

# 付 録

## 技 術 資 料

資料 1	ライフライン事業者における耐震設計の現状	(1)
資料 2	費用便益法による分析の基本的な考え方と算出方法の例	(3)
資料 3	シールドトンネルの用途別の要求性能と照査	(5)
資料 4	入力地震動の算定に用いる係数 $C_N$ について	(14)
資料 5	地盤固有周期の近似式	(17)
資料 6	シールドトンネルの免震効果とすべり挙動について	(21)
資料 7	セグメントリングが降伏した後のリング断面の応力分布と釣り合い式	(26)
資料 8	立坑・トンネル接合部の耐震計算法	(28)
資料 9	基盤の設定法および等価設計法の適用性に対する検討 基盤の設定法および等価設計法の適用性に対する検討	(50)
資料 10	表面波分散曲線計算プログラム	(73)
資料 11	深層地盤による地震動増幅特性についての解析例	(101)

S I 単位系への換算率表

量	SI 単位以外 (A)	SI 単位 (B = $\alpha$ A)	SI 単位への 換算率( $\alpha$ )
	記号	記号	
力	kgf	N	9.81
	tf	kN	9.81
モーメント	tf·m	kN·m	9.81
応力・弾性係数	kgf/cm <sup>2</sup>	N/m <sup>2</sup> (Pa)	9.81 × 10 <sup>4</sup>
	tf/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup> (kPa)	9.81
重量密度	tf/m <sup>3</sup> (= gf/cm <sup>3</sup> )	kN/m <sup>3</sup>	9.81
加速度	gal	m/s <sup>2</sup>	0.01
角度	°	rad	$\pi/180$

## 資料1 ライフライン事業者における耐震設計の現状

シールドトンネルの地震時および地震後の要求性能に関するアンケートを、鉄道、道路、上下水道、電力、通信等のライフライン事業者を対象に1998年4月に行った。アンケートの質問項目は以下のとおりである。

- ・シールドトンネルおよび立坑の事例とその用途および構造形式
- ・耐震設計を実施しているかどうか
- ・基準指針および照査レベル
- ・レベル1地震動に対する許容損傷度
- ・レベル2地震動に対する許容損傷度
- ・許容損傷度に関する将来的な展望
- ・意見・要望

さらに、同年7月、アンケート調査結果に基づき、各ライフライン事業者の代表者を対象として要求性能の考え方に関してヒアリング会を開催した。ヒアリング会における議事項目は以下のとおりである。

- ・アンケートに対する回答内容に関する質疑応答
- ・アンケート回答以外のシールドトンネルの設計例について
- ・具体的な応答計算方法および耐震性照査方法
- ・今後の指針改訂等に伴う対応
- ・意見・要望

付表1-1および付表1-2は上述のアンケートおよびヒアリング調査結果に基づき、用途別のシールドトンネルおよび立坑の要求性能についてまとめて整理したものである。

付表 1-1 ライフライン事業者におけるシールドトンネルの耐震設計の現状

事業者名	用途・直径・シールド	二次工	耐震設計	基礎設計	設計方向	指針レベル以上	現行許容損傷度 (レベル1)	現行許容損傷度 (レベル2)	将来的許容損傷度 (レベル1)	将来的許容損傷度 (レベル2)	意見・要望
神戸市水道局	水道送水管 3.35m 外径 鋼 or コクリート	鋼管+コクリート	実施	水道施設耐震工法 対策指針と解説	縦断および横断	動脈(P1波形)+応答変位法 屈曲点への応力集中(動脈)	健全維持 一次および二次工の発生応力が許容応力内	少なくとも送水・貯留機能を保持する。相対変位 10mm 以下 後に補修できる程度の亀裂(ランク B)			
神戸市建設局	公共下水道 2.8m	なし(汚水処理管+コクリート)	実施	下水道施設の耐震対策指針と解説		兵庫県南部地域	流下機能を確保 自閉き量が補修可能な範囲内(漏水は許容)	流下機能を確保 自閉き量が補修可能な範囲内(漏水は許容)			構造の評価値を明確に 地震変化点での対策 可とうシールドの効果範囲(評価) レベル2での地震動の波長、地盤・シールド 相互作用について知りたい
中部電力 土木建築 東邦ガス	放水路 6.7m 内径 ガス管 2.4m	無筋コクリート	実施	石油パイプライン技術 基準		実施せず	健全維持	継手部の降伏 復旧工事が実施できる			安全係数、鋼製部材や地盤反力の定数等を適切に評価する手法、安全性調査方法について終局耐力、耐久性など多面的に確立していく必要あり
大阪ガス	ガス導管	中詰砂+導管	実施	共同耐震設計指針 (ガス導管耐震設計指針)		実施せず	健全維持 (基本的にガス管自体が耐えうるかどうか問題→ガス導管耐震設計にて検討)	震度以上の損傷 ・接合部で縁が切れるもの、トンネルの抜き出しはさける ・リブが継手部分には許容を越えるが、自閉き量を 2mm 未満に抑える			ガス導管耐震設計に基づき、 ガス導管許容土被り以浅→一次工：仮設、以深→一次工：本設
東京ガス	1.ガス導管 2.65m 2.ガス導管+NTTケーブル	1.中詰め ITケーブル 2.コクリート	なし	共同耐震設計指針		実施せず	健全維持 補修が必要ない程度	損傷するが補修を行い再利用可能な程度			
中部電力 送変電 地中線	1.ケーブル敷設 5.6m 内径 2.ケーブル敷設 4.2m 内径	1.コクリート 2.無筋コクリート	実施	1.共同耐震設計指針 2.水道施設耐震工法指針		実施せず	過度な漏水はさける	崩壊しない程度 変形しても補修できる程度 点検時に避難できる程度			シールドの部分安全係数・使用限界値・耐久性・止水性の評価法を知りたい
関西電力 送変電 地中送電	電力ケーブル 5.6m 内径	なし (ケーブルバッド)	実施	水道施設耐震工法指針	縦断および横断 (一次元)	土木構造物の耐震性向上の指針(大阪土木建築構造物震害対策検討会)に基づき上町断層を想定断層とした西大阪地域工学基礎面構成(665gal)		崩壊しない程度 変形しても補修できる程度 点検時に避難できる程度			耐震性能(対L2)に対する評価に多様化が予想される 共同耐震、重要度、耐震性能が異なる複数のシールドが同一トンネル内に設置される場合の性能評価が今後の課題 立坑との取り付け部に漏水のない構造の技術開発を進めたい
NTT 関西	1.通信ケーブル 3.7m 外径 2.通信ケーブル 3.15m 外径	1.コクリート 2.コクリート	実施	独自のマニュアル	軸方向	実施せず					
東京電力 送電線 管線	ケーブル 3.2m 内径	なし	実施	独自マニュアル(共同耐震設計指針に準拠)	軸方向および断面方向	実施せず					検討中
神戸市交通局	地下鉄 単円:5.3x5.4m DOT:5.3x9.8m RC&G/ケーブル	なし (事業費削減、工期短縮)	DOT:実施 単円:代表	新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料(鉄道総研)	縦断および横断	G0 波形を入力地震動とした動的解析 (SuperFLUSH, 7 S2)	損傷しない (発生応力が割り増し許容応力度以内に収まるように設計)	損傷・破壊しない (発生断面積が破壊耐力以内に収まるように設計)			入力地震動・基礎面・解析手法の統一 種々の継手に対応した耐震性能評価法の整理
東京都交通局	地下鉄 5.3x8.9m	なし	なし					トンネルが大きな損傷を受けない 地下水の噴出がない			形状を保持することで安定性を保っている。 新形式シールド(例:ほぞ付き)も取り扱ってほしい
帝都 高速度 交通団	地下鉄 9.5m 複線 6.6m 単線		なし					無補修で列車の走行が可能			ある程度の損傷を受けても人命、避難路確保等に支障をきたさない 短時間で機能を回復することが可能
熊谷組 土木技術	道路(湾曲) 13.9m 外径	鉄筋コクリート (浮き上がり防止)	実施	東京湾横断道路シールド耐震設計・シールド耐震設計基準 (日本道路公団)		L1:関北橋記録より作成した疑似加速度波形 L2:八戸港記録より作成した疑似加速度波形	道路交通機能を損なわないような損傷(中程度の損傷) 二次工の剥離・落下が生じない程度 漏水を補修可能な程度 可とう性継手の止水性が確保される程度	崩壊しない程度の損傷(かなりの損傷)			地震条件と入力波が決まれば、地震時変形量はシールド剛性によらずほぼ一定値になる。発生断面積ではなく変形量に基づき耐震設計が必要
熊池組 土木設計			実施 なし	水道施設耐震工法指針	軸方向	実施せず		漏水しないなど 施設によって異なる			軸方向のみの耐震検討が一般的だが、設計として一貫していないのでは?

付表 1-2 ライフライン事業者における立坑の耐震設計の現状

事業者名	シールドトンネルの用途・直径	工法・直径	取合部	耐震設計	基準指針類	設計方向	指針レベル以上	現行許容損傷度 (レベル1)	現行許容損傷度 (レベル2)	将来的許容損傷度 (レベル1)	将来的許容損傷度 (レベル2)	意見・要望
神戸市水道局	水道送水管 3.35m 外径	1. オープンケーシング 10.5m, 本設 2. 鋼矢板逆巻工鋼管を貫通させている 3. 鋼矢板土留 5.9x7.2m, 仮設	立坑内にトンネル二次覆工鋼管を貫通させている (剛結)	実施	水道施設耐震工法指針		動解 (PI 液形)+応答変位法 (水平および縦方向)	立坑内の発電設備としての機能保有 地下水流入を妨ぐことができる 電線の損傷を許容 (応力で照査)	立坑内の発電設備, 応急給水設備等の緊急設備が稼働可能な範囲の損傷 地下水の流入を防ぐ (応力で照査)			可とう切替の活用について, 各条件項目別 (土質・施設重要度・施設管理・補修の可否・可とう切替機機能など) による採用の可否が行えるフロー
神戸市建設局 下水道河川	公共下水道 2.8m	オープンケーシング 13.2m 外径 本設	可とう切替 M/T	実施	下水道施設の耐震対策指針と解析		実施せず	軽微な損傷程度 機能上問題ない状態				仮設土留の耐震設計について知りたい
中部電力 土木建築 水力土建	放水路 6.7m 内径	連壁逆巻 17~18m 本設	コンクリート +弾性ワザ ー	実施	石油パイプライン技術基準		実施せず					トンネル補修用の通路として使用可能な状態
東邦ガス	ガス管 2.4m	圧入オープンケーシング 11m 逆巻 6.6m 到達 仮設	特別な措置なし (リフト継手ボルトを大きくした)	実施	水道施設耐震工法指針		実施せず					シールドトンネル側での耐震設計と立坑側の耐震設計の整合性を規定する必要がある。
大阪ガス	ガス導管	本設 砂詰め+導管	可とう切替 M/T	実施	水道施設耐震設計指針+独自のマニュアル 道路指示方書 共同補修設計指針	軸方向 断面方向	実施せず	健全維持 (許容応力度法)	震災以前の飛注のため考慮せず			接合部の耐震検討法の規定を望む
東京ガス	1. ガス導管 2.65m 2. ガス導管 + NTPケーブル	1. オープンケーシング 12.4m 外径 本設 (逆巻) 2. 切替機付+CJG工法 5.4m 外径 仮設 (到達)	地盤が軟弱な場合 可とう切替 M/T	実施	水道施設耐震工法指針		実施せず	健全な状態で補修なし	損傷するが補修を行い再利用可能な程度			
中部電力 送変電 地中線	1. ガス導管・ケーブル敷設 5.6m 内径 2. ケーブル敷設 4.2m 内径	1. 連壁, 14m 本設 2. ニューチャックケーシング 20m 本設	可とう切替 M/T	実施	1. 水道施設耐震工法指針 2. LNG 地下式貯槽指針		実施せず					耐震設計を実施していないケースが多い 立坑・地盤相互作用を考慮した3次元解析が必要では? アンケート集計結果を知りたい
関西電力 送変電 地中送電	電力ケーブル 5.6m 内径	11.5m 内径 本設	可とう切替 M/T	実施	水道施設耐震工法指針		実施せず					公衆に危害が及ばないこと 長期間・広範囲の機能障害を生じないこと
NTT 関西	1. 通信ケーブル 3.7m 外径 2. 通信ケーブル 3.15m 外径	1. ニューチャックケーシング 11.0m, 本設 2. 円形連壁 11.0m, 本設	剛結 鉄筋補強	実施	独自のマニュアル	断面方向	実施せず					シールドトンネルへの通路として安全に使用可能な程度 (崩壊しない, 地下水の流入がない, 電気・排水設備に損傷を受けない)
東京電力 送電線 管路	ケーブル 3.2m 内径	8x6m 内側 本設	剛結合を さける	実施	独自のマニュアル	軸方向	実施せず			検計中		大深度立坑の場合の免震設計・施工法
神戸市 交通局	地下鉄 5.3-5.4m	開削工法 18x10m (13x10m) 本設	取り付け 部に弱点 を作る	実施	新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料 (鉄道総研)		実施せず	損傷しない (発生応力が割り出し許容応力度以内に収まるように設計) 漏水に対し目詰り量でチェック	損傷しない (発生断面積が耐力以内に収まるように設計) 残留変形に制限			トンネルとの合理的接合方法について整理してほしい
東京都 交通局	地下鉄 5.3-8.9m	開削工法 駅部を利用 本設	特別な措置なし	なし			実施せず					接合部の評価方法の確立を要望する
帝都 高速 交通営団	地下鉄 9.5m 複線 6.6m 単線	開削工法 駅部 本設	剛結	実施	独自のマニュアル	断面方向	実施せず					ある程度の損傷を受けても人命, 避難路確保等に支障をきたさない 短時間で機能を回復することが可能
熊谷組 土木技術	道路 (湾曲) 13.9m 外径	設置ケーシング 18x38m	可とう切替 M/T	実施	東京湾横断道路シールドトンネル構造設計・トンネル耐震設計基準 (日本道路公団)		L1: 開北橋記録より作成した疑似加速度波形 L2: 八戸港記録より作成した疑似加速度波形	L1: 地震時変形量 ≤ 設計許容変位量 L2: 地震時変形量 ≤ 限界変位量 (道路交通機能を損わない程度) (可とう切替機) を通過する床版は, 一定レベルの走行性を確保しつつ変形量を吸収させる)	L2: 地震時変形量 ≤ 限界変位量 (道路交通機能を損わない程度) (可とう切替機) を通過する床版は, 一定レベルの走行性を確保しつつ変形量を吸収させる)			以下の案も考えられる。 1. いくつかのリングの継手部に弾性ワザを設置する 2. トンネルと立坑壁の間に弾性材を設置し, 取り付け部をピン構造とする
鴻池組 土木設計			可とう切替 M/T	実施 or なし	水道施設耐震工法指針	軸方向および断面方向	実施せず					1. 立坑内に管やケーブルが通る場所, シールドトンネルと同様に安全に通過できる程度 (点検のみ使用) 2. 人が安全に通過できる (軸方向は考慮する必要なしか?)

## 資料2 費用便益法による分析の基本的な考え方と算出方法の例

### 1. はじめに

阪神淡路大震災を契機に耐震設計指針類や耐震対策のためのガイドライン等が改訂され、既設構造物についても、所要の耐震性能を満足するために強度補強等の耐震対策が行われている。構造物の耐震対策を実施する場合には、施設の重要性和耐震対策のレベルを適切に組み合わせるとともに耐震対策の適切な優先順位の決定など、効率的な対策の実施が求められる。そこで、対象構造物の耐震対策に要する費用と、耐震対策によってもたらされる便益の関係を明確にし、耐震対策のレベルの設定、耐震対策事業の優先度等を検討する必要がある。ここでは検討方法として費用便益法を取り上げ、その考え方の例を紹介するとともに、トータルコストを考慮した評価方法についても示す。

### 2. 費用便益法の考え方

#### (1) 費用と便益の基本的な考え方

費用便益法においては評価しようとする事業が実行された場合と実行されなかった場合とを比較して費用と便益を分析する。ここで言う費用とは一般的に事業の実施に要する費用であり、便益とは事業の実施により発生する便益である。これを耐震対策に当てはめると、それぞれ、耐震対策の実施に要する費用の増分と、耐震対策の実施により発生する便益に相当することになる。

#### (2) 耐震対策の費用と便益

よって、耐震対策において費用便益法を適用する場合、耐震対策によってもたらされる便益の定量的な評価が課題となり、それには市民生活や社会活動に与える影響なども鑑みて評価する必要がある。便益の算定方法には一般的に機会費用法、代替費用法、仮想評価法などが用いられている。以下にそれらの一般的な定義を述べる。

##### a. 機会費用法（OC法）

サービスや機能の価値を、それらが提供することができなくなったことによって失われた利益（逸失利益）で評価する方法である。

##### b. 代替費用法

対象者が自己生産しているサービスの価値を、類似のサービスを市場で生産している者の賃金で評価する方法である。

##### c. 仮想評価法（CVM法）

アンケートを用いて便益の値段を評価する手法である。

これらの手法を耐震対策に適用する場合、耐震対策によって地震後に失わずにすんだ利益を評価することになる。しかし、その対象が構造物による便益であり、構造物が被災した場合には必ず復旧することを鑑みると、「耐震対策によって、耐震対策しなかった場合と比べて少なくすんだ復旧費」として評価することも可能である。

#### (3) 耐震対策による便益の期待値

一方、耐震対策による便益は、地震生起確率によって直接影響を受けると考えられる。例えば、耐震対策の費用と比較する際に用いる便益には便益の期待値（耐震対策の実施に

よって発生する便益に地震生起確率を乗じたもの)を用いることが適当と考えられる。

ここで、地震生起確率は構造物の今後の供用年数をその対象期間とするため、耐震対策の便益の評価はその建設、耐震対策や復旧費用等を含めた供用期間全体のトータルコストで評価することが望ましいと考えられる。そこで、以下にトータルコストを考慮した耐震対策の評価方法の一例を示す。

### 3. トータルコストを考慮した耐震対策の評価

ここでは、構造物のトータルコストを考慮した評価方法の一例を示す。これは、耐震対策の便益の評価方法として、費用としての計上が比較的容易な「耐震対策によって、耐震対策しなかった場合と比べて少なくすんだ復旧費」として評価する方法である。

これは、現状のトータルコスト  $TC_0$  と耐震設計による対策後のトータルコスト  $TC_m$  とを比較する方法であり、それらの差  $\Delta C_e$  や対策に関わる費用  $CC_m$  で除した対策効率  $\alpha_e$  を用いて耐震対策の効果を評価するものである。

$$\Delta C_e = TC_0 - TC_m \quad (1)$$

$$\alpha_e = (TC_0 - TC_m) / CC_m \quad (2)$$

現状のトータルコスト  $TC_0$  の算出方法の一例として、初期建設費  $CC_0$  と地震による被害額の期待値  $EC_0$  の和として算出する方法を挙げる。

$$TC_0 = CC_0 + EC_0 \quad (3)$$

ここで、地震による被害額の期待値  $EC_0$  とは、個々の地震による被害額の期待値の累計であり、個々の地震による被害額の期待値  $EC_{0i}$  は地震が発生する確率  $P_i$  と地震による被害額  $C_{0i}$  の積として表現することができる。

$$EC_0 = \sum EC_{0i} = \sum (P_i \times C_{0i}) \quad (4)$$

地震による被害額  $C_{0i}$  には、その地震による構造物の復旧費用（構造被害額  $Rs_{0i}$ ）、構造物の損傷に伴う人的および物的被害額（ $Rc_{0i}$ ）および構造被害により生じる営業機会損失額（機能被害額  $Rf_{0i}$ ）に分類され、それらの和として、 $C_{0i} = Rs_{0i} + Rc_{0i} + Rf_{0i}$  と表現することができる。従って、現状のトータルコスト  $TC_0$  は、

$$TC_0 = CC_0 + \sum (P_i \times (Rs_{0i} + Rc_{0i} + Rf_{0i})) \quad (5)$$

一方、対策後のトータルコスト  $TC_m$  の一例として、初期建設費  $CC_0$ 、対策費  $CC_m$ 、地震による被害額の期待値  $EC_m$  の和として算出する方法を挙げる。地震による被害額の期待値  $EC_m$  は、現状の被害額の期待値と同様の考え方で算出する。

$$TC_m = CC_0 + CC_m + \sum (P_i \times (Rs_{mi} + Rc_{mi} + Rf_{mi})) \quad (6)$$

### 資料3 シールドトンネルの用途別の要求性能と照査

#### 1. はじめに

シールドトンネルの要求性能の設定は、シールドトンネルを保有する事業者が想定地震動に応じてその用途別に要求性能を定めることによって行うものとする。また、シールドトンネルの耐震性能の照査は、設定した要求性能に見合った部材の損傷およびトンネル変形の許容値を指標に照査するものとする。

#### 2. シールドトンネルの用途別の要求性能と照査

シールドトンネルの要求性能は、本ガイドライン（案）2章2.3節で述べたように、シールドトンネルを保有する事業者ごとに想定地震動に応じた要求性能を定めることによって表現することとした。シールドトンネルの用途別にその要求性能を設定する場合の基本的な考え方を以下に示す。

##### （a）下水道の場合

下水道の管路施設の耐震設計は、平成9年8月に日本下水道協会より発刊された「下水道施設の耐震対策指針と解説」<sup>1)</sup>（以下「下水道指針」）に基づいて実施することとされている。「下水道指針」に定められている耐震設計の方針は以下のとおりである。

- ①個々の施設の構造面での耐震化を図ることを基本とする。
- ②さらに、構造物が万が一被害を受けた場合にも機能を確保できるよう、システム的な対応により耐震性の向上を図る。
- ③施設の耐震設計に当たっては、「下水道指針」に示す耐震計算法を用いて安全性を確保する。
- ④設計対象地震動として、レベル1およびレベル2の2段階の地震動を考慮し、各段階に応じた耐震性能を確保する。

また、「下水道指針」で定める耐震設計の基本的な考え方は以下のとおりである。

- ①「重要な幹線等」と「その他の管路」に区分し耐震設計を行う。
- ②「重要な幹線等」は、新設、既設ともにレベル1地震動に対して設計流下能力を確保し、レベル2地震動に対して流下機能を確保する。
- ③「その他の管路」は、新設を対象にレベル1地震動に対して、設計流下能力を確保する。
- ④「重要な幹線等」の耐震化が難しい場合には、システムとして機能が確保できるようネットワーク化等の方策を検討する。

なお「下水道指針」では、以下の幹線管路を「重要な幹線等」と定義している。

- ①ポンプ場および処理場に直結する幹線管路
- ②河川・軌道等を横断する管路で地震被害によって二次災害を誘発するおそれのあるもの、および復旧が極めて困難と予想される幹線管路等
- ③相当広範囲の排水区を受け持つ吐き口に直結する幹線管路
- ④防災拠点や避難所等からの排水をうける管路



⑤その他、下水を流下収集させる機能面からみて、システムとして重要な管路

下水道管渠として利用されるシールドトンネルは、主に処理場に直結する場合や、他の工法では施工が困難な条件において適用されることが多いため、ネットワークにおける重要度や復旧の困難さを鑑みると、「重要な幹線等」と位置づけられる場合が多いと考えられる。

下水道管路施設の耐震上の要求性能は、管路の位置づけ、分合流の別、地域特性、社会条件等によっても異なるものと考えられる。諸条件の影響の具体例を以下に示す。

#### ①分流式と合流式

下水道のシールドトンネルでは、トンネル内に直接下水が流下している場合が一般的である。このため、幹線管渠の維持管理性は、流下下水量の多少によって異なるため、耐震上の要求性能もそれによって異なるものと考えられる。

たとえば、分流式の雨水幹線や合流式の合流幹線は、雨天時には管内の流下下水量が增大するが、晴天時には流量が極めて少なく、維持管理が容易である。このため、レベル2地震動に対しても、ある程度のひび割れや漏水は許容し、修復するという考え方がなじむ。一方、分流式の汚水幹線では、常時流量が多いため、維持管理が極めて困難であり、設計施工段階で極力メンテナンスフリーとなるような配慮がなされているのが現状である。よって、レベル2地震動に対して、合流幹線と雨水幹線とで要求性能を区別する配慮も必要になってくることが考えられる。

#### ②汚水漏水時の損失

一般にシールド管渠は地下水位以下に建設されるケースが多いと考えられるが、地下水位が深い地盤で建設され、汚水幹線から汚水が漏水した場合には、地下水汚染などの二次的な被害を生じさせる可能性がある。このため、地下水が飲料水用に利用されている場合には、それなりの要求性能を確保する必要がある。

しかしながら、「下水道指針」での規定においては、抽象的な表現や不明確な事項も含まれている。このため、例えば神戸市では、「下水道指針」の考え方を基本として、「神戸市下水道耐震設計指針（シールド管路編）」<sup>2)</sup>を策定し、「下水道指針」で定められていない事項をより明確に定めている。「神戸市下水道耐震設計指針」においてシールドトンネルに対する要求性能は以下のように表現されている。

①レベル1地震動に対しては、機能に支障を与えない程度の部分的なクラック等の被害は許容するが、設計流下能力は確保する。具体的には許容応力度法による応力照査で、発生応力度を許容応力度の1.5倍以内にする。

②レベル2地震動に対しては管渠の縦断勾配が変化したり、ひび割れ等が生じて元横断形状を保つことによって、補修や布設替等の対策を講じるまでの間は流下機能を確保する。具体的には限界状態設計法による応力照査で発生応力が終局耐力以内とする。

下水道用シールドトンネルの要求性能は、以上の事項を総合的に鑑み、適切に設定するものとする。要求性能の設定例を付録表3-1に示す。

付録表 3-1 下水道用シールドトンネルの要求性能の設定例

		重要な幹線等			その他の管路
		分流式の汚水幹線	合流式	分流式の雨水幹線	
レベル1地震動		要求性能Ⅰ	要求性能Ⅰ	要求性能Ⅰ	要求性能Ⅰ
レベル2 地震動	南海沖地震	要求性能Ⅰ	要求性能Ⅱ	要求性能Ⅱ	要求性能Ⅱ
	内陸断層地震	要求性能Ⅱ	要求性能Ⅱ	要求性能Ⅱ	要求性能Ⅲ

(b) 上水道の場合

上水道の管路施設の耐震設計は、1997年に社団法人水道協会より発刊された「水道施設耐震工法指針・解説」<sup>3)</sup>（以下「水道指針」）に基づいて実施することとされている。「水道指針」に定められている耐震設計の方針は以下のとおりである。

- ①地震によって施設が被害を受けても、水道システム全体として給水機能ができるだけ保持しうよう配慮する。
- ②水道施設は、耐震設計に用いる地震動のレベル及び施設の重要度の組み合わせに対して、地震時にそれぞれの施設が保持すべき性能を確保できるように設計する。
- ③耐震設計に当たっては、施設の構造特性、周辺の地盤特性等を考慮し、それらに適合した耐震設計法を用いる。

また「水道指針」で定める耐震設計の基本的な考え方は以下のとおりである。

- ①水道施設の耐震化を計画するに当たって、重要度の高い施設（ランクA）及びその他の施設（ランクB）の2つに区分し耐震設計を行う。
- ②「ランクA」の幹線は、レベル1地震動に対して無被害であること、レベル2地震動に対して人命に重要な影響を与えず、機能保持が可能であることとする。
- ③「ランクB」は、レベル1地震動に対して機能保持が可能であること、レベル2地震動に対して水道システム全体として機能を保てることとする。

「水道指針」では、ランクAの施設は、水道事業体の供給システムの実態を踏まえ、次の事項を総合的に判断し、それぞれの事業体が責任をもって決定する。

- ①重大な二次災害を起こす可能性のある施設
- ②水道システムの中でも上流に位置する施設
- ③基幹施設であって代替施設のないもの
- ④重要施設等への供給管路
- ⑤復旧困難な基幹施設
- ⑥被災時の情報収集の中心となる施設

被害を受けた場合に復旧活動が困難な例として、河川、鉄道を横断する管路、埋設深度の大きな管路、活断層近傍の基幹施設等が挙げられる。

上水道管渠に用いられるシールドトンネルは上流に位置する施設や、他工法で施工が困難である条件に適用されることが多いため、「ランクA」の施設と位置づけられると考えられる。

上水道用のシールドトンネルでは、セグメント内面をコンクリートで二次覆工したもの

をそのまま水路として用いる場合もあるが、送・配水トンネルの大部分が圧力管路であり内圧を考慮してその性能照査を行う必要がある。断面形状は一般に、ダクトイル鉄管または鋼管等をトンネル内に挿入して配管する方式が多く、その方式は①中詰（充填）方式、②点検通路方式が代表的なものである。また、内管については、次の2つに大別される。

- ・継手構造管路：管路として変形能力の大部分を継手にもたせる。（ダクトイル鉄管等）
- ・一体構造管路：管路として変形能力の大部分を管体材料にもたせる。（鋼管等）

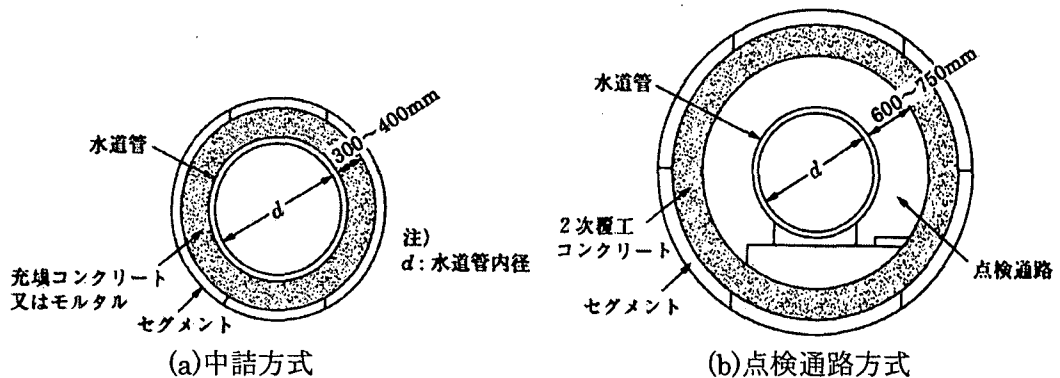
①中詰方式（充填方式）

ダクトイル鉄管にあっては、常時の内圧、外圧、温度変化、不同沈下および地震時の地盤歪みにより生じる継手伸縮量、継手屈曲角、管体応力が許容値を超過しないこと。鋼管にあっては、常時の内圧、外圧、温度変化、不同沈下および地震時の地盤歪みにより生じる軸方向歪みと曲げ歪みを合成した応力又は歪みが許容値を超過しないこと。

②点検通路方式

点検通路方式では、セグメント単独またはセグメントと二次覆工からなる合成断面について、軸方向応力及び歪みが合成断面の許容値を超過しないこと。内管は直接地震力の影響を受けず、常時の状態での発生応力に対処する設計のみでよい。この方式では、ボルトの交換、止水等の復旧作業がある程度可能である。

上水道用シールドトンネルの要求性能は、以上の事項を総合的に鑑み、適切に設定するものとする。要求性能の設定例を付録表 3-2 に示す。ここでは、シールドトンネルを重要な施設（ランク A）と位置づけた設定例を示している



付録図 3-1 シールドトンネルの断面形状例

付録表 3-2 上水道用シールドトンネルの要求性能の設定例

		ランク A	
		中詰方式	点検通路方式
レベル1 地震動		要求性能Ⅰ	要求性能Ⅰ
レベル2 地震動	南海沖地震	要求性能Ⅰ	要求性能Ⅱ
	内陸断層地震	要求性能Ⅱ	要求性能Ⅱ

(c) 鉄道の場合

鉄道用のシールドトンネルの設計は、1997年7月に財団法人鉄道総合技術研究所より発行された「鉄道構造物等設計標準・同解説 シールドトンネル」<sup>4)</sup>に基づいて実施すること

とされている。ここでは、覆工設計の基本として、

- ・覆工は、鉄道トンネルとして機能を満足し、安全かつ経済的であること。
- ・覆工の安全性は、計算上の発生応力度が定められた許容応力度以下であること。

の2点が挙げられている。ただし、耐震設計については、1999年10月に財団法人鉄道総合技術研究所より発刊された「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」<sup>5)</sup>（以下「鉄道指針」）に基づいて実施することとされている。「鉄道指針」では耐震設計の方針として、「想定する地震動および構造物の重要度に応じて耐震性能を定め、それを確保すること」を基本としている。

「鉄道指針」で定める耐震設計の基本的な考え方は以下のとおりである。

①構造物の耐震性能を以下の三つに区分し、レベル1地震動に対しては耐震性能Ⅰを、レベル2地震動に対しては重要度の高い構造物は耐震性能Ⅱをその他の構造物は耐震性能Ⅲを満足するものとする。

耐震性能Ⅰ：地震後に補修せずに機能を保持でき、かつ過大な変位を生じない。

耐震性能Ⅱ：地震後に補修を必要とするが、早期に機能を回復できる。

耐震性能Ⅲ：地震によって構造物全体系が崩壊しない。

②原則として、次の構造物を重要度の高い構造物とする。

1)新幹線鉄道および大都市旅客鉄道の構造物

（大都市旅客鉄道とはピーク1時間当たり片道の計画平均断面輸送量が概ね1万人を越える線区等、計画輸送量の多い線区から設定）

2)開削トンネル等被害が生じた場合の復旧が困難な構造物

「鉄道指針」では、部材の損傷度のほかに、列車の走行性より変位に関して以下のような制限を設けている。

構造物の変位は、次について照査するものとする。

- ・レベル1地震動：変位が構造物の機能を維持等から定まる許容値を越えないこと。
- ・レベル2地震動：変位が落橋防止等構造物の安全性から定まる許容値を越えないこと。

レベル1地震動に対して列車走行性が損うような過大な変位を生じないように検討することを原則としている。検討は、レベル1地震動によって生じる構造物の変位が列車走行シミュレーションにより算出した変位の許容値を越えないことにより照査する。ただし、地震動に対して構造体の増幅が大きくない開削トンネルに対して、照査を行わないでよいとされている。

変位の検討は、折れ角・目違いおよび横方向への振動変位について行われる。付録表3-3に折れ角・目違いの許容値を示す。なお、常時の軌道の整備基準としては、軌道整備の4原則（軌間・水準・高低・通り）により規定される。

鉄道用シールドトンネルの要求性能は、以上の事項を総合的に鑑み、適切に設定するものとする。要求性能の設定例を付録表3-4に示す。

付録表 3-3 軌道面の折れ角・目違いの許容値（地震時）

変位方向	目違い $\delta$ (mm)	折れ角 $\theta$ (1/1000)		適用範囲
		平行移動	折れ込み	
鉛直	35 (300/V)	10 (300/V) <sup>1,3</sup>	9 (300/V)	$V \leq 300$ km/h
水平	9 (300/V) <sup>2,4</sup>	5.5 (300/V)	3 (300/V) <sup>1,3</sup>	

注1) V: 列車走行速度 (km/h).  
 注2) 静的不同変位量も考慮すること.  
 注3) 用語の意味は、下図のとおりである.



