

地下構造物の耐震

関西電力株式会社 松本正毅

1. 地下構造物の耐震設計法¹⁾

都市機能の高度化、高密度化等に伴い、積極的に地下の利用が進められており、様々な施設（構造物）が建設されている。これら構造物は水道・ガス・電気・通信など比較的小口径な埋設管から、トンネルや共同溝など大口径の線状地下構造物、また駐車場や地下タンクなどの鉛直地下構造物といったような形状に分けられる。これら各種地下構造物に対しては、過去の地震被害や地震観測等から耐震性の検討がなされており、表1-1に示すように耐震設計法として①震度法②応答変位法③動的解析法が基準や指針類で用いられている。通常の設計では震度法や応答変位法が用いられ、構造物の形状や地盤条件が複雑な場合などに動的解析法が用いられている。ここではまず、多くの地下構造物の耐震設計に取り入れられている応答変位法の概要について述べるとともに、次章以下で地下構造物の代表例としてボックスカルバート、シールドトンネルの耐震設計事例について取り上げることとする。

表1-1 基準類に示された主要な地下構造物の耐震設計法

対象構造物	基準類の名称（制定年）	耐震設計法
石油パイプライン埋設導管	石油パイプライン技術基準 (1974)	縦断方向：応答変位法
沈埋トンネル	沈埋トンネル耐震設計指針（案） (1975)	・沈埋トンネル部 縦断方向：変位法 横断方向：震度法 ・立坑・換気塔部 震度法 ・部分系（周辺地盤、沈埋トンネル部、立坑・換気塔部）および全体系 動的解析
水道施設	水道施設耐震工法指針・解説 (1979)	・埋設管路 縦断方向：応答変位法 ・暗渠・共同溝 横断方向：震度法 縦断方向：応答変位法 ・立坑 震度法、応答変位法 (暗渠・共同溝、立坑については必要に応じて動的解析の実施)
地下貯油槽躯体	地下貯油施設技術指針 (1980)	偏土圧入力による方法 変位入力による方法 動的解析（必要に応じて）
LNG地下タンク	LNG地下式貯槽指針 (1981)	震度法 動的解析（必要に応じて）
ガス導管	高・中低圧ガス導管耐震設計指針 (1982)	縦断方向：応答変位法
共同溝躯体	共同溝設計指針 (1986)	軟弱地盤部等 縦断方向：応答変位法 特に重要度が高い箇所 動的解析
シールドトンネル	トンネル標準示方書（シールド編） ・同解説（1986）	地山条件の急変部等 応答変位法 動的解析については他の計算結果と照合して解釈
地下駐車場躯体	駐車場設計・施工指針 同解説 (1992)	長手、短手方向 応答変位法 構造が複雑な場合等 動的解析

1-1 応答変位法の概要¹⁾

応答変位法とは、地下構造物の地震時挙動はその慣性力ではなく周辺地盤の動的変形に支配されるものとして、周辺地盤の地震時変位に応じて構造物を強制的に変形させ、このとき生じる応力・変形を解析するものである。

一般に地下構造物の見かけの重量は、周辺地盤と比較すると相対的に軽く、また周囲を地盤で囲まれていることから逸散減衰が大きく、自己振動がすぐに収まってしまふ。これらのことから、地下構造物自身が地盤中で自由に振動するとは考えにくい。地下構造物が周辺地盤の振動に追従した動きをすることは地下埋設管、地下タンク、沈埋トンネル等の地震時挙動観測、振動実験などからも明らかであり、地下構造物に生じる応力は、慣性力による影響よりも周辺地盤の相対変位によって強制的に生じさせられるものと考えられる。

1-2 応答変位法の考え方²⁾

ここでは、応答変位法の基本的な考え方について管路構造物を例に示す。管路軸方向および軸直角方向に作用する力の関係を図1-1に示す。このモデルより力の釣合式は、

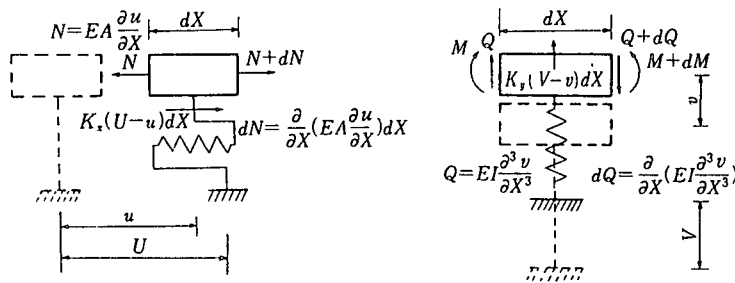


図1-1 管路応答モデル

$$-EA \frac{d^2 u}{dx^2} = k_x (U - u) \quad (\text{軸方向})$$

$$EI \frac{d^4 v}{dx^4} = k_y (V - v) \quad (\text{軸直角方向})$$

u, v : 管の軸方向および軸直角方向の変位

U, V : 軸方向および軸直角方向の地盤の入力変位

k_x, k_y : 軸方向および軸直角方向における管の単位長さ当たりの地盤バネ定数

EA, EI : 管の軸および曲げ剛性

となる。上式は弾性床の上の棒あるいは梁の変形を表す式である。応答変位法の特徴は管路位置での地盤変位が既知量として与えられているところにあり、地盤の変位としては地盤振動の波長 L をもった正弦波を仮定すると

$$U = a_x \sin 2\pi x / L \quad \text{軸方向}$$

$$V = a_y \sin 2\pi x / L \quad \text{軸直角方向}$$

で与えられ、管路構造物の応答変位は

$$u = \alpha_1 U, \quad \alpha_1 = 1 / \{ 1 + (2\pi / \beta_1 L)^2 \}, \quad \beta_1 = \sqrt[2]{k_x / EA}$$

$$v = \alpha_2 V, \quad \alpha_2 = 1 / \{ 1 + (2\pi / \beta_2 L)^4 \}, \quad \beta_2 = \sqrt[4]{k_y / EI}$$