付録表 3-4 鉄道用シールドトンネルの要求性能の設定例

		重要度の高い施設	その他の施設
レベル1地震動		要求性能Ⅰ	要求性能Ⅰ
レベル2地震動	南海沖地震	要求性能Ⅰ	要求性能Ⅱ
	内陸断層地震	要求性能Ⅱ	要求性能Ⅱ

(d) ガス幹線の場合

ガス幹線用のシールドトンネルの耐震設計は、2000年3月に社団法人日本ガス協会より発刊された「高圧ガス導管耐震設計指針」<sup>6)</sup>（以下「ガス導管指針」）を参考に実施することが適当と考えられる。また、導管以外のガス施設の耐震設計については1997年に高圧ガス保安協会より発刊された「高圧ガス設備等耐震設計指針」<sup>7)</sup>（以下「ガス設備指針」）を参考に実施することが適当と考えられる。

「ガス導管指針」では耐震設計の方針として、「2段階のレベルの地震動を想定し、地震動毎に定めた耐震性能を確保すること」を基本としている。

「ガス導管指針」で定める耐震設計の基本的な考え方は以下のとおりである。

- ①レベル1地震動に対しては「被害がなく、修理することなく運転に支障がない」という耐震性能を確保すること
- ②レベル2地震動に対しては「導管に変形は生じるが、漏洩は生じない」という耐震性能を確保すること

一方、「ガス設備指針」では耐震設計の方針として、

- ①設備の規模、設置する地域の想定地震動の強さとその可能性を考慮する、
  - ②設備が地震によって方が一破損した場合の第三者への災害の波及の程度に応じて合理的な耐震性能を保有させる、
- を基本としている

「ガス設備指針」で定める耐震設計の考え方は、「レベル1地震動に際してはその機能に重大な支障が生じず、かつ、レベル2地震動に際しては、人命に重大な影響を与えてはならない」ということを基本とし、施設の重要度別に、以下の耐震性能を満足することを原則としている。

- ①レベル1地震動に対して、有害な変形等が残留せず、かつ、構造物内の高圧ガスの気密

性が保持されていること

②レベル2地震動及び地盤の液状化に伴う地盤変状に対して重要度 Ia および I にかかわる構造物内の高圧ガスの気密性が保持されること

なお、施設の重要度は以下のように分類されている。

重要度 Ia：設備の損傷もしくは機能喪失が、事業所外の広範囲の公衆、公共財産、環境に壊滅的損害を与えるおそれのあるもの

重要度 I：設備の損傷もしくは機能損失が、事業所外の公衆、公共財産、環境に多少の損害を与えるおそれのあるもの

重要度 II：設備の損傷もしくは機能喪失が、事業所外の人命を損なう恐れのないもの

重要度 III：通常の耐震性を要するもの

さらに、「ガス導管指針」では、導管の耐震性評価として、「地震動は導管に対して繰り返し強制変位を与えるものとし、それにより導管に生じる地震時ひずみが極低サイクルの疲労損傷度評価に基づき定めた許容ひずみを越えないことを照査する」としている。

ガス幹線用シールドトンネルの要求性能は、以上の事項を総合的に鑑み、適切に設定するものとする。要求性能の設定例を付録表 3-5 に示す。なお、重要度の高い幹線であっても、構造形式が中詰方式の場合で、内管が独自に外力に抵抗するように設計されており、外殻となるシールドトンネルが仮設構造物と位置づけられている場合などは例外とする。

付録表 3-5 ガス幹線用シールドトンネルの要求性能の設定例

		重要度の高い施設（重要度 Ia, I）		その他の施設（重要度 II, III）	
		点検通路方式	中詰方式	点検通路方式	中詰方式
レベル1地震動		要求性能 I	要求性能 I	要求性能 I	要求性能 I
レベル2 地震動	南海沖地震	要求性能 I	要求性能 I	要求性能 II	要求性能 I
	内陸断層地震	要求性能 II	要求性能 III	要求性能 III	要求性能 III

(e) 電力施設の場合

シールドトンネルが採用される電力施設としては、発電所における放水路や、電力ケーブルなどが挙げられるが、これらの電力用シールドトンネルの耐震設計の際には、「水道指針」や 1986 年に社団法人日本道路協会より発刊された「共同溝設計指針」<sup>8)</sup>、1998 年 3 月に社団法人土木学会より発刊された「トンネル耐震設計の方向と基本課題」<sup>9)</sup>などが参考になる。「水道指針」については本節 (b) に示したとおりである。

「共同溝設計指針」において、耐震設計は「軟弱地盤部、地盤条件変化部または特殊な構造となる箇所について行い、耐震計算は応答変位法によるものとし、特に重要度の高い箇所では動的解析により安全性を確認するのが良い」としている。「トンネル耐震設計の方向と基本課題」では、レベル1地震動に対して地震後に補修する必要がないこと、レベル2地震動に対し、重要な構造物に対しては短期間の補修を要するが補強は必要としないこと（機能水準 A）、それ以外の構造物に対しては補強を必要とするが崩壊しないこと（機能

水準B)を耐震設計の基本方針としている。また、電力ケーブルは都市部における基盤設備であるため、電力の供給支障が都市機能の回復に与える影響は大きいと、電力用洞道の地震時における機能水準は機能水準Aであることが望ましいとしている。

また、電気設備の耐震性能について「電気設備防災対策検討会方向(耐震性関係)」<sup>10)</sup>(電気設備防災対策検討会耐震性小委員会)には「一般的な地震動に対し、個々の設備ごとに機能に重大な支障が生じないこと。高いレベルの地震動に対しても、著しい(長期的かつ広範囲)供給支障が生じないよう、代替性の確保、多重化などにより総合的にシステムの機能が確保されること」と記されている。さらに、電気事業法においても、「地震時に損傷した施設に対しては早期に復旧する必要がある」と記載されている。

放水路用シールドトンネルでは、セグメント内面をコンクリートで二次覆工したものをそのまま水路として用いる場合が多いが、電力ケーブル用シールドトンネルでは、点検通路方式の構造形式が代表的である。

電力用シールドトンネルの要求性能は、以上の事項を総合的に鑑み、適切に設定するものとする。要求性能の設定例を付録表3-6に示す。ここでは、シールドトンネルを重要な施設と位置づけ、「機能水準A」の考え方に基づいて設定した。

付録表3-6 電力用シールドトンネルの要求性能の設定例

		重要な施設(機能水準A)	
		電力ケーブル用 (点検通路方式)	発電所における 放水路用
レベル1地震動		要求性能Ⅰ	要求性能Ⅰ
レベル2 地震動	南海沖地震	要求性能Ⅱ	要求性能Ⅱ
	内陸断層地震	要求性能Ⅱ	要求性能Ⅱ

#### (f) 通信施設の場合

通信用シールドトンネルの耐震設計の際にも、「水道指針」や1986年に社団法人日本道路協会より発刊された「共同溝設計指針」、1998年3月に社団法人土木学会より発刊された「トンネル耐震設計の方向と基本課題」などが参考になる。「水道指針」については本節(b)に、「共同溝設計指針」および「トンネル耐震設計の方向と基本課題」については本節(e)に示したとおりである。

「トンネル耐震設計の方向と基本課題」では、通信用洞道の地震時における機能水準は「高度情報化社会における社会基盤としての重要性を考慮して、機能水準Aであることが望ましい」としている。

現在、シールドトンネルは通信ケーブルネットワークのなかでも基幹に位置づけられ、敷設されるケーブル施設は全て最重要と考えられる。

通信用シールドトンネルの要求性能は、以上の事項を総合的に鑑み、適切に設定するものとする。要求性能の設定例を付録表3-7に示す。ここでは、シールドトンネルを重要な施設と位置づけ、「機能水準A」の考え方に基づき設定した。

付録表 3-7 通信用シールドトンネルの要求性能の設定例

		重要な施設（機能水準A）
レベル1 地震動		要求性能Ⅰ
レベル2 地震動	南海沖地震	要求性能Ⅱ
	内陸断層地震	要求性能Ⅱ

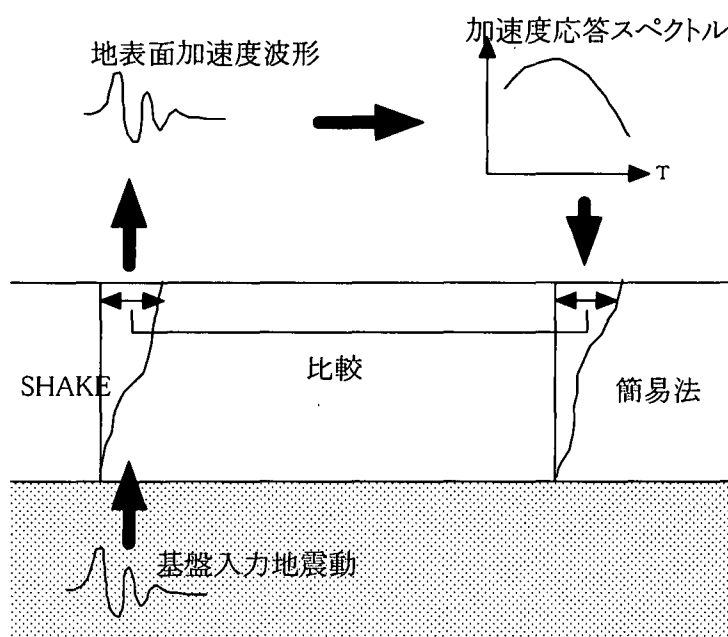
#### 参考文献

- 1) 日本下水道協会, 「下水道施設の耐震対策指針と解説」, 1997. 8.
- 2) 神戸市, 「神戸市下水道耐震設計指針（シールド管路編）」, 1998. 3.
- 3) 日本水道協会, 「水道施設耐震工法指針・解説」, 1997. 3.
- 4) 鉄道総合技術研究所, 「鉄道構造物等設計標準・同解説 シールドトンネル」, 1997. 7.
- 5) 鉄道総合技術研究所, 「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」, 1999. 10.
- 6) 日本ガス協会, 「高圧ガス導管耐震設計指針」, 2000. 3.
- 7) 高圧ガス保安協会, 「高圧ガス設備等耐震設計指針」, 1997.
- 8) 日本道路協会, 「共同溝設計指針」, 1986.
- 9) 土木学会地震工学委員会トンネル耐震性研究小委員会, 「トンネル耐震設計の方向と基本課題」, 1998. 3.
- 10) 電気設備防災対策検討会耐震性小委員会, 「電気設備防災対策検討会方向（耐震性関係）」



#### 資料4 入力地震動の算定に用いる係数 $C_N$ について

本文式(3.3-1)における、地震動の非定常性が応答スペクトルに与える係数  $C_N$  に関して、どの程度の値を与えるべきかについて、実在の地盤と地震観測記録を用いて検討した。付録図 4-1 に検討のプロセスを示す。まず、観測記録を基盤入射地震動としてプログラム SHAKE により地盤応答解析を行う。その結果得られた地表面における加速度時刻歴から、減衰 5% の加速度応答スペクトルを計算する。次に、これが設計地震動を表すスペクトルであるとして、3.3 節(2)に示した方法により、地盤の非線形応答特性を考慮した地盤変位分布を求める。このようにして求めた最大地表面地盤変位と、先述の SHAKE による最大地表面地盤変位と比較し、これらが等しくなるための係数  $C_N$  の値を検討する。



付録図 4-1 検討のプロセス

用いた地盤データは、刈藻島⑤地盤モデルである。その詳細を表 1-1 に示す。なお、他の地盤データについても解析したが、傾向が同じであったので、この地盤データを用いた解析結果についてのみ示すこととする。入力した地震波形はすべて水平成分で、道路橋示方書のタイプ I およびタイプ II の I 種地盤の時刻歴波形、千葉県東方沖地震の袖ヶ浦、東大生産研における記録、鳥取県西部地震における江府における k-net 記録、兵庫県南部地震におけるポートアイランド記録および SERM2 データベース<sup>1)</sup> に収録されている 1983 年以前の加速度記録 299 成分である。SERM2 のデータはやや古いために記録の精度に多少の問題があり、現在の地震計による記録とは同レベルで議論するにはやや無理があるが、プレート間地震による記録を多く収録しているという点で重要である。

ここで、地震動の非定常性を表すパラメータとして、震動継続時間を定義する。Papoulis の考えに従って次式で定義する<sup>2)</sup>。

$$\tau_p = \sqrt{\frac{\int t^2 f^2(t) dt - \int t f^2(t) dt}{\int f^2(t) dt}} \quad (4-1)$$

ここに、 $f(t)$ は加速度時刻歴で、積分は全データ時間にわたって行うものとする。

付録表 4-1 刈藻島⑤地盤モデル

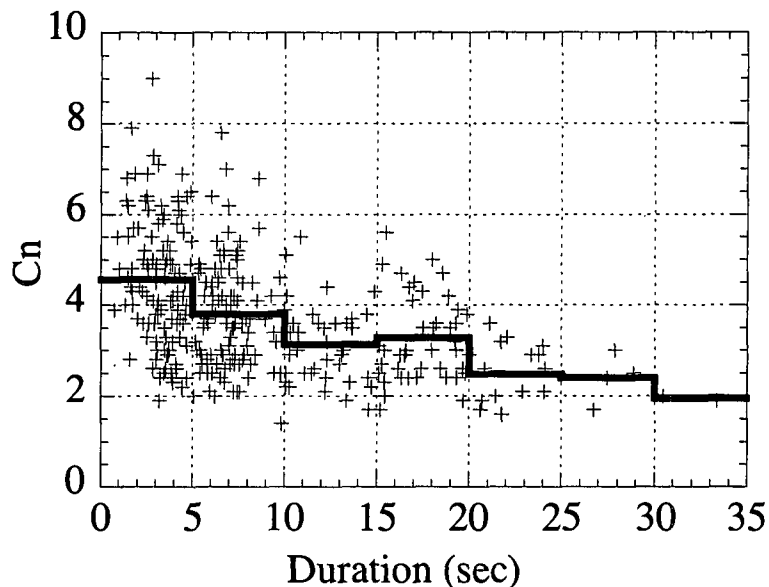
番号	土質	層厚	$V_s$ (m/s)	$G_0$ (tf/m <sup>2</sup> )	$\gamma'_t$ (tf/m <sup>3</sup> )	非線形特性
1	B	1.2	127	2985	1.80	表層
2		1.3	169	5242		
3	B	1.6	173	5773	1.90	沖積層
4		1.7	187	6780		
5		1.7	195	7378		
6		1.7	202	7931		
7	As	2.3	197	7101	1.80	沖積層
8		2.3	203	7585		
9	Ac	1.5	148	3570	1.60	沖積層
10		1.6	150	3670		
11		1.6	152	3771		
12	Ds	2.2	197	7558	1.90	洪積層
13		2.3	202	7939		
14	Dc	2.4	275	13139	1.70	洪積層
15		2.4	280	13600		
16		2.4	285	14046		
17	Dsg	6.5	341	24868	2.10	洪積層
18		6.5	359	27563		
19	Dc	4.0	290	14590	1.70	洪積層
20		4.0	295	15053		
21		4.0	299	15502		
22		5.0	304	15992		
23		5.0	309	16520		
24	Base		320	21943	2.10	弾性

付録図 4-2 に求められた最適な  $C_N$  と、震動継続時間との関係を示す。図には継続時間を 5 秒単位に区切った場合の、それぞれの領域での  $C_N$  の平均を実線で示している。全体的に大きくばらついているが、震動継続時間が大きくなるにつれ、 $C_N$  の値が小さくなっていることがわかる。これは震動継続時間が大きくなるにつれ、定常的な性質が強まるために  $C_N$  が小さくなったものと考えられる。完全に定常な入力の場合には  $C_N=1$  となることは確認している。しかしながら、付録図 4-2 は、 $C_N=2$  が地震動を入力した場合の下限値として考えて良いことを示している。

一方、継続時間が短い場合には、かなり大きくばらついている。この場合ばらつきをどのように評価するかが問題となる。元々、本文式(3.3-1)を用いて加速度応答スペクトルで設計地震動を与える方法は、考えられる地震動の平均的な値を与えることを意味している。すなわちスペクトルは、いわば平均化の方法の一つである。つまり最大加速度や最大変位などの波形のピーク値のばらつきに比べて、応答スペクトルの値はばらつきが小さく安定

している。 $C_N$ の値は応答スペクトルの値から変位波形のピーク値を推定するパラメータであるので、このことから考えれば大きければ当然と言える。したがって、 $C_N$ のばらつきはそれほど問題にする必要はなく、平均的な $C_N$ の値を評価しておけば、設計地震動を加速度応答スペクトルで与えるこの方法では十分と考えられる。付録図1-2の実線から、継続時間が0～5秒の領域における $C_N$ の平均値としては4.5程度である。継続時間が5秒程度の地震動は、マグニチュードが6.5程度以下であり、かなり震源に近い場合を除けば、構造物に大きな損傷を与えることはないものと考えられる。マグニチュード7程度の地震では、震源時間が10～15秒程度と考えられ、この場合の $C_N$ の平均値は3～3.5となっている。

以上の点を考慮すれば、マグニチュード7程度の地震に対しては $C_N=3.5$ 程度、マグニチュード8程度の巨大地震に対しては $C_N=2.0$ 程度を与えるのが適当と判断される。



付録図 4-2 最適な  $C_N$  と震動継続時間の関係

#### 参考文献

- 1) Design Seismic Load Research Group(SLG): CORRECTED AND INTEGRATED EARTHQUAKE MOTION ACCELEROGRAMS(GRAPHICAL INFORMATION) REVISED EDITION, Structural Problems for Transportation Facilities, School of Civil Engineering, Kyoto University, KUCE No.84-ST-03, July 1984.
- 2) Papoulis, A. (1962). The Fourier Integral and Its Application, McGraw Hill.

## 資料5 地盤固有周期の近似式

シールドトンネルなどの地下構造物の耐震設計を行う際に、地盤の固有周期を求めることが必要となる。厳密に固有周期を求めるには重複反射法などの地盤応答解析法を用いれば良いが、設計現場には計算が煩雑であり、近似式を用いて地盤の固有周期を求めることがよく行われている。しかしながら、既存の近似式は常に良い精度で固有周期を与えるとは限らないことが知られている。ここでは、殆どの地盤条件で精度良く地盤固有周期を与えることのできる近似計算法を、反射透過係数法に基づいて導く。

### 既存の近似式

以下のような地盤固有周期の近似式が既に提案されている。

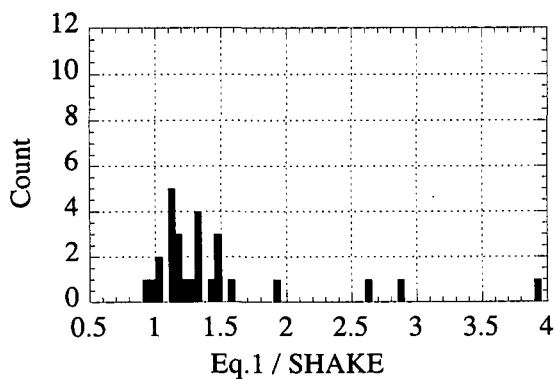
①各層をせん断波が通過するのに必要な時間を求め、これらの和から表層地盤全体を2往復するのに必要な時間を式(1)で算定する。ここに、 $V_i$ 、 $H_i$ は*i*層におけるせん断波速度と層厚である。式(1)は土木構造物の耐震設計基準でよく用いられている。

$$T_c = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{4H_i}{V_i} \quad (1)$$

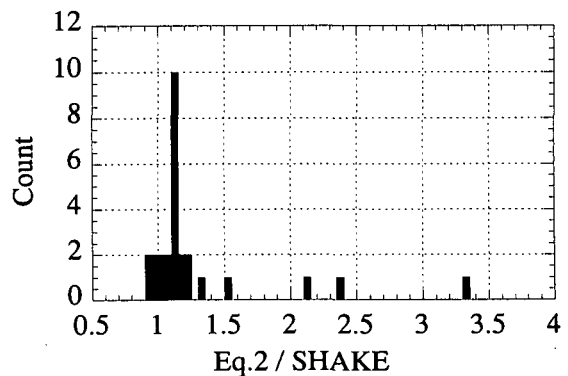
②各層におけるせん断波速度に対して各層厚により加重平均を求めて単層の表層地盤に置き換えると、固有周期は式(2)で近似される。ここにHは表層地盤全体の層厚である。式(2)は建築分野で好んで用いられる傾向があるが、物理的な背景が貧弱という欠点を持つ。

$$T_A = \frac{4H}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{V_i H_i}{H}}, \quad H = \sum_{i=1}^{n-1} H_i \quad (2)$$

これらの近似式は、基盤の速度 $V_n$ を用いず、結果的に剛基盤が仮定されている。



付録図 5-1 式 (1) の近似精度



付録図 5-2 式 (2) の近似精度

付録図 5-1 および 5-2 に、これらの近似式と重複反射法による一次固有周期の比の分布を示す。用いた地盤データは、兵庫県内の K-net 観測点 27 地点において、深さ 20m 程度までの地盤を対象に得られたものである。全般的に式(2)の方が精度が良いが、どちらもかなり

大きなばらつきを持ち、決して近似精度が良いとは言えないことがわかる。(1)式で 1.8 以上、(2)式で 1.5 以上の4つの地盤は、いずれも比較的浅い位置にインピーダンス比が大きな地層境界がある地盤構成となっている。

### 反射透過係数法

水平成層地盤の震動解析法の一つとして、反射透過係数法がある。この手法では無限に反射透過を繰り返す波を、地表面で足し合わせるにより、地盤の応答倍率を求めることができる。単層の表層地盤と基盤から成る2層系地盤に鉛直上向きに入射した場合の応答倍率は、

$$\begin{aligned}
 A_v(T) = & 2T_1^U \exp(-jp_1 H_1) \\
 & + 2T_1^U R_1^D \exp(-jp_1 \cdot 3H_1) \\
 & + 2T_1^U R_1^D R_1^D \exp(-jp_1 \cdot 5H_1) + \dots
 \end{aligned} \tag{3}$$

となる。ここに  $p_i$  は鉛直波数で  $2\pi/TV_i$  で与えられる。 $j$  は虚数単位である。 $T_i^U$ 、 $T_i^D$  は、 $i$  層と  $i+1$  層の境界にそれぞれ上向き、下向きに入射したときの透過係数であり、 $R_i^D$  は同じ境界に下向きに入射した場合の反射係数で、

$$R_i^D = \frac{\rho_i V_i - \rho_{i+1} V_{i+1}}{\rho_i V_i + \rho_{i+1} V_{i+1}} \tag{4}$$

となる。なお、 $V_i$  のかわりにせん断剛性  $G_i$  が与えられている場合には、

$$V_i = \sqrt{\frac{G_i}{\rho_i}}$$

の関係を用いれば良い。

### 一回反射近似

多層系地盤の場合には、すべての地層境界面での反射透過を無限に繰り返す波を足し合わせなければならぬので式が大変複雑となる。そこで反射透過係数法を修正し、一回反射して地表面に戻ってきた波だけを扱って、応答倍率を近似的に求める方法を示す。地表面に入射する波の振幅を1とし、実数部のみをとれば、式(3)の第2項は、

$$R_1^D \cos\left(\frac{\pi}{T} \cdot \frac{4H_1}{V_1}\right) \tag{5}$$

となるので、各層境界の反射波を足し合わせれば、以下の式が得られる。

$$\begin{aligned}
A_F(T) &= 2 + R_1^D \cos\left(\frac{\pi}{T} \cdot \frac{4H_1}{V_1}\right) \\
&\quad + T_1^D R_2^D T_1^U \cos\left(\frac{\pi}{T} \left(\frac{4H_1}{V_1} + \frac{4H_2}{V_2}\right)\right) + \dots \\
&= 2 + S_i \left\{ -\cos\left(\frac{\pi}{T} t_i\right) \right\} \\
&= 2 + S_i \cos\left(\frac{\pi}{T} (t_i - T)\right)
\end{aligned} \tag{6}$$

$$t_i = \sum_{k=1}^i \frac{4H_k}{V_k} \tag{7}$$

各層境界における反射透過の影響を表す係数  $S_i$  は、 $T_k^D T_k^U \approx 1$  を考慮すれば次式で近似される。

$$\begin{aligned}
S_i &= -R_i^D \prod_{k=1}^i T_{k-1}^D T_{k-1}^U \\
&\approx -R_i^D
\end{aligned} \tag{8}$$

#### 多項式近似

さらに式(6)の  $\cos$  関数部分を、 $t=0, T, 2T$  に極値を持つ4次関数を用いて近似する。

$$A_4(T) = 2 + \sum_{i=1}^{n-1} S_i \left( \frac{2}{T^4} t_i^4 - \frac{8}{T^3} t_i^3 + \frac{4}{T^2} t_i^2 - 1 \right) \tag{9}$$

一次固有周期は式(9)の極大値を与える  $T$  なので、 $T$  で偏微分してゼロとおくと、以下の式が得られる。

$$\frac{\partial A_4(T)}{\partial T} = -4 \sum_{i=1}^{n-1} S_i \frac{t_i^4}{T^5} + 12 \sum_{i=1}^{n-1} S_i \frac{t_i^3}{T^4} - 8 \sum_{i=1}^{n-1} S_i \frac{t_i^2}{T^3} = 0 \tag{10}$$

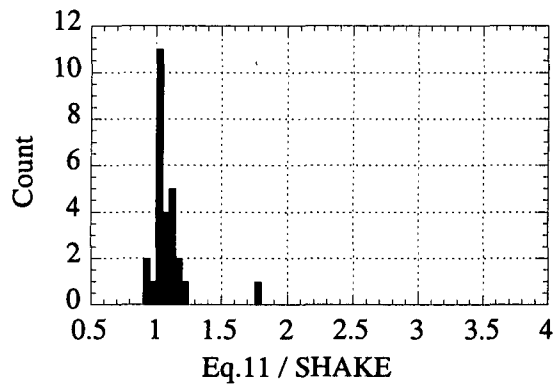
これを整理すれば2次方程式が得られるので、一次固有周期は大きい方の根として表わされる。

$$T_4 = \frac{3 \sum_{i=1}^{n-1} S_i t_i^3 + \sqrt{9 \left( \sum_{i=1}^{n-1} S_i t_i^3 \right)^2 - 8 \left( \sum_{i=1}^{n-1} S_i t_i^2 \right) \left( \sum_{i=1}^{n-1} S_i t_i^4 \right)}}{4 \sum_{i=1}^{n-1} S_i t_i^2} \tag{11}$$

式(11)が虚数になる場合には、層数  $n$  を解が実数になるまで1つつ減らして計算すれば良い。この操作は比較的浅い位置にインピーダンス比が大きな地層境界がある地盤の場合に、深い地層情報を無視する働きをする。

付録図 5-3 に式(4), (7), (8), (11)から求めた固有周期の重複反射に対する比の分布を示す。既存の近似式に比べてはるかに精度が良いことがわかる。一つの地盤構成だけ約 1.8 となっ

ているが、この周期は重複反射法による応答倍率においても極大値にはなっていない凸状の部分に相当しており、一次固有周期になるかどうかの微妙な場合と考えられる。



付録図 5-3 式(11)の近似精度

資料6 シールドトンネルの免震効果とすべり挙動について

標記の事項について検討した以下の論文を技術資料とし掲載する。

小池 武・寺本 正： シールドトンネルの免震効果とすべり挙動の応答変位法による評価，第25回地震工学研究発表会，1999.



# シールドトンネルの免震効果とすべり挙動の 応答変位法による評価

小池 武<sup>1</sup> ・ 寺本 正<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 川崎製鉄株式会社鋼構造研究所 (〒263-0005 千葉県稲毛区長沼町351)

<sup>2</sup>正会員 工修 川崎製鉄株式会社エネルギー水道事業部 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町2-2-3 日比谷国際ビル)

本報告は、レベル2地震動を受ける地中構造物の耐震対策として用いられる「免震層」による外力低減と構造物・周辺地盤間の土の弾塑性特性に基づく「すべり」による外力低減の、トンネル地震時ひずみに及ぼす低減効果について比較検討を行ったものである。

ここでは、立坑近傍および異種地盤境界近傍に免震層を設置したシールドトンネルの地震時ひずみを応答変位法により評価する手法を提案し、数値計算により両者の低減効果を比較検討した。

Key words: Seismic isolation method, slippage, shield tunnel, response displacement method, ground stiffness, shear strain

## 1. はじめに

シールドトンネルのような地中構造物が大きな地震力を受けた際の耐震対策として、従来は構造物継手部に伸縮継手を挿入することで変形性能を向上させる方法が採用されてきたが、近年構造物と周辺地盤の間に免震層を挿入して構造物に作用する外力を低減する工法が提案されるようになった。後者の工法を考える時、「免震層」による外力の低減と構造物・周辺地盤間の「すべり」による外力低減の二種類の低減効果について明確にしておくことが、免震対策を効果的に実施する上で有用と考えられる。

ここでは、立坑近傍および異種地盤境界近傍に免震層を設置したシールドトンネルの地震時ひずみを応答変位法に基づいて算定する手法を提案し、数値計算により両手法の低減効果の比較検討した結果について報告する。

## 2. 応答変位法による免震効果の簡易評価手法

### (1) 一様地盤に設置された免震層を持つトンネルの地震時挙動

シールドトンネルを含む地盤が震動するとき、図1に示すように免震層を有する場合は剛性の小さな免震層と相対的に剛性の大きな周辺地盤がせん断変形を分担している。この時、周辺地盤と免震層のそれぞれの剛性をばねで表現できるとすると、周辺地盤ばね  $K_A$  と免震層ばね  $K_B$  から合成される合成地盤ばね  $K_A^*$  は次式で与えられる。

$$K_A^* = \frac{K_A K_B}{K_A + K_B} \quad (1)$$

図2に示す免震層を持つシールドトンネルの解析モデルを用いると、構造物の変位挙動  $v_s$  は図3に示すように免震層区間と非免震層区間ごとに次の釣り合い式が得られる。

$$\rho A \frac{\partial^2 v_s}{\partial t^2} - EA \frac{\partial^2 v_s}{\partial x^2} = \pi D \tau_G \quad (2)$$

ここで、 $\rho, A, E, D, \tau_G$  は、それぞれトンネルの密度、断面積、弾性係数、口径、せん断応力である。さらに、図2の  $L, W$  および  $v_G$  は、それぞれ地震波波長、免震層区間幅そして地震動変位振幅である。

$$\pi D \tau_G = \begin{cases} K_A (v_G - v_s) & ; 0 \leq x \leq \frac{L}{4} - \frac{W}{2} \\ K_A^* (v_G - v_s) & ; \frac{L}{4} - \frac{W}{2} \leq x \leq \frac{L}{2} \end{cases} \quad (3)$$

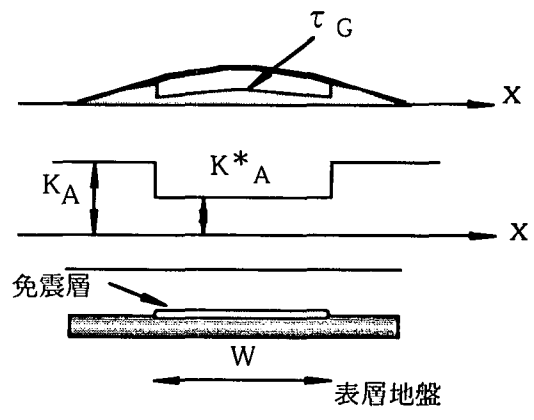


図2 免震層を持つシールドトンネルの解析モデル

両区間でのトンネル変位の一般解は次式で表現できる。

$$v_s(\xi) = \beta v_G \sin \xi + A \sinh\left(\frac{\lambda \xi}{k_L \cos \phi}\right) + B \cosh\left(\frac{\lambda \xi}{k_L \cos \phi}\right) \quad (4)$$

$$v_s^*(\xi) = \beta^* v_G \sin \xi + A^* \sinh\left(\frac{\lambda^* \xi}{k_L \cos \phi}\right) + B^* \cosh\left(\frac{\lambda^* \xi}{k_L \cos \phi}\right)$$

ここで、 $\phi$  は入射角。  $\xi = k_L x \cos \phi - \omega t$ ,  $k_L = 2\pi/L$

$$\lambda = \sqrt{\frac{K_A}{EA}}, \lambda^* = \sqrt{\frac{K_A^*}{EA}} \quad (5)$$

$$\beta = 1 / \left\{ 1 + \left( \frac{k_L \cos \phi}{\lambda} \right)^2 \right\}, \beta^* = 1 / \left\{ 1 + \left( \frac{k_L \cos \phi}{\lambda^*} \right)^2 \right\}$$

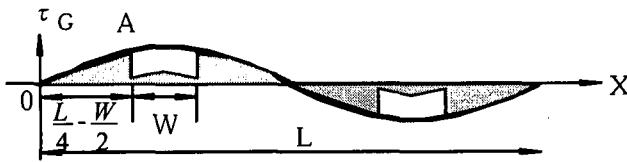


図3 免震層区間でのせん断応力分布の低減

免震層・非免震層の境界部分(図3のA点)での変位、たわみ角の連続性およびそれぞれの領域での正弦波としての境界条件:

$$v_s(\xi_w) = v_s^*(\xi_w), \left[ \frac{\partial v_s}{\partial \xi} \right]_{\xi_w} = \left[ \frac{\partial v_s^*}{\partial \xi} \right]_{\xi_w}, v_s(0) = 0,$$

$$\left[ \frac{\partial v_s^*}{\partial \xi} \right]_{\xi = \frac{\pi}{2}} = 0, \text{ここで, } \xi_w = \frac{L}{4} - \frac{W}{2} \quad (6)$$

から未定係数A, A\*, B, B\*を決定すると、トンネルに発生する最大軸ひずみ  $\epsilon_m$  は、 $x=0$  で最大値をとることから次式で算定することができる。この式の第一項は非免震状態でのトンネルひずみを示し、第二項の  $\lambda A$  は免震層による低減効果を示す。

$$\epsilon_m = \beta \epsilon_G + \lambda A \quad (7)$$

ただし、 $\epsilon_G$  は自由地盤のトンネル軸方向最大ひずみ、そして係数A, A\*は次式より算定される。

$$\begin{bmatrix} \sinh \zeta & -\sinh \zeta^* + \frac{\cosh \zeta^*}{\tanh\left(\zeta^* \frac{\pi}{2\xi_w}\right)} \\ \frac{\zeta}{\xi_w} \cosh \zeta & -\frac{\zeta^*}{\xi_w} \left( \cosh \zeta^* - \frac{\sinh \zeta^*}{\tanh\left(\zeta^* \frac{\pi}{2\xi_w}\right)} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ A^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\beta^* - \beta) v_G \sin \xi_w \\ (\beta^* - \beta) v_G \cos \xi_w \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\zeta = \frac{\lambda}{k_L \cos \phi} \xi_w, \zeta^* = \frac{\lambda^*}{k_L \cos \phi} \xi_w, \xi_w = k_L \left( \frac{L}{4} - \frac{W}{2} \right) \cos \phi - \omega t \quad (9)$$

## (2) 立坑近傍の地震時挙動 (図4)

立坑とそれに接続するシールドトンネルが剛結ではなく、トンネル軸方向移動が非拘束である場合を検討する。この場合には、立坑は地盤と同一の挙動を行い、トンネルは立坑とは独立に挙動することになる。

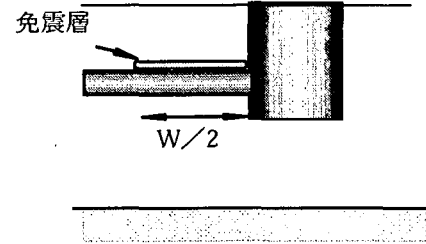


図4 免震層を持つ立坑近傍の解析モデル

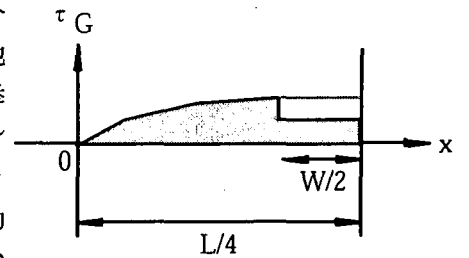


図5 立坑近傍の免震層区間でのせん断応力分布の低減

図5のせん断応力分布を仮定すると、立坑近傍のトンネルに発生する最大軸ひずみは  $x=0$  で最大値をとることから次式で求められる。

$$\epsilon_m = \beta \epsilon_G + \lambda A \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \exp(\zeta) & -\exp(\zeta^*) - \exp\left(-\zeta^* + \frac{\pi \zeta^*}{2\xi_w}\right) \\ \frac{\zeta}{\xi_w} \exp(\zeta) & -\frac{\zeta^*}{\xi_w} \left( \exp(\zeta^*) - \exp\left(-\zeta^* + \frac{\pi \zeta^*}{2\xi_w}\right) \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ A^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\beta^* - \beta) v_G \sin \xi_w \\ (\beta^* - \beta) v_G \cos \xi_w \end{bmatrix} \quad (11)$$

この時、立坑とトンネルの相対変位は次式で求められる。

$$\Delta^* = [v_G - v_s]_{x=\frac{L}{4}} = (1 - \beta^*) v_G - 2A^* \exp\left(\frac{L\lambda^*}{4}\right) \quad (12)$$

この相対変位は立坑とトンネルが剛結されている場合に吸収しなければならない最大相対変位を概算的に与えることになる。

## (3) 異種地盤境界を通過するトンネルの地震時挙動

地震動が異種地盤境界近傍を通過する時、両側の整層地盤を伝播する地震動よりも相対的に大きな変位振幅を生じることが知られている。ここでは、問題を簡単化するため、境界近傍で増幅した地震動変位振幅が  $v_G$  であると仮定して以下の定式化を行なう。

境界を挟むそれぞれの地盤での特性値を地震波の波長  $L_1, L_2$ , 免震層区間幅  $W_1, W_2$ , 地盤剛性  $K_A, K_B$  とする。この時、それぞれの地盤におけるトンネルに発生する最大軸ひずみは、2.(1)の手法にしたがって  $x_1=0, x_2=0$  で最大値をとることから次式で算定することができる。

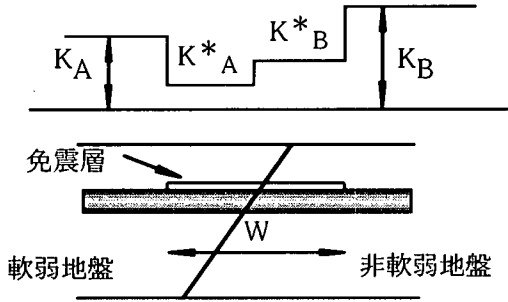


図6 異種地盤境界を通過するトンネルの解析モデル

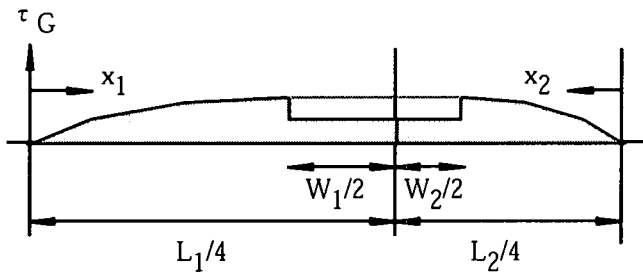


図7 異種地盤境界近傍の免震層区間でのせん断応力分布の低減

$$\varepsilon_m^1 = \beta_1 \varepsilon_G + \lambda_1 A_1, \quad \varepsilon_m^2 = \beta_2 \varepsilon_G + \lambda_2 A_2 \quad (13)$$

ここで、定数  $A_1, A_2$  は以下の関係式より求められる。

$$\begin{bmatrix} \sinh(\zeta_1) & -\sinh(\zeta_1^*) & \cos(\zeta_1) & -\cosh(\zeta_1^*) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \zeta_1 \cosh(\zeta_1) - \zeta_1^* \cosh(\zeta_1^*) & \zeta_1 \sinh(\zeta_1) - \zeta_1^* \sinh(\zeta_1^*) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sinh(\zeta_2) & -\sinh(\zeta_2^*) & \cos(\zeta_2) & -\cosh(\zeta_2^*) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \zeta_2 \cosh(\zeta_2) - \zeta_2^* \cosh(\zeta_2^*) & \zeta_2 \sinh(\zeta_2) - \zeta_2^* \sinh(\zeta_2^*) & 0 & 0 \\ 0 & \sinh(\zeta_{1p}^*) & 0 & \cosh(\zeta_{1p}^*) & 0 & -\sinh(\zeta_{2p}^*) & 0 & -\cosh(\zeta_{2p}^*) \\ 0 & \zeta_{1p}^* \cosh(\zeta_{1p}^*) & 0 & \zeta_{1p}^* \sinh(\zeta_{1p}^*) & 0 & -\zeta_{2p}^* \cosh(\zeta_{2p}^*) & 0 & -\zeta_{2p}^* \sinh(\zeta_{2p}^*) \\ 0 & (\zeta_{1p}^*)^2 \sinh(\zeta_{1p}^*) & 0 & (\zeta_{1p}^*)^2 \cosh(\zeta_{1p}^*) & 0 & -(\zeta_{2p}^*)^2 \sinh(\zeta_{2p}^*) & 0 & -(\zeta_{1p}^*)^2 \cosh(\zeta_{2p}^*) \\ 0 & (\zeta_{1p}^*)^3 \cosh(\zeta_{1p}^*) & 0 & (\zeta_{1p}^*)^3 \sinh(\zeta_{1p}^*) & 0 & -(\zeta_{2p}^*)^3 \cosh(\zeta_{2p}^*) & 0 & -(\zeta_{2p}^*)^3 \sinh(\zeta_{2p}^*) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_1^* \\ B_1 \\ B_1^* \\ A_2 \\ A_2^* \\ B_2 \\ B_2^* \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$= \nu_G \begin{bmatrix} (\beta_1^* - \beta_1) \sin(\xi w_1) & \xi w_1 (\beta_1^* - \beta_1) \cos(\xi w_1) & (\beta_2^* - \beta_2) \sin(\xi w_2) & \xi w_2 (\beta_2^* - \beta_2) \cos(\xi w_2) & \beta_2^* - \beta_1^* & 0 & -(\frac{\pi}{2})^2 (\beta_2^* - \beta_1^*) & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$\lambda_i = \sqrt{\frac{K_{Ai}}{EA}}, \quad \lambda_i^* = \sqrt{\frac{K_{Ai}^*}{EA}}, \quad \beta_i = 1 / \left\{ 1 + \left( \frac{k_{Li} \cos \phi}{\lambda_i} \right)^2 \right\},$$

$$\beta_i^* = 1 / \left\{ 1 + \left( \frac{k_{Li} \cos \phi}{\lambda_i^*} \right)^2 \right\}, \quad \xi_i = k_{Li} x \cos \phi - \omega t, \quad k_{Li} = 2\pi / L_i$$

$$\zeta_i = \frac{\lambda_i}{k_{Li} \cos \phi} \xi_{wi}, \quad \zeta_i^* = \frac{\lambda_i^*}{k_{Li} \cos \phi} \xi_{wi}, \quad \xi_{wi} = k_{Li} \left( \frac{L_i - W_i}{4} \right) \cos \phi - \omega t$$

$$\zeta_{ip} = \frac{\lambda_i}{k_{Li} \cos \phi} \frac{\pi}{2}, \quad \zeta_{ip}^* = \frac{\lambda_i^*}{k_{Li} \cos \phi} \frac{\pi}{2}; \quad i=1, 2 \quad (15)$$

### 3. すべり挙動

周辺地盤の応力ひずみ特性として図8を用いると、すべりが生じた状態のシールドトンネルに作用する

せん断応力は図9となる。この時、トンネル軸方向ひずみおよび地盤・トンネル間の相対変位  $\Delta$  は、ひずみ低減係数<sup>2)</sup>  $q$  を用いて次式で求められる。

$$\varepsilon_S = q \beta \varepsilon_G, \quad \Delta = (1 - q^* \beta) \nu_G \quad (16)$$

ここで、 $(EA)_{eq}$  をシールドトンネルの等価断面剛性とする、トンネル表面に作用するせん断応力  $\tau_c$  および  $q, q^*$  は次式で与えられる。

$$\tau_G = \frac{2\pi}{L} E t \beta \varepsilon_G = \frac{2\pi}{L} \frac{(EA)_{eq}}{\pi D} \beta \varepsilon_G \quad (17)$$

ただし、

$$\tau_G \geq \tau_{cr}, \quad q = 1 - \cos \xi + \left( \frac{\pi}{2} - \xi \right) \sin \xi,$$

$$\xi = \arcsin \left( \frac{\tau_{cr}}{\tau_G} \right); \quad \tau_G \leq \tau_{cr} \quad q = 1 \quad (18)$$

$$\tau_G \geq \tau_{cr}, \quad q^* = \left( 1 + \frac{\pi^2}{8} - \frac{\xi^2}{2} \right) \cdot \sin \xi - \xi \cdot \cos \xi$$

$$; \quad \tau_G \leq \tau_{cr} \quad q^* = 1 \quad (19)$$

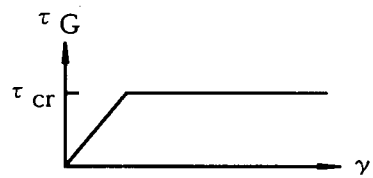


図8 土の応力ひずみ特性のモデル化

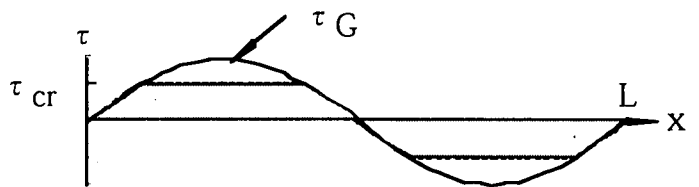


図9 シールドトンネルに作用するすべり状態のせん断応力分布

#### 4. 数値計算例

数値計算では、 $D=2.75m, t=12.8cm$ の鋼製セグメントを用いたシールドトンネル(等価断面剛性:  $(EA)_{eq}=3.36 \times 10^9 kgf$ )を想定し、免震層の区間幅および剛性の効果を検討した。さらに、免震効果とすべり挙動によるトンネルひずみ低減効果の比較検討も行なった。シールドトンネルの耐震解析に用いる数値(地盤ばね係数、地震波波長、表層地盤基盤面上の速度応答スペクトルなど)は、水道施設耐震工法指針<sup>3)</sup>のレベル2地震動に対する耐震設計法に従った。

図10の $\epsilon_G, \epsilon_{ns}, \epsilon_s, \epsilon_m$ はそれぞれ地盤ひずみ、免震層・すべりのいずれの効果も考慮しない場合の構造物ひずみ、すべりを考慮した場合の構造物ひずみそして免震層を考慮した場合の構造物ひずみである。図中の $\zeta_G$ と $\zeta_W$ はそれぞれ免震層剛性の周辺地盤剛性に対する比および地震波の波長に対する免震層区間幅の比であり、数値計算では $\zeta_G=0.001, 0.01, 0.1$ そして $\zeta_W=0.1, 0.2$ とした。さらに、シールドトンネルのすべり開始限界応力は、トンネル周辺の地盤拘束力やトンネル表面の摩擦特性などの影響を受けるが、主としてその大きさは鉛直土圧に比例する。ここでは、シールドトンネルの埋設置深さをガス導管の土被りの5倍、10倍程度の大きさと想定して、ガス導管のすべり開始限界応力( $\tau_{cr}=0.1kgf/cm^2$ )からシールドトンネルのすべり開始限界応力を $\tau_{cr}=0.5 \sim 1.0kgf/cm^2$ とした。

図10の3図を比較すると、(1)免震層剛性の効果が小さく、(2)免震層の区間幅を地震波長の20%程度にすると、短周期地盤で比較的大きなトンネルひずみ低減効果が見られる。しかし(3)すべりによる低減効果が免震層以上に大きいことを示している。図11は図10(2)とほぼ同様の傾向を示している。また、図12の相対変位は、免震層( $\Delta^*$ )よりもすべり( $\Delta$ )の方が小さい値を示しており、立坑接合部の応力緩和は、免震層だけでは必ずしも有効とは言えないように思われる。

図13は、異種地盤の軟弱地盤側のトンネル最大発生軸ひずみを検討したものである。すべりによるひずみ( $\epsilon_s$ )が免震層によるひずみ( $\epsilon_m$ )の $\zeta_W=0.2$ の曲線と同程度であることがわかる。以上より、すべり開始限界応力 $\tau_{cr}$ が $1.0kgf/cm^2$ 以下ならば、長周期地盤ですべりによるひずみ低減効果が顕著なことがわかる。

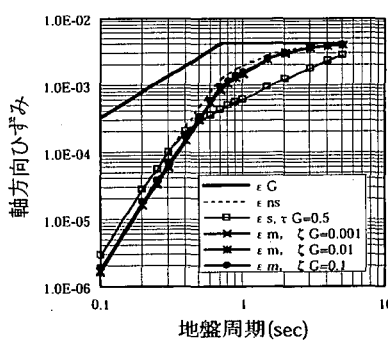
#### 5. まとめ

数値解析結果をまとめると以下のとおり。

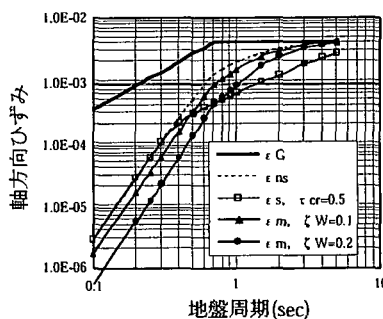
- (1) 限界せん断応力が $1.0kgf/cm^2$ 以下の場合、長周期地盤側ですべりの方が免震層よりひずみ低減効果大きい。
- (2) 免震層の幅が地震波長の20%程度の時、短周期地盤側でひずみ低減効果が見られる。
- (3) 免震層の剛性を低下させることによるひずみ低減効果は小さい。

#### 参考文献

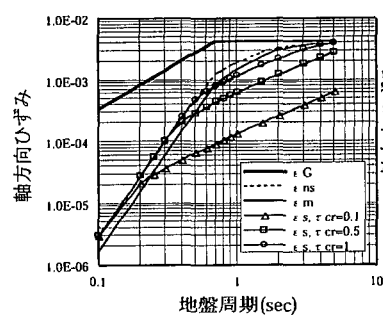
- 1) 千葉 光, 本田利器, 田村敬一, 中尾吉宏: 不整形地盤における地震動の増幅特性, 土木技術資料, 41-1, 1999.
- 2) 小池 武: 埋設パイプラインの地震時ひずみ評価, 土木学会論文報告集No.331, pp.13-24, 1983.
- 3) 日本水道協会: 水道施設耐震工法指針, 日本水道協会, 1997.



(1) 免震層剛性の影響



(2) 免震層区間幅の影響



(3) すべり開始限界応力の影響

図10 一様地盤でのトンネル軸方向ひずみに与える免震層とすべりの効果比較

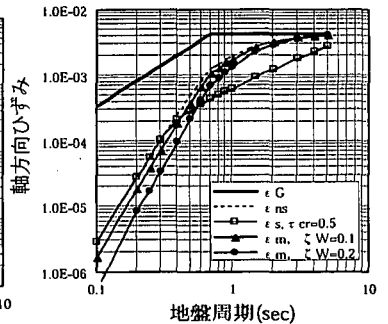


図11 立坑近傍のトンネル軸方向ひずみ

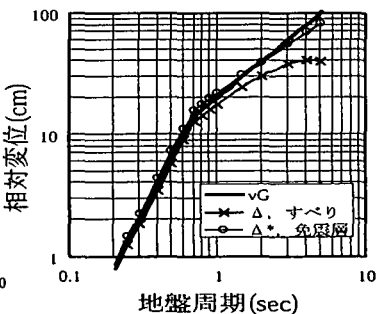


図12 立坑近傍の相対変位

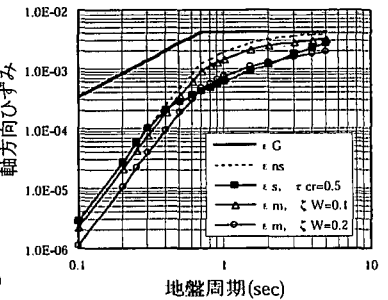


図13 異種地盤境界を通過するトンネル軸方向ひずみ(軟弱地盤側)

## 資料7 セグメントが降伏した後のリング断面の応力分布と釣り合い式

セグメントリング全体の釣り合い式は、志波ら<sup>1)</sup>により論じられてきた。しかし、元論文<sup>1)</sup>のモーメント釣り合い式の符号の取扱いと本ガイドライン（案）での取扱いが異なるため、その点を以下に説明する。

### (1) 軸力のつりあい

付録図7-1の力のつりあいから、

$$2 \int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} E_s \varepsilon_c(y) t \cdot r d\alpha - 2 \int_{\psi}^{\varphi} E_s \varepsilon_t(y) t \cdot r d\alpha - 2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\psi} E_s \varepsilon_y(y) t \cdot r d\alpha = 0 \quad (1)$$

### (2) モーメントのつりあい

付録図7-1のモーメントのつりあいから、

$$2 \int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} E_s \varepsilon_c(y) y \cdot t \cdot r d\alpha - 2 \int_{\psi}^{\varphi} E_s \varepsilon_t(y) y \cdot t \cdot r d\alpha + 2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\psi} E_s \varepsilon_y(y) y \cdot t \cdot r d\alpha = M \quad (2)$$

### (3) 元になる文献<sup>1)</sup>でのモーメントつりあい式

(2)と(3)の差異は一部符号がマイナス符号になっている点である。

$$2 \int_{\varphi}^{\frac{\pi}{2}} E_s \varepsilon_c(y) y \cdot t \cdot r d\alpha - 2 \int_{\psi}^{\varphi} E_s \varepsilon_t(y) y \cdot t \cdot r d\alpha - 2 \int_{\frac{\pi}{2}}^{\psi} E_s \varepsilon_y(y) y \cdot t \cdot r d\alpha = M \quad (3)$$

(4) 上記(1)に基づいて導かれた式は元論文の式(23-a)と同一である。一方、上記(2)に基づいて導かれた本ガイドライン（案）本文の式(4.3.6-5)の $\phi$ 、 $\psi$ に関する連立方程式の第二式は、元論文の式(23-b)と異なる。

(5) 参考として、元論文の式は以下の通りである。

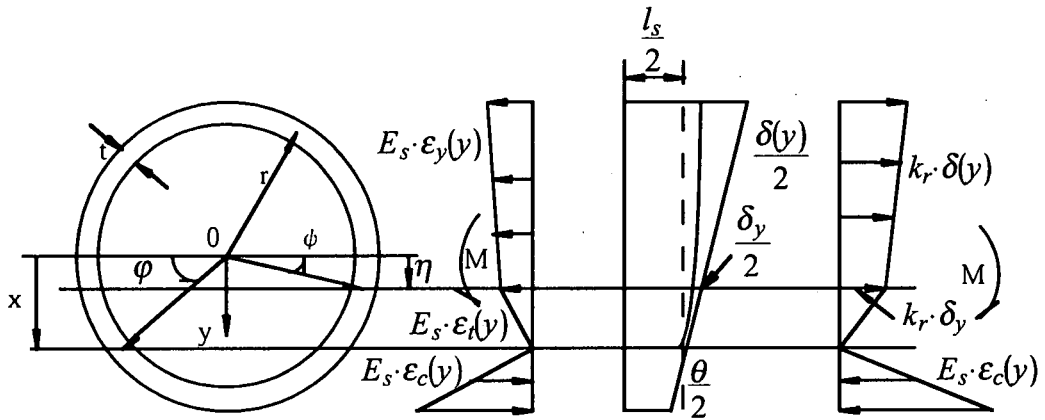
式(23-a)

$$(1-R_1)(\cos\varphi + \varphi\sin\varphi) - \frac{\pi}{2}(1+R_1)\sin\varphi + (R_1 - R_2)\left\{\cos\psi + \left(\frac{\pi}{2} + \psi\right)\sin\psi\right\} = 0$$

式(23-b)

$$\frac{2\pi M}{N_y r} R_1(\sin\varphi - \sin\psi) - \frac{\pi}{2}(1+R_2) - (1-R_1)(\varphi + \sin\varphi \cos\varphi) - (R_1 - R_2)(\psi + \sin\psi \cos\psi) = 0$$

軸力及び曲げモーメントが同時に作用した時、弾塑性状態におけるセグメントリング断面の応力分布は付録図7-1に示す状態となる。



付録図7-1 弾塑性状態におけるセグメントリング断面の応力分布

参考文献

- 1) 志波、川島、大日万、加納：シールドトンネルの耐震解析に用いる長手方向覆工剛性の評価法、土木学会論文集 第398号/I-10 1988年10月、pp.319-327.

## 資料8 立坑・トンネル接合部の耐震計算法

トンネルや立坑の耐震計算は、現在、地震時の地盤変位に基づいた応答変位法によって体系化されている。これに対し、立坑とトンネルの接合部の耐震計算についてもこれと整合のとれた計算手法が必要であると考えられる。

ここでは、立坑が地盤変位と同じ振動数で振動するものとの仮定をおいて、トンネルの耐震計算法と同じ手法で接合部の耐震計算を行う方法を提案する。

### 8.1 基本的な仮定

- ①トンネルは、線形もしくは等価線形の梁要素にて表す。
- ②地盤は、線形もしくは等価線形の地盤反力係数にて表す。
- ③トンネルは、地盤の応答変位と立坑の挙動を考慮した境界条件に支配される。
- ④立坑は、地盤と同じ振動数で振動する。
- ⑤立坑は、地盤の応答変位にのみ支配され、トンネルからの反力はないものとする。

### 8.2 軸方向の計算（伸縮）

#### (1) 軸方向計算の基礎式

いま、有限長  $\ell$  のトンネルを弾性床上的の棒要素で表し、水平に伝播する地震動変位、 $u_G(x, t, z) = Z_1(z) \sin(\omega t - 2\pi x/L_1)$  がこれに作用したとすると、トンネルの軸方向変形  $u(x, t)$  は次のように表される。（付録図 8.2-1 参照）

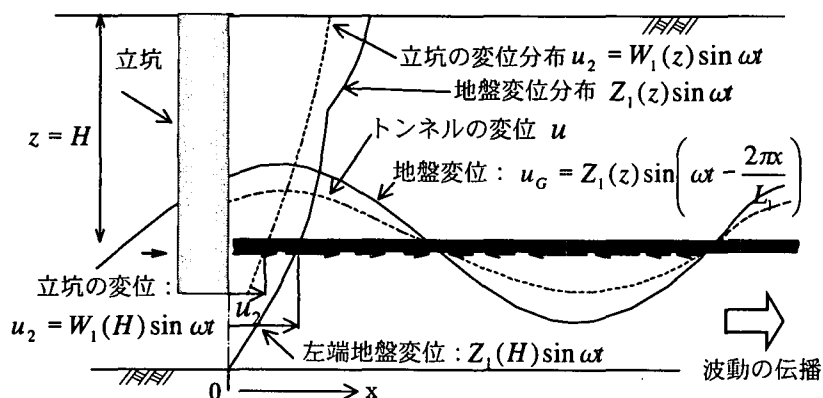
$$-EA \frac{d^2 u}{dx^2} + K_1 u = K_1 Z_1 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{L_1}\right) \quad (8.2-1)$$

$EA$ ：トンネルの軸方向剛性

$K_1$ ：トンネル単位長さあたりの軸方向地盤ばね定数

$Z_1$ ：トンネル軸方向に伝播する波動の、深さ  $z$  における変位振幅

$L_1$ ：波長、 $\omega$ ：波動の角振動数



付録図 8.2-1 立坑・トンネル接合部に作用する地盤変位

この式の一般解は積分定数 $a_1(t), a_2(t)$ を用いて次式で表される。(ただし,  $\xi = x/\ell$ )

$$u(\xi, t) = \alpha_1 Z_1 [a_1(t) \cosh \beta_1 \xi + a_2(t) \sinh \beta_1 \xi + \sin(\omega t - \gamma_1 \xi)] \quad (8.2-2)$$

ここに,

$$\alpha_1 \equiv \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{L_1}\right)^2 \frac{EA}{K_1}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma_1}{\beta_1}\right)^2} \quad (\text{地盤からトンネルへのひずみ伝達率})$$

$$\beta_1 \equiv \sqrt{\frac{K_1}{EA}} \ell \quad (\text{剛性比} \cdot \text{トンネル長特性値})$$

$$\gamma_1 \equiv \frac{2\pi\ell}{L_1} \quad (\text{トンネル長} / \text{波長特性値})$$

$$\frac{\gamma_1}{\beta_1} = \frac{2\pi}{L_1} \sqrt{\frac{EA}{K_1}} = \sqrt{\frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1}} \quad (\text{剛性比} / \text{波長特性値})$$

(2) 伸縮継手を考慮した境界条件

有限長トンネルの境界条件を次のように仮定する。

トンネル左端は立坑との接合部とし, そこでの軸力は伸縮継手の軸力  $T = T(t)$  に伝達されるものとする。右端は, 軸力=0 の自由端とする。

トンネルの軸力  $P = P(x, t)$  は, 一般式で,

$$P(\xi, t) = EA \frac{du}{dx} = \alpha_1 P_0 \left[ \frac{\beta_1}{\gamma_1} (a_1 \sinh \beta_1 \xi + a_2 \cosh \beta_1 \xi) - \cos(\omega t - \gamma_1 \xi) \right] \quad (8.2-3)$$

ここに,  $P_0 = EA \frac{\gamma_1 Z_1}{\ell} = EA \frac{2\pi Z_1}{L_1}$  : 地盤の強制変位を受ける無限連続棒の軸力振幅

である。なお,  $\alpha_1 P_0$  は無限長トンネルに発生する軸力振幅を表す。

境界条件として, 左端と右端における軸力の条件から,

$$\xi = 0; \quad P = \alpha_1 P_0 \left( \frac{\beta_1}{\gamma_1} a_2(t) - \cos \omega t \right) = T(t) \quad (8.2-4a)$$

$$\xi = 1; \quad P = \alpha_1 P_0 \left\{ \frac{\beta_1}{\gamma_1} (a_1(t) \sinh \beta_1 + a_2(t) \cosh \beta_1) - \cos(\omega t - \gamma_1) \right\} = 0 \quad (8.2-4b)$$

また, 伸縮継手のばね定数を  $K_j$ , トンネル左端の変位を  $u_1(t)$ , 立坑の変位を  $u_2(t)$  とすれば,



$$T(t) = K_f \{u_1(t) - u_2(t)\} \quad (8.2-4c)$$

上式 (8.2-4a), (8.2-4b) から,  $a_1(t), a_2(t)$  は, 未知数  $T(t)$  を媒介としながら次のように求まる。

$$a_1(t) = \frac{\gamma_1}{\beta_1 \sinh \beta_1} \left\{ \cos(\omega t - \gamma_1) - \left( \frac{T(t)}{\alpha_1 P_0} + \cos \omega t \right) \cosh \beta_1 \right\}$$

$$a_2(t) = \frac{\gamma_1}{\beta_1} \left( \frac{T(t)}{\alpha_1 P_0} + \cos \omega t \right)$$

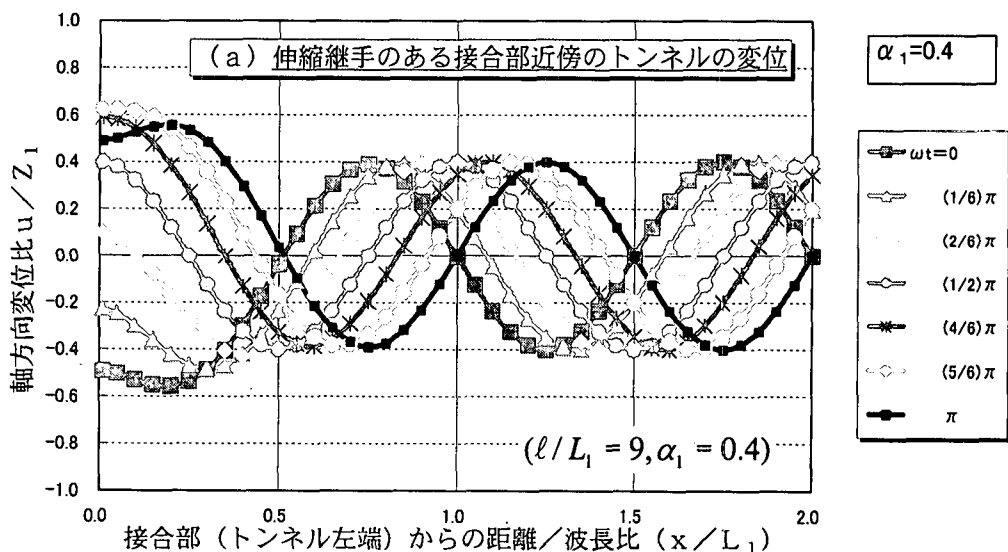
トンネル一般部の変位は, 上記  $a_1(t), a_2(t)$  を (8.2-2) に代入して次のようになる。

$$u(\xi, t) = \alpha_1 Z_1 \left[ \frac{\gamma_1 \cosh \beta_1 \xi}{\beta_1 \sinh \beta_1} \left\{ \cos(\omega t - \gamma_1) - \left( \frac{T(t)}{\alpha_1 P_0} + \cos \omega t \right) \cosh \beta_1 \right\} \right. \\ \left. + \frac{\gamma_1}{\beta_1} \left( \frac{T(t)}{\alpha_1 P_0} + \cos \omega t \right) \sinh \beta_1 \xi + \sin(\omega t - \gamma_1 \xi) \right] \quad (8.2-5)$$

いま,  $T=0$  の伸縮自由継手とし, 波動伝播による接合部 (トンネル左端) 近傍のトンネルの変位分布を示せば付録図 8.2-2 のようである。

さて, トンネル左端 ( $\xi=0$ ) の変位  $u_1$  は,

$$u_1(t) = \alpha_1 Z_1 \left[ \frac{\gamma_1}{\beta_1 \sinh \beta_1} \left\{ \cos(\omega t - \gamma_1) - \left( \frac{T(t)}{\alpha_1 P_0} + \cos \omega t \right) \cosh \beta_1 \right\} + \sin \omega t \right]$$



付録図 8.2-2 トンネル左端の変位分布例 (伸縮自由継手の場合)

トンネル長が十分大きく  $\beta_1 \gg 1$  なら,  $\cosh \beta_1 / \sinh \beta_1 \rightarrow 1$ ,  $1 / \sinh \beta_1 \rightarrow 0$  となり, トンネル左端の変位  $u_1$  は,

$$\begin{aligned} u_1(t) &= \alpha_1 Z_1 \left\{ \sin \omega t - \frac{\gamma_1}{\beta_1} \left( \frac{T(t)}{\alpha_1 P_0} + \cos \omega t \right) \right\} \\ &= Z_1 \left\{ \alpha_1 \sqrt{1 + \left( \frac{\gamma_1}{\beta_1} \right)^2} \sin(\omega t - \theta_1) - \frac{\gamma_1}{\beta_1} \frac{T(t)}{P_0} \right\} \\ &= Z_1 \left\{ \sqrt{\alpha_1} \sin(\omega t - \theta_1) - \frac{\gamma_1}{\beta_1} \frac{T(t)}{P_0} \right\} \end{aligned} \quad (8.2-6)$$

ただし,

$$\tan \theta_1 = \frac{\gamma_1}{\beta_1} = \sqrt{\frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1}} \quad (8.2-7)$$

$T=0$  の伸縮自由継手の場合は, 左端の地盤変位とは振幅が  $\sqrt{\alpha_1}$  倍となり, 位相が  $\theta_1$  だけ遅れる。

### (3) 伸縮継手の相対変位および軸力

いま, 立坑が地盤とは異なる振幅で変位:  $u_2 = (\pm)W_1 \sin \omega t$  (振動数は同じ, 位相は地盤と同位相+もしくは逆位相-) するとする。

逆位相については, 地盤が2次モードで振動したような場合, 剛性の大きい立坑は1次モードで変形し, その結果, 立坑の一部の変位が地盤とは逆となることに対応する。

伸縮継手の相対変位  $\Delta u$  は,

$$\begin{aligned} \Delta u(t) &= u_1(t) - u_2(t) \\ &= \sqrt{\alpha_1} Z_1 \sin(\omega t - \theta_1) - W_1 \sin \omega t - \frac{\gamma_1}{\beta_1} \frac{T(t)}{P_0} Z_1 \\ &= \sqrt{\alpha_1} Z_1 (\sin \omega t \cos \theta_1 - \cos \omega t \sin \theta_1) - W_1 \sin \omega t - \frac{\gamma_1}{\beta_1} \frac{T(t)}{P_0} Z_1 \\ &= -Z_1 \left\{ (W_1 / Z_1 - \alpha_1) \sin \omega t + \sqrt{\alpha_1(1 - \alpha_1)} \cos \omega t + \frac{\gamma_1}{\beta_1} \frac{T(t)}{P_0} \right\} \\ &= -Z_1 \left\{ \sqrt{(W_1 / Z_1)^2 + (1 - 2W_1 / Z_1)\alpha_1} \sin(\omega t + \theta_2) + \frac{\gamma_1}{\beta_1} \frac{T(t)}{P_0} \right\} \end{aligned} \quad (8.2-8)$$

ただし,

$$\tan \theta_2 = \frac{\sqrt{\alpha_1(1 - \alpha_1)}}{(W_1 / Z_1) - \alpha_1} \quad (8.2-9)$$

ここで,

$$\cos \theta_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_1}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\gamma_1 / \beta_1)^2}} = \sqrt{\alpha_1} \quad (8.2-10)$$

$$\sin \theta_1 = \sqrt{1 - \cos^2 \theta_1} = \sqrt{1 - \alpha_1} \quad (8.2-11)$$

の関係を用いた。なお、符号(±)は $W_1$ 自体に正負を加味することで一般性を失わない。

未知数 $T(t)$ については、式(8.2-8)と式(8.2-4c)から、

$$\begin{aligned} T(t) &= K_J \{u_1(t) - u_2(t)\} \\ &= -K_J Z_1 \left\{ \sqrt{(W_1/Z_1)^2 + (1-2W_1/Z_1)\alpha_1} \sin(\omega t + \theta_2) + \frac{\gamma_1 T(t)}{\beta_1 P_0} \right\} \end{aligned}$$

の関係を導くことができ、これから、伸縮継手の軸力 $T(t)$ が次式で求まる。

$$\begin{aligned} T(t) &= \frac{-K_J \alpha_E Z_1 \sin(\omega t + \theta_2)}{1 + \frac{\gamma_1 K_J Z_1}{\beta_1 P_0}} = \frac{-\alpha_E P_0 \sin(\omega t + \theta_2)}{\frac{2\pi EA/L_1}{K_J} + \sqrt{\frac{1-\alpha_1}{\alpha_1}}} \\ &= -\kappa \alpha_E \alpha_J P_0 \sin(\omega t + \theta_2) \end{aligned} \quad (8.2-12)$$

ここで、

$$\kappa = K_J / (2\pi EA / L_1) \quad : \text{継手/トンネル剛性比} \quad (8.2-13)$$

$$\alpha_E = \sqrt{(W_1/Z_1)^2 + (1-2W_1/Z_1)\alpha_1} \quad : \text{伸縮自由継手への変位伝達率} \quad (8.2-14)$$

$$\alpha_J = \frac{1}{1 + \kappa \sqrt{(1-\alpha_1)/\alpha_1}} \quad : \text{継手剛性による変位伝達補正率} \quad (8.2-15)$$

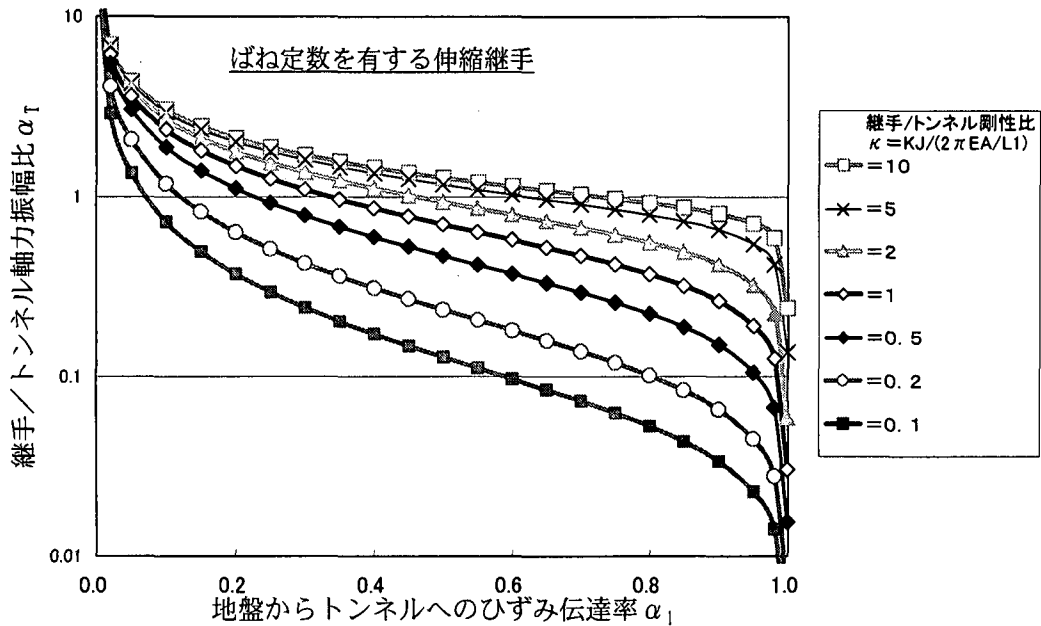
なお、 $\alpha_E$ は後述するように、地盤から伸縮自由継手への変位振幅の伝達率を表している。継手の軸力振幅 $|T|$ を、無限長トンネルの軸力振幅 $\alpha_1 P_0$ との比で表せば、次のような伸縮継手/トンネル軸力振幅比が得られる。

$$\alpha_T \equiv \frac{|T|}{\alpha_1 P_0} = \frac{\kappa \alpha_E \alpha_J}{\alpha_1} \quad (8.2-16)$$

立坑が地盤と同じ変位をする場合( $W_1/Z_1 = 1$ )について、伸縮継手/トンネル軸力振幅比 $\alpha_T$ とひずみ伝達率 $\alpha_1$ の関係を剛性比 $\kappa$ をパラメータにして付録図 8.2-3 に示す。

また、伸縮継手の相対変位 $\Delta u$ も、式(8.2-12)~(8.2-15)から次のように $T$ を含まない形に表すことができる。

$$\begin{aligned} \Delta u(t) &= u_1(t) - u_2(t) \\ &= T(t) / K_J \\ &= \frac{-\alpha_E Z_1 \sin(\omega t + \theta_2)}{1 + \frac{\gamma_1 K_J L_1}{\beta_1 2\pi EA}} \\ &= -\alpha_E \alpha_J Z_1 \sin(\omega t + \theta_2) \end{aligned} \quad (8.2-16)$$



付録図 8.2-3 継手/トンネル軸力振幅比  $\alpha_T$  とひずみ伝達率  $\alpha_1$  の関係

伸縮自由継手,  $K_J = 0$ , の場合は、

$$\Delta u(t) = -\alpha_E Z_1 \sin(\omega t + \theta_2)$$

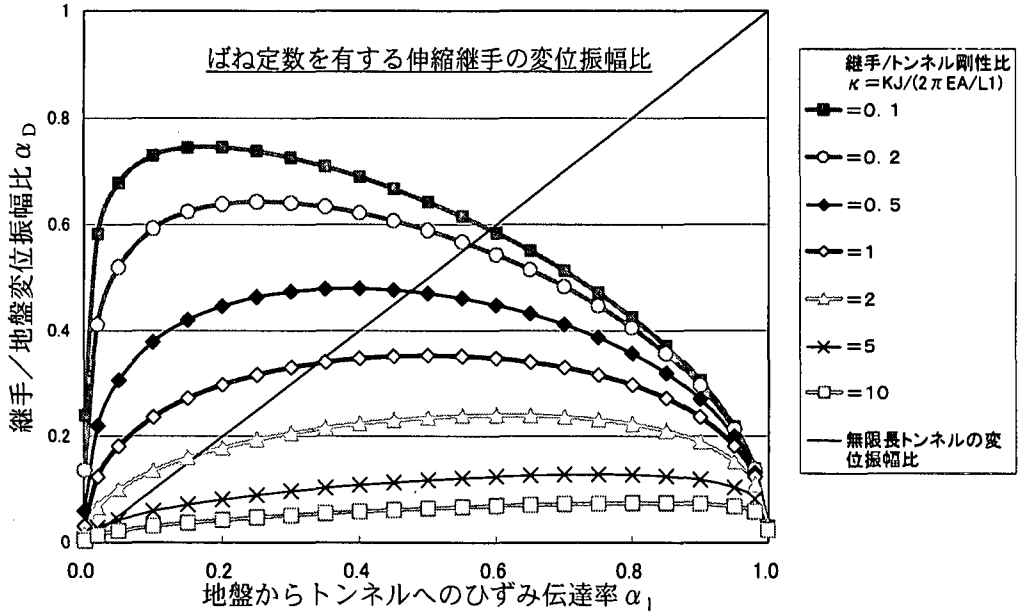
となり、係数  $\alpha_E$  が地盤から伸縮自由継手への変位の伝達率を表していることがわかる。従って、係数  $\alpha_J$  は継手剛性による変位伝達の補正率を表していることになる。

接合部の伸縮継手の突込み・拔出しの振幅  $|\Delta u|$  は上式で評価できる。

以上のように、伸縮継手の相対変位振幅は、地盤の変位振幅に対して次式の比で表される。

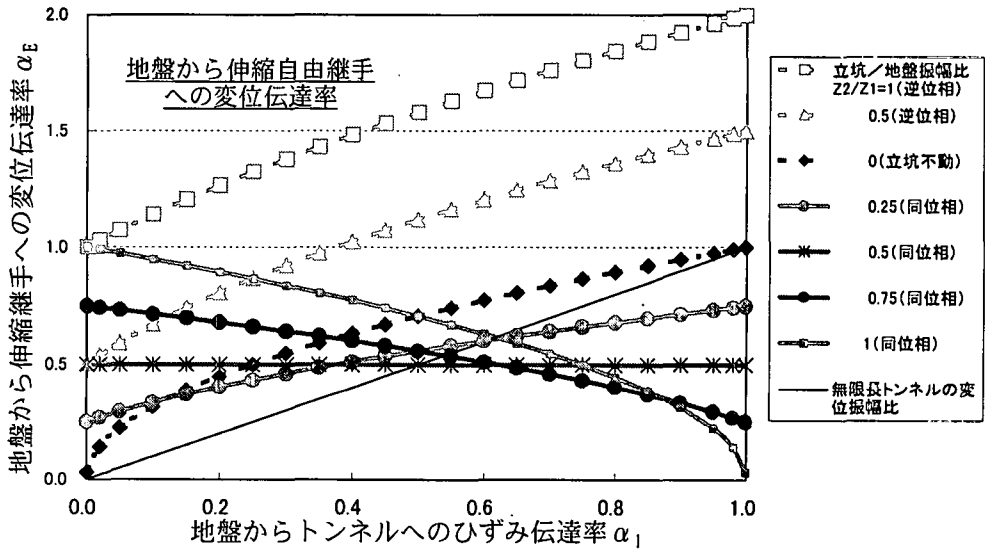
$$\alpha_D \equiv \frac{|\Delta u|}{Z_1} = \alpha_E \alpha_J \quad (8.2-17)$$

立坑が地盤と同じ変位をする場合 ( $W_1 / Z_1 = 1$ ) について、この継手/地盤変位振幅比  $\alpha_D$  とひずみ伝達率  $\alpha_1$  の関係を、剛性比  $\kappa$  をパラメータにしてしめすならば、付録図 8.2-4 のようである。



付録図 8.2-4 伸縮継手／地盤変位振幅比  $\alpha_D$

なお、伸縮自由継手 ( $K_j = 0$ ) の場合の変位伝達率  $\alpha_E$  とひずみ伝達率の関係は付録図 8.2-5 に示す。立坑と地盤の振動が逆位相になった場合は、伸縮継手に最大 2 倍の突込み・拔出しが生じる。