となる。

以上は一様な地盤にある一様な断面の無限長の梁である仮定のもと導かれており、管路構造物に関する基準類において基本的な考え方は同じである。ただし、上記仮定を満足しない場合や地盤変位あるいはひずみの設定方法等については関連する基準類を参照されたい。

一般に、横断方向の断面は地震時で決まることは少なく省略されることが多いが、「駐車場設計・施工指針 同解説」では原則として短手、長手の両方向について応答変位法による耐震計算を行うこととしている。これは、地下駐車場の構造が線状地下構造物と異なり、短手、長手の両方向に広がりをもっていることによる。図1-2に「駐車場設計・施工指針 同解説」に示されている地震時荷重の考え方を示す

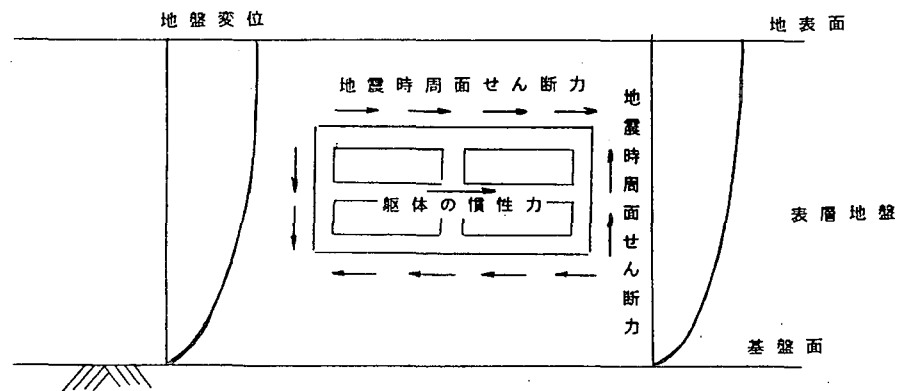


図1-2 「駐車場設計・施工指針 同解説」に示されている地震時荷重

2. ボックスカルバートの耐震設計

2-1 耐震設計概説²⁾

取水あるいは放水のための水路、あるいは道路下などにケーブル、配管等を収容する場合の地下構造物としてボックスカルバートが用いられることが多い。ボックスカルバートの設計としては縦断方向については、「水道施設耐震工法指針・解説」、「沈埋トンネル耐震設計指針」等の線状地下構造物の設計方法をもとに設計を行っている。また、横断方向の設計については、側壁や頂版などの部材をはりにモデル化したラーメンとして設計する。表2-1に、各機関で策定されている耐震設計法の要約を示す。

表 2-1 各種基準による応答変位法

	石油パイプライン地震対策要綱(1975)	水道施設耐震工法指針・解説(1979)	沈埋トンネル耐震設計指針(案)(1975)
設計震度・加速度	$kh' = 0.15$	$kh' = 0.15$	$A_{0.15} = 150 \text{ gal}$
スペクトル・波形	単位震度あたりの標準スペクトル (S_v)	同左	単位加速度あたりの標準スペクトル (S_v)
地盤の固有周期	$T = C (H/V_s)$ 粘性土: $C = 4.0$ 砂質土: $C = 5.2$	$T_g = 4 \sum (H_i/V_{s1})$ H_i : i 層の層厚 V_{s1} : i 層のせん断波速度	$T = 4H/V_{s,av}$ H : 表層地盤の層厚 $V_{s,av}$: 表層の平均せん断波速度
変位振幅	水平: $U_h(x) = (2/\pi^2) \cdot S_v \cdot T \cdot kh' \cdot \cos(\pi \cdot x/2H)$ 鉛直: $U_v = 1/2 \cdot U_h$		左の式の kh' を $A_{0.15}$ に変更したもの
波長	$L = (2 \cdot L_1 \cdot L_2) / (L_1 + L_2)$ $L_1: T \cdot V_{s1}$ $L_2: T \cdot V_{s0}$	$L = Tg \cdot (2 \cdot V_s \cdot V_{s0}) / (V_s + V_{s0})$ V_s : 表層地盤の平均せん断波速度 V_{s0} : 基盤のせん断波速度	特に規定なし

2-2 設計事例 (火力発電所放水路・ボックスカルバート部)

ボックスカルバートの耐震設計例として、火力発電所の放水路ボックスカルバート部の設計例を以下に示す。

(1) 設計条件

(a) 形状寸法

- ① 断面寸法: 高さ 5.5m、幅 10m、
部材厚さ (頂板・側壁 $t=0.7\text{m}$ 、底版 $t=0.8\text{m}$)
- ② 土被り: 3.0m程度

構造寸法図を図 2-1 に地質断面図を図 2-2 に示す。

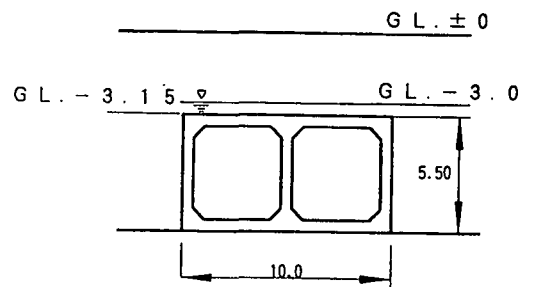


図 2-1 構造寸法図

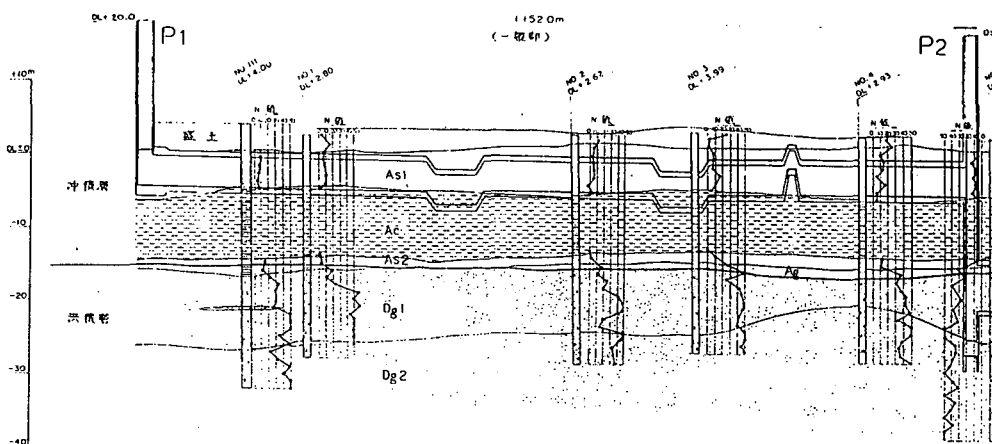


図 2-2 地質断面図

(b) 地盤モデル

洪積砂質土層 (GL. -21m, $V_s=460\text{m/s}$) を基盤とし、基盤および表層地盤の解析に用いる地盤モデルを図 2-3 に示す。

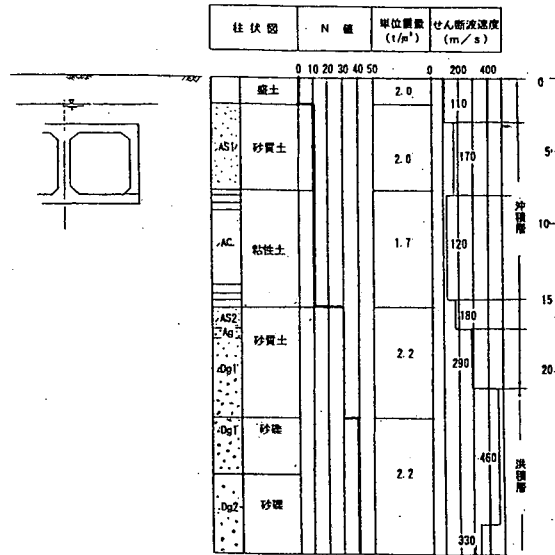


図 2-3 地盤モデル

(c) 入力地震波

地震動の種類

タフトNS波、エル・セントロNS波、八戸NS波（遠距離）、新潟NS波（中距離）、伊豆NS波（近距離）の5波について基準類と同規模になるように $A_{max} = 150 \text{ gal}$ となるように設定した。

(2) 設計のフロー

設計例の放水路は、地盤変位振幅の算出法としては地質が複雑なことから、既往の観測地震波を用いた等価線形化法による1次元重複反射理論により地盤の応答解析を行い、構造物中心位置での地盤変位振幅を求めた。

放水路の長手方向の耐震設計は、図2-4に示す設計フローに従って実施した。

(a) まず、放水路の形状寸法の設定、地盤条件の設定、

地震波の選定を行う。

(b) 次に、応答変位法によって、継手を設けない場合の断面力を求める。

(c) 継手間隔を仮定して、継手を設けた場合の放水路の断面力を算出する。

(d) 算出された断面力より、放水路の応力度の計算を行い、鉄筋の応力、コンクリートの応力を照査する。

(e) 発生応力度が許容応力度を越える場合には、継手間隔を狭めて、再度計算する。

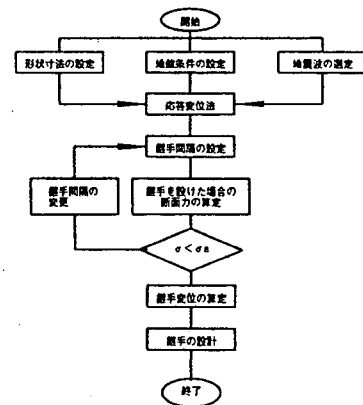


図 2-4 設計フロー

- (f)発生応力度が許容応力度以内におさまる継手間隔を決定する。
 (g)継手の変位量を算出する。
 (h)沈下などの影響を考慮して継手構造を決定する。

(3)変位振幅

前述したように、地盤の変位振幅は、地盤の等価せん断弾性係数および等価減衰定数のせん断ひずみ依存性を考慮した1次元重複反射理論解析プログラム「SHAKE」を使用し算出した。計算された放水路中心位置での変位振幅を表2-2に示す。当該地点では、八戸NS波の変位振幅が最も大きく算出され、以後の計算は、この変位振幅を用いて設計を行った。ちなみに表2-1に示した各種の基準から求められる変位振幅は、最大1.5cmであり、本計算方法により求められた変位より小さく算出された。

表2-2 放水路位置での地震動別地盤の変位振幅

地震動	地盤の変位振幅 (cm)
タフトNS波	3.1
エル・セントロNS波	2.9
八戸NS波	3.9
新潟NS波	2.4
伊豆NS波	1.6

(4)継手間隔および継手の変位

応答変位法によって算出される断面力は、管路が無限に連続するとした場合の断面力である。放水路の場合は、継手を設けなければ、非常に大きな断面力が発生することになるので、適当な間隔に可とうジョイントを設け、断面力を低減する。

継手間隔の検討は、図2-5に示すように、放水路を地盤ばねによって支持したはりにモデル化し、地盤ばねに地盤の変位振幅を与え、継手を設けた場合の断面力を算出した。この断面力によって発生する応力度と許容応力度を比較し、継手間隔を設定した。設計例では、継手間隔は40m、地震による継手の変位は約3cmと算出された。