付録図 8.2-5 地盤から伸縮自由継手への変位伝達率

立坑の回転の影響を考慮したトンネル接合部での相対変位

地盤変位が深さ方向に変化することによって立坑は水平変位  $u_2$  するだけでなく回転（傾斜）を伴う。回転の位相は水平変位と同じと仮定すれば、立坑回転の影響を考慮した伸縮継手の突込み・抜出しの振幅  $\delta$  は、次のような回転振幅  $\theta$  による付加分  $\delta$  を加算して求められる。

$$\delta = (D_0/2)\theta \quad (8.2-18)$$

ここに、 $D_0$  はトンネル外径であり、 $\theta$  は立坑の接続部深さでの回転振幅である。

剛結継手の軸力

剛結継手の軸力  $T(t)$  は、伸縮継手の軸力を表す前式(8.2-12)において  $K_J \rightarrow \infty$  とした場合から求められる。

$$\begin{aligned} T(t) &= \frac{-K_J Z_1}{1 + \frac{\gamma_1 K_J Z_1}{\beta_1 P_0}} \sqrt{(W_1/Z_1)^2 + (1 \mp 2W_1/Z_1)\alpha_1} \sin(\omega t + \theta_2) \\ &\rightarrow -\frac{\beta_1}{\gamma_1} P_0 \sqrt{(W_1/Z_1)^2 + (1 \mp 2W_1/Z_1)\alpha_1} \sin(\omega t + \theta_2) \\ &= -P_0 \sqrt{\frac{\alpha_1}{1 - \alpha_1}} \sqrt{(W_1/Z_1)^2 + (1 \mp 2W_1/Z_1)\alpha_1} \sin(\omega t + \theta_2) = P_1(t) \end{aligned}$$

剛結接続部の軸力振幅  $|T|$  は、地盤の強制変位を受ける無限連続の場合の軸力振幅  $P_0$  との比で次のように表される。この比  $\alpha_R$  は、剛結による軸力発生率とみることができる。

$$\alpha_R \equiv \frac{|T|}{P_0} = \sqrt{\frac{(W_1/Z_1)^2 \alpha_1 + (1 \mp 2W_1/Z_1)\alpha_1^2}{1 - \alpha_1}} \quad (8.2-19)$$

立坑が地盤と同じように変位する場合 ( $W_1/Z_1 = 1$ ) は、次式となる。

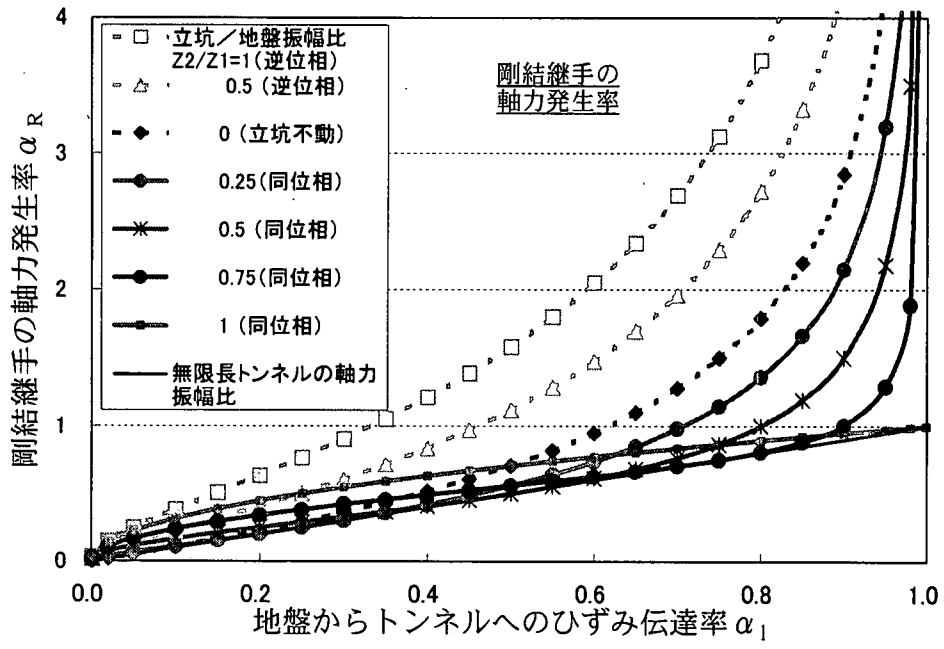
$$\alpha_R \equiv \frac{|T|}{P_0} = \sqrt{\alpha_1} \quad (8.2-20)$$

剛結継手の軸力発生率  $\alpha_R$  とひずみ伝達率  $\alpha_1$  との関係は、付録図 8.2-6 のようである。

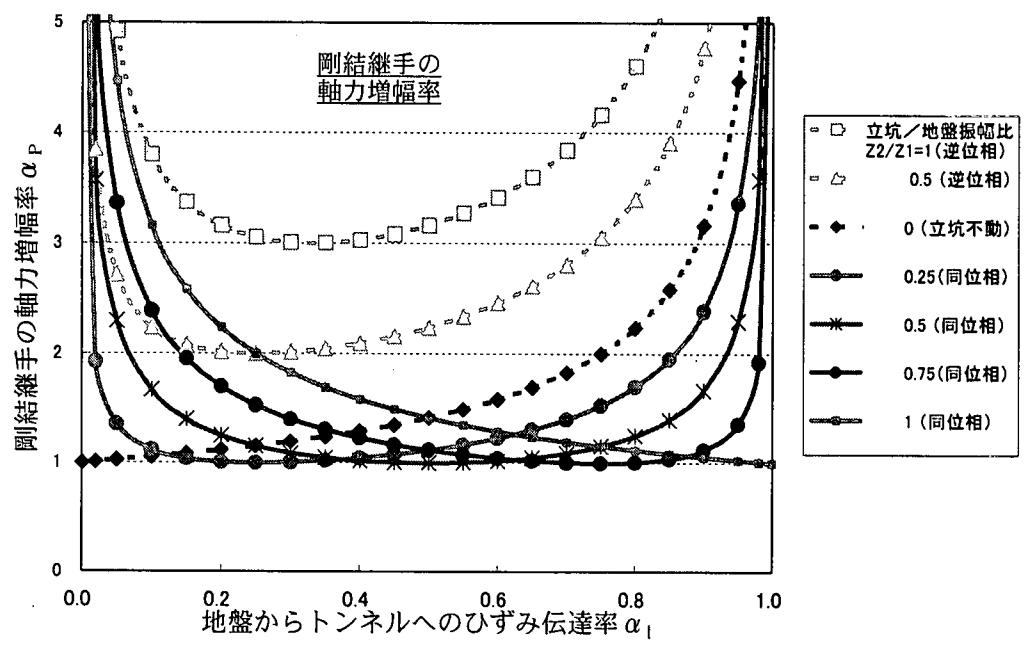
一方、剛結端部の軸力を無限連続トンネルの軸力振幅  $\alpha_1 P_0$  との比で示せば、次のようになる。この比  $\alpha_P$  は、無限長トンネルに対する剛結部の軸力増幅率の関係にある。

$$\alpha_P \equiv \frac{|T|}{\alpha_1 P_0} = \sqrt{\frac{(W_1/Z_1)^2 + (1 \mp 2W_1/Z_1)\alpha_1}{\alpha_1(1 - \alpha_1)}} \quad (8.2-21)$$

軸力増幅率  $\alpha_P$  とひずみ伝達率の関係を示せば、付録図 8.2-7 のようである。



付録図 8.2-6 剛結継手による軸力発生率



付録図 8.2-7 剛結部の軸力増幅率  $\alpha_P$

### 8.3 軸直角方向の計算（曲げ・せん断）

#### (1) 軸直角方向計算の基礎式

いま、有限長  $\ell$  のトンネルを弾性床土上の梁要素で表し水平に伝播する横波の地震動変位、 $v_G(x, t, z) = Z_2(z) \sin(\omega t - 2\pi x/L_2)$  がこれに作用したとすると、トンネルの軸直角方向変形  $v(x, t)$  は次のように表される。（付録図 8.3-1 参照）

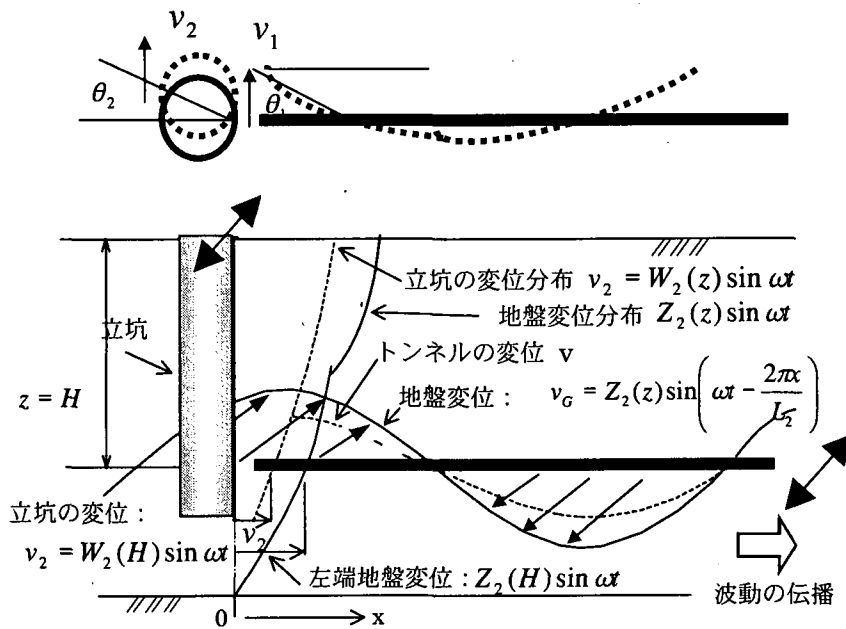
$$EI \frac{d^4 v}{dx^4} + K_2 v = K_2 Z_2 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi x}{L_2}\right) \quad (8.3-1)$$

$EI$  : トンネルの曲げ剛性

$K_2$  : トンネル単位長さあたりの軸直角方向地盤ばね定数

$Z_2$  : トンネル軸方向に伝播する横波波動の、深さ  $z$  における変位振幅

$L_2$  : 波長,  $\omega$  : 波動の角振動数



付録図 8.3-1 立坑・トンネル接合部に作用する地盤変位

この式の一般解は 4 個の積分定数  $b_1(t), \dots, b_4(t)$  を用いて次式で表される。（ただし、 $\xi = x/\ell$ ）

$$v(\xi, t) = \alpha_2 Z_2 \left[ \sum_{i=1}^4 b_i(t) \phi_i(\beta_2 \xi) + \sin(\omega t - \gamma_2 \xi) \right] \quad (8.3-2)$$



ここに,

$$\alpha_2 \equiv \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{L_2}\right)^4 \frac{EI}{K_2}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\gamma_2}{\beta_2}\right)^4} \quad (\text{地盤からトンネルへのひずみ伝達率})$$

$$\beta_2 \equiv \sqrt[4]{\frac{K_2}{4EI}} \cdot \ell \quad (\text{剛性比} \cdot \text{トンネル長特性値})$$

$$\gamma_2 \equiv \frac{2\pi\ell}{L_2} \quad (\text{トンネル長} / \text{波長特性値})$$

$$\frac{\gamma_2}{\beta_2} = \frac{2\pi}{L_2} \sqrt[4]{\frac{4EI}{K_2}} = \sqrt[4]{\frac{4(1-\alpha_2)}{\alpha_2}} \quad (\text{剛性比} / \text{波長特性値})$$

また,  $\phi_i(\beta_2\xi)$  は次のような関数で表される。

$$\phi_1(\beta_2\xi) = \cos \beta_2\xi \cosh \beta_2\xi$$

$$\phi_2(\beta_2\xi) = \sin \beta_2\xi \cosh \beta_2\xi + \cos \beta_2\xi \sinh \beta_2\xi$$

$$\phi_3(\beta_2\xi) = \sin \beta_2\xi \sinh \beta_2\xi$$

$$\phi_4(\beta_2\xi) = \sin \beta_2\xi \cosh \beta_2\xi - \cos \beta_2\xi \sinh \beta_2\xi$$

(8.3-3)

トンネルの、曲げモーメントおよびせん断力は、一般式で、

$$\begin{aligned} M(\xi, t) &= -EI \frac{d^2v}{dx^2} \\ &= \alpha_2 M_0 \left[ \left(\frac{\beta_2}{\gamma_2}\right)^2 \{2b_1\phi_3(\beta_2\xi) + 2b_2\phi_4(\beta_2\xi) - 2b_3\phi_1(\beta_2\xi) - 2b_4\phi_2(\beta_2\xi)\} + \sin(\omega t - \gamma_2\xi) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q(\xi, t) &= -EI \frac{d^3v}{dx^3} \\ &= \alpha_2 Q_0 \left[ \left(\frac{\beta_2}{\gamma_2}\right)^3 \{2b_1\phi_2(\beta_2\xi) + 4b_2\phi_3(\beta_2\xi) + 2b_3\phi_4(\beta_2\xi) - 4b_4\phi_1(\beta_2\xi)\} - \cos(\omega t - \gamma_2\xi) \right] \end{aligned}$$

また, 変形角は,

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{dv}{dx} \\ &= \alpha_2 \theta_0 \left[ \frac{\beta_2}{\gamma_2} \{-b_1\phi_4(\beta_2\xi) + 2b_2\phi_1(\beta_2\xi) + b_3\phi_2(\beta_2\xi) + 2b_4\phi_3(\beta_2\xi)\} - \cos(\omega t - \gamma_2\xi) \right] \end{aligned}$$

$$\text{ここに, } M_0 = EIZ_2 \left( \frac{\gamma_2}{\ell} \right)^2 = EIZ_2 \left( \frac{2\pi}{L_2} \right)^2, \quad Q_0 = EIZ_2 \left( \frac{\gamma_2}{\ell} \right)^3 = EIZ_2 \left( \frac{2\pi}{L_2} \right)^3,$$

$$\text{および, } \theta_0 = \frac{\gamma_2 Z_2}{\ell} = \frac{2\pi Z_2}{L_2}$$

は、それぞれ、地盤から強制変位を受ける無限連続梁の曲げモーメント、せん断力および変形角の振幅を表している。また、 $\alpha_2 M_0, \alpha_2 Q_0, \alpha_2 \theta_0$  は、それぞれ、地盤ばねを介して地盤変位をうける無限長トンネルに発生する曲げモーメント、せん断力、変形角の振幅である。

## (2) 可撓継手を考慮した境界条件

有限長トンネルの境界条件を次のように仮定する。

トンネル左端は、可撓継手を介して立坑に接続する。可撓継手の断面力を、いま

$$M = M_T(t); \text{ 曲げモーメント, } \quad Q = Q_T(t); \text{ せん断力}$$

とし、立坑とトンネル左端の相対変位およびそのばね定数から求められる未知数とする。

右端は、曲げモーメントおよびせん断力ともに0の自由端とする。

まず、左端  $\xi = 0$  において;

$$M = \alpha_2 M_0 \left[ -2 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 b_3(t) + \sin \omega t \right] = M_T(t) \quad (8.3-4a)$$

$$Q = \alpha_2 Q_0 \left[ -4 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^3 b_4(t) - \cos \omega t \right] = Q_T(t) \quad (8.3-4b)$$

従って、

$$b_3(t) = -\frac{1}{2} \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 \left\{ \frac{M_T(t)}{\alpha_2 M_0} - \sin \omega t \right\} \quad (8.3-5a)$$

$$b_4(t) = -\frac{1}{4} \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^3 \left\{ \frac{Q_T(t)}{\alpha_2 Q_0} + \cos \omega t \right\} \quad (8.3-5b)$$

また、右端  $\xi = 1$  において;

$$M = \alpha_2 M_0 \left[ \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 \{ 2b_1(t)\Phi_3 + 2b_2(t)\Phi_4 - 2b_3(t)\Phi_1 - 2b_4(t)\Phi_2 \} + \sin(\omega t - \gamma_2) \right] = 0 \quad (8.3-4c)$$

$$Q = \alpha_2 Q_0 \left[ \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^3 \{ 2b_1(t)\Phi_2 + 4b_2(t)\Phi_3 + 2b_3(t)\Phi_4 - 4b_4(t)\Phi_1 \} - \cos(\omega t - \gamma_2) \right] = 0 \quad (8.3-4d)$$

従って、 $b_1(t), b_2(t)$  は、 $b_3(t), b_4(t)$  で表すことができ、

$$b_1(t) = \frac{\Phi_8}{\Phi_5} b_3(t) + \frac{\Phi_6}{\Phi_5} b_4(t) - \frac{1}{\Phi_5} \left\{ 2 \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 \Phi_3 \sin(\omega t - \gamma_2) + \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^3 \Phi_4 \cos(\omega t - \gamma_2) \right\} \quad (8.3-5c)$$

$$b_2(t) = -\frac{\Phi_7}{\Phi_5} b_3(t) - \frac{\Phi_9}{\Phi_5} b_4(t) + \frac{1}{\Phi_5} \left\{ \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 \Phi_2 \sin(\omega t - \gamma_2) + \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^3 \Phi_3 \cos(\omega t - \gamma_2) \right\} \quad (8.3-5d)$$

ここで、 $\Phi_1, \dots, \Phi_9$  は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 &= \cos \beta_2 \cosh \beta_2 \\ \Phi_2 &= \sin \beta_2 \cosh \beta_2 + \cos \beta_2 \sinh \beta_2 \\ \Phi_3 &= \sin \beta_2 \sinh \beta_2 \\ \Phi_4 &= \sin \beta_2 \cosh \beta_2 - \cos \beta_2 \sinh \beta_2 \\ \Phi_5 &= 2(2\Phi_3^2 - \Phi_2\Phi_4) = 2(\sinh^2 \beta_2 - \sin^2 \beta_2) \\ \Phi_6 &= 4(\Phi_2\Phi_3 - \Phi_1\Phi_4) = 4(\sinh \beta_2 \cosh \beta_2 - \sin \beta_2 \cos \beta_2) \\ \Phi_7 &= 2(\Phi_1\Phi_2 + \Phi_3\Phi_4) = 2(\sinh \beta_2 \cosh \beta_2 + \sin \beta_2 \cos \beta_2) \\ \Phi_8 &= 2(2\Phi_1\Phi_3 + \Phi_4^2) = 2(\sinh^2 \beta_2 + \sin^2 \beta_2) \\ \Phi_9 &= 2(\Phi_2^2 - 2\Phi_1\Phi_3) = \Phi_8 = 2(\sinh^2 \beta_2 + \sin^2 \beta_2) \end{aligned} \right\} \quad (8.3-6)$$

トンネル長が十分大きく、 $\beta_2 \equiv \sqrt[4]{\frac{K_2}{4EI}} \cdot l \rightarrow \infty$  とすると、 $\cosh \beta_2 / \sinh \beta_2 \rightarrow 1$  で、また、上式(8.3-5c)、(8.3-5d)の第3項は0に収束するから、結局、次式が得られる。

$$b_1(t) = b_3(t) + 2b_4(t) = -\frac{1}{2} \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 \left\{ \frac{M_T(t)}{\alpha_2 M_0} - \sin \omega t \right\} - \frac{1}{2} \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^3 \left\{ \frac{Q_T(t)}{\alpha_2 Q_0} Z + \cos \omega t \right\} \quad (8.3-7a)$$

$$b_2(t) = -b_3(t) - b_4(t) = \frac{1}{2} \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 \left\{ \frac{M_T(t)}{\alpha_2 M_0} - \sin \omega t \right\} + \frac{1}{4} \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^3 \left\{ \frac{Q_T(t)}{\alpha_2 Q_0} + \cos \omega t \right\} \quad (8.3-7b)$$

(3) 可撓継手の相対変位および断面力

いま、可撓継手の回転ばね定数およびせん断ばね定数を、それぞれ、 $K_\theta$ 、 $K_s$  とし、トンネル左端の変形角および横変位を、それぞれ、 $\theta_1(t), v_1(t)$ 、また、立坑のねじれ角および横変位を、それぞれ、 $\theta_2(t), v_2(t)$  とすれば、

$$M_T(t) = K_\theta \{\theta_1(t) - \theta_2(t)\} \quad (8.3-8a)$$

$$Q_T(t) = K_s \{v_1(t) - v_2(t)\} \quad (8.3-8b)$$

まず、立坑の鉛直軸回りのねじれ角については、 $\theta_2(t) = 0$  とみなすことができる。トンネル左端におけるねじれ角  $\theta_1$  は  $\xi = 0$  と上記積分定数を代入して求められる。

$$\begin{aligned} \frac{M_T(t)}{K_\theta} &= \theta_1(t) \\ &= \alpha_2 \theta_0 \left[ 2 \frac{\beta_2}{\gamma_2} b_2(t) - \cos \omega t \right] \\ &= \alpha_2 \theta_0 \left[ \left\{ \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right) \left\{ \frac{M_T(t)}{\alpha_2 M_0} - \sin \omega t \right\} + \frac{1}{2} \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 \left\{ \frac{Q_T(t)}{\alpha_2 Q_0} + \cos \omega t \right\} \right\} - \cos \omega t \right] \end{aligned}$$

変形移項すれば、

$$\left\{ \frac{1}{K_\theta \alpha_2 \theta_0} - \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \frac{1}{\alpha_2 M_0} \right) \right\} M_T(t) - \frac{1}{2} \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 \frac{Q_T(t)}{\alpha_2 Q_0} = - \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right) \sin \omega t + \left\{ \frac{1}{2} \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 - 1 \right\} \cos \omega t \quad (8.3-9a)$$

次に、トンネル左端  $\xi = 0$  における横変位  $v_1$  も上記積分定数を代入して求められる。立坑の横変位  $v_2$  は、地盤と同じ振動数で変位するものと仮定し、振幅を  $W_2$  とする。

$$v_2 = W_2 \sin \omega t \quad (8.3-10)$$

従って、

$$\begin{aligned} \frac{Q_T(t)}{K_s} &= v_1(t) - v_2(t) \\ &= \alpha_2 Z_2 [b_1(t) + \sin \omega t] - W_2 \sin \omega t \\ &= \alpha_2 Z_2 \left[ - \frac{1}{2} \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 \left\{ \frac{M_T(t)}{\alpha_2 M_0} - \sin \omega t \right\} - \frac{1}{2} \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^3 \left\{ \frac{Q_T(t)}{\alpha_2 Q_0} + \cos \omega t \right\} + \sin \omega t \right] - W_2 \sin \omega t \end{aligned}$$

変形移項すれば、

$$\begin{aligned} \frac{M_T(t)}{\alpha_2 M_0} + \left\{ \frac{2}{K_S \alpha_2 Z_2} \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 + \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right) \frac{1}{\alpha_2 Q_0} \right\} Q_T(t) \\ = \left\{ 1 + 2 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 \left( 1 - \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} \right) \right\} \sin \omega t - \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right) \cos \omega t \end{aligned} \quad (8.3-9b)$$

以上の(8.3-9a), (8.3-9b)より, 継手の断面力  $M_T(t), Q_T(t)$  が求まる。

$$\begin{aligned} M_T(t) = -\alpha_2 M_0 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 \frac{1}{\left\{ \frac{4Q_0}{K_S Z_2} \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^4 + 2 \frac{\beta_2}{\gamma_2} \left\{ \frac{M_0}{K_\theta \theta_0} - \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right\} + 1 \right.} \\ \times \left[ \left\{ 2 \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) + \frac{\beta_2}{\gamma_2} \frac{4Q_0}{K_S Z_2} + \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 \right\} \sin \omega t - \left\{ \frac{2Q_0}{K_S Z_2} \left( 1 - 2 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 \right) - 2 \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right\} \cos \omega t \right] \end{aligned} \quad (8.3-11a)$$

$$\begin{aligned} Q_T(t) = \alpha_2 Q_0 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^3 \frac{1}{\frac{1}{2} \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 \frac{1}{\frac{\beta_2}{\gamma_2} \frac{M_0}{\gamma_2 K_\theta \theta_0} - 1} + \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right) \frac{\alpha_2}{1 - \alpha_2} \frac{Q_0}{2K_S Z_2} + \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2} \\ \times \left[ \left\{ \frac{1}{1 - \frac{\gamma_2}{\beta_2} \frac{K_\theta \theta_0}{M_0}} - 2 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) \right\} \sin \omega t - \left\{ \frac{\frac{\gamma_2}{\beta_2} - \left( \frac{1}{2} \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 + 1 \right) \frac{K_\theta \theta_0}{M_0}}{1 - \frac{\gamma_2}{\beta_2} \frac{K_\theta \theta_0}{M_0}} \right\} \cos \omega t \right] \end{aligned} \quad (8.3-11b)$$

また, 継手に生じる変形角および相対変位は, これらをもとに次式から求められる。

$$\theta_1(t) = M_T(t) / K_\theta \quad (8.3-12a)$$

$$v_1(t) - v_2(t) = Q_T(t) / K_S \quad (8.3-12b)$$

以下, 剛結や回転自由などの特別の場合の可撓継手の断面力および相対変位を示す。

なお, 以下では, 便宜上, つぎのようにおいた。

$$\alpha_{22} \equiv \sqrt{\frac{1 - \alpha_2}{\alpha_2}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2$$

a) 剛結の場合

ここで、可撓継手がなく、トンネルが立坑と剛結されている場合について、その断面力を求める。 ( $K_\theta \rightarrow \infty, K_s \rightarrow \infty$ )

断面力を、地盤の強制変位を受ける無限連続梁の曲げモーメント振幅およびせん断力振幅との比率で示すと、曲げモーメントは、

$$\begin{aligned}
 M_T(t)/M_0 &= \alpha_2 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 \left[ \left\{ 2 \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) + \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 \right\} \sin \omega t + 2 \frac{\gamma_2}{\beta_2} \cos \omega t \right] \\
 &= \alpha_2 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 \sqrt{4 \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right)^2 + 4 \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 + \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^4} \sin(\omega t + \phi_1) \\
 &= \alpha_2 \left( \frac{1}{\alpha_{22}} \right) \sqrt{\frac{1}{\alpha_2^2} \left( \frac{W_2}{Z_2} \right)^2 + \frac{2}{\alpha_2} (\alpha_{22} - 1) \frac{W_2}{Z_2} + (1 + \alpha_{22}^2)} \sin(\omega t + \phi_1) \quad (8.3-13)
 \end{aligned}$$

この曲げモーメント振幅比を、

$$\alpha_{RM} = |M_T(t)|/M_0 = |M_T(t)|/\{EIZ_2(2\pi/L_2)^2\}$$

と表す。なお、位相差は、次式で求められる。

$$\tan \phi_1 = \frac{\gamma_2}{\beta_2} / \left\{ \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 \right\} \quad (8.3-14)$$

また、せん断力は、

$$\begin{aligned}
 Q_T(t)/Q_0 &= -2\alpha_2 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^3 \left[ \left\{ 2 \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) \right\} \sin \omega t + \frac{\beta_2}{\gamma_2} \left\{ 2 \frac{1 - \alpha_2}{\alpha_2} + \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 \right\} \cos \omega t \right] \\
 &= -4\alpha_2 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^3 \sqrt{\frac{1}{\alpha_2^2} \left( \frac{W_2}{Z_2} \right)^2 - \frac{2}{\alpha_2} \frac{W_2}{Z_2} + \frac{1}{\alpha_2} \left( 1 + \frac{1}{2} \alpha_{22} \right)} \sin(\omega t + \phi_2) \\
 &= -\sqrt{2} \alpha_2 \left( \frac{\sqrt{\alpha_{22}}}{\alpha_{22}^2} \right) \sqrt{\frac{1}{\alpha_2^2} \left( \frac{W_2}{Z_2} \right)^2 - \frac{2}{\alpha_2} \frac{W_2}{Z_2} + \frac{1}{\alpha_2} \left( 1 + \frac{1}{2} \alpha_{22} \right)} \sin(\omega t + \phi_2) \quad (8.3-15)
 \end{aligned}$$

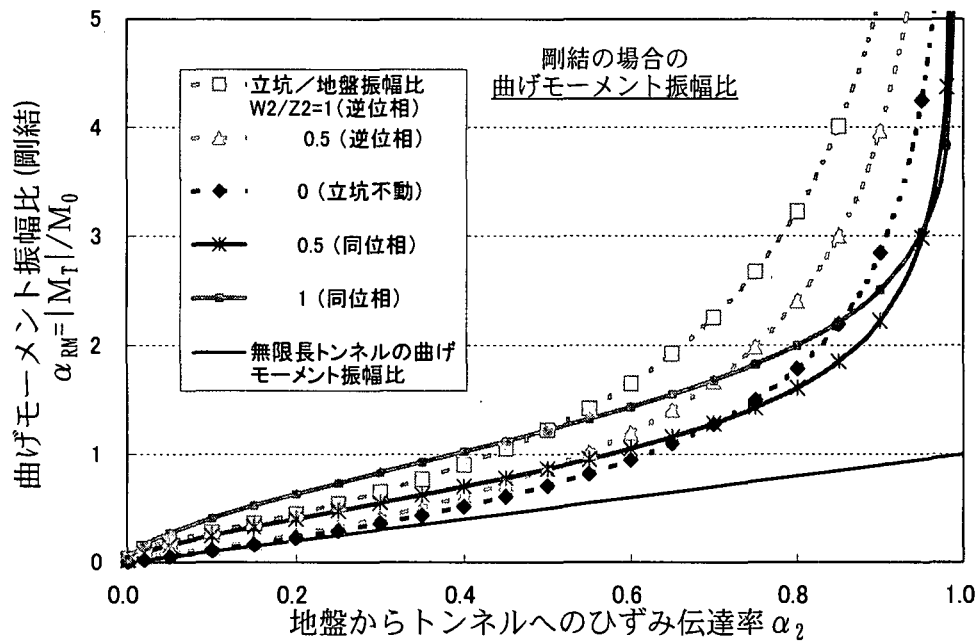
このせん断力振幅比を

$$\alpha_{RQ} = |Q_T(t)|/Q_0 = |Q_T(t)|/\{EIZ_2(2\pi/L_2)^3\}$$

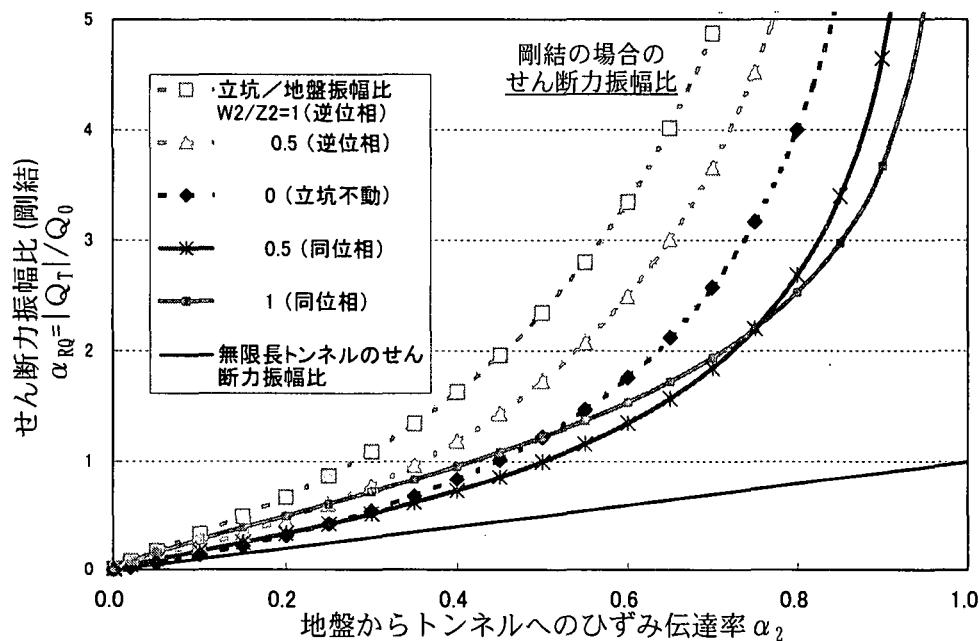
と表す。なお、位相差は、

$$\tan \phi_2 = \frac{\beta_2}{\gamma_2} \left\{ \frac{1 - \alpha_2}{\alpha_2} + \frac{1}{2} \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 \right\} / \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) \quad (8.3-16)$$

剛結の場合の曲げモーメント振幅比およびせん断力振幅比を付録図 8.3-2 (a)および(b)に示す。明らかに、剛結継手は、無限長トンネルの断面力に対し過大になり、現実的ではない。



付録図 8.3-2(a) 剛結の場合の曲げモーメント振幅比



付録図 8.3-2(b) 剛結の場合のせん断力振幅比

次に、可撓継手があり、回転ばね、または、せん断ばねが0の場合について、相対変位および断面力を求める。

b) 回転自由の可撓継手

回転自由、 $K_\theta \rightarrow 0 (K_s \neq 0)$  の場合、 $M_T(t) = 0$  である。

まず、せん断力は、

$$\begin{aligned}
 Q_T(t)/Q_0 &= \alpha_2 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^3 \frac{\left\{ 1 - 2 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) \right\} \sin \omega t - \frac{\gamma_2}{\beta_2} \cos \omega t}{\left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right) \frac{\alpha_2}{1 - \alpha_2} \frac{Q_0}{2K_s Z_2} + \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2} \\
 &= \alpha_2 \left( \frac{\sqrt{2}}{4} \frac{\sqrt{\alpha_{22}}}{\alpha_{22}^2} \right) \frac{\left\{ 1 - \frac{1}{\alpha_{22}} \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) \right\} \sin \omega t - \sqrt{2\alpha_{22}} \cos \omega t}{\left( \frac{1}{\sqrt{2\alpha_{22}}} \right) \frac{\alpha_2}{1 - \alpha_2} \frac{Q_0}{2K_s Z_2} + \frac{1}{2\alpha_{22}}} \quad (8.3-17)
 \end{aligned}$$

また、変形角は、

$$\begin{aligned}
 \theta_1(t)/\theta_0 &= -\alpha_2 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 \\
 &\times \frac{\left\{ 2 \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) + \frac{\beta_2}{\gamma_2} \frac{4Q_0}{K_s Z_2} + \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 \right\} \sin \omega t - \left\{ \frac{2Q_0}{K_s Z_2} \left( 1 - 2 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 \right) - 2 \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right\} \cos \omega t}{\frac{4Q_0}{K_s Z_2} \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^4 + 2 \frac{\beta_2}{\gamma_2}} \\
 &= -\frac{\alpha_2}{2\alpha_{22}} \frac{\left\{ 2 \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) + \frac{1}{\sqrt{2\alpha_{22}}} \frac{4Q_0}{K_s Z_2} + 2\alpha_{22} \right\} \sin \omega t - \left\{ \frac{2Q_0}{K_s Z_2} \left( 1 - \frac{1}{\alpha_{22}} \right) - 2\sqrt{2\alpha_{22}} \right\} \cos \omega t}{\frac{Q_0}{K_s Z_2} \frac{\alpha_2}{1 - \alpha_2} + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\alpha_{22}}}} \quad (8.3-18)
 \end{aligned}$$

さらに、相対変位は、

$$\begin{aligned}
 v_1(t) - v_2(t) &= \alpha_2 Q_0 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^3 \frac{\left\{ 1 - 2 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) \right\} \sin \omega t - \frac{\gamma_2}{\beta_2} \cos \omega t}{\left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right) \frac{\alpha_2}{1 - \alpha_2} \frac{Q_0}{2Z_2} + \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 K_s} \\
 &= \alpha_2 Q_0 \left( \frac{\sqrt{2}}{4} \frac{\sqrt{\alpha_{22}}}{\alpha_{22}^2} \right) \frac{\left\{ 1 - \frac{1}{\alpha_{22}} \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) \right\} \sin \omega t - \sqrt{2\alpha_{22}} \cos \omega t}{\frac{1}{\sqrt{2\alpha_{22}}} \frac{\alpha_2}{1 - \alpha_2} \frac{Q_0}{2Z_2} + \frac{1}{2\alpha_{22}} K_s} \quad (8.3-19)
 \end{aligned}$$



c) 回転自由・せん断剛結の可撓継手

次に、回転自由でせん断剛結の可撓継手の場合、 $M_T(t) = 0$  で、 $K_\theta \rightarrow 0, K_s \rightarrow \infty$  ます、せん断力は、

$$\begin{aligned} Q_T(t)/Q_0 &= \alpha_2 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^3 \left[ \left\{ \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 - 2 \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) \right\} \sin \omega t - \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^3 \cos \omega t \right] \\ &= \alpha_2 \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\sqrt{\alpha_{22}}}{\alpha_{22}^2} \right) \sqrt{\frac{1}{\alpha_2^2} \left( \frac{W_2}{Z_2} \right)^2 - \frac{2(1 + \alpha_{22}) W_2}{\alpha_2 Z_2} + \frac{1}{\alpha_2} (1 + 2\alpha_{22})} \sin(\omega t - \phi_3) \end{aligned} \quad (8.3-20)$$

このせん断力振幅比を、

$$\alpha_{jQ} = |Q_T(t)|/Q_0 = |Q_T(t)|/\{EIZ_2(2\pi/L_2)^3\}$$

と表すものとする。なお、位相差は、

$$\tan \phi_3 = \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^3 / \left\{ \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 - 2 \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) \right\} \quad (8.3-21)$$

次に、変形角は、

$$\begin{aligned} \theta_1(t)/\theta_0 &= -\alpha_2 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right) \left[ \left\{ \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 \right\} \sin \omega t + \frac{\gamma_2}{\beta_2} \cos \omega t \right] \\ &= -\alpha_2 \frac{1}{\sqrt{2\alpha_{22}}} \sqrt{\frac{1}{\alpha_2^2} \left( \frac{W_2}{Z_2} \right)^2 - \frac{2(1 - \alpha_{22}) W_2}{\alpha_2 Z_2} + \frac{1}{\alpha_2}} \sin(\omega t + \phi_4) \end{aligned} \quad (8.3-22)$$