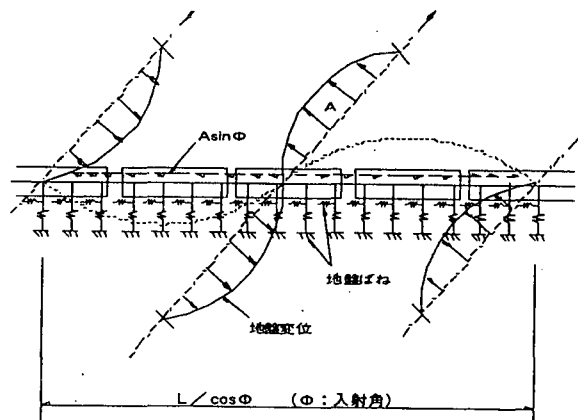


図2-5 継手を設けた場合の断面力算出の概念図

(5)動的解析による照査

応答変位法は、構造物の慣性力と減衰力を無視した静的な計算方法である。放水路の場合、その内部は海水で満たされるため、慣性力の影響を考慮した動的解析を行い、応答変位法による設計を照査する必要がある。図2-6は、地盤・放水路を質量・ばねに置換した軸方向断面力を算出するための動的解析モデルである（減衰特性を表すダッシュポットは図上では省略した）。

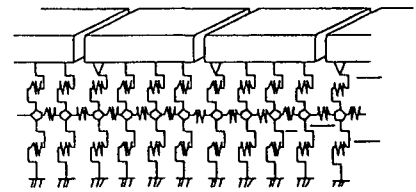


図2-6 軸方向振動モデル

表層地盤のモデル化は、放水路横断方向の地盤を2次元有限要素法でモデル化し、図2-6に示すモデルの地盤バネの値を決定する。地盤のせん断剛性は、地盤のせん断ひずみ依存性を考慮した1次元重複反射理論解析の結果を用いる。

軸方向の動的解析は、入力地震動に位相差があるとして、ある時間差をもって耐震上の基盤面に地震動が作用すると考える。ここでは基盤のせん断速度で地震動が伝播するものとして位相差を算出している。表2-3に応答変位法と動的解析の結果を示すが、動的解析による解析結果が応答変位法によって算出される結果を下回っているのはこの地震動の伝播速度が大きく位相差があまり生じなかったことによると思われる。このように動的解析の結果には、解析条件の設定値等に、まだ大きな不確かさが含まれていることを考慮する必要がある。

表2-3 応答変位法と動的解析の結果

解析手法	軸力 (t)	曲げモーメント (t・m)	せん断力 (t)	軸方向伸縮力 (cm)	せん断変位量 (cm)	相対回転角 (度)
応答変位法	2030	4780	370	3.1	1.4	0.151
動的解析	987	3044	217	2.7	0.9	0.125

3. シールドトンネルの耐震設計

3-1 耐震設計概説^{1) 5)}

シールド工法は発進・到達立坑以外の工事用地が少なくすむこと、周辺構造物に影響を与えないで掘ることができること、広範囲の土質に対応できることなどの利点を生かし、ライフライン施設を初めとした多くの都市トンネルに用いられている。

シールドトンネルの覆工はコンクリート製もしくは鋼製のプレキャスト部材のセグメントを組み立てた構造である。セグメントの接合に用いられる継手の剛性はセグメント本体の剛性に比べ小さいことから、シールドトンネルは他の線状地下構造物に比べ不連続な構造体となっている。しかしながら、各種設計指針では、シールドトンネルの耐震設計法として応答変位法をあげている。これは見かけの比重が小さいなど一般の線状地下構造物と共通した性格を有し、挙動が類似していると考えられ

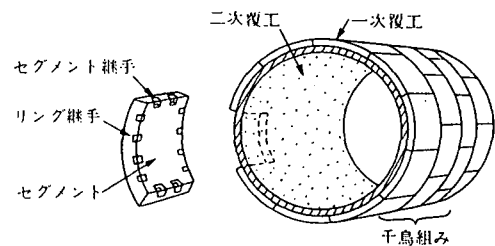


図3-1 シールドトンネルの構造図

るからである。

線状地下構造物の応答変位法による解析の場合弾性床上の梁（はり）で通常モデル化するが、シールドトンネルは前述のように多数の継ぎ手を有し不連続な構造体であるため、モデル化に伴い軸剛性及び曲げ剛性を適切に評価する必要がある。特に軸剛性については圧縮はセグメントリングの断面が抵抗し剛性は大きい、引張りに対してはリング継ぎ手に変形し剛性が小さいという異方性を持つ。このような剛性の異方性をどう評価するかが重要であり、一般的には図3-2に示すような、覆工構造を長手方向の断面力とこれによって生じる変形量の関係が見かけ上等しくなるような等価剛性梁に置換する方法が多く採用されている。

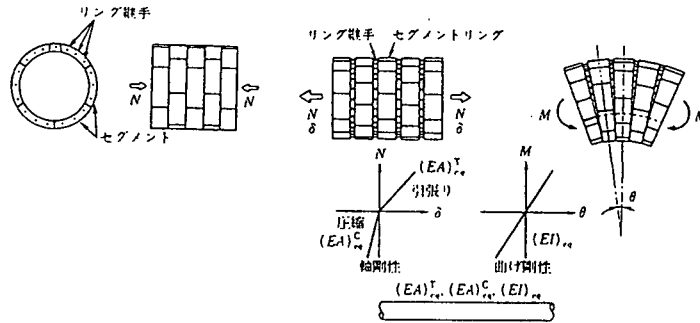


図3-2 等価剛性梁の概念図

覆工の剛性の評価法については各種基準・指針類（例えば「水道施設耐震工法指針・解説」）に例示されているのでそれを参照していただきたい。

3-2 設計事例（火力発電所放水路シールドトンネル部）

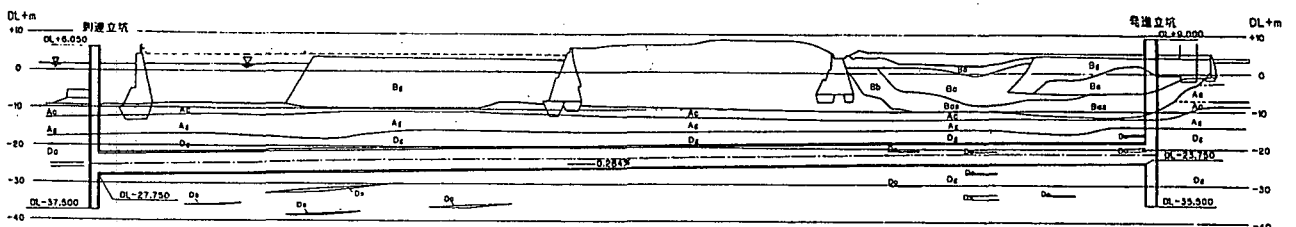
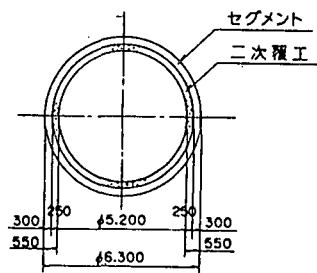
シールドトンネルの耐震設計例として、火力発電所の放水路シールドトンネルの設計例を以下に示す。

(1) 設計条件

(a) 形状寸法

- ① 断面寸法 外径 6.3 m、内径 5.2 m
- ② 土被り 2.0 ~ 2.5 m
- ③ 覆工 一次：RCセグメント、二次：RC構造 (t=250mm)

トンネル縦断線形と地質およびトンネル断面図を図3-3に示す。



地質層凡例

Bo : 土	Bc : 凝灰岩	Ac : 沖積層
Bb : 凝灰土	Bas : 石灰岩	Dg : 凝灰岩
Bg : 凝灰砂	Ag : 凝灰砂	Ds : 凝灰砂
Bs : 凝灰砂	As : 凝灰砂	Dc : 凝灰砂

図3-3 トンネル縦断線形および地質、トンネル断面図

(b) 地盤モデル

耐震設計上の基盤の設定は必ずしも容易ではないが、①「水道施設耐震工法指針・解説」によればN値50以上または $V_s \geq 300\text{m/s}$ を一応の目安としている。②重要なのは「構造物底板以上の地震の相対変位」である。という理由により立坑底板地盤である洪積砂質土層 (GL. -4 0.5m) を基盤とした。この基盤より上面の表層地盤の物性値を表3-1に、解析に用いる地盤モデルを図3-4に示す。

表3-1 表層地盤の物性値

地層 No	地質名	単位体積重量 γ (t/m ³)	N 値	層 厚 H(m)	せん断弾性波速度 (m/s) (計算値)
1	沖積砂質土	1.80	11	3.00	102
2	沖積砂質土	1.95	30	8.36	127
3	沖積粘性土	1.56	11	4.85	171
4	沖積粘性土	1.66	6	1.00	163
5	洪積砂質土	2.00	40	23.29	195
6	洪積砂質土	2.00	50	基盤	334