この変形角振幅比を、

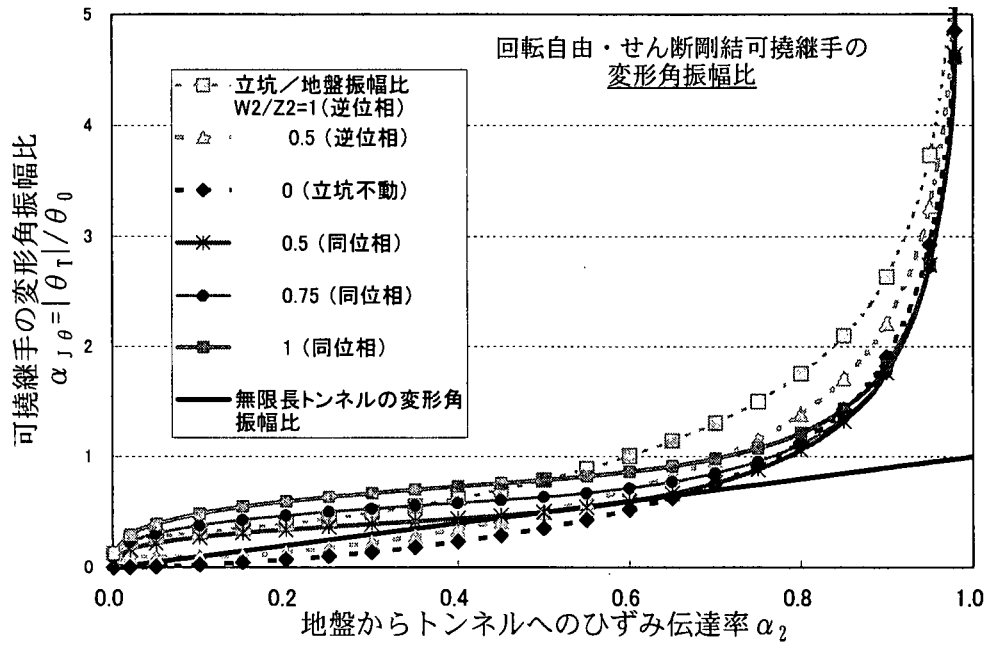
$$\alpha_{j\theta} = |\theta_1(t)|/\theta_0 = |\theta_1(t)|/(2\pi Z_2/L_2)$$

と表すものとする。なお、位相差は、

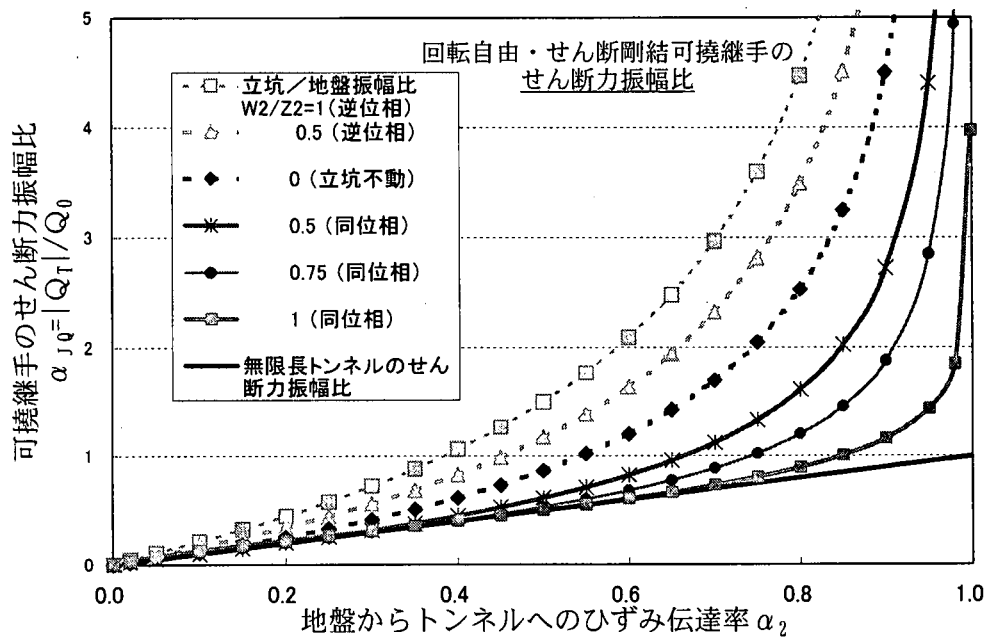
$$\tan \phi_4 = \frac{\gamma_2}{\beta_2} / \left\{ \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 \right\} \quad (8.3-23)$$

回転自由・せん断剛結の可撓継手の変形角振幅比とせん断力振幅比を、それぞれ、付録図 8.3-3(a)および(b)に示す。

可撓継手の変形角(たわみ角)振幅 $\theta_1$ は、ひずみ伝達率 $\alpha_2$ が0.7程度以下では、地盤変形の変形角 $\theta_0$ を超えないが、ひずみ伝達率 $\alpha_2$ がこれより大きくなるに従って、次第に大きくなる。継手のせん断剛性を剛結としているので、ひずみ伝達率 $\alpha_2$ が大きい(地盤の剛性が大、またはトンネルの剛性が小)場合、立坑と地盤のわずかな変位差が大きな変形角とせん断力を生む。従って、可撓継手には若干のせん断変位を許容する機構が望ましい。



付録図 8.3-3(a) 回転自由・せん断剛結可撓継手の変形角振幅比



付録図 8.3-3(b) 回転自由・せん断剛結可撓継手のせん断力振幅比

d) 完全自由継手

さらに、立坑と全く自由な接合、 $K_\theta \rightarrow 0, K_s \rightarrow 0$  の場合、断面力はゼロで、

$$M_T(t) = 0, \quad Q_T(t) = 0$$

まず、変形角は、

$$\begin{aligned} \theta_1(t)/\theta_0 &= -\alpha_2 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^4 \left[ \frac{\beta_2}{\gamma_2} \sin \omega t - \left\{ \frac{1}{2} - \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 \right\} \cos \omega t \right] \\ &= -4(1-\alpha_2) \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 \sqrt{\frac{1}{4} + \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^4} (\omega t - \phi_5) \\ &= -\sqrt{\alpha_2} \sin(\omega t - \phi_5) \end{aligned} \quad (8.3-24)$$

この変形角振幅比を、

$$\alpha_{F\theta} = |\theta_1(t)|/\theta_0 = |\theta_1(t)|/(2\pi Z_2/L_2)$$

と表すものとする。なお、位相差は、

$$\tan \phi_5 = \frac{1}{2} \frac{\gamma_2}{\beta_2} - \frac{\beta_2}{\gamma_2} \quad (8.3-25)$$

また、相対変位は、

$$\begin{aligned} \{v_1(t) - v_2(t)\}/Z_2 &= \alpha_2 \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 \left[ \left\{ \frac{1}{2} - \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) \right\} \sin \omega t - \frac{1}{2} \frac{\gamma_2}{\beta_2} \cos \omega t \right] \\ &= \alpha_2 \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^4 - \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2 \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) + \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right)^2 + \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^4 \frac{1}{4} \left( \frac{\gamma_2}{\beta_2} \right)^2} \sin(\omega t - \phi_2) \\ &= \alpha_2 \sqrt{\left( \frac{1}{\alpha_2} - 1 \right) \left( 1 + 2 \sqrt{\frac{1}{\alpha_2} - 1} \right) - 2 \sqrt{\frac{1}{\alpha_2} - 1} \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) + \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right)^2} \sin(\omega t - \phi_2) \\ &= \alpha_2 \sqrt{\alpha_{22}^2 (1 + 2\alpha_{22}) - 2\alpha_{22} \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) + \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right)^2} \sin(\omega t - \phi_6) \end{aligned} \quad (8.3-26)$$

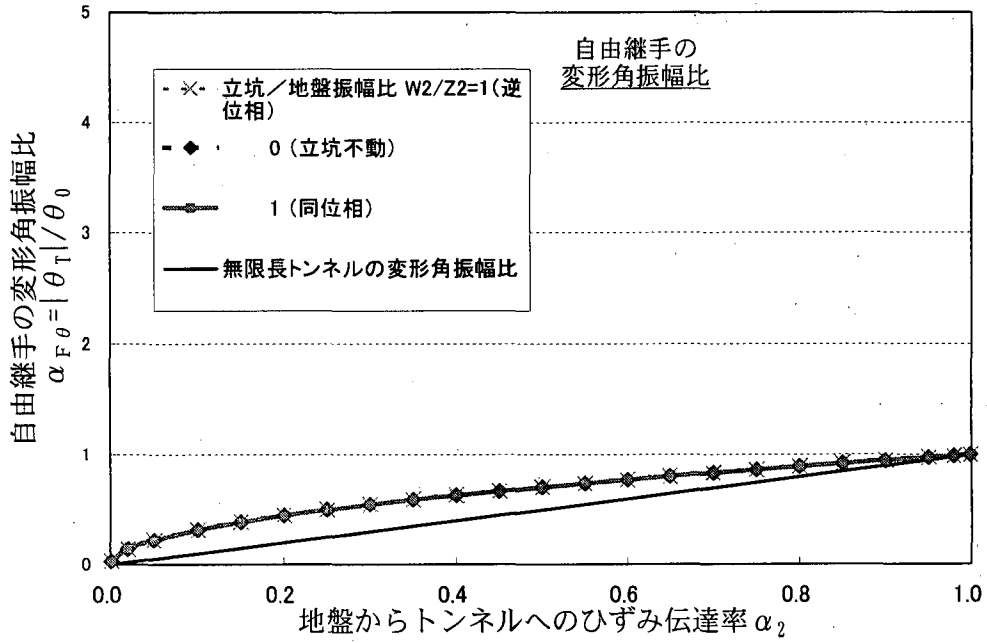
この相対変位の地盤変位との振幅比を、

$$\alpha_{FD} = \{|v_1(t) - v_2(t)\}|/Z_2$$

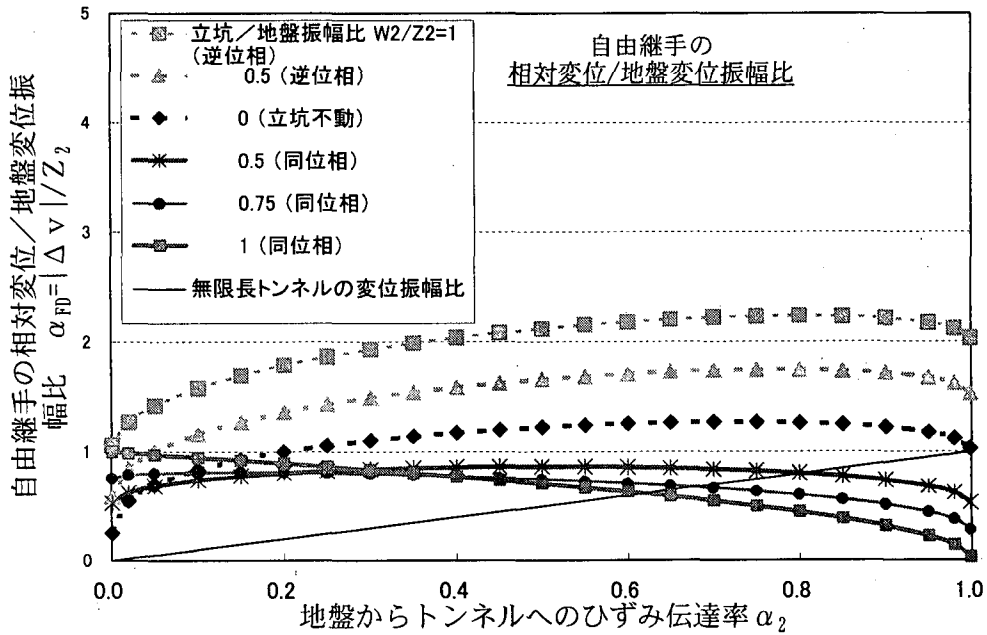
と表すものとする。なお、位相差は、

$$\tan \phi_6 = \frac{\gamma_2}{\beta_2} / \left\{ 1 - 2 \left( \frac{\beta_2}{\gamma_2} \right)^2 \left( \frac{W_2}{\alpha_2 Z_2} - 1 \right) \right\} \quad (8.3-27)$$

完全自由継手の変形角振幅比および相対変位/地盤変位振幅比を、それぞれ、付録図 8.3-4(a)および(b)に示す。完全自由継手の変形角振幅は立坑の変位に依存しない。相対変位振幅は、立坑が地盤と同位相で変位する限り、地盤の変位振幅を超えることはなく、逆位相の場合、地盤変位振幅の約2倍、もしくはそれより若干大きくなることもある。



付録図 8.3-4(a) 完全自由継手の変形角振幅比



付録図 8.3-4(b) 完全自由継手の相対変位/地盤変位振幅比

## 資料9 基盤の設定法および等価設計法の適用性に対する検討

ここでは、付録の2章で示された解析手法の妥当性に対するいくつかの検討結果を示す。

大阪の地盤のように、地盤が弾性と仮定した条件下で地表の地震動が与えられている場合には、地盤の非線形を考慮した地震応答解析を行うために、まず、弾性の条件で定義された地表の波形から基盤入射波を求める必要がある。この作業は重複反射理論によるしかないが、次の二つの問題がある。

### (1) 微小ひずみ時の減衰

弾性条件として、地盤の剛性の評価は明瞭である。しかし、減衰については必ずしも明瞭とはいえない。考え方として次のようなものが考えられる。

- ①減衰を0とする。
- ②散乱の減衰程度を考える。
- ③非線形解析に用いる動的変形特性を微小ひずみにも適用して計算を行う。

この減衰の設定法により、入射波は変化する。一方、非線形解析では、等価線形法を用いる場合には小さいひずみに対する剛性や減衰は解析結果には影響しない。つまり、入射波を求める際の減衰の設定方法により非線形解析における地表の応答が異なる事になる。

減衰の評価については、結論がでていないわけではないが、例えば余震合成法で地表の応答を求めることを考えると、余震記録には散乱の減衰の影響が含まれていると考えられる。そこで、ここでは、散乱の減衰相当として2%の減衰を考えることにする。経験式としての散乱の減衰を考慮する解析は9.3節で検討する。

### (2) 基盤の深さ

入射波を求める基盤は、工学的基盤であることが好ましい。工学的基盤は、理想的には  $V_s=700\text{m/s}$  程度が好ましいと考えられるが、設計指針などでは、 $N$  値が50程度の、建造物の支持地盤に相当する  $V_s=300\sim 400\text{m/s}$  が用いられる事も多い。

さらに、事例解析<sup>9)</sup>によれば、深いところでも非線形挙動が起こるような大きなひずみが発生している。解析ではどこまで非線形として扱うべきかという問題がある。

工学的基盤として妥当なせん断波速度については9.1節、深いところの非線形については9.2節、散乱の減衰については9.3節で検討する。また、最後に9.4節では等価線形解析の適用性に対する検討を示す。

## 9. 1 基盤の深さに対する検討

ここでは、まず、基盤の深さについて検討する。

付録計算例の表2.1.1-1（以下、表2.1.1-1（計算例）と表す）に示した大阪の地盤ではGL-75mまでの地盤しか分からない。ここでも  $V_s=450\text{m/s}$  である。したがって、基盤の取り

方を検討するには、より深い地盤が必要である。そこで、文献1を参考にして、下部の地盤を設定する。表2.1.1-1（計算例）と文献1の地盤を比較すると、表2.1.1-1（計算例）の地盤の GL-75m 直上の層（第18層）は Ma11と想定される。そこで、現在の基盤に文献4のデータの、上面深度104.8m 以下の部分をつけることにする。付録表9.1に、表2.1.1-1（計算例）より下の部分を示す。

基盤として次の4カ所を検討する。

- ・地震基盤：GL-1505.2m 位置
- ・工学的基盤： $V_s=700\text{m/s}$  の層で、具体的には GL-355.5m の Ma3の下層。以下、工学的基盤700として引用。
- ・工学的基盤： $V_s=500\text{m/s}$  の層を設定する。具体的には GL-153.7m の Ma9の下層である。以下、工学的基盤500として引用。
- ・通常の基盤：表2.1.1-1（計算例）の基盤で、GL-75m 位置。以下、通常基盤として引用。

これに対して、次の7通りの方法で非線形解析を行った。

Model 0:通常基盤まで弾性で降ろし、そのまま非線形で上げた計算。

Model 1:地震基盤まで弾性で下ろし、全層を非線形で上げた計算。ここで、GL-75m 以深については、Hardin-Drnevich モデルで非線形特性をモデル化する。この際、粘土（Ma-1～Ma10）については、文献1に示されている粘土の  $G-\gamma$  関係を拡大解釈し、基準ひずみを0.25%とする。また、砂については0.2%を与える。さらに、減衰は、最大減衰を20%、最小減衰を2%とする。

Model 2:上記と同じモデルであるが、弾性域をもう少し広げ、粘土は0.4%、砂は0.3%とする。

Model 3:本質的にはモデル1と同じである。ただし、非線形計算の際、工学的基盤700より下の層は弾性とする。

Model 4:本質的にはモデル1と同じである。ただし、非線形計算の際、工学的基盤500より下の層は弾性とする。

Model 5:工学的基盤700が半無限層として地表の結果を降ろし、非線形で上げた計算。

Model 6:工学的基盤500が半無限層として地表の結果を降ろし、非線形で上げた計算。

なお、通常基盤より下は、前に示した層序の各層を一つの層にモデル化し、かなり厚い層でも細分化することはしていない。非線形計算の際には、非線形特性を代表させる意味では再分割が必要な可能性もあるが、ひずみ値がそれほど大きくないこと、表層と異なり層内で非常に違っている可能性はあまりないと考えられることから、特に問題は無いと考えられる。

付録図9.1には、地表で与えた地震波から入射波を求める弾性計算の際の最大応答値を示す。ここで、地表から GL-75m、GL-75m～616m、GL-616m～地震基盤で図の縮尺が異なっている。

加速度、せん断応力、せん断ひずみについては、図上で全く区別できない程度結果が一致している。変位分布は基準となる深さが異なるので、異なっている。そこで、変位分布の一致性を確かめるために、浅い基盤のケースの最大変位の図を、地表で深い地盤のケースに一致するようにずらしたのが付録図9.2である。(加速度、応力、ひずみは全く同じ)。このようにしても、変位は全く同じにはならず、差がある。これは、最大変位が発生する時間が異なるからと考えられる。

付録図9.3には、深い基盤から立ち上げた4つのケースを deconvolution の弾性のケースと併せてしめす。弾性と非線型では大きな差がある。一方、非線形解析の4つのケースはそれなりに一致しており、余り差はない。詳細に変位分布を見ると、弾性の部分を増やすほど弾性の応答に近づいていることが明瞭に見える。しかし、その差はわずかである。

付録表9.1 大阪地盤の GL-75mより深い部分の想定地盤

番号	深さ (m)	元の深 さ(m)	層厚 (m)	分割	土 質	$V_s$ (m/s)	$\gamma$ (tf/m <sup>3</sup> )	$V_p$ (km/s)
19	95.2	125	20.2		礫砂シルト	480.3	1.72	1.908
	114.7	144.5	19.5		Ma10	385.9	1.58	1.605
	131.6	161.4	16.9		砂または砂礫	496.9	1.79	1.879
	153.7	183.5	22.1		Ma9	451.6	1.61	1.625
	168.7	198.5	15.0		砂または砂礫	507.8	1.77	1.823
	193.1	222.9	24.4		Ma8	471.7	1.65	1.683
	206.6	236.4	13.5		砂または砂礫	544.1	1.83	1.879
	249.0	278.8	42.4		Ma7~Ma6	503.6	1.68	1.700
	263.9	293.7	14.9		砂または砂礫	590.8	2.06	1.899
	275.0	304.8	11.1		Ma5	496.6	1.78	1.673
	302.5	332.3	27.5		砂または砂礫	648.0	2.07	1.947
	321.4	351.2	18.9		Ma4	580.6	1.84	1.735
	325.9	355.7	4.5		砂または砂礫	698.9	2.09	1.975
	355.5	385.3	29.6		Ma3	593.6	1.81	1.758
	388.0	417.8	32.5		砂または砂礫	722.1	2.07	2.010
	406.4	436.2	18.4		Ma2	628.6	1.91	1.821
	416.2	446.0	9.8		砂シルト互層	695.1	1.99	1.938
	418.9	448.7	2.7		粘土 (非海成)	682.7	1.98	1.919
	422.1	451.9	3.2		砂シルト互層	728.6	2.07	2.016
	424.6	454.4	2.5		粘土 (非海成)	662.9	2.01	1.925
	440.2	470.0	15.6		砂シルト互層	723.6	2.01	1.988
	448.2	478.0	8.0		粘土 (非海成)	664.8	1.95	1.882
	472.2	502.0	24.0		砂シルト互層	797.1	2.05	2.049
	477.6	507.4	5.4		Ma1	670.7	1.85	1.785
	494.6	524.4	17.0		砂シルト互層	763.6	2.10	2.073
	497.4	527.2	2.8		粘土 (非海成)	634.3	1.88	1.815
	525.2	555.0	27.8		砂シルト互層	809.6	2.11	2.117
	539.2	569.0	14.0		Ma0	713.4	1.93	1.920
	573.8	603.6	34.6		砂シルト互層	837.1	2.13	2.170
	582.0	611.8	8.2		Ma-1	701.4	1.93	1.853
	587.8	617.6	5.8		砂シルト互層	869.1	2.07	2.247
	606.5	636.3	18.7		砂シルト互層	863.7	2.10	2.197
	613.3	643.1	6.8		砂または礫	794.2	2.02	2.062
	616.0	645.8	2.7		砂シルト互層	775.2	2.13	2.197
	1505.2	1535	889.2		砂または礫	981.2	2.14	2.433
	基盤	基盤			大阪層群下部	3183.9	2.70	5.644

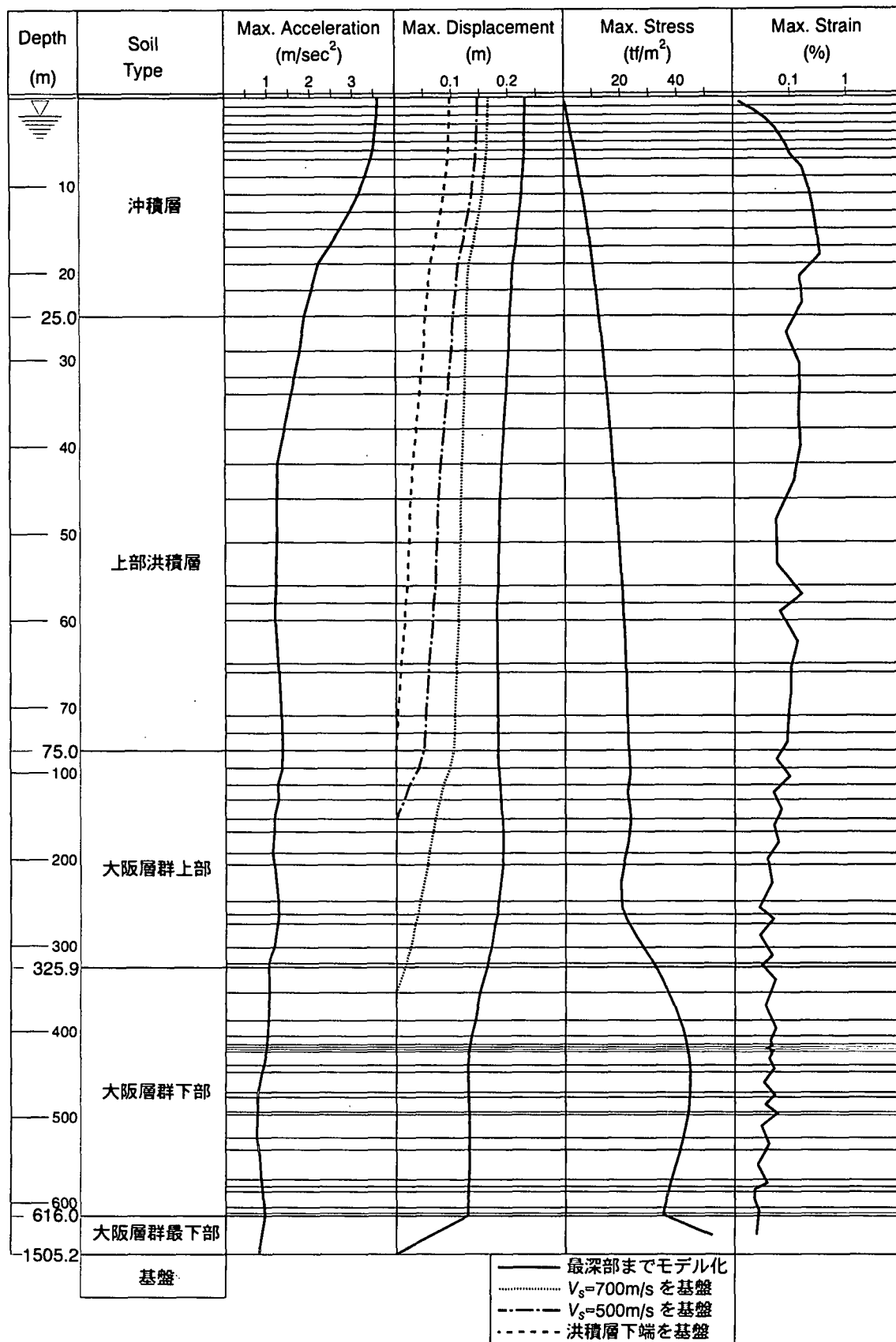
付録図9.4には工学的基盤700を基盤としたときの応答が示されている。比較のために Model1（地震基盤上を非線形）とした結果も示されている。最大変位を除けば、Model1と Model5の結果は一致している。したがって、表層の応答に着目するのであれば工学的基盤700は十分良好な基盤と考えられる。

付録図9.5には、工学的基盤500について上と同じ計算が示されている。深い基盤のケースと比べ、差が少し大きくなっているようにも見えるが、全体的な状況はほとんど変わらない。すなわち、工学的基盤500でも十分良好な基盤と考えられる。

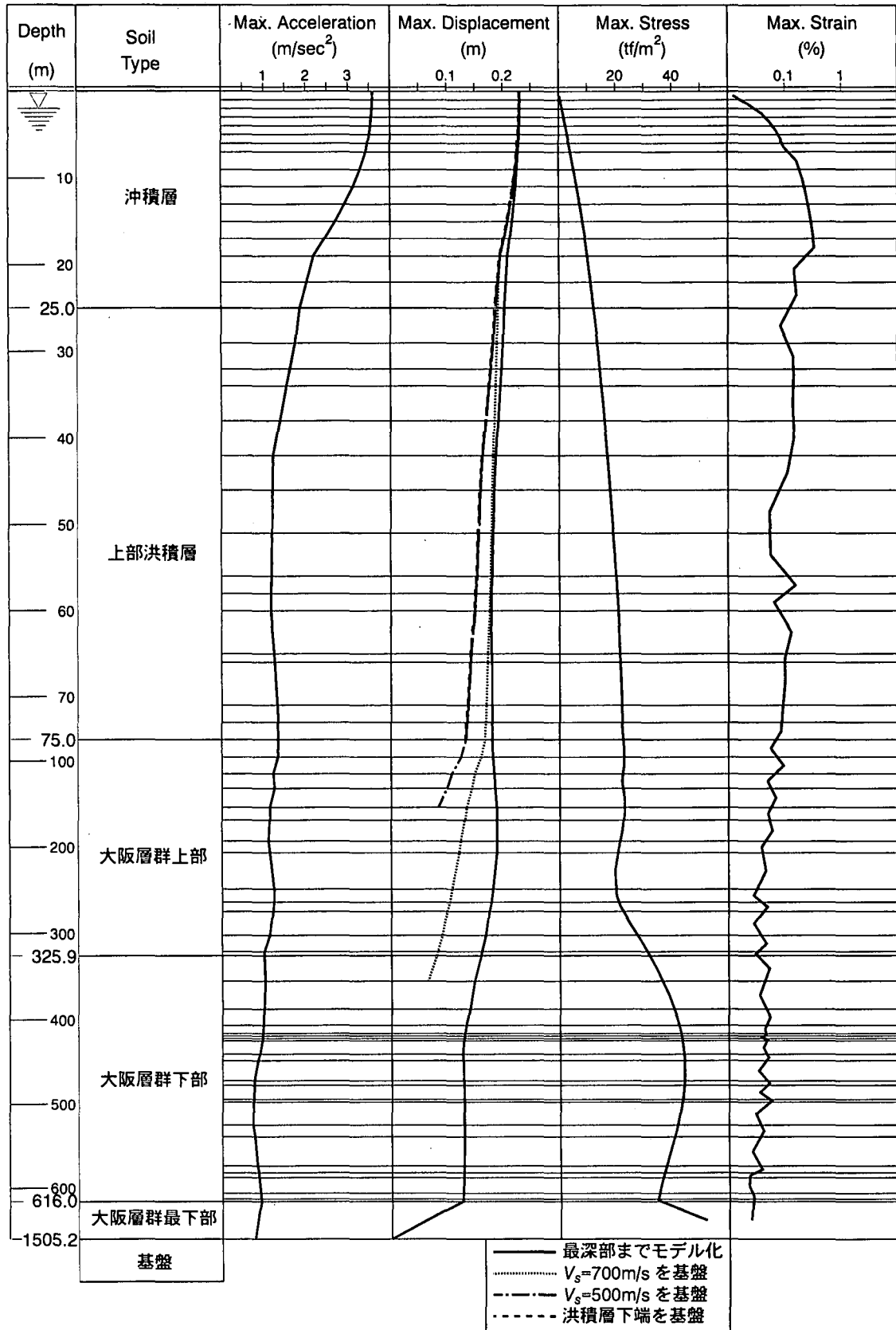
付録図9.6に通常基盤について上と同じ計算が示されている。深い基盤のケースと比べれば差はかなり拡大している。ただし、注意が必要なのは、通常基盤のケースでは基盤の  $V_s$  は450m/s であるのに対し、深い地盤をつけた場合には、この層の  $V_s$  は480m/s で、異なっている。この意味で、通常基盤のケースは他のケースと完全に同じ比較をしているわけではない。差が大きいのはこのモデル化の違いである可能性もある。

これらの結果から総合的に判断すると、表2.1.1-1（計算例）に示した部分だけで  $V_s=450\text{m/s}$  の層を基盤として計算しても良さそうと考えられる。