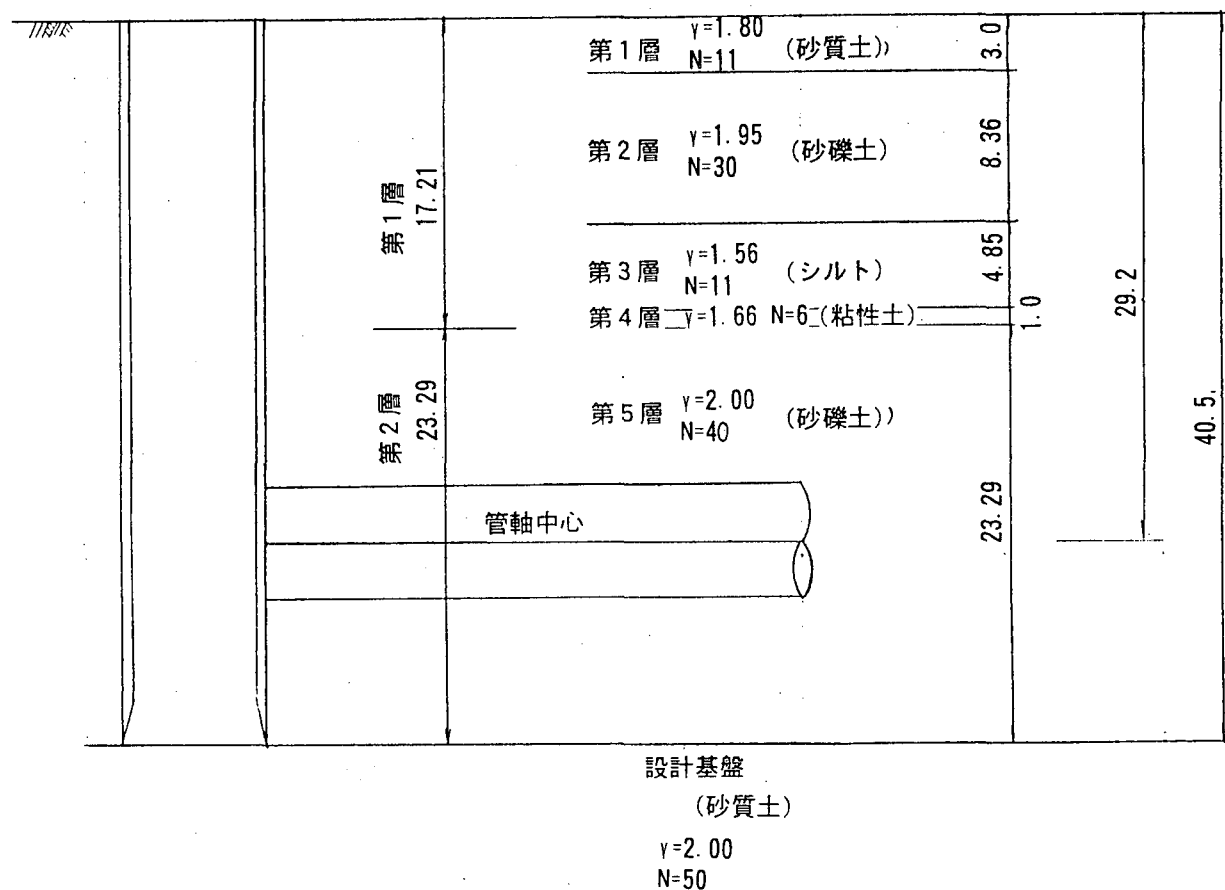


図3-4 地盤モデル

(c) 変位振幅・地震動の波長⁷⁾

解析対象となる地盤の表層地盤を2層に分けられることから「国鉄建造物設計標準解説」で提案されている2層モデルにおける地盤面の変位量を算出する方法を用いた。詳細は同書に譲るが、表層地盤の固有周期、応答速度の基準値、基盤面における水平震度、刺激係数により耐震設計上の地盤面の変位量を求め、それをもとに鉛直方向分布を算出する方法である。この方法により求められるシールド管渠位置での変位量は0.771cmとなった

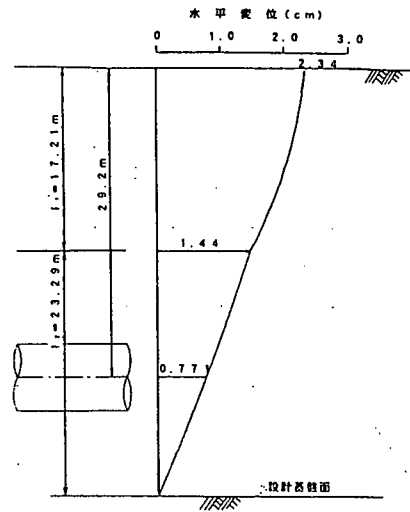


図3-5 水平変位振幅の鉛直分布

また、表層地盤の地震動波長についても「国鉄建造物設計標準解説」で提案されている式より $L = 200\text{m}$ となった。

(d) シールドトンネルのモデル化

解析に用いたシールドトンネルのモデルを図3-6に示す。ここで用いている等価剛性（等価軸剛性 $(EA)^c_{eq}$ 、 $(EA)^t_{eq}$ 、等価曲げ剛性 $(EI)^c_{eq}$ ）については二次覆工を考慮している。

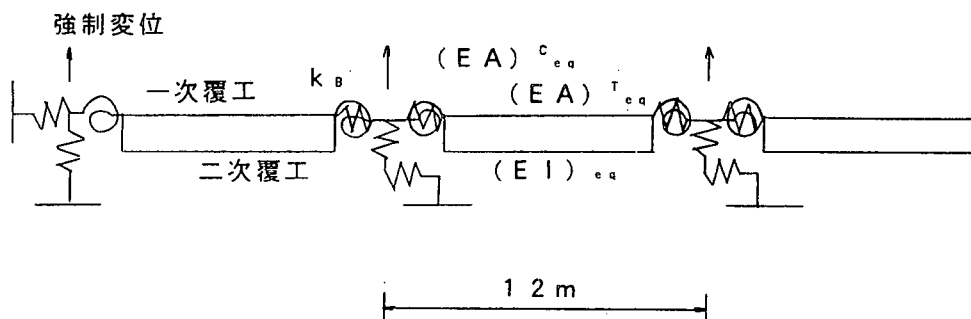


図3-6 シールドトンネルのモデル

(e) 等価曲げ剛性の算出^{8) 9)}

覆工の長手方向に曲げモーメントが作用した場合に、圧縮側はセグメントおよび二次覆工が、また引張側はセグメント、リング継手、および二次覆工がそれぞれ抵抗するものとして、以下の仮定のもと導かれた「建設省土木研究所資料」により提案されている式を用いた。この算出方法の概念図を図3-7に示す。

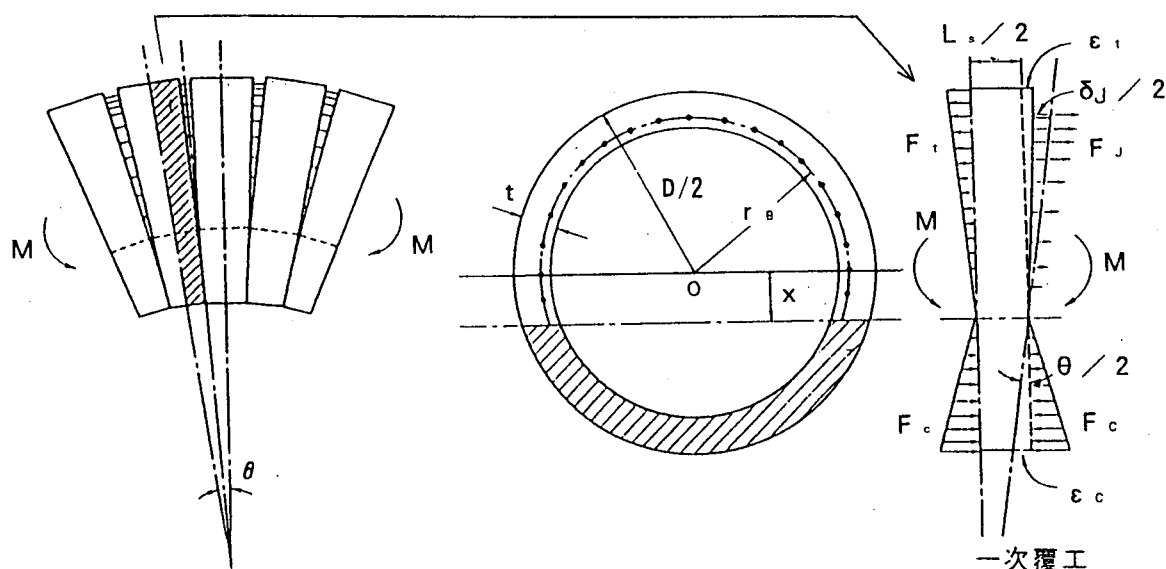


図3-7 曲げ剛性算出モデル

- ①中立軸は断面中央から距離 x だけ圧縮側にずれるものとする。
- ②リング接合面において、セグメントの端面は、中立軸を境にして引張側と圧縮側とで、それぞれ傾きの異なる平面を保持するものとする。
- ③リング長が口径に比べて短いことから、中立軸位置は管渠の長手方向に一定とする。
- ④セグメントおよびリング継手の剛性は線形とする。

また、設計例においては、二次覆工の等価曲げ剛性を鉄筋をリング継手に置き換えバネ定数を算出し、一次覆工と同じ考えで算出した。算出した一次・二次覆工の等価曲げ剛性結果は並列に重ね合わせ、両者の和をシールド管渠全体の等価曲げ剛性として扱っている。

(f) 等価軸剛性^{B)}

軸圧縮剛性については、図3-8に示すようにセグメントと二次覆工の両方の断面が有効に抵抗するものと考えられる。従って等価剛性はセグメント、二次覆工コンクリート、鉄筋それぞれの剛性の和としている。

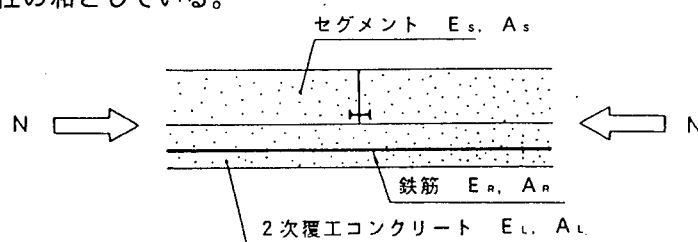


図3-8 一・二次覆工系の軸圧縮剛性

軸引張剛性 (EA) T。

等価引張剛性の算出には、「水道施設耐震工法指針・解説」で提案されている式をもとに一次覆工と二次覆工の付着およびリング継手部の二次覆工コンクリートのクラックを考慮している「建設省土木研究所報告」の式を採用している。

(g) リング継手間のバネ定数⁹⁾

ボルトの軸方向バネ定数 (軸剛性) は図3-9に示すように、ボルト軸部とねじ切り部のそれぞれのバネを直列につないだものとし、以下の式で表している。

$$k_B = \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2}$$

ここで、 k_1 : 軸部のバネ剛性
 k_2 : ネジ切り部のバネ剛性

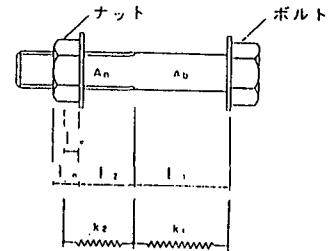


図3-9 ボルトのバネ定数

(2)地震時の地盤変位

地震時の地盤の変位は「1-2 応答変位法の考え方」に示したように正弦波状に変化すると仮定した。

(3)応答変位法による解析結果

以上で求めた等価剛性および変位振幅により図3-6に示したモデルにより梁-バネ系解析プログラムを用いてシールドトンネルに発生する断面力を算出した。結果を表3-2及び図3-10~11に示す。なお、立坑との接合部を固定したモデルで計算した場合曲げモーメント869.3 t・m、軸力148.8 tという大きな断面力のでる端部には可とうセグメントを導入している。