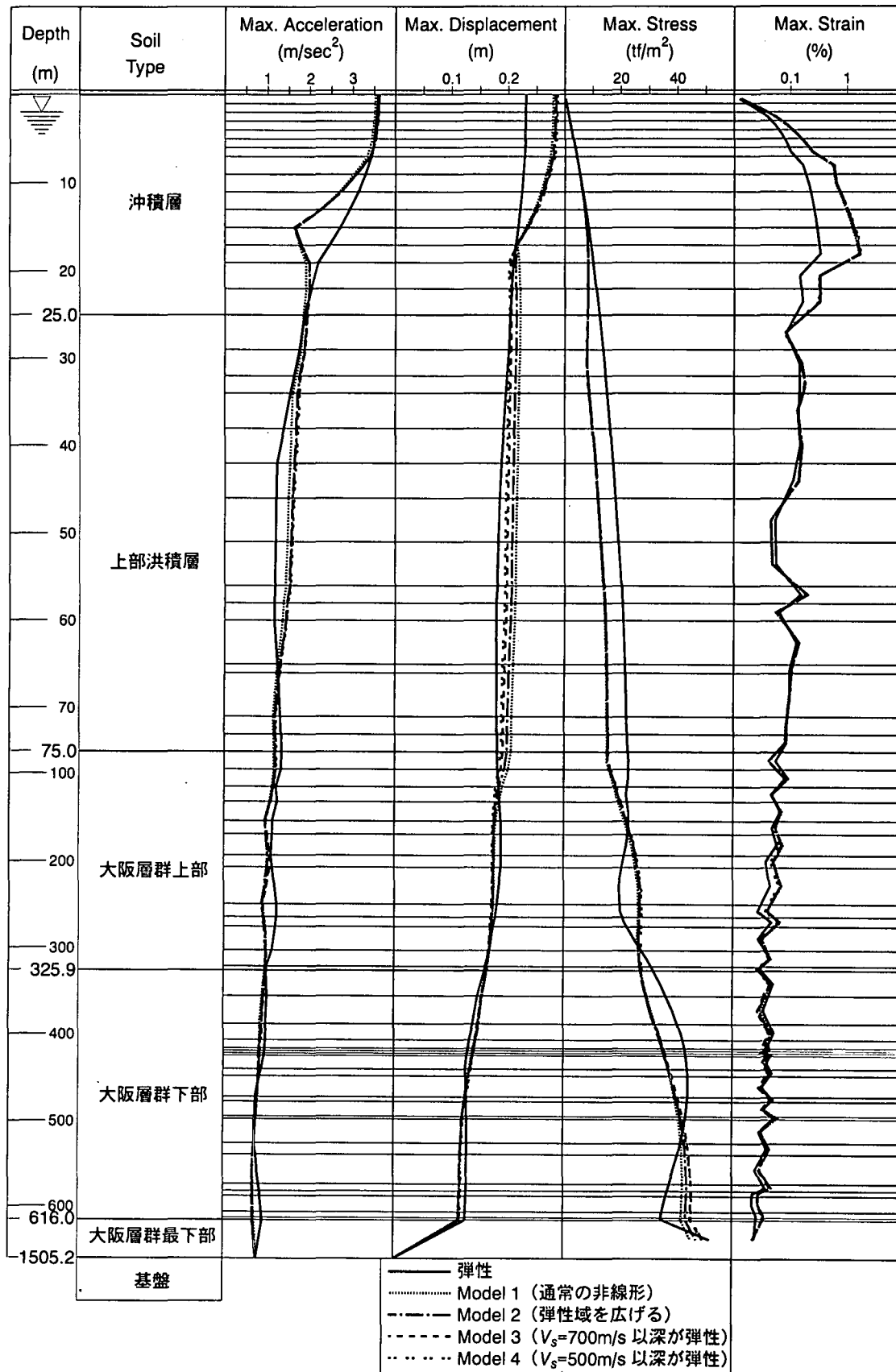




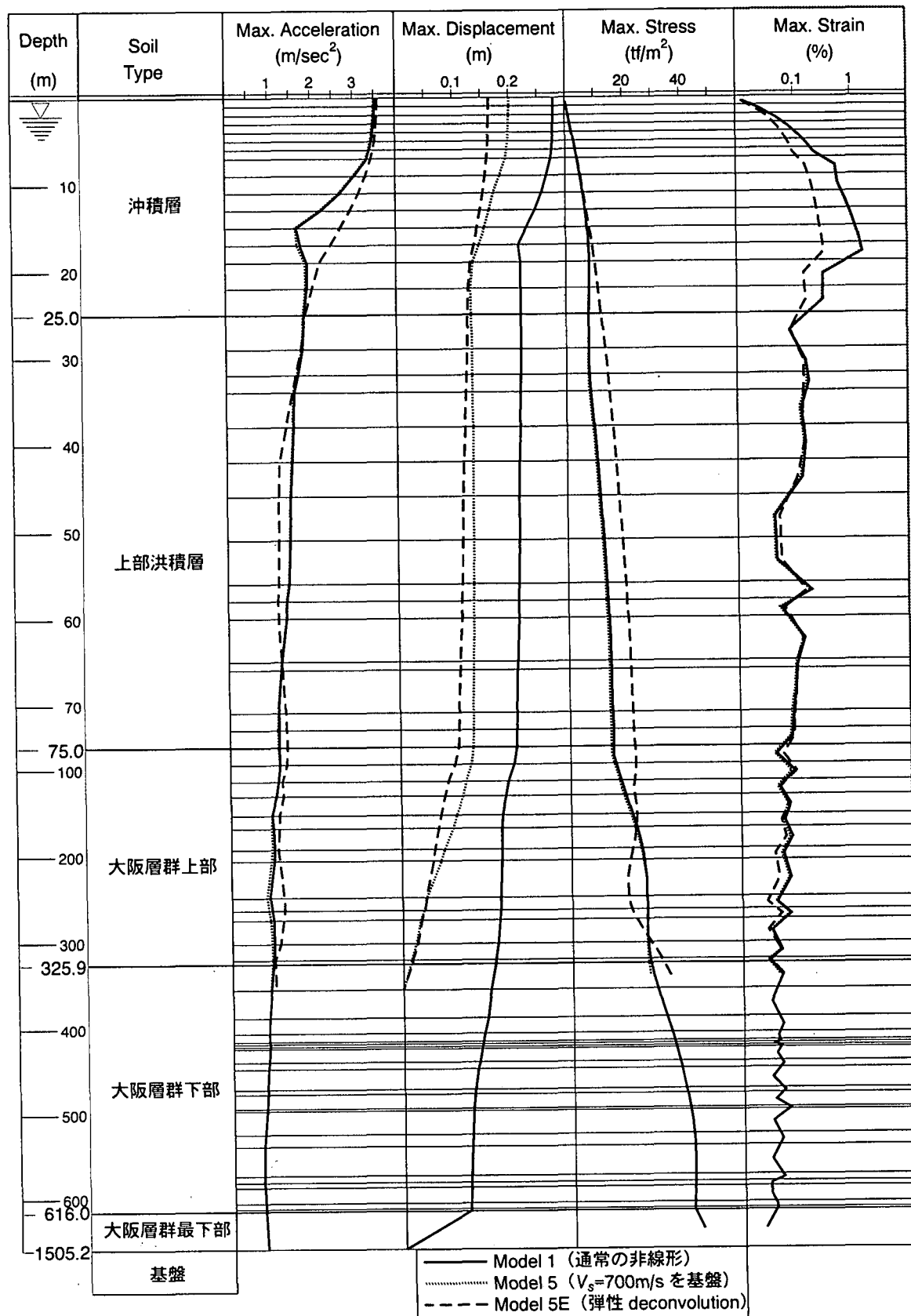
付録図9.1 弾性で基盤が異なるときの最大応答値の比較



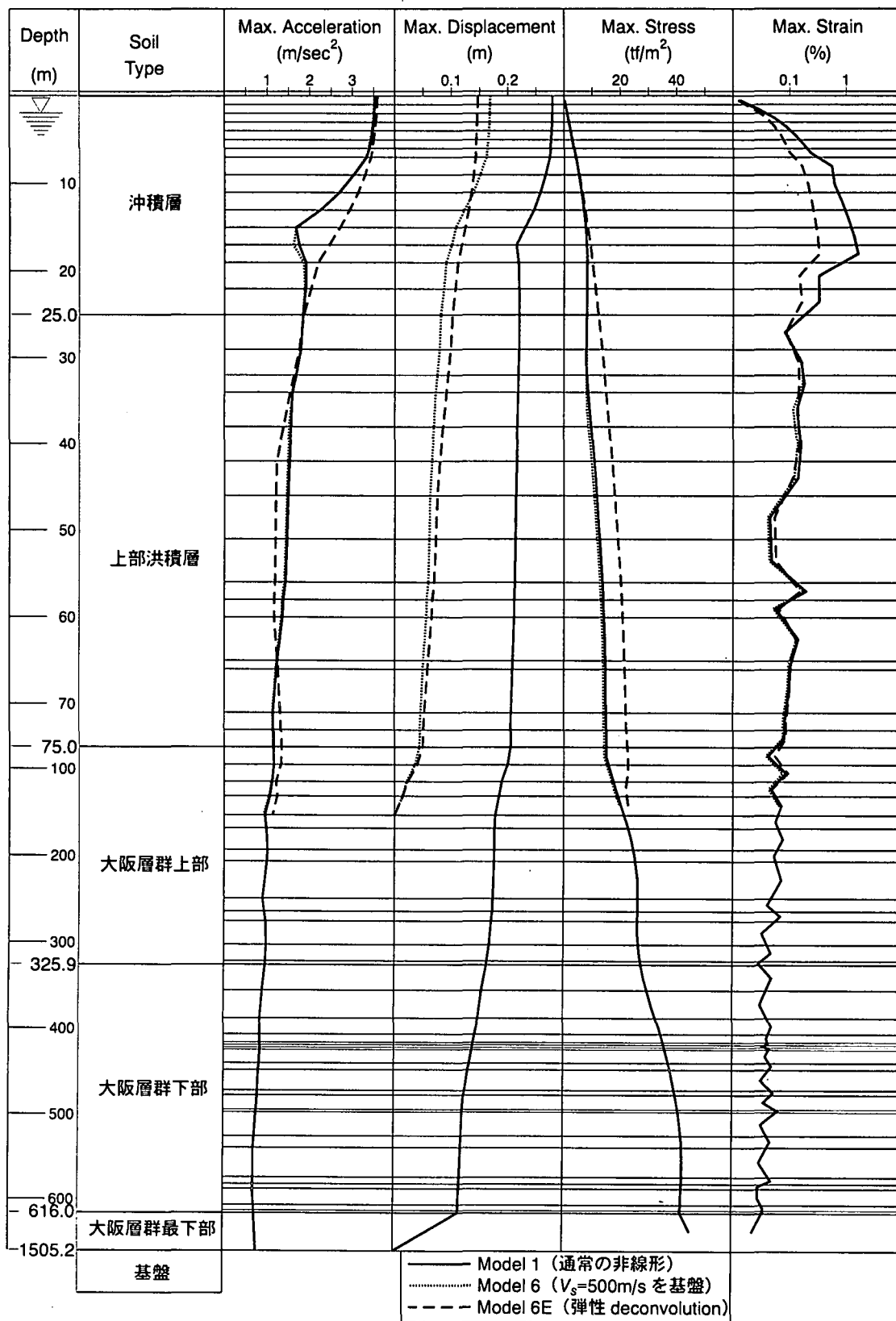
付録図9.2 弾性で地表の変位を合わせたときの最大応答値の比較



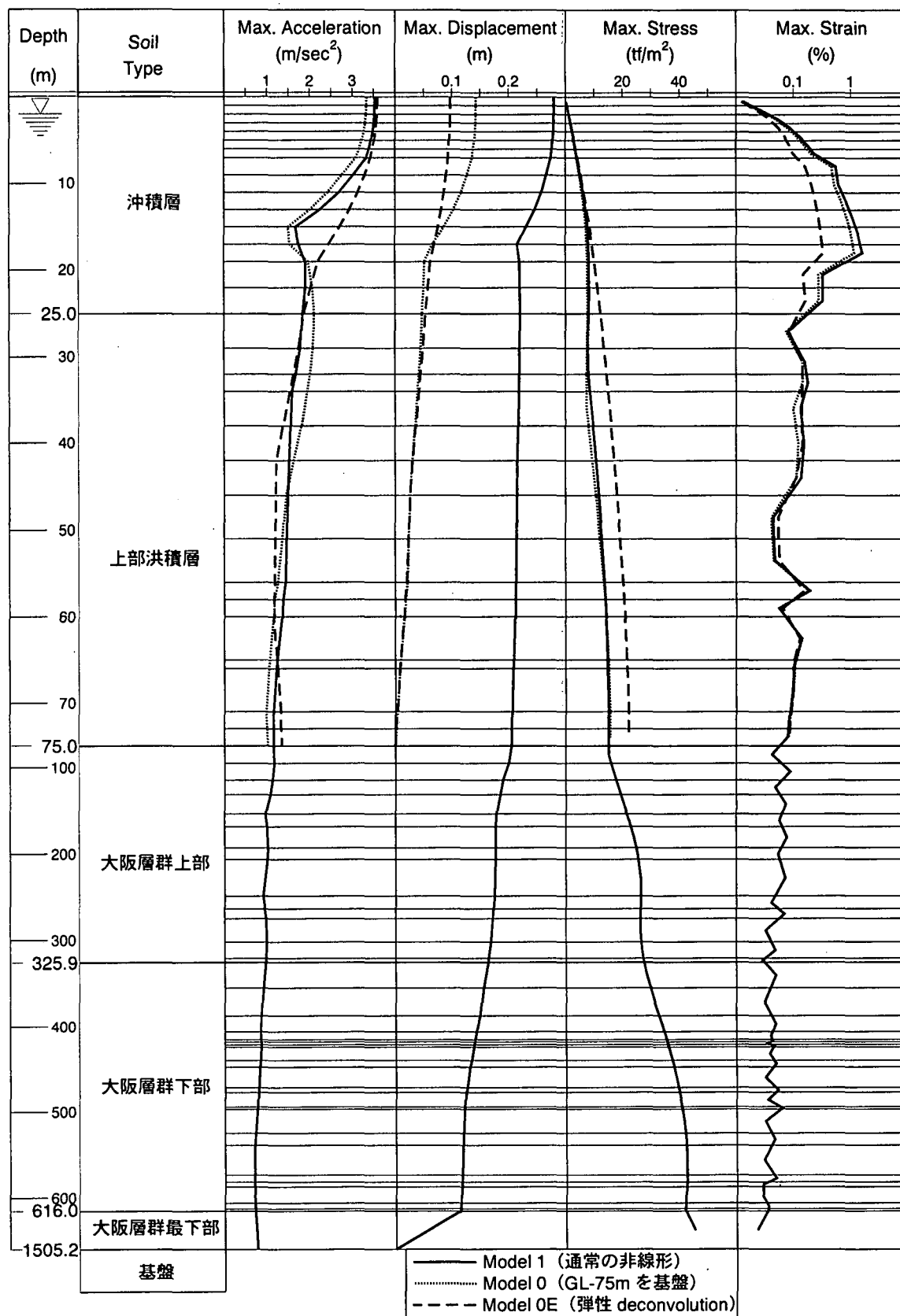
付録図9.3 深い基盤を用いたときの最大応答値の比較



付録図9.4 Vs=700m/sを基盤としたケースの最大応答値の比較



付録図9.5 Vs=500を基盤としたケースの最大応答値の比較



付録図9.6 通常基盤を基盤としたケースの最大応答値の比較

## 9. 2 基盤の非線形挙動に対する検討

地盤の地震応答解析を行う場合には、適切な地震動を設定する必要がある。ここで、地震動の設定方法には大きく三つの方法がある。すなわち、得られた地震記録を用いる場合、地表で設定する場合、(工学的)基盤で設定する場合である。二つ目の方法は特に1995年兵庫県南部地震以降よく行われるようになった小地震合成法による地震動作成の様な設定方法を意味し、その誘導の性質から、地盤は弾性的に挙動していると仮定している。また、地盤の弾性挙動時における地震動が設計用地震動のケースもある。

最初の、地震記録を設計用に用いる方法は、サイトの特性に応答が大きく依存しているので、設計に用いるには一旦基盤における地震動に戻す必要があるが、大きな非線形性、さらに本論で検討するのと同じ基盤設定の問題があり、精度よい計算は困難である。また、最後の方法は基盤の設定位置により地表の応答は異なる。その意味で、二つ目の方法はかなり実用的な設定方法かもしれない。

この方法は、地盤が弾性的に挙動することを仮定しているので、実用に際しては基盤の地震動を求める必要がある。ここで、いくつかの問題が発生する。すなわち、弾性の応答であるから散乱の減衰の影響が大きい可能性があること、基盤をどこに設定するかという問題である。最初の問題に関しては9.3節で報告するので、ここでは二つ目の問題に対して考察する。

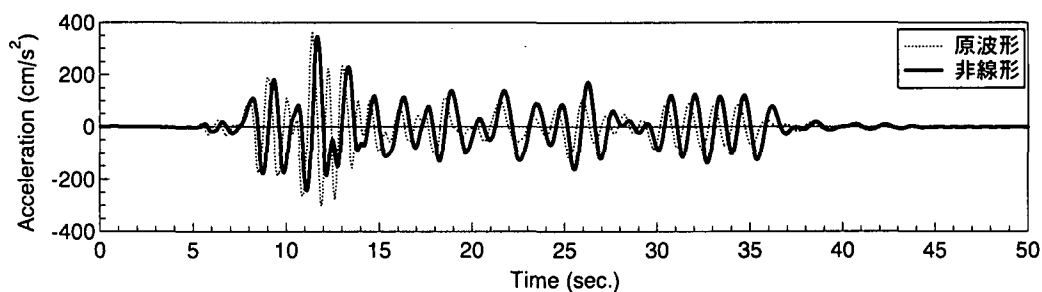
地表の地震動を引き戻す層は、工学的基盤と考えられる。しかし、工学的基盤の定義は明瞭ではない。原子力関係<sup>2)</sup>では、 $V_p=700\text{m/s}$ 程度が設定されているのに対し、最近の設計指針では300~400m/sが設定されることが多い。後者は工学的な意味合いというより、実務上構造物の支持地盤となる地盤以深の地盤調査はほとんど行われていないことに起因している。筆者は、工学的基盤は、表層の応答に応答されない層、つまり表層からの反射波がほとんどないそうとして定義するべきと考えているが、その設定方法については未だ模索中である。

本論では、その根拠作りの一つとして行った結果を報告する。特に着目するのは、地盤の非線形である。すなわち、文献1)3)などではかなり深い地盤まで非線形化する可能性が示され、それらが地表の応答に影響することが示されている。しかし、これらの検討では基盤の波形を入力として与えており、非線形性の特性から言って地表の応答が変化するのは当然といえる。ここでは、最初に述べたように、地盤が弾性的に挙動すると仮定して設定された地表の地震動に対して、基盤の深さと地盤の非線形性が最終的な地表の地震動に与える影響を検討する。

### 9.2.1 解析モデルと解析ケース

解析に用いるモデルは9.1節で示したものと同一である。設定する地震波も同一である。

表層の非線形特性も9.1節で設定したものと同一である。GL-75m以深はHardin-Drnevichモデルを用い、粘土は、文献3)の $G-\gamma$ 関係より基準ひずみを0.25%、砂については一律0.2%とする。さらに、最大減衰を20%とする



付録図9.7 非線形解析による地表の加速度時刻歴

まず、基盤として次の4つを検討対象とする。

- ・地震基盤：GL-1505.2m
- ・工学的基盤-1： $V_s=700\text{m/s}$  (Ma3の下)
- ・工学的基盤-2： $V_s=500\text{m/s}$  (Ma9の下)
- ・工学的基盤-3：表2.1.1-1 (計算例) の GL-75m (通常基盤と引用)

次に、計算として以下の7つのケースを行う。

- ・ Model 0:通常基盤までの計算
- ・ Model 1:地震基盤までの計算
- ・ Model 2:上と同じモデルで、弾性域を大きくする
- ・ Model 3:Model 1と同で、工学的基盤-1より下は弾性
- ・ Model 4: Model 1と同で、工学的基盤-2より下は弾性
- ・ Model 5:工学的基盤-1が半無限層
- ・ Model 6:工学的基盤-2が半無限層

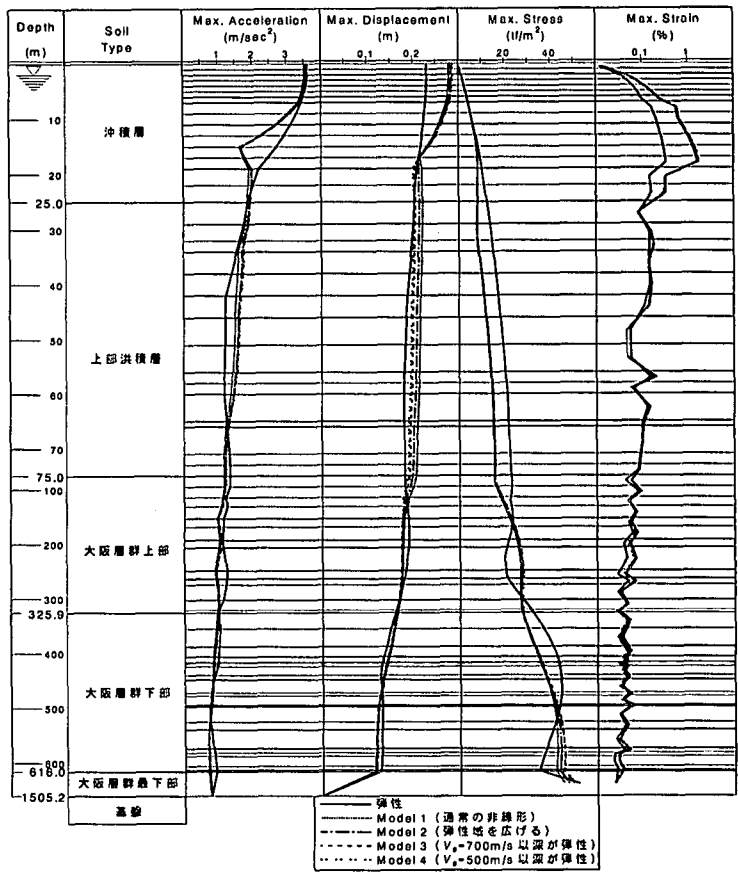
## 9.2.2 解析結果と考察

解析のうち、Model 1の計算結果を付録図9.7に示すが、非線形の効果は長周期化としてみることができる。

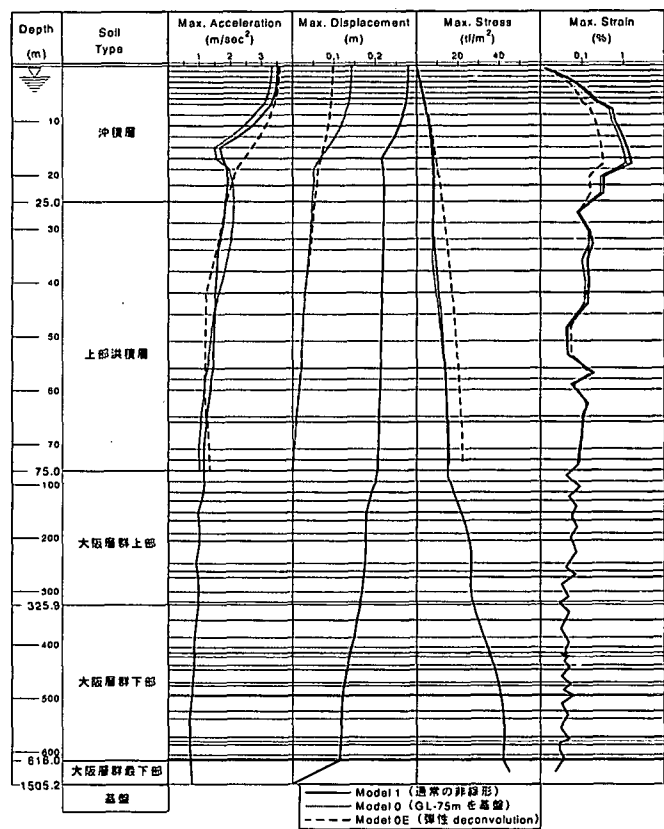
計算例として付録図9.8、付録図9.9に最大応答値を比較して示す。下方でも最大ひずみは0.01%より相当大きく非線形挙動が期待される。付録図9.8では下方の層の非線形をしなかったケースを比較しているが、弾性と非線形の応答では大きな差がみられるが非線形解析どうしの差はあまりない。次に付録図9.9では、GL-75m を基盤として設定したケースを検討しているが、加速度、応力、ひずみとも若干の差が見える。ページの都合から示さなかったが工学的基盤-1、-2では差はほとんどみられなかった。従って、 $V_s=500\text{m}$  は基盤として妥当であるが、付録図9.9は設計者の判断が必要な領域と考えられる。

なお、本検討は最大値についてのみであり、周波数特性についての検討は行っていない。





付録図9.8 非線形域の違いによる応答の差



付録図9.9 基礎深さの違いによる応答の差

### 9. 3 散乱の減衰が強震動予測に与える影響

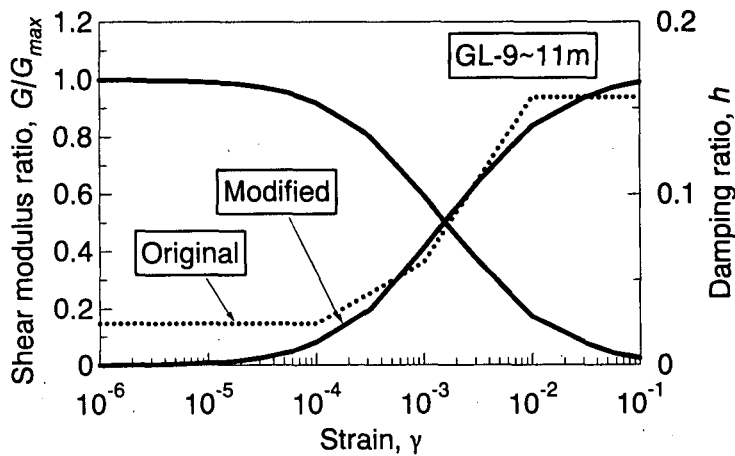
ここでは、地表で与えられた地震動を基盤に戻す際の散乱の減衰の影響について検討する。

#### 9.3.1 解析モデル

地盤モデルはこれまで同様、表2.1.1-1（計算例）に示す大阪の地盤である。材料の非線形性は、安田・山口による提案式<sup>9)</sup>を用いるが、減衰特性については、この提案式によるのではなく、Hardin-Drnevichの提案に基づく以下の式を用いる。

$$h = h_{max}(1 - G/G_{max}) \quad (1)$$

ここで、 $h$ および $h_{max}$ は減衰定数とその最大値、 $G/G_{max}$ はせん断定数比である。もとの実験式を用いなかった理由は、最近の動的変形特性に関する研究から、ひずみの小さいところでは非線形に起因する履歴減衰はほとんどないことがわかっていることを考慮したものである。なお、 $h_{max}$ の値は、5%のひずみで実験式の減衰と式(1)の減衰が同じになるように決めた。付録図9.10に後に示す計算で最大ひずみが大きかったGL-9~11mの層についてオリジナルの式との比較を示すが、両者は中ひずみではかなり一致しているものの、小ひずみ域ではオリジナルの式は減衰が大きい。



付録図9.10 第9層（GL-9~11m）の動的変形特性

地震動もこれまでと同様である。解析には、重複反射理論と等価線形法に基づく周波数領域の解析で、基本的にはSHAKEと同じであるが、散乱の減衰を考慮する、周波数依存性を考慮できるなどの機能を有しているDYNEQ<sup>9)</sup>に必要な機能を付け加えて用いた。

### 9.3.2 入射波の作成

減衰の与え方を次の三つ想定する。

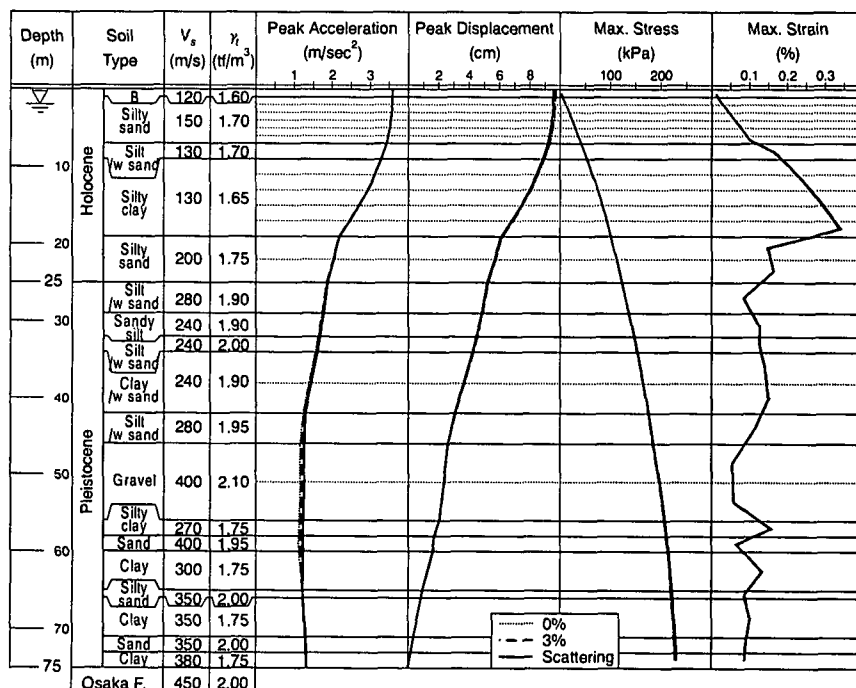
- ①減衰を考慮しない。
- ②3%の周波数に依存しない減衰を与える。
- ③減衰に関する経験式を用いる。

ここで、①は地盤が弾性とするれば必然的な減衰である。②は散乱の減衰を一定減衰として与えるとき、清田ら<sup>6)</sup>が推奨している値である。最後の③が本研究の目的であるが、散乱の減衰については多くの実験式がある。ここでは、散乱の減衰に対する経験式として福島・翠川<sup>7)</sup>が多くの経験式をまとめて整理した次式を用いる。

$$\log Q^{-1} = -A \log f - B \tag{2}$$

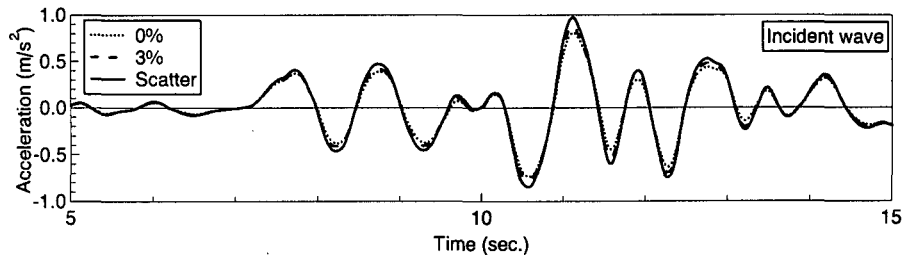
ここで、 $Q^{-1}=2h$ 、 $A$ 、 $B$ は係数である。原論文では $A$ 、 $B$ の値は材料ごとに定義されているが、ここでは、簡単化のため、全層に対して砂の値、すなわち、 $A=0.73$ 、 $B=0.87$ を用いる。また、式(2)は0.5~5Hzで設定されているので、これをはずれる周波数帯域については端部の値を一定として延長した。なお、式(2)に基づき減衰を計算すると、0.5Hzと5Hzでそれぞれ11.2、2.1%となる。

付録図9.11に加速度、相対変位、せん断応力および最大ひずみの最大応答値を比較して示す。いずれのケースでも最大応答値で見るとほとんど差がなく、図ではあまり区別できない。しかし、他の応答を見ると、差も見えてくる。

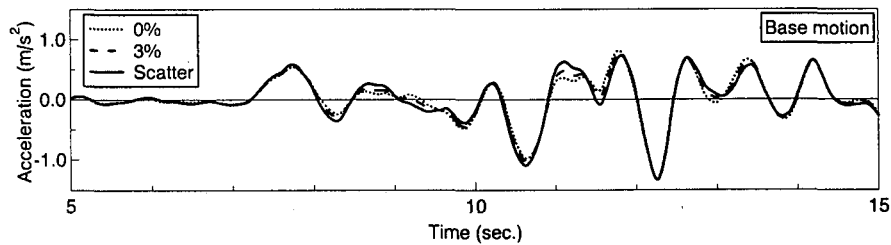


付録図9.11 入射波計算時の最大応答値

付録図9.12は基盤位置の加速度時刻歴で、差が見やすいように最大値付近の5～15秒までと時間軸を拡大したものである。(a)は入射波を比較しているが、波形もそれほど差がないように見える。しかし、11秒付近の最大値の値は、減衰0%のケースで $0.81\text{m/s}^2$ 、一方散乱の減衰を考慮した方は $0.98\text{m/s}^2$ であり、散乱減衰を考慮した方が21%大きくなっている。しかし(b)に示した複合波では最大値はそれぞれ1.32,  $1.34\text{m/s}^2$ であり、その差は1.5%とほとんどない。このことは最大応答値のみを見ては差がわかりにくいことを示している。

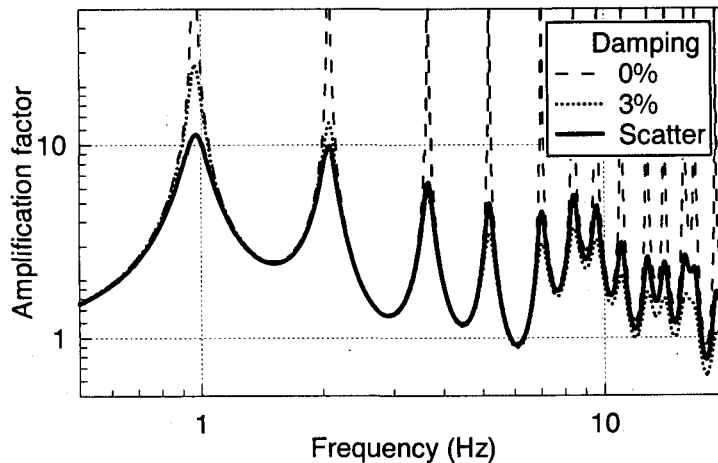


(a) 入射波の比較



(b) 複合波の比較

付録図9.12 基盤の波形の比較



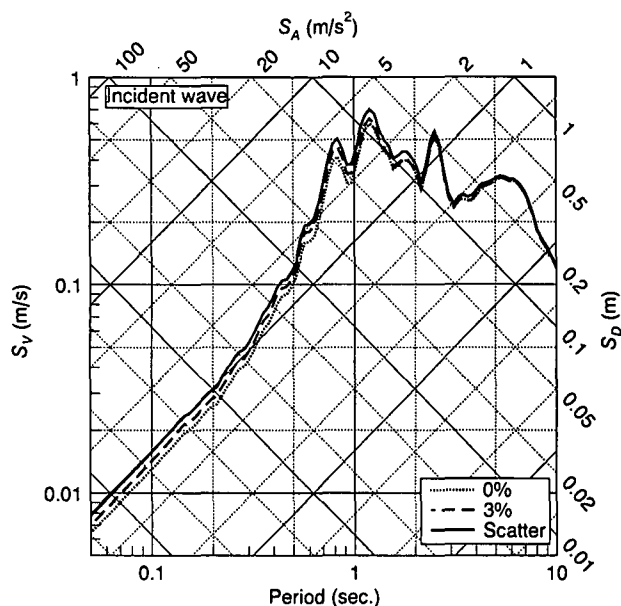
付録図9.13 増幅比の比較

付録図9.13には地表の基盤に対する増幅比を示している。減衰0%のケースでは、各卓越周期付近で非常に鋭いピークを示し、最大値は1000を越えている（図では50までの部分

しか示されていない)。これに対して、残りの二つのケースでは増幅比は最大でも10程度であり、大きな差が見られる。次に、減衰が3%のケースと散乱減衰の応答を縛れると、周波数が低い領域では3%減衰の方が増幅が大きく、周波数が高い領域では3%減衰の方が増幅が大きい。

式(2)より減衰3%に対応する周波数を計算すると、おおよそ3Hzである。付録図9.13でもこの付近で増幅比の逆転が起こっている。

最後に、付録図9.14に入射波の応答スペクトルを示す。短周期（高振動数）部分では三つのケースに明瞭に差があることがわかる。



付録図9.14 入射波の応答スペクトル

弾性の応答を考えると当然のことであるが、減衰比が小さいほど表層地盤の増幅が大きくなる。したがって、減衰が小さいほど求められる入射波は小さくなる。このことは、設計にとって危険側の評価となる可能性があることから、入射波の算定においては適切な減衰を考慮することが必要であることがわかる。

### 9.3.3 非線形解析

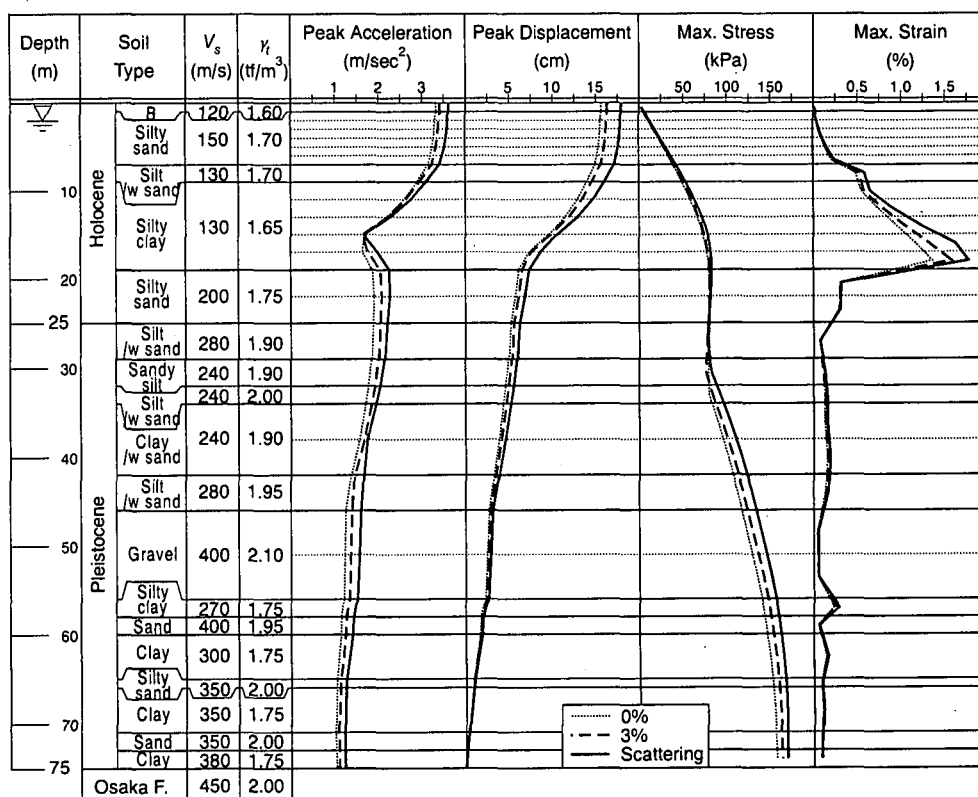
前項で得られた入射波を用いて、地盤の非線形性を考慮して地表の応答を求める。本計算で用いた DYNEQ の様な周波数特性を考慮できるプログラムは一般的でないことから、ここでは、通常の等価線形手法で応答を求めることにする。すなわち、非線形化に伴う材料特性の変化は最大ひずみの0.65倍で定義される有効ひずみより求める。また、散乱の減衰は考慮しない。

付録図9.15に最大応答値を比較して示す。入射波計算の時とは異なり、各ケースで差が

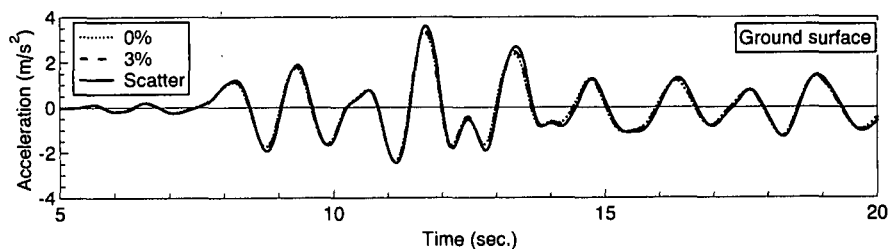
見られる。

まず、最大加速度を見ると、散乱減衰を考慮して作った波形の応答に対し、減衰0%のケースは92%、減衰3%のケースでは94%と小さめに評価している。付録図9.16には地表の加速度時刻歴を三つのケースについて比較しているが、ほとんど差がないように見えるが、実際には相当な差があるわけである。

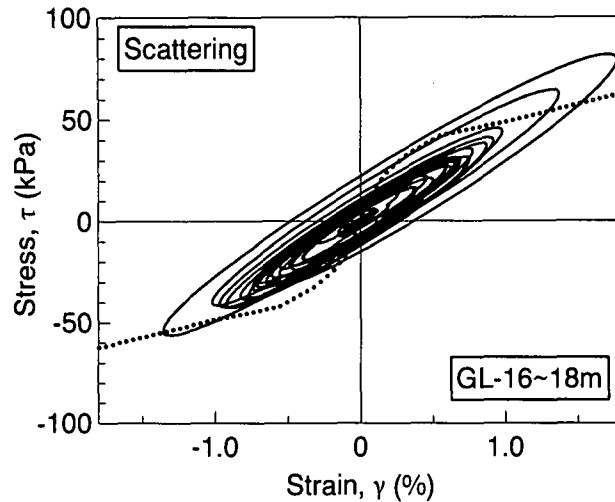
付録図9.16では GL-16m で最大加速度がほぼ同じになっている。これは、GL-16~18m の層で非線形性が著しく、付録図9.17に示す応力-ひずみ関係からわかるように、せん断応力がひずみの増加に対してほとんど変化しない領域に入っている。したがって、加速度の値も変わらない値となっていると考えられる。従って、ケースによっては、その差はもっと大きくなる可能性がある。



付録図9.15 最大応答値の比較

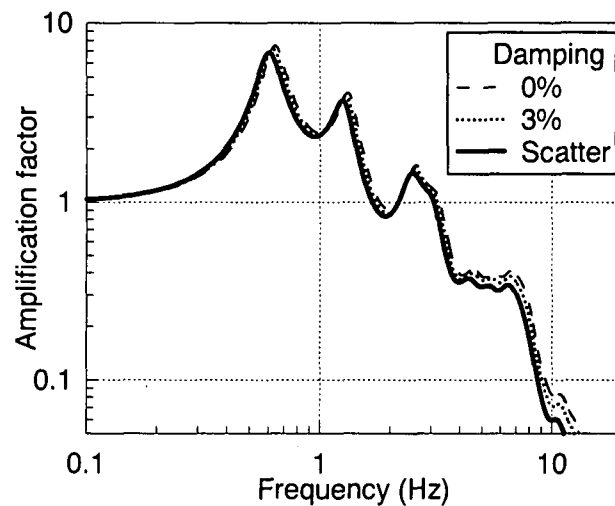


付録図9.16 地表の加速度時刻歴の比較



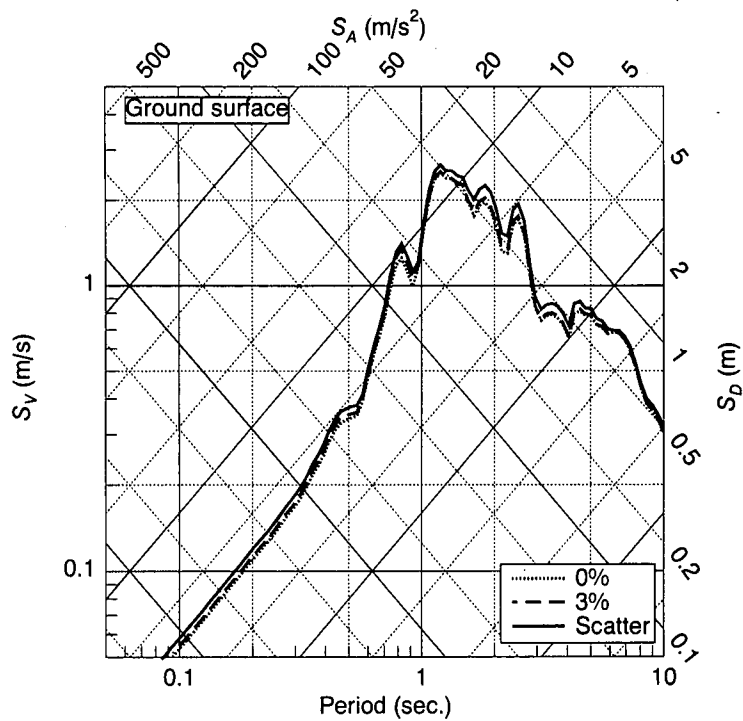
付録図9.17 第13層の応力-ひずみ関係

付録図9.18には増幅比の比較を示している。前項で示したように、入射波の大きさとしてみると、散乱減衰、減衰3%、0%順番に大きくなっている。この結果、増幅比で見ると、散乱の減衰を考慮した解析が一番卓越振動数が小さく（卓越周期が長く）非線形性が著しいことがわかる。しかし、卓越振動数は減衰0%のケースで0.65Hz、散乱減衰考慮のケースで0.62Hzと差は小さいが、増幅比は7.5と6.7で11%の差がある。



付録図9.18 増幅比の比較

付録図9.19は応答スペクトルを比較している。付録図9.14に示した入射波に比べると差は小さくなったが、入射波では長周期成分では差が見られなかったのに対して、全体的に差が発生しているのが特徴である。図上では差は小さい様に見えるが、散乱減衰を考慮したケースに比べ、減衰0%のケースでは最大85%、減衰3%のケースでは89%の値となっている。ただし、付録図9.17で示したように、大きな非線形挙動が起こっていることから、地表では挙動が均質化された可能性もある。



付録図9.19 応答スペクトルの比較

### 9.3.4 おわりに

一つのケーススタディではあるが、地盤が弾性的に挙動するという条件で設定された地表の地震動から入射波を求める際に散乱の減衰の考慮の有無が応答結果に与える影響を調べた。その差は最大加速度で10%、応答スペクトルの最大誤差で15%程度であった。この値をどのように評価するかは設計者の判断による訳であるが、必ずしも無視できる値とは考えられない。散乱の減衰を考慮できないプログラムでも一定減衰等を考慮する方が好ましい。この場合、地盤の卓越周期における散乱減衰の値を用いるのが好ましいと考えられる。