表3-2 応答変位法による計算結果

	曲げモーメント (t・m)	軸力 (t)
Mmax	78.46	7.78
N ^T max	13.91	130.62
N ^C max	9.84	-182.18

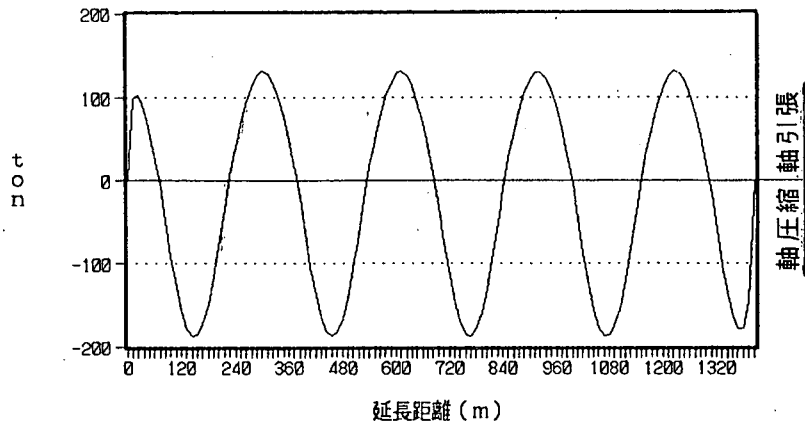


図 3-10 軸力図

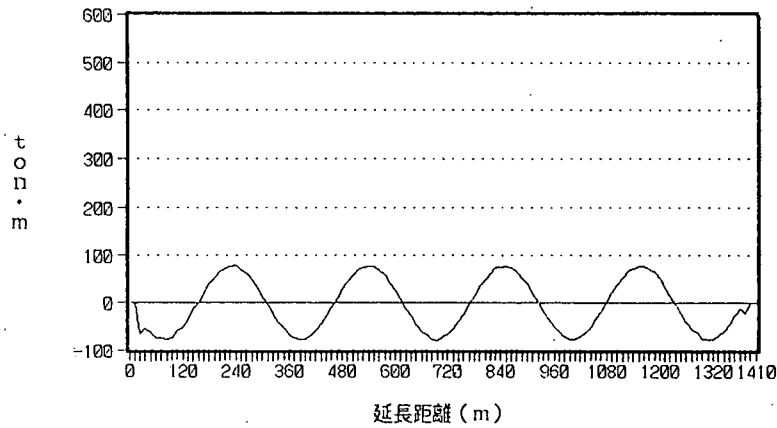


図 3-11 モーメント図

応力度計算で得られた軸および曲げ応力は「水道施設耐震工法指針・解説」に基づき応力の合成を行い安全性照査を行った。応力の合成は

$$\sigma_x = \sqrt{\gamma \sigma_L^2 + \sigma_B^2}$$

ここで、 σ_L 、 σ_B ：地盤波動の伝播によって引き起こされる軸および曲げ応力

γ ：重畳係数

で表される。^{2) 4)}

重畳係数は図 3-12 に示すように、振幅 a_n を持つせん断波動が直交する 2 方向から 45° で管路に入射し、さらに鉛直面内では、水平方向に振幅 a_n 、鉛直方向に $a_n/2$ を持つ合成せん断波動が、管内に 45° の角度で入射するとの仮定で求められている。軸ひずみを生ぜしめるせん断波動の合

成振幅 U_h は次式となる。

$$U_h^2 = 2 \left[a_h^2 + \left\{ (a_h + a_v) / 2 \right\}^2 \right] = 3.12 a_h^2$$

$$a_v = a_h / 2$$

このことより、「水道施設耐震設計工法指針・解説」においては軸ひずみを生ぜしめる4種類のせん断波動、曲げひずみを生ぜしめる1種類のせん断波動の5種類の波動を仮定していることになる。仮定するせん断波動の数によって $\gamma = 1.0 \sim 3.12$ の値をとるが、ここでは3.12を採用する。この結果を表3-3および4に示す。

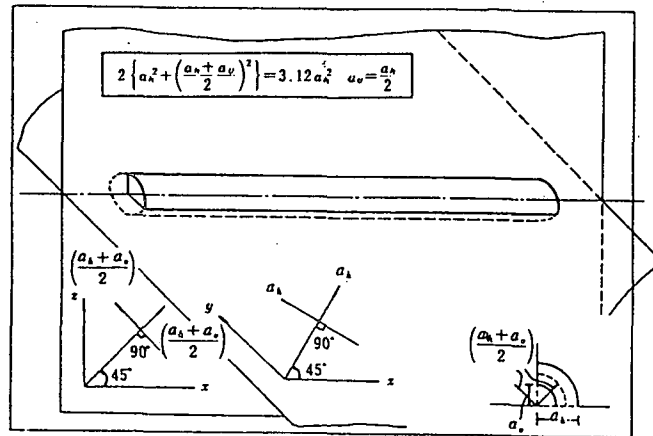


図3-11 波動による変位振幅の合成

表3-2 個々の断面力による応力度

	曲げモーメント (t・m)	軸力 (t)	σ_c (kg/cm ²)	σ_s (kg/cm ²)
σ_L		7.78	0.0	80.7
		130.62	0.0	1355.1
		-182.18	3.2	0.0
σ_B	78.46		4.8	369.7
	13.91		0.8	65.5
	9.84		0.6	46.4

表3-3 合成応力度

	σ_c (kg/cm ²)	σ_s (kg/cm ²)
M_{max}	4.8	396.2
N_{max}^T	0.8	2394.5
N_{max}^C	5.7	46.4
許容応力度	225	4500

4. 今後の課題^{1) 2) 5) 10)}

地下構造物の耐震設計において各種研究等で指摘されている今後の課題について要約して以下に示す。
まず最初に地下構造物全般としては、

- ①入力地盤変位については現在地表面に沿って正弦波形状の変位分布を想定しているが、特に強震時の観測データ不足から離れた2点間の相対変位については不明な点が多い。今後のデータ蓄積・検討に期待する。
- ②計算結果が動的FEM等とかなり異なることがある。
- ③構造物への地震力の作用方法が設計指針ごとに異なっており曖昧である。
- ④液状化やすべりなどの地盤の破壊に起因した被害事例が多く、応答変位法による解析の他に地盤破壊の構造物への影響を適切に評価する手法の確立が必要である。

があげられる。次にシールドトンネル特有のものとしては、

- ①シールドトンネルの大断面・大深度化に伴い表層地盤との層境を横切る位置に埋設レベルがある場合があり構造物横断方向に及ぼす地震時の影響が無視できなくなる。
- ②二次覆工構築後に発生する荷重の一・二次覆工への分担の算出方法が明確になっていない。
- ③シールドトンネルのリング継手の挙動は、ボルト、定着鉄筋など多くの部材が組み合わさった複雑な挙動を示すため載荷試験等で挙動を解明する必要がある。

が今後の検討課題と考えられる。

参考文献

- 1) 川嶋一彦：地下構造物の耐震設計，鹿島出版会，1994
- 2) 高田至郎：ライフライン地震工学，共立出版，1991
- 3) 日本道路協会：駐車場設計・施工指針 同解説，1992
- 4) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説1979年版，1979
- 5) 土木学会編：動的解析と耐震設計〔第4巻〕ライフライン施設，技報堂出版，1989
- 6) 土木学会：トンネル標準示方書（シールド編）・同解説，1986
- 7) 土木学会：国鉄建造物設計標準解説，1986
- 8) 建設省土木研究所：シールドトンネルの耐震性に関する研究（その1）シールドセグメントの等価剛性の評価および応答変位法の適用，土木研究所資料第2262号，1985
- 9) 建設省土木研究所：シールドトンネルの耐震性に関する研究（その8）シールド管渠の地震応答に及ぼす立坑の影響，土木研究所資料第2815号，1988
- 10) 土木学会関西支部：関西における地下空間の活用と技術，平成6年度講習会テキスト，1994