## 9. 4 非線形解析との比較

等価線形解析は、大地震時には誤差が大きくなる。そこで、大阪の地盤について、非線形解析による解析を行った。応力-ひずみ関係は、与えた動的変形特性を完全に満たすことのできるモデルを用いたので、等価線形解析と同じである。解析は DYNES<sup>®</sup>で行った。

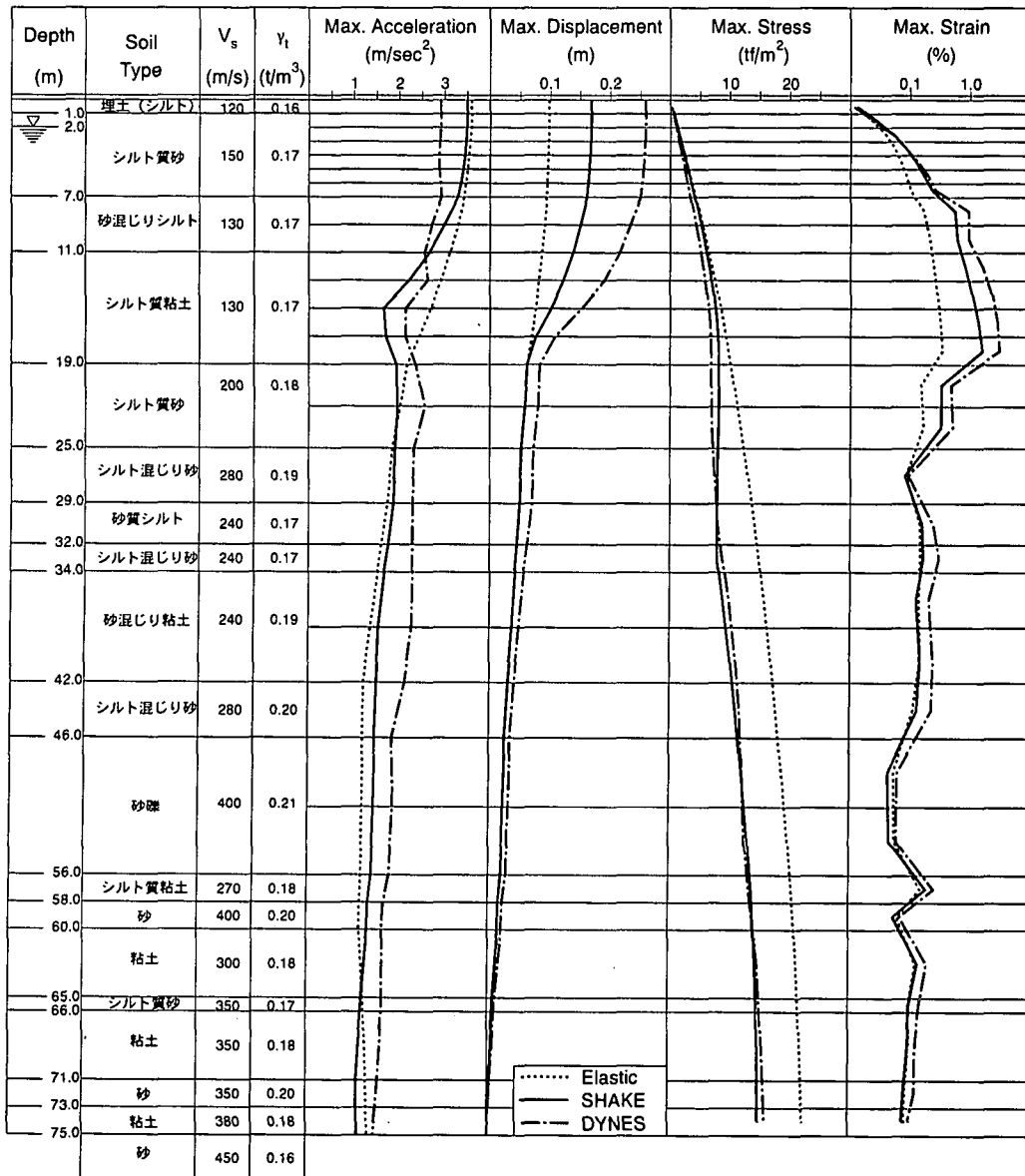
付録図9.20に最大応答値を比較して示す。非線形解析の結果は、等価線形解析 (SHAKE) に比べると、深いところでは加速度が大きい浅いところでは加速度が小さい。また、せん断ひずみが大いいく、対応して変位も大きいことがわかる。



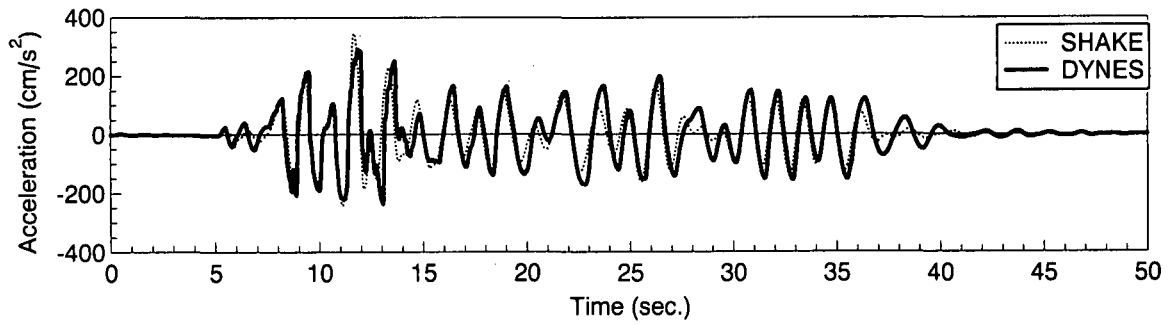
付録図9.21に地表の加速度時刻歴を示す。波形は全体として等価線形と同じであるが、ピーク時（約12秒）のピーク加速度に違いがあり、これが最大加速度の違いになっている。次に、付録図9.22に地表の加速度時刻歴から求めた応答スペクトルを示す。スペクトルの形状はこれまでの二つとよく似ているが、等価線形法よりさらに少し低周波数（長周期）側によっており、非線形の影響がより表れた結果と考えられる。

付録図9.23に前節と同じく、9層、13層の応力-ひずみ関係を示す。骨格曲線と比べると、等価線形法がせん断応力を過大評価していたのに対し、ここで用いたモデルでは骨格曲線がきちんと表現されていることが分かる。ここで、付録図9.21と付録図9.23で骨格曲線の形状が異なっているように見えるが、これは、離散点で与えられた動的変形特性を内挿補間する際、等価線形解析では、片対数軸（ $G-\gamma$ 関係）で補間したのに対し、非線形解析では実軸（ $\tau-\gamma$ 関係）で補間を行ったためである。

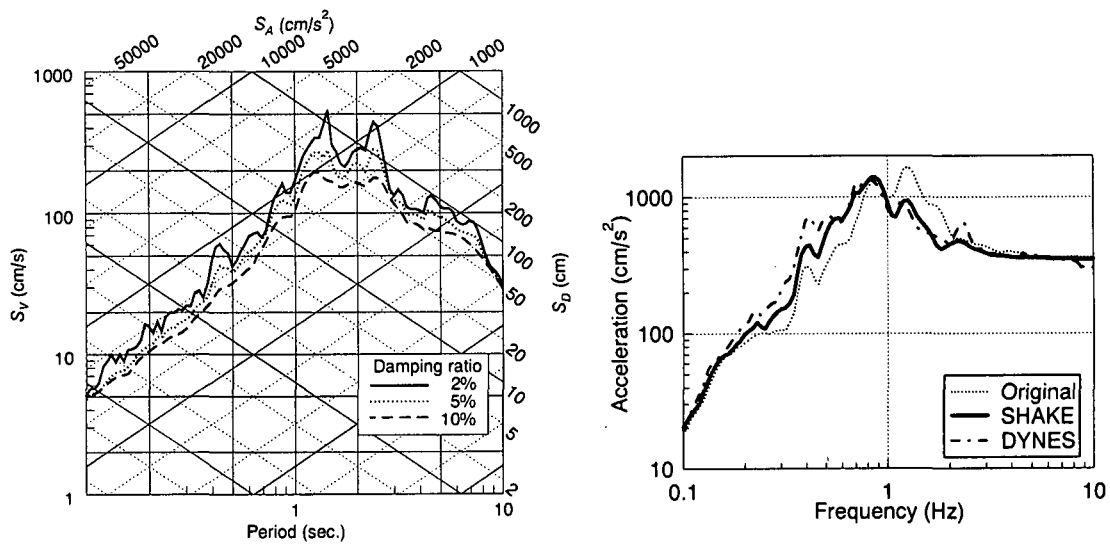
非線形解析では、等価線形解析と比べ、せん断強度が小さく、これと対応するように、せん断ひずみが大きくなっている。



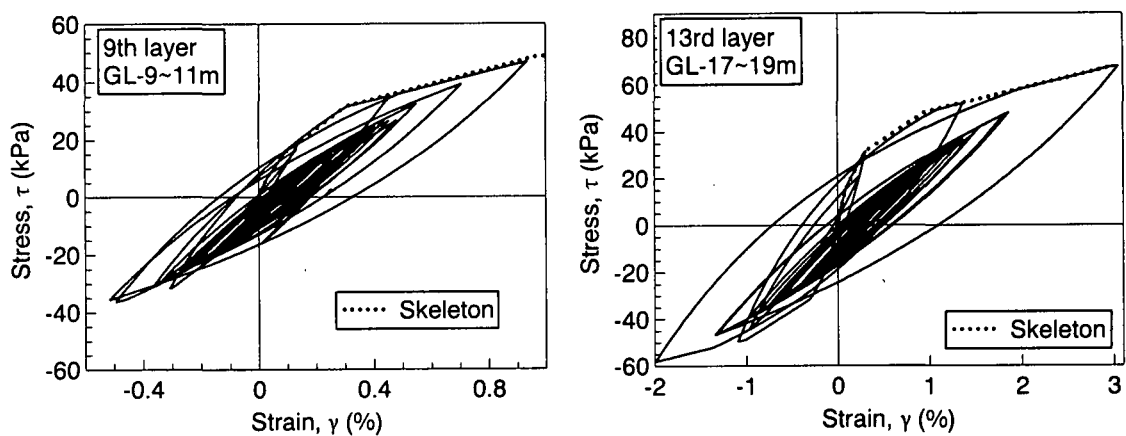
付録図9.20 最大応答値の比較



付録図9.21 地表の加速度時刻歴



付録図9.22 地表の波形から計算した応答スペクトル



付録図9.23 応力-ひずみ関係の比較

## 参考文献

- 1) 松本正毅, 大石富彦, 嶋田隆一 (1998) : 大阪平野の深部地盤構造を考慮した入力地震動策定に関する一考察, 電力土木, No.277, pp. 87-92
- 2) 電気技術基準調査委員会 (1987) : 原子力発電所耐震設計技術指針
- 3) 藤川智, 林康裕, 福武毅芳 (2000) : 工学的基盤の非線形性が表層地震応答に与える影響に付いての検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp. 297-298
- 4) 安田進, 山口勇 (1985) : 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第20回土質工学研究発表会講演集, pp. 539-542
- 5) 吉田望, 末富岩雄 (1996) : DYNEQ : 等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 佐藤工業 (株) 技術研究所報, pp. 61-70
- 6) 清田芳治, 萩原庸嘉, 青柳隆之 (1993) : 地盤のひずみ依存性を考慮したモード別等価線形地震応答解析手法 その3 微小加速度レベルにおける地盤の減衰性の検討, 日本建築学会学術講演概要集 (関東), 構造 I, pp. 217-218
- 7) 福島美光, 翠川三郎 (1994) : 周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的な  $Q^{-1}$  値とそれに基づく地盤増幅率の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第460号, pp.37-46
- 8) 吉田望 (2000) : DYNES, A computer program for dynamic response analysis of level ground by effective stress-nonlinear method, Version 2.0, 佐藤工業

## 資料10 表面波分散曲線計算プログラム

資料として、設計計算例2.4節の伝播波長の算定で用いた表面波分散曲線計算プログラム（著者：横浜市立大学理学部 齊藤正徳）を掲載する。本プログラムの公開については、著者の承認を得ている。

なお、本プログラムの利用は自由であるが、計算の結果生じた利用者の不利益について、著者は責任を負わないことを承知されたい。プログラムは、利用者の責任において使用するのが原則である。

また、利用に際しては、参考文献として、下記文献を引用することをお願いしたい。

齊藤正徳・椛澤宏之：成層構造に対する反射率，表面波分散曲線の計算Ⅱ，レーリー波の計算，物理探査，46巻4号，pp.283-298，1993

```

C
C   Love Wave Dispersion Curve : Sample Program (love.f)
C
C   M. Saito ; Aug. 3, 1995
C
C   Parameter (LMAX=50, NMAX=50, KMAX=300)
C   Character*4 NAME (2)
C   Dimension FRQ (0:NMAX), RSLT (4, KMAX)
C   Common/Model/H (LMAX), RHO (LMAX), VS (LMAX), VP (LMAX)
C   *           , QS (LMAX), QP (LMAX)
C
C   Input (ASCII file #7)
C   NAME : Model name
C   H   : Layer thickness, from top to bottom
C   RHO : Density
C   VS  : Shear wave velocity
C   VP  : Compressional wave velocity (dummy)
C   QS  : Shear wave Q (dummy)
C   QP  : Compressional wave Q (dummy)
C   Input (standard input file #5)
C   FMN : Minimum frequency
C   FMX : Maximum frequency
C   DF  : Frequency interval
C   CMN : Minimum phase velocity
C   CMX : Maximum phase velocity
C   DC  : Phase velocity interval
C   EPS : Relative accuracy of phase velocity
C   Output (standard output file #6)
C   Mode : Relative mode number
C   f   : Frequency
C   c   : Phase velocity
C   U   : Group velocity
C   A   : Transfer function
C   Slope: Sign of the characteristic function at zero
C           The sign must be the same along a dispersion curve.
C           If the sign changes in a calculated mode, that implies
C           switch to an adjacent mode.
C   Output (binary file #8)
C
C   Subroutines : lovswp.f lovdsp.f lovint.f lovmrx.f
C
C   Comment : This program first finds intersections of dispersion
C             curves at a constant phase velocity CMX. The inter-
C             sections are next used as the starting points of
C             dispersion curves.
C
C   Read Model
C
C   OPEN (8, FILE=' DUMMY' )
C   Read (5, 1) NAME
C   1   Format (2A4)
C       Do 3 I=1, LMAX
C         Read (5, 2, END=5) H (I), RHO (I), VS (I), VP (I)
C         *           , QS (I), QP (I)
C   2   Format (6F10.0)
C       N = I
C       If ( H (I).le.0 ) Go to 5

```

```

3 Continue
C
  Write(6,4) LMAX
4  Format(/5X,'Size of Common/Model is too small, LMAX =',I5/)
   Stop
C
C  Write Model
C
5 Write(6,6) NAME
6  Format(/10X,'Model = ',2A4)
   Write(6,7) (H(I), RHO(I), VS(I), VP(I), QS(I), QP(I), I=1, N)
7  Format(/6X,'h',9X,'Rho',8X,'Vs',9X,'Vp',9X,'Qs',9X,'Qp'
   *          / (6F11.4))
C
C  Read/Write Parameters
C
   Read(5,8) FMN, FMX, DF, CMN, CMX, DC, EPS
8  Format(3F10.0/4F10.0)
   Write(6,9) FMN, DF, FMX, CMN, DC, CMX, EPS
9  Format(/'freq',F11.4,' (' ,F10.4,')',F11.4
   *      /'c ',F11.4,' (' ,F10.4,')',F11.4
   *      /'Eps ',1PE11.4)
C
C  Find Start Frequencies
C
   Call Lovswp(N, CMX, FMN, FMX, DF, EPS*10, NF, FRQ, IER)
C
   Write(6,10) NF, CMX
10 Format(/15,' Roots found at c =',F11.4)
   If(NF.eq.0) Stop
   Write(6,11) (I, FRQ(I), I=0, NF-1)
11 Format(/10X,'m',6X,'f'/(6X,15,F11.4))
C
C  Write Header
C
   Write(8,*) NAME
   Write(8,*) NF
C
C  Calculate Dispersion Curves
C
Do 18 M=0, NF-1
  K = (FRQ(M) - FMN)/DF + 1.5
  F0 = FMN + K*DF
C
   Call Lovdsp(N, F0, FMX, DF, CMN, CMX, DC, EPS,
   *          RSLT, KX, IER)
   If(IER.ne.0) Go to 18
   If(KX.eq.0) Go to 18
C
   Write(6,12) M
12 Format(/3X,'Mode =',I3,3X,'Love Wave'
   *      /6X,'f',10X,'c',10X,'U',8X,'A',9X,'Slope')
   Write(8,*) M, KX
Do 15 K=1, KX
  F = F0 + (K-1)*DF
  C = RSLT(1, K)
  U = RSLT(2, K)

```

```

      A = RSLT(3, K)
      LS = 1
      If( RSLT(4, K).lt.0 ) LS = -1
      Write(6, 13) F, C, U, A, LS
13     Format(3F11.4, 1PE13.4, I4)
      Write(8, *) F, C, U, A, LS
15     Continue
C
18     Continue
C
C     EOF
C
      MODE = -1
      Write(8, *) MODE, KX
C
      Stop
      End
C
C     Sweep frequencies at a given phase velocity
C
C     M. Saito ; Aug. 3, 1995
C     Revised ; Jun. 12, 1997
C
      Subroutine Lovswp(N, C, FMN, FMX, DF, EPS, NF, FRQ, IER)
C
      Parameter (LMAX=50, NMAX=50)
      Dimension FRQ(0:NMAX), Y(2), YW(2), YC(2)
      Common/Model/H(LMAX), RHO(LMAX), VS(LMAX), VP(LMAX)
C
      Input
C     N : Number of layers including the bottom half space
C     C : Phase velocity
C     FMN : Minimum frequency
C     FMX : Maximum frequency
C     DF : Interval of frequency
C     EPS : Relative accuracy
C
      Output
C     NF : Number of frequencies found
C     FRQ : Eigen frequencies corresponding to C
C     IER : Return code
C
      Subroutine : Lovmrz
C
      If( N.le.0 .or. DF.le.0 .or. C.le.0 ) Go to 90
C
      P1 = 1
      P1 = 4*Atan(P1)
      P12 = 2*P1
      F2 = FMN
      NF = 0
      Call Lovmrz(N, P12*F2, C, 0, Y, YC, YW, U, A, IER)
      If( IER.ne.0 ) Return
      Y2 = Y(2)
C
C     Find a zero corss
C
10     F1 = F2
      Y1 = Y2

```

```

F2 = F1 + DF
If ( F2.gt.FMX ) Go to 20
Call Lovmrx(N, PI2*F2, C, 0, Y, YC, YW, U, A, IER)
Y2 = Y(2)
If ( Y1*Y2.gt.0 ) Go to 10
C
C Interpolation
C
FS = F2
YS = Y2
F3 = (F1*Y2 - F2*Y1)/(Y2 - Y1)
Do 14 K=1, 10
  Call Lovmrx(N, PI2*F3, C, 2, Y, YC, YW, U, A, IER0)
  Y3 = Y(2)
  DEL = Y(2)/YW(2)
  F4 = F3*(1 - DEL)
  If ( Abs(DEL).le.EPS ) Go to 15
  If ( Y1*Y3.le.0 ) then
    F2 = F3
    Y2 = Y3
  Else
    F1 = F3
    Y1 = Y3
  Endif
  If ( (F4-F1)*(F4-F2).ge.0 )
*   F4 = (F1*Y2 - F2*Y1)/(Y2 - Y1)
    F3 = F4
14 Continue
  IER = 1
C
15 NF = NF + 1
  FRQ(NF) = F4
  F2 = FS
  Y2 = YS
  Go to 10
C
20 Return
C
90 Write(6,91) N, C, DF
91 Format(/' Invalid Input in LOVSWP, N, C, DF =', I5, 3X,
*       1P2E10.3/)
  IER =-1
  Return
  End
C
C LOVE WAVE DISPERSION CURVE
C
C FINDS A DISPERSION CURVE IN FMIN < F < FMAX
C
C M. SAITO SEP. 3, 1989
C REVISED FEB. 17, 1996
C
C SUBROUTINE LOVDSP(N, FMN, FMX, DF, CMN, CMX, DC, EPS,
*                 RSLT, KX, IER)
C
C IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
C PARAMETER (LMAX=50, KMAX=300)

```



```

DIMENSION RSLT (4, KMAX)
*           , Y (2), YC (2), YW (2)
COMMON/MODEL/H (LMAX), RHO (LMAX), VS (LMAX), VP (LMAX)
C
C INPUTS
C   N   : NUMBER OF LAYERS INCLUDING THE BOTTOM HALF-SPACE
C   FMN : MINIMUM FREQUENCY
C   FMX : MAXIMUM FREQUENCY, SHOULD BE GREATER THAN FMN
C   DF  : INCREMENT OF FREQUENCY, SHOULD BE GREATER THAN 0
C   CMN : MINIMUM PHASE VELOCITY
C   CMX : MAXIMUM PHASE VELOCITY, SHOULD BE GREATER THAN CMN
C         CMN AND CMX APPLY ONLY TO FMN
C   DC  : INCREMENT OF SPHASE VELOCITY, SHOULD BE GREATER THAN 0
C   EPS : RELATIVE ACCURACY
C OUTPUTS
C   RSLT (1, K) : C, PHASE VELOCITY
C               2 : U, GROUP VELOCITY
C               3 : TRANSFER FUNCTION
C               4 : C*DY2/DC
C   KX  : ACTUAL LENGTH OF RSLT
C   IER : RETURN CODE
C         = 0 ; NORMAL EXIT
C
C SUBROUTINE : LOVINT, LOVMRX
C
C Comments : Too large a DF may fail to find a dispersion curve.
C           Calculated dispersion curve may not belong to a single
C           mode. The sign of RSLT(4, *), the slope of the
C           characteristic equation, may help identify the mode.
C
C   IF ( N. LE. 1 .OR. DF. LE. 0 .OR. DC. LE. 0 .OR. FMN. GE. FMX .OR.
*     CMN. GE. CMX ) GO TO 90
C
C   P12 = 1
C   P12 = 8*ATAN (P12)
C   KX = (FMX - FMN)/DF + 1.5
C   CMIN = CMN
C   CMAX = CMX
C   DELC = DC
C   VS1 = VS (1)
C   VSN = VS (N)
C
C   DO 1 K=1, KX
C     F = FMN + (K-1)*DF
C     W = P12*F
C
C     CALL LOVINT (N, W, CMIN, CMAX, DELC, EPS, C, U, A
*       , Y, YC, YW, IER)
C     IF ( IER. LT. 0 ) GO TO 10
C     IF ( IER. GT. 1 ) GO TO 10
C
C     RSLT (1, K) = C
C     RSLT (2, K) = U
C     RSLT (3, K) = A
C     RSLT (4, K) = YC (2)
C
C   FIND NEXT GUESS

```

```

C
DDC = C*(1 - C/U)*DF/F
IF ( K.EQ.1 ) THEN
  CMIN = C + DDC
ELSE
  CMIN = RSLT(1, K-1) + 2*DDC
ENDIF
IF ( CMIN.LT.VS1 ) CMIN = VS1*0.95
IF ( CMIN.GT.VSN ) CMIN = VSN
W = W + PI2*DF
CALL LOVMRX(N, W, CMIN, 1, Y, YC, YW, U, A, IER)
DELC = -CMIN*Y(2)/YC(2)
IF ( YC(2)*RSLT(4, K).LT.0 ) DELC = -DELC*2
IF ( Abs(DELC).GT.ABS(DDC) ) DELC = Sign(DDC, DELC)/2
CMAX = CMIN + 10*DELC
IF ( CMAX.GT.VSN ) CMAX = VSN
IF ( CMAX.LT.VS1 ) CMAX = VS1*0.95
DELC = (CMAX - CMIN)/10
IF ( DELC.EQ.0 ) GO TO 10
1 CONTINUE
C
C   NORMAL EXIT
C
C   RETURN
C
10 KX = K - 1
IF ( KX.LE.0 ) THEN
  IER = -1
ELSE
  WRITE(6, 11) F
11  FORMAT (/5X, ' (LOVDSP)  ROOT NOT FOUND AT F = ',
*      1PE10.3/)
C  *      1PD10.3/)
  IER = 0
ENDIF
C
C   RETURN
C
C   INPUT ERROR
C
90 WRITE(6, 91)
91  FORMAT (5X, 5(' ?'), 3X, ' (LOVDSP)  INVALID INPUTS ',
*      'CHECK PARAMETERS ', 5(' ?'))
  IER = -1
  RETURN
  END
C
C   LOVE WAVE INTERPOLATION
C
C   DISPER80 FLAT-VER. 1
C
C   M. SAITO  AUG. 17, 1989
C   REVISED  JUN. 28, 1995
C
SUBROUTINE LOVINT(N, W, CMN, CMX, DC, EPS, C, U, A,
*      Y, YC, YW, IER)
C

```

```

C      IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
C      PARAMETER (LMAX=50)
C      DIMENSION Y (2), YC (2), YW (2)
C      COMMON/MODEL/H (LMAX), RHO (LMAX), VS (LMAX), VP (LMAX)
C
C      THIS PROGRAM FINDS A LOVE WAVE PHASE VELOCITY AND A
C      GROUP VELOCITY AT AN ANGULAR FREQUENCY W
C      NEWTON'S METHOD IS USED
C
C      INPUTS
C      N      : NUMBER OF LAYERS INCLUDING THE BOTTOM HALF SPACE
C      W      : ANGULAR FREQUENCY
C      CMN    : MIN PHASE VALOCITY
C      CMX    : MAX PHASE VELOCITY. CMN MAY BE .GT. CMX
C              IN THAT CASE DC MUST BE .LT. 0
C      DC     : STEP OF PHASE VELOCITY
C      EPS    : RELATIVE ACCURACY OF C
C      OUTPUTS
C      C      : PHASE VELOCITY
C      U      : GROUP VELOCITY
C      A      : TRANSFER FUNCTION, 1/2*K**2*13
C      Y      : SURFACE VALUES OF Y
C      YC     : SURFACE VALUES OF C*DY/DY
C      YW     : SURFACE VALUES OF W*DY/DW
C      IER    : RETURN CODE
C              = 0 ; NORMAL EXIT
C              =-1 ; INVALID INPUTS
C              = 1 ; TOO SLOW CONVERGENCE
C              = 2 ; NO ROOT IN THE SPECIFIED RANGE
C
C      SUBROUTINE : LOVMRX
C
C      NOTICE : Y2 HERE IS Y2 (ORIGINAL)/K
C              UP TO TEN INTERPOLATIONS WILL BE DONE. THE LOOP
C              "DO 7 K=1, 10" DEFINES THE NUMBER OF INTERPLOATIONS
C
C      IF ( N .LE. 1 .OR. W .LE. 0 .OR. DC .EQ. 0 ) GO TO 90
C
C      WRITE (6, 1) W
C 1  FORMAT (/7X, 'W', 15X, 'LOVE WAVE' /
C      *      1PE18. 6/7X, 'C', 17X, 'Y2', 16X, 'U', 17X, 'A')
C      *      1PD18. 6/7X, 'C', 17X, 'Y2', 16X, 'U', 17X, 'A')
C
C      FIND A ZERO CROSS
C
C      KX = (CMX - CMN)/DC + 0.5
C      IF ( KX .LE. 0 ) GO TO 90
C      CMX0 = VS (N)
C      C2 = CMN
C      CALL LOVMRX (N, W, C2, 0, Y, YC, YW, U, A, IER)
C      IF ( IER .NE. 0 ) RETURN
C      F2 = Y (2) /ABS (Y (1))
C      WRITE (6, 2) C2, F2
C 2  FORMAT (1P4E18. 6)
C 2  FORMAT (1P4D18. 6)
C      DO 3 K=1, KX
C          C1 = C2

```

```

F1 = F2
C2 = C1 + DC
IF ( C2. GE. CMX0 ) GO TO 4
CALL LOVMRX (N, W, C2, 0, Y, YC, YW, U, A, IER1)
F2 = Y (2) /ABS (Y (1))
c WRITE (6, 2) C2, F2
IF ( EPS. LT. 0 ) GO TO 3
IF ( F2*F1. LE. 0 ) GO TO 6
3 CONTINUE
4 WRITE (6, 5) W
5 FORMAT (/5X, ' (LOVINT) NO ROOT FOUND AT W =',
* 1PE12. 5)
C * 1PD12. 5)
IER = 2
RETURN
C
C INTERPOLATION
C
6 C4 = C2
IF ( F2. EQ. 0 ) GO TO 9
C3 = (C1*F2 - C2*F1) / (F2 - F1)
DO 7 K=1, 10
CALL LOVMRX (N, W, C3, 1, Y, YC, YW, U, A, IER1)
F3 = Y (2) /ABS (Y (1))
C WRITE (6, 2) C3, F3
IF ( Abs (Y (2)). Lt. Abs (YC (2)) ) then
DEL = -Y (2) /YC (2)
Else
DEL = F3*(C3 - C2) / (C3*(F3 - F2))
Endif
C4 = C3*(1 + DEL)
IF ( ABS (DEL). LE. EPS ) GO TO 9
IF ( F1*F3. LE. 0 ) THEN
C2 = C3
F2 = F3
ELSE
C1 = C3
F1 = F3
ENDIF
IF ( (C4 - C1)*(C4 - C2). GE. 0 )
* C4 = (C1*F2 - C2*F1) / (F2 - F1)
IF ( ABS (C2-C1). LE. EPS*C4 ) GO TO 9
C3 = C4
7 CONTINUE
WRITE (6, 8) C3
8 FORMAT (/5X, ' (LOVINT) ROOT MAY BE INACCURATE AT C =',
* 1PE12. 5/)
C * 1PD12. 5/)
IER = 1
C
C GROUP VELOCITY AND AMPLITUDE
C
9 C = C4
CALL LOVMRX (N, W, C, 2, Y, YC, YW, U, A, IER1)
C
F3 = Y (2) /ABS (Y (1))
c WRITE (6, 2) C, F3, U, A

```

```

C
C   RETURN
C
C   INPUT ERROR
C
90 WRITE (6, 91) N, W, CMN, CMX, DC
91  FORMAT (/5X, ' (LOVINT) INVALID INPUTS', 3X,
*      ' N =', I5, 3X, ' W =', 1PE10.3, 3X, ' CMN =', E10.3, 3X,
1      ' CMX =', E10.3, 3X, ' DC =', E10.3/)
C *      ' N =', I5, 3X, ' W =', 1PD10.3, 3X, ' CMN =', D10.3, 3X,
C 1      ' CMX =', D10.3, 3X, ' DC =', D10.3/)
C   IER =-1
C   RETURN
C   END
C
C   LOVE WAVE MATRIX METHOD INTEGRATION
C
C   DISPER-80 FLAT-VERSION-1
C
C   M. SAITO  AUG. 17, 1989
C   REVISED  JUN. 24, 1995
C
C   SUBROUTINE LOVMRX (N, W, C, IG, Y, YC, YW, U, A, IER)
C
C   IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
C   PARAMETER (LMAX=50)
C   DIMENSION Y (2), YC (2), YW (2)
C   COMMON/MODEL/H (LMAX), RHO (LMAX), VS (LMAX), VP (LMAX)
C   DATA EPS/1.E-10/
C
C   THIS PROGRAM INTEGRATES LOVE WAVE EQUATION OF MOTION BY
C   MATRIX METHOD
C
C   THIS IS A SIMPLIFIED VERSION OF DISPER-80 LOVMRX
C
C   INPUTS
C   N   : NUMBER OF LAYERS INCLUDING THE BOTTOM HALF SPACE
C   W   : ANGULAR FREQUENCY
C   C   : PHASE VELOCITY
C   IG  : = 0 TO INTEGRATE Y
C       = 1 TO INTEGRATE Y AND YC
C       = 2 TO INTEGRATE Y, YC AND YW
C
C   OUTPUTS
C   Y   : SURFACE VALUES OF Y1 AND Y2
C   YC  : SURFACE VALUES OF C*DY/DC
C   YW  : SURFACE VALUES OF W*DY/DW
C   U   : GROUP VELOCITY
C   A   : TRANSFER FUNCTION FOR STEP SOURCE TIME FUNCTION
C   IER : RETURN CODE
C       = 0 ; NORMAL EXIT
C       =-1 ; INVALID INPUTS
C
C   NOTICE : Y2 HERE IS Y2 (ORIGINAL) /K
C
C   DEFINE SHO (X) =SINH (X) /X AND SH1 (X) = (COSH (X) -SINH (X) /X) /X**2
C
C   SHO (X) = 0.9999997 + X*(0.1666667

```

```

*      + X*(0.0083361 + X*0.0001984)
SH1(X) = 0.3333333 + X*(0.0333333
*      + X*(0.0011907 + X*0.0000220))

C
C   DOUBLE PRECISION VERSION
C
C   SHO(X) = 1.D0 + X*(1.6666 66666 66666 7D-1
C   *      + X*(8.33 33333 33334 0D-3
C   1      + X*(1.9 84126 98412 7D-4
C   2      + X*(2.7557 31918 9D-6 + X*(2.50 12108 4D-8
C   3      + X*(1.60596 1D-10 + X*7.64 7D-13))))))
C   SH1(X) = 3.3333 33333 33333 3D-1
C   *      + X*(3.333 33333 33333 3D-2
C   1      + X*(1.19 04761 90476 2D-3
C   2      + X*(2.20458 55379 2D-5
C   3      + X*(2.505 21083 7D-7 + X*(1.9 27085 3D-9
C   4      + X*(1.0706 3D-11 + X*4.50D-14))))))

C
C   INITIAL VALUE
C
C   IF ( N.LE.0 .OR. W.LE.0 .OR. C.LE.0 ) GO TO 90
IER = 0
L = N
WN = W/C
RO = RHO(L)
EM = RO*VS(L)**2
C   WRITE(6,*) 'CHECK 1'
IF ( EM.LE.0 ) GO TO 92
CS = C/VS(L)
RBB = (1 + CS)*(1 - CS)
C   WRITE(6,*) 'CHECK 2'
IF ( RBB.LE.0 ) GO TO 92
RB = SQRT(RBB)

C
YC(1) = 0
YW(1) = 0
YW(2) = 0

C
Y(1) = EPS
Y(2) = EM*RB*Y(1)
IF ( I.G.GT.0 ) YC(2) = -(EM*CS**2/RB)*EPS

C
C   INTEGRATE UPWARD
C
DO 21 L=N-1, 1, -1
RO = RHO(L)
EM = RO*VS(L)**2
C   WRITE(6,*) 'CHECK (' , L, ')'
IF ( EM.LE.0 ) GO TO 92
CS = C/VS(L)
RBB = (1 + CS)*(1 - CS)
HK = H(L)*WN
HKK = HK**2
XX = RBB*HKK

C
C   SINH(X)/X
C

```

```

AA = ABS (XX)
IF ( AA. LE. 1 ) THEN
  SB = SHO (XX)
  CB = 1 + XX*SHO (XX/4) **2/2
  IF ( IG. GT. 0 ) DB = SH1 (XX) *HKK
ELSE
  AA = SQRT (AA)
  IF ( XX. LE. 0 ) THEN
    CB = COS (AA)
    SB = SIN (AA) /AA
  ELSE
    CB = 1
    SB = TANH (AA) /AA
  ENDIF
  IF ( IG. GT. 0 ) DB = (HKK/XX) * (CB - SB)
ENDIF
SB = HK*SB
C
C LAYER MATRIX
C
Q11 = CB
Q12 = SB/EM
Q21 = EM*RBB*SB
C
C INTEGRATE Y
C
Z1 = Y (1)
Z2 = Y (2)
Y (1) = Q11*Z1 + Q12*Z2
Y (2) = Q21*Z1 + Q11*Z2
C
IF ( IG. GT. 0 ) THEN
  QC11 = -HK*SB
  QC12 = -(HK*DB + SB) /EM
  QC21 = -EM* (HK*CB + SB*CS**2)
C
  ZC1 = YC (1)
  ZC2 = YC (2)
  YC (1) = QC11*Z1 + QC12*Z2 + Q11*ZC1 + Q12*ZC2
  YC (2) = QC21*Z1 + QC11*Z2 + Q21*ZC1 + Q11*ZC2
ENDIF
C
IF ( IG. GT. 1 ) THEN
  QW11 = HK*RBB*SB
  QW12 = HK*CB/EM
  QW21 = HK*EM*RBB*CB
C
  ZW1 = YW (1)
  ZW2 = YW (2)
  YW (1) = QW11*Z1 + QW12*Z2 + Q11*ZW1 + Q12*ZW2
  YW (2) = QW21*Z1 + QW11*Z2 + Q21*ZW1 + Q11*ZW2
ENDIF
C
C NORMALIZATION
C
IF ( ABS (Y (1)) *EPS. LT. 1 ) GO TO 21
Y (1) = Y (1) *EPS

```

```

      Y (2) = Y (2) *EPS
      IF ( IG. GT. 0 ) THEN
        YC (1) = YC (1) *EPS
        YC (2) = YC (2) *EPS
      ENDIF
      IF ( IG. GT. 1 ) THEN
        YW (1) = YW (1) *EPS
        YW (2) = YW (2) *EPS
      ENDIF
C
21 CONTINUE
C
      IF ( IG. EQ. 2 ) THEN
        U = C / ( 1 + YW (2) / YC (2) )
        A = -C * Y (1) / ( W * YC (2) )
      ENDIF
C
      RETURN
C
C   INPUT ERROR
C
90 WRITE (6, 91)  N, W, C
91  FORMAT (/5X, ' (LOVMRX)  INVALID INPUTS', 3X, ' N =', 15,
*          3X, ' W =', 1PE10. 3, 3X, ' C =', E10. 3/)
C  *          3X, ' W =', 1PD10. 3, 3X, ' C =', D10. 3/)
      IER = -1
      RETURN
C
92 WRITE (6, 93)  L
93  FORMAT (/5X, ' (LOVMRX)  RIGITY BECOMES 0 AT LAYER ', 15)
      IER = -1
      RETURN
      END

```



```

C
C Rayleigh Wave Test Program (raylei.f)
C
C M Saito ; Aug 3, 1995
C
C Parameter (LMAX=50, NMAX=50, KMAX=300)
C Character*4 NAME (2)
C Dimension FRQ (0:NMAX), RSLT (5, KMAX)
C Common/Model/H (LMAX), RHO (LMAX), VS (LMAX), VP (LMAX)
C * , QS (LMAX), QP (LMAX)
C
C Input (ASCII file #7)
C NAME : Model name
C H : Layer thickness, from top to bottom
C RHO : Density
C VS : Shear wave velocity
C VP : Compressional wave velocity (dummy)
C QS : Shear wave Q (dummy)
C QP : Compressional wave Q (dummy)
C Input (standard input file #5)
C FMN : Minimum frequency
C FMX : Maximum frequency
C DF : Frequency interval
C CMN : Minimum phase velocity
C CMX : Maximum phase velocity
C DC : Phase velocity interval
C EPS : Relative accuracy of phase velocity
C Output (standard output file #6)
C Mode : Relative mode number
C f : Frequency
C c : Phase velocity
C U : Group velocity
C A : Transfer function
C Ellip: Ellipticity of orbital motion
C Slope: Sign of the characteristic function at zero
C The sign must be the same along a dispersion curve.
C If the sign changes in a calculated mode, that implies
C switch to an adjacent mode.
C
C Comment : This program first finds intersections of dispersion
C curves at a constant phase velocity CMX. The inter-
C sections are next used as the starting points of
C dispersion curves.
C
C Subroutines : rayswp.f raydsp.f rayint.f raymr.f
C
C Read Model
C
C Read (5, 1) NAME
1 Format (2A4)
Do 3 I=1, LMAX
Read (5, 2, END=5) H (I), RHO (I), VS (I), VP (I)
* , QS (I), QP (I)
2 Format (6F10.0)
N = I
If ( H (I).le.0 ) Go to 5
3 Continue

```

```

C
  Write(6,4) LMAX
4  Format(/5X,'Size of Common/Model is too small, LMAX =',15/)
  Stop
C
C  Write Model
C
5  Write(6,6) NAME
6  Format(/10X,'Model = ',2A4)
  Write(6,7) (H(I), RHO(I), VS(I), VP(I), QS(I), QP(I), I=1, N)
7  Format(/6X,'h',9X,'Rho',8X,'Vs',9X,'Vp',9X,'Qs',9X,'Qp'
  *      / (6F11.4))
C
C  Read/Write Parameters
C
  Read(5,8) FMN, FMX, DF, CMN, CMX, DC, EPS
8  Format(3F10.0/4F10.0)
  Write(6,9) FMN, DF, FMX, CMN, DC, CMX, EPS
9  Format(/5X,'Freq',F11.4,'(',F10.4,')',F11.4
  *      /5X,'c ',F11.4,'(',F10.4,')',F11.4
  *      /5X,'Eps ',1PE11.4)
C
C  Find Start Frequencies
C
  Call Rayswp(N, CMX, FMN, FMX, DF, EPS*10, NF, FRQ, IER)
C
  Write(6,10) NF, CMX
10 Format(/15,' Roots found at c =',F11.4)
  If(NF.eq.0) Stop
  Write(6,11) (I, FRQ(I), I=0, NF-1)
11 Format(/10X,'m',6X,'f'/(6X,15,F11.4))
C
C  Write Header
C
  Write(8) NAME
  Write(8) NF
C
C  Calculate Dispersion Curves
C
  Do 18 M=0, NF-1
    K = (FRQ(M) - FMN)/DF + 1
    FO = FMN + K*DF
C
  Call Raydsp(N, FO, FMX, DF, CMN, CMX, DC, EPS,
  *      RSLT, KX, IER)
  If(IER.ne.0) Go to 18
  If(KX.eq.0) Go to 18
C
  Write(6,12) M
12 Format(/3X,'Mode =',13,3X,'Rayleigh Wave'
  *      /6X,'f',10X,'c',10X,'U',8X,'A',12X,'Ellip',2X,'Slope')
  MODE = 1000 + M
C
  Write(8) MODE, KX
  Do 15 K=1, KX
    F = FO + (K-1)*DF
    C = RSLT(1, K)
    U = RSLT(2, K)

```

```

      A = RSLT(3, K)
      Y3= RSLT(4, K)
      LS = 1
      If ( RSLT(5, K).lt. 0 ) LS =-1
      Write(6, 13) F, C, U, A, Y3, LS
13      Format(3F11.4, 1PE13.4, 0PF9.3, I4)
C      Write(8) F, C, U, A, Y3, LS
15      Continue
C
18      Continue
C
C      EOF
C
      MODE =-1
C      Write(8) MODE, KX
C
      Stop
      End
C
C      Sweep frequencies at a given phase velocity
C
C      M. Saito ; Aug. 3, 1995
C      Revised ; Jun. 12, 1997
C
      Subroutine Rayswp(N, C, FMN, FMX, DF, EPS, NF, FRQ, IER)
C
      Parameter (LMAX=50)
      Dimension FRQ(*), Y(5), YW(5), YC(5)
      Common/Model/H(LMAX), RHO(LMAX), VS(LMAX), VP(LMAX)
C
C      Input
C      N : Number of layers including the bottom half space
C      C : Phase velocity
C      FMN : Minimum frequency
C      FMX : Maximum frequency
C      DF : Interval of frequency
C      EPS : Relative accuracy
C      Output
C      NF : Number of frequencies found
C      FRQ : Eigen frequencies corresponding to C
C      IER : Return code
C      Subroutine : Raymrx
C
      If ( N.le. 0 .or. DF.le. 0 .or. C.le. 0 ) Go to 90
C
      PI = 1
      PI = 4*Atan(PI)
      PI2 = 2*PI
      F2 = FMN
      NF = 0
      Call Raymrx(N, PI2*F2, C, 0, Y, YC, YW, U, A, IER)
      If ( IER.ne. 0 ) Return
      Y2 = Y(5)
C
C      Find a zero corss
C
10      F1 = F2

```

```

Y1 = Y2
F2 = F1 + DF
If ( F2.gt.FMX ) Go to 20
Call Raymrx(N, P12*F2, C, 0, Y, YC, YW, U, A, IER)
Y2 = Y(5)
If ( Y1*Y2.gt.0 ) Go to 10
C
C Interpolation
C
FS = F2
YS = Y2
F3 = (F1*Y2 - F2*Y1)/(Y2 - Y1)
Do 14 K=1, 10
  Call Raymrx(N, P12*F3, C, 2, Y, YC, YW, U, A, IER0)
  Y3 = Y(5)
  DEL = Y(5)/YW(5)
  F4 = F3*(1 - DEL)
  If ( Abs(DEL).le.EPS ) Go to 15
  If ( Y1*Y3.le.0 ) then
    F2 = F3
    Y2 = Y3
  Else
    F1 = F3
    Y1 = Y3
  Endif
  If ( (F4-F1)*(F4-F2).ge.0 )
*   F4 = (F1*Y2 - F2*Y1)/(Y2 - Y1)
    F3 = F4
14 Continue
  IER = 1
C
15 NF = NF + 1
  FRQ(NF) = F4
  F2 = FS
  Y2 = YS
  Go to 10
C
20 Return
C
90 Write(6, 91) N, C, DF
91 Format(/' Invalid Input in RAYSWP. N, C, DF =', I5, 3X,
*       1P2E10.3/)
  IER = -1
  Return
  End
C
C RAYLEIGH WAVE DISPERSION CURVE
C
C FINDS A DISPERSION CURVE IN FMIN < F < FMAX
C
C M. SAITO SEP. 3, 1989
C REVISIED FEB. 16, 1996
C
C SUBROUTINE RAYDSP(N, FMIN, FMX, DF, CMN, CMX, DC, EPS,
*                 RSLT, KX, IER)
C
C IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)

```

```

PARAMETER (LMAX=50)
DIMENSION RSLT(5,*), Y(5), YC(5), YW(5)
COMMON/MODEL/H(LMAX), RHO(LMAX), VS(LMAX), VP(LMAX)
C
C INPUTS
C N : NUMBER OF LAYERS INCLUDING THE BOTTOM HALF-SPACE
C FMN : MINIMUM FREQUENCY
C FMX : MAXIMUM FREQUENCY, SHOULD BE GREATER THAN FMN
C DF : INCREMENT OF FREQUENCY, SHOULD BE GREATER THAN 0
C CMN : MINIMUM PHASE VELOCITY
C CMX : MAXIMUM PHASE VELOCITY, SHOULD BE GREATER THAN CMN
C CMN AND CMX APPLY ONLY TO FMN
C DC : INCREMENT OF SPHASE VELOCITY, SHOULD BE GREATER THAN 0
C EPS : RELATIVE ACCURACY
C OUTPUTS
C RSLT(1,K) : C, PHASE VELOCITY
C 2 : U, GROUP VELOCITY
C 3 : TRANSFER FUNCTION
C 4 : ELLIPTICITY
C 5 : C*DY24/DC
C KX : ACTUAL LENGTH OF RSLT
C IER : RETURN CODE
C = 0 ; NORMAL EXIT
C
C SUBROUTINE : RAYINT, RAYMRX
C
C Comments : Too large a DF may fail to find a dispersion curve.
C Calculated dispersion curve may not belong to a single
C mode. The sign of RSLT(5,*), the slope of the
C characteristic equation, may help identify the mode.
C
IF ( N.LE.1 .OR. DF.LE.0 .OR. DC.LE.0 .OR. FMN.GE.FMX .OR.
* CMN.GE.CMX ) GO TO 90
C
P12 = 1
P12 = 8*ATAN(P12)
KX = (FMX - FMN)/DF + 1.5
CMIN = CMN
CMAX = CMX
DELC = DC
VS1 = VS(1)
VSN = VS(N)
C
DO 1 K=1, KX
F = FMN + (K-1)*DF
W = P12*F
C
write(6,*)' f, cmin, cmzx, delc', f, cmin, cmax, delc
CALL RAYINT(N, W, CMIN, CMAX, DELC, EPS, C, U, A, ELIP
* , Y, YC, YW, IER)
IF ( IER.LT.0 ) GO TO 10
IF ( IER.GT.1 ) GO TO 10
C
RSLT(1,K) = C
RSLT(2,K) = U
RSLT(3,K) = A

```

```

RSLT(4, K) = ELIP
RSLT(5, K) = YC(5)
C
C FIND NEXT GUESS
C
DDC = C*(1 - C/U)*DF/F
IF ( K.EQ.1 ) THEN
  CMIN = C + DDC
ELSE
  CMIN = RSLT(1, K-1) + 2*DDC
ENDIF
IF ( CMIN.LE.VS1*0.9 ) CMIN = VS1*0.92
IF ( CMIN.GT.VSN ) CMIN = VSN*0.92
W = W + P12*DF
CALL RAYMRX(N, W, CMIN, 1, Y, YC, YW, U, A, IER)
DELC = -CMIN*Y(5)/YC(5)
IF ( YC(5)*RSLT(5, K).LT.0 ) DELC = -DELC*2
IF ( ABS(DELC).GT.ABS(DDC) ) DELC = SIGN(DDC, DELC)/2
CMAX = CMIN + 10*DELC
IF ( CMAX.GT.VSN ) CMAX = VSN
IF ( CMAX.LT.VS1*0.9 ) CMAX = VS1*0.92
DELC = (CMAX - CMIN)/10
IF ( DELC.EQ.0 ) GO TO 10
1 CONTINUE
C
C NORMAL EXIT
C
RETURN
C
10 KX = K - 1
IF ( KX.LE.0 ) THEN
  IER = -1
ELSE
  WRITE(6, 11) F
11 FORMAT (/5X, ' (RAYDSP) ROOT NOT FOUND AT F = ',
*          1PE10.3/)
C *          1PD10.3/)
  IER = 0
ENDIF
C
RETURN
C
C INPUT ERROR
C
90 WRITE(6, 91)
91 FORMAT (5X, 5(' '), 3X, ' (RAYDSP) INVALID INPUTS ',
*          'CHECK PARAMETERS ', 5(' '))
  IER = -1
  RETURN
  END
C
C RAYLEIGH WAVE INTERPOLATION
C
C SIMPLIFIED VERSION OF DISPER-80 RAYDSP
C
C M. SAITO AUG. 17, 1989
C REVISED JUN. 29, 1995

```

```

C
SUBROUTINE RAYINT(N, W, CMN, CMX, DC, EPS, C, U, A, ELIP,
*           Y, YC, YW, IER)
C
C   IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
C   PARAMETER (LMAX=50)
C   DIMENSION Y(5), YC(5), YW(5)
C   COMMON/MODEL/H(LMAX), RHO(LMAX), VS(LMAX), VP(LMAX)
C
C   THIS PROGRAM FINDS A RAYLEIGH WAVE PHASE AND A
C   GROUP VELOCITY AT AN ANGULAR FREQUENCY W
C   NEWTON'S METHOD IS USED
C
C   INPUTS
C   N   : NUMBER OF LAYERS INCLUDING THE BOTTOM HALF SPACE
C   W   : ANGULAR FREQUENCY
C   CMN : MIN PHASE VELOCITY
C   CMX : MAX PHASE VELOCITY
C       CMN MAY BE .GT. CMX, IF SO DC MUST BE .LT. 0
C   DC  : STEP OF PHASE VELOCITY
C   EPS : RELATIVE ACCURACY OF C
C   OUTPUTS
C   C   : PHASE VELOCITY
C   U   : GROUP VELOCITY
C   A   : TRANSFER FUNCTION, 1/2*K**2*13
C   ELIP : ELLIPTICITY OF SURFACE ORBITAL MOTION
C   Y   : SURFACE VALUES OF YIJ
C   YC  : SURFACE VALUES OF C*DYIJ/DC
C   YW  : SURFACE VALUES OF W*DYIJ/DW
C   IER : RETURN CODE
C       = 0 ; NORMAL EXIT
C       = -1 ; INVALID INPUTS
C       = 1 ; TOO SLOW CONVERGENCE
C       = 2 ; NO ROOT IN THE SPECIFIED RANGE
C
C   SUBROUTINE : RAYMRX
C
C   NOTICE : YIJ HERE DEFINED IN TERMS OF Y2 (ORIGINAL)/W*C AND
C             Y4 (ORIGINAL)/W*C
C             UP TO TEN INTERPLOATIONS WILL BE DONE. THE LOOP
C             "DO 7 K=1, 10" DEFINES THE NUMBER OF INTERPOLATIONS.
C
C   IF (N.LE.0 .OR. W.LE.0 .OR. DC.EQ.0) GO TO 90
C
C   WRITE(6,1) W
C 1  FORMAT(/7X,'W',15X,'RAYLEIGH WAVE'/
*        1PE18.6/7X,'C',17X,'Y2',16X,'Y3',16X,'U')
C *        1PD18.6/7X,'C',17X,'Y2',16X,'Y3',16X,'U')
C
C   FIND A ZERO CROSS
C
C   KX = (CMX - CMN)/DC + 0.5
C   IF (KX.LE.0) GO TO 90
C   CMX0 = VS(N)
C   C2 = CMN
C   CALL RAYMRX(N, W, C2, 0, Y, YC, YW, U, A, IER)
C   IF (IER.NE.0) RETURN

```

```

      F2 = Y (5) /ABS (Y (3))
      Y3 =-Y (1) /Y (3)
c   WRITE (6, 2)  C2, F2, Y3
2   FORMAT (1P4E18. 6)
C   2   FORMAT (1P4D18. 6)
      DO 3 K=1, KX
          C1 = C2
          F1 = F2
          C2 = C1 + DC
          IF ( C2. GT. CMX0 ) GO TO 4
          CALL RAYMRX (N, W, C2, 0, Y, YC, YW, U, A, IER1)
          F2 = Y (5) /ABS (Y (3))
          Y3 =-Y (1) /Y (3)
c   WRITE (6, 2)  C2, F2, Y3
          IF ( EPS. LT. 0 ) GO TO 3
          IF ( F2*F1. LE. 0 ) GO TO 6
3   CONTINUE
4   WRITE (6, 5)  W
5   FORMAT (/5X, ' (RAYINT) NO ROOT FOUND AT W =',
*         1PE12. 5/)
C   *         1PD12. 5/)
      IER = 2
      RETURN
C
C   INTERPOLATION
C
6   C4 = C2
      IF ( F2. EQ. 0 ) GO TO 9
      C3 = (C1*F2 - C2*F1) / (F2 - F1)
      DO 7 K=1, 10
          CALL RAYMRX (N, W, C3, 1, Y, YC, YW, U, A, IER1)
          F3 = Y (5) /ABS (Y (3))
          Y3 =-Y (1) /Y (3)
c   WRITE (6, 2)  C3, F3, Y3
          If ( Abs (Y (5)). Lt. Abs (YC (5)) ) then
              DEL =-Y (5) /YC (5)
          Else
              DEL = F3* (C3 - C2) / (C3* (F3 - F2))
          Endif
          C4 = C3* (1 + DEL)
          IF ( ABS (DEL). LE. EPS ) GO TO 9
          IF ( F1*F3. LE. 0 ) THEN
              C2 = C3
              F2 = F3
          ELSE
              C1 = C3
              F1 = F3
          ENDIF
          IF ( (C4 - C1) * (C4 - C2). GE. 0 )
*         C4 = (C1*F2 - C2*F1) / (F2 - F1)
          C3 = C4
7   CONTINUE
      WRITE (6, 8)  W
8   FORMAT (/5X, ' (RAYINT) ROOT MAY BE INACCURATE AT W =',
*         1PE12. 5)
C   *         1PD12. 5)
      IER = 1

```



```

C
C   GROUP VELOCITY AND AMPLITUDE
C
9 C = C4
  CALL RAYMRX(N, W, C, 2, Y, YC, YW, U, A, IER1)
C
  F3 = Y(5)/ABS(Y(3))
  Y3 = -Y(1)/Y(3)
  ELIP = Y3
  WRITE(6,2) C, F3, Y3, U
C
  RETURN
C
C   INPUT ERROR
C
90 WRITE(6,91) N, W, CMN, CMX, DC
91  FORMAT(20X,5(' '),3X,'(RAYINT) INVALID INPUTS',3X,'N =',I5,
*        3X,'W =',1PE10.3,3X,'CMN =',E10.3,3X,
1        'CMX =',E10.3,3X,'DC =',E10.3,3X,5(' '))
C *        3X,'W =',1PD10.3,3X,'CMN =',D10.3,3X,
C 1        'CMX =',D10.3,3X,'DC =',D10.3,3X,5(' '))
  IER = -1
  RETURN
  END
C
C   RAYLEIGH WAVE MATRIX METHOD INTEGRATION
C
C   THIS IS A SIMPLIFIED VERSION OF DISPER-80 RAYMRX
C
C   M. SAITO   AUG. 17, 1989
C   REVISED   JUN. 29, 1995
C
  SUBROUTINE RAYMRX(N, W, C, IG, Y, YC, YW, U, A, IER)
C
C   IMPLICIT REAL*8 (A-H, O-Z)
  PARAMETER (LMAX=50)
  DIMENSION Y(5), YC(5), YW(5)
*        , Z(5), ZC(5), ZW(5), Q(5,5), QC(5,5), QW(5,5)
  COMMON/MODEL/H(LMAX), RHO(LMAX), VS(LMAX), VP(LMAX)
  DATA EPS/1.E-10/
C
C   INPUTS
C   N   : NUMBER OF LAYERS INCLUDING THE BOTTOM HALF SPACE
C   W   : ANGULAR FREQUENCY
C   C   : PHASE VELOCITY
C   IG  : = 0 ; TO INTEGRATE Y ONLY
C        = 1 ; TO INTEGRATE Y AND YC
C        = 2 ; TO INTEGRATE Y, YC, AND YW
C
C   OUTPUTS
C   Y   : SURFACE VALUE OF YIJ
C   YC  : SURFACE VALUE OF C*DYIJ/DC
C   YW  : SURFACE VALUE OF W*DYIJ/DW
C   U   : GROUP VELOCITY
C   A   : TRANSFER FUNCTION FOR STEP SOURCE TIME FUNCTION
C        1/2*K**2*13
C   IER : RETURN CODE
C        = 0 ; NORMAL EXIT

```

```

C
C NOTICE : DEFINITION OF COMPOUND MATRIX ELEMENT IS DIFFERENT
C FROM THE ORIGINAL ONE
C
C DEFINE SHO (X) =SINH (X) /X AND SH1 (X) = (COSH (X) -SINH (X) /X) /X**2
C
C SHO (X) = 0. 9999997 + X*( 0. 1666667
* + X*( 0. 0083361 + X*0. 0001984))
C SH1 (X) = 0. 3333333 + X*( 0. 0333333
* + X*( 0. 0011907 + X*0. 0000220))
C
C DOUBLE PRECISION VERSION
C
C SHO (X) = 1. D0 + X*( 1. 6666 66666 66666 7D-1
* + X*( 8. 33 33333 33334 0D-3
C 1 + X*( 1. 9 84126 98412 7D-4
C 2 + X*( 2. 7557 31918 9D-6 + X*( 2. 50 12108 4D-8
C 3 + X*( 1. 60596 1D-10 + X*( 7. 64 7D-13))))))
C SH1 (X) = 3. 3333 33333 33333 3D-1
C * + X*( 3. 333 33333 33333 3D-2
C 1 + X*( 1. 19 04761 90476 2D-3
C 2 + X*( 2. 20458 55379 2D-5
C 3 + X*( 2. 505 21083 7D-7 + X*( 1. 9 27085 3D-9
C 4 + X*( 1. 0706 3D-11 + X*4. 50D-14))))))
C
C INITIAL VALUES
C
C IF ( N. LE. 0 .OR. W. LE. 0 .OR. C. LE. 0 ) GO TO 90
C IER = 0
C L = N
C WN = W/C
C RO = RHO (L)
C IF ( RO. LE. 0 .OR. VP (L). LE. 0 .OR. VS (L). LE. 0 ) GO TO 92
C CP = C/VP (L)
C CS = C/VS (L)
C GA = 2/CS**2
C RAA = ( 1 + CP) * ( 1 - CP)
C RBB = ( 1 + CS) * ( 1 - CS)
C IF ( RBB. LE. 0 .OR. RAA. LE. 0 ) GO TO 92
C RA = SQRT (RAA)
C RB = SQRT (RBB)
C
C Y (2) = RA*RB - 1
C Y (1) = RO* (GA*Y (2) + 1)
C Y (5) = -RO* (GA*Y (1) + RO* (GA - 1))
C Y (3) = -RO*RA
C Y (4) = -RO*RB
C IF ( 1G. GT. 0 ) THEN
C YC (3) = RO*CP**2/RA
C YC (4) = RO*CS**2/RB
C YC (2) = - (RB*YC (3) + RA*YC (4)) /RO
C YC (1) = RO*GA* (YC (2) - 2*Y (2))
C YC (5) = RO*GA* (2* (Y (1) + RO) - YC (1))
C ENDF
C
C DO 3 I=1, 5
C Y (I) = Y (I) *EPS

```

```

        YC (I) = YC (I) *EPS
        YW (I) = 0
3 CONTINUE
C
C   INTEGRATE UPWARD
C
DO 21 L=N-1, 1, -1
    RO = RHO (L)
    IF ( RO .LE. 0 .OR. VP (L) .LE. 0 .OR. VS (L) .LE. 0 ) GO TO 92
    CP = C/VP (L)
    CS = C/VS (L)
    GA = 2/CS**2
    RAA = (1 + CP) * (1 - CP)
    RBB = (1 + CS) * (1 - CS)
    HK  = H (L) *WN
    HKK = HK**2
    XX  = RAA*HKK
    ONE = 1
C
C   SINH (X) /X
C
DO 4 J=1, 2
    CA = CB
    SA = SB
    DA = DB
    AA = ABS (XX)
    IF ( AA .LE. 1 ) THEN
        SB = SHO (XX)
        CB = 1 + XX*SHO (XX/4) **2/2
        IF ( IG .GT. 0 ) DB = SH1 (XX) *HKK
    ELSE
        AA = SQRT (AA)
        IF ( XX .LE. 0 ) THEN
            CB = COS (AA)
            SB = SIN (AA) /AA
        ELSE
            IF ( AA .GT. 100 ) ONE = 0
            IF ( AA .LE. 100 ) ONE = ONE/COSH (AA)
            CB = 1
            SB = TANH (AA) /AA
        ENDIF
        IF ( IG .GT. 0 ) DB = (HKK/XX) * (CB - SB)
    ENDIF
    XX = HKK*RBB
    SB = HK*SB
4 CONTINUE
C
C   LAYER MATRIX
C
E1 = CA*CB
E2 = E1 - ONE
E3 = SA*SB
E4 = SA*CB
E5 = CA*SB
R1 = 1/RO
R2 = RO*GA
R3 = R2 - RO

```

F1 = E2 - E3  
 F2 = R1\*F1  
 F3 = GA\*F1 + E3

C

Q (3, 3) = E1  
 Q (3, 4) = RAA\*E3  
 Q (4, 3) = RBB\*E3  
 Q (2, 5) = -R1\*(F2 + R1\*(E2 - RAA\*Q (4, 3)))  
 Q (1, 5) = R2\*Q (2, 5) + F2  
 Q16 = -R2\*Q (1, 5) - F3  
 Q (2, 2) = Q16 + E1  
 Q (1, 2) = R2\*Q16 - R3\*F3  
 Q (5, 2) = -R2\*Q (1, 2) + R3\*(R2\*F3 + R3\*E3)  
 Q (2, 3) = R1\*(E4 - RBB\*E5)  
 Q (1, 3) = R2\*Q (2, 3) - E4  
 Q (4, 2) = -R2\*Q (1, 3) + R3\*E4  
 Q (2, 4) = R1\*(E5 - RAA\*E4)  
 Q (1, 4) = R2\*Q (2, 4) - E5  
 Q (3, 2) = -R2\*Q (1, 4) + R3\*E5  
 Q (3, 5) = Q (2, 4)  
 Q (4, 4) = Q (3, 3)  
 Q (4, 5) = Q (2, 3)  
 Q (5, 3) = Q (4, 2)  
 Q (5, 4) = Q (3, 2)  
 Q (5, 5) = Q (2, 2)  
 Q (1, 1) = ONE - 2\*Q16  
 Q (2, 1) = 2\*Q (1, 5)  
 Q (3, 1) = 2\*Q (1, 4)  
 Q (4, 1) = 2\*Q (1, 3)  
 Q (5, 1) = 2\*Q (1, 2)

C

C

INTEGRATE Y

C

DO 5 I=1, 5  
 5 Z (I) = Y (I)  
 DO 7 I=1, 5  
 TMP = 0  
 DO 6 J=1, 5  
 6 TMP = TMP + Q (I, J) \* Z (J)  
 Y (I) = TMP  
 7 CONTINUE

C

IF ( 1G GT. 0 ) THEN  
 RAC = -2\*CP\*\*2  
 RBC = -2\*CS\*\*2  
 E1C = -HK\*(E4 + E5)  
 E3C = -2\*E3 - HK\*(DA\*SB + SA\*DB)  
 E4C = -E4 - HK\*(E3 + DA\*CB)  
 E5C = -E5 - HK\*(E3 + DB\*CA)  
 R2C = -2\*R2  
 F1C = E1C - E3C  
 F2C = R1\*F1C  
 F3C = GA\*(F1C - 2\*F1) + E3C

C

QC (3, 3) = E1C  
 QC (3, 4) = RAA\*E3C + RAC\*E3  
 QC (4, 3) = RBB\*E3C + RBC\*E3

```

QC (2, 5) = -R1* (F2C + R1* (E1C - RAA*QC (4, 3) - RAC*Q (4, 3)))
QC (1, 5) = R2*QC (2, 5) + R2C*Q (2, 5) + F2C
QC16    = -R2*QC (1, 5) - R2C*Q (1, 5) - F3C
QC (2, 2) = QC16 + E1C
QC (1, 2) = R2*QC16 + R2C*Q16 - R3*F3C - R2C*F3
QC (5, 2) = -R2*QC (1, 2) - R2C*Q (1, 2) + R3* (R2*F3C + R3*E3C)
*       + R3* (R2C*F3 + R2C*E3) + R2C* (R2*F3 + R3*E3)
QC (2, 3) = R1* (E4C - RBB*E5C - RBC*E5)
QC (1, 3) = R2*QC (2, 3) + R2C*Q (2, 3) - E4C
QC (4, 2) = -R2*QC (1, 3) - R2C*Q (1, 3) + R3*E4C + R2C*E4
QC (2, 4) = R1* (E5C - RAA*E4C - RAC*E4)
QC (1, 4) = R2*QC (2, 4) + R2C*Q (2, 4) - E5C
QC (3, 2) = -R2*QC (1, 4) - R2C*Q (1, 4) + R3*E5C + R2C*E5
QC (3, 5) = QC (2, 4)
QC (4, 4) = QC (3, 3)
QC (4, 5) = QC (2, 3)
QC (5, 3) = QC (4, 2)
QC (5, 4) = QC (3, 2)
QC (5, 5) = QC (2, 2)
QC (1, 1) = -2*QC16
QC (2, 1) = 2*QC (1, 5)
QC (3, 1) = 2*QC (1, 4)
QC (4, 1) = 2*QC (1, 3)
QC (5, 1) = 2*QC (1, 2)

```

C  
C  
C

INTEGRATE YC

```

DO 9 I=1, 5
  ZC (I) = YC (I)
DO 11 I=1, 5
  TMP = 0
  DO 10 J=1, 5
    TMP = TMP + QC (I, J)*Z (J) + Q (I, J)*ZC (J)
  YC (I) = TMP
11 CONTINUE
ENDIF

```

C

IF ( IG GT. 1 ) THEN

```

E1W = HK* (RAA*E4 + RBB*E5)
E3W = HK* (E4 + E5)
E4W = HK* (E1 + Q (4, 3))
E5W = HK* (E1 + Q (3, 4))
F1W = E1W - E3W
F2W = R1*F1W
F3W = GA*F1W + E3W

```

C

```

QW (3, 3) = E1W
QW (3, 4) = RAA*E3W
QW (4, 3) = RBB*E3W
QW (2, 5) = -R1* (F2W + R1* (E1W - RAA*QW (4, 3)))
QW (1, 5) = R2*QW (2, 5) + F2W
QW16    = -R2*QW (1, 5) - F3W
QW (2, 2) = QW16 + E1W
QW (1, 2) = R2*QW16 - R3*F3W
QW (5, 2) = -R2*QW (1, 2) + R3* (R2*F3W + R3*E3W)
QW (2, 3) = R1* (E4W - RBB*E5W)
QW (1, 3) = R2*QW (2, 3) - E4W

```

```

QW (4, 2) = -R2*QW (1, 3) + R3*E4W
QW (2, 4) = R1* (E5W - RAA*E4W)
QW (1, 4) = R2*QW (2, 4) - E5W
QW (3, 2) = -R2*QW (1, 4) + R3*E5W
QW (3, 5) = QW (2, 4)
QW (4, 4) = QW (3, 3)
QW (4, 5) = QW (2, 3)
QW (5, 3) = QW (4, 2)
QW (5, 4) = QW (3, 2)
QW (5, 5) = QW (2, 2)
QW (1, 1) = -2*QW16
QW (2, 1) = 2*QW (1, 5)
QW (3, 1) = 2*QW (1, 4)
QW (4, 1) = 2*QW (1, 3)
QW (5, 1) = 2*QW (1, 2)

```

C  
C  
C

INTEGRATE YW

```

DO 13 I=1, 5
13   ZW (I) = YW (I)
DO 15 I=1, 5
    TMP = 0
DO 14 J=1, 5
14   TMP = TMP + QW (I, J) *Z (J) + Q (I, J) *ZW (J)
    YW (I) = TMP
15   CONTINUE
ENDIF

```

C  
C  
C

NORMALIZATION

```

IF ( ABS (Y (5)) *EPS. LT. 1 ) GO TO 21
DO 17 I=1, 5
17   Y (I) = Y (I) *EPS
    IF ( IG. GT. 0 ) THEN
DO 18 I=1, 5
18   YC (I) = YC (I) *EPS
ENDIF
    IF ( IG. GT. 1 ) THEN
DO 19 I=1, 5
19   YW (I) = YW (I) *EPS
ENDIF
ENDIF

```

C  
C  
C

21 CONTINUE

```

IF ( IG. EQ. 2 ) THEN
    U = C / (1 + YW (5) / YC (5))
    A = -Y (3) / (W * C + YC (5))
ENDIF

```

C  
C  
C  
C

RETURN

INPUT ERROR

C  
C  
C  
C

```

90 WRITE (6, 91) N, W, C
91   FORMAT (20X, 5 ('?'), 3X, ' (RAYMRX) INVALID INPUTS', 3X, ' N =', I5,
*       3X, ' W =', 1PE10.3, 3X, ' C =', E10.3, 3X, 5 ('?'))
C   *       3X, ' W =', 1PD10.3, 3X, ' C =', D10.3, 3X, 5 ('?'))

```

```
IER =-1
RETURN
C
92 WRITE (6, 93) L
93  FORMAT (20X, 5 ('?'), 3X, ' (RAYMRX)  INVALID INPUT AT LAYER',
*         15, 3X, 5 ('?'))
IER =-1
RETURN
END
```

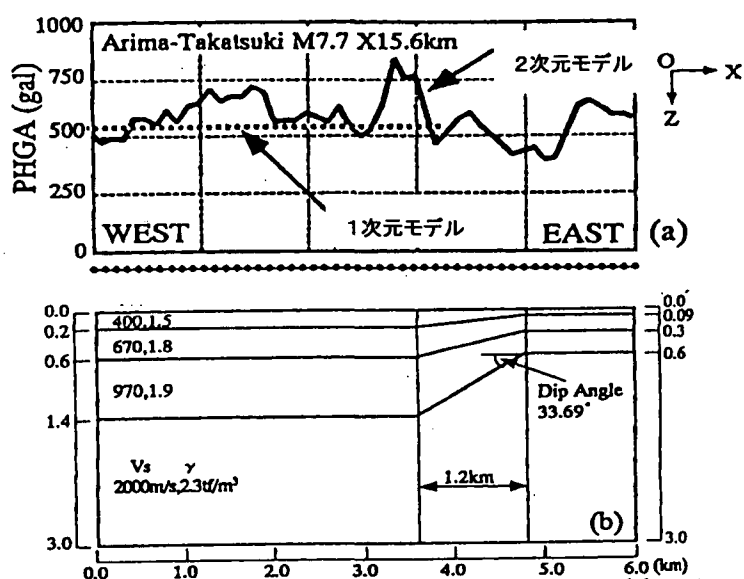
資料 1 1 深層地盤による地震動増幅特性についての解析例

設計地震動を理論的方法や、経験的方法と理論的方法を組み合わせたハイブリッド法などで評価する場合には、深層地盤による影響を考慮しなければならない。ここでは、深層地盤構造による地震動の増幅特性を解析した事例を示す。

(事例 1)

表層に近いところの不整形だけでなく、やや深い、例えば 200m~1.5km 程度の箇所における不整形性が地表面加速度に及ぼす影響について検討した結果を付録図 11-1 に示す<sup>1)</sup>。

但し、(b)のような不整形地盤構造を対象とした差分法による 2次元地震応答解析結果と 1次元重複反射解析結果である。



PHGA: Peak Horizontal Ground Acceleration

付録図 11-1 不整形地盤の地表面応答の変化に関する計算事例<sup>1)</sup>

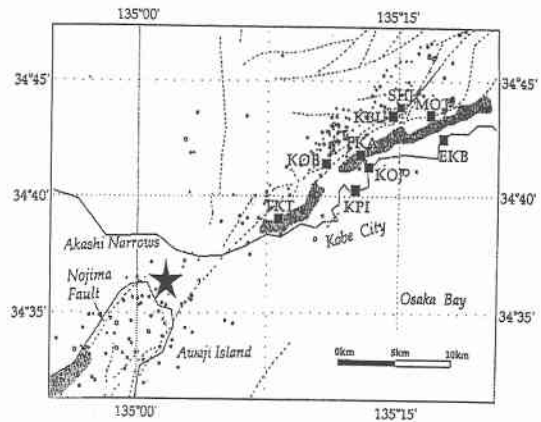


(事例2)

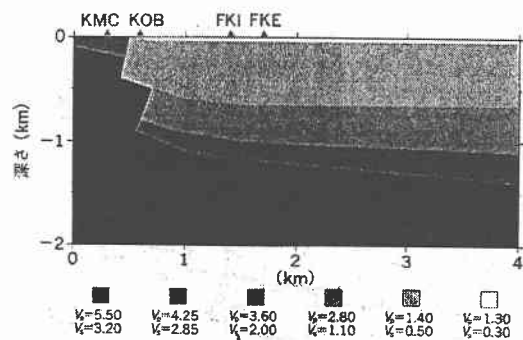
兵庫県南部地震の被害は、大阪盆地の北端に近い堆積地盤で「带状」に集中した。被害が集中した地域が六甲断層系からやや離れて、それらに平行して直線上に連なっていることから、直下に伏在断層があり、その断層が兵庫県南部地震の震源断層となったと考えられた。しかし、余震分布は既存の活断層に沿って発生しており、余震分布や強震記録から推定される起震断層は、この「帯」から北に1 km くらい離れたところに位置する(付録図 11-2 参照)。

そこで、本震直後から、東灘区付近で断層に近い丘陵部から被害集中地域を横断する南北方向に設置したアレー状も強震観測網における余震記録や反射波探査結果を基に付録図 11-3 のような地下構造モデルを推定した<sup>2)</sup>。

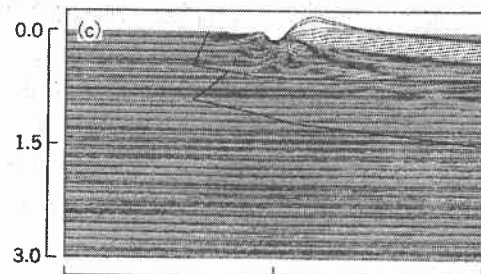
その結果、付録図 11-4 のように、震源から放射された地震波が基盤から堆積層へ伝播する様子が見えてくる。すなわち、盆地端部近傍で基盤岩が急激に深くなることでの震動がフォーカシングのような現象と軟らかい表層地盤による増幅の相乗効果によって「震災の帯」の生成の原因と推定される。



付録図 11-2 被災の帯と余震分布図<sup>2)</sup>



付録図 11-3 地下構造モデル図



付録図 11-4 地下構造モデルに対して合成された地震動

参考文献

- 1) 江尻譲嗣ら：やや深い地盤構造の不整形性が地震動に及ぼす影響，土木学会第 51 回，年次学術講演会，平成 8 年 9 月
- 2) 例えば，地盤工学会：阪神・淡路大震災調査報告書 平成 8 年 3 月