

設計技術検討部会報告

内容

部会活動の概要

1. 提言を設計実務に適用する場合の手法と課題の検討
 - 1.1 入力地震動
 - 1.2 橋梁
 - 1.3 堤防・河川構造物
 - 1.4 地中構造物
 - 1.5 港湾施設
 - 1.6 地盤・土工
2. 耐震設計の高度化への対応状況の調査
3. 耐震設計の高度化に備える施策の提案
 - 3.1 設計技術者の役割
 - 3.2 設計技術者の技術力向上に関する施策
 - 3.3 設計品質向上に関する施策

設計技術検討部会報告

部会活動の概要

設計技術検討部会は、「土木学会の第二次提言を設計実務に適用するための具体的な対応方法案と課題を検討し、耐震設計の高度化に備える施策を提案する」ことを目的に活動を続けている。部会長は佐伯光昭（日本技術開発(株)土木本部副本部長）、メンバーは建設コンサルタント18名、総合建設業（ゼネコン）5名、メーカー2名の計25名からなる部会である。部会は平成7年11月28日に第1回目を、その後3ヵ月に2回のペースで、これまでに計8回開催している。

「第二次提言」の内容が耐震設計そのものに言及し、かつ多岐に渡るため、構造種別と入力地震動の計6つのワーキンググループを設け、昨年秋までの間、「提言を設計実務に適用する場合の手法と課題」の検討を行った。提言の内容は、設計実務上、様々な変更を求めるものであるが、各種構造物に共通して、次の大きな課題を投げかけている。

- ①レベル2地震動に対し損傷過程に立ち入った解析を行って設計すること
- ②合理的な耐震設計および耐震補強を行うために、構造物の重要度に応じた耐震性の要求水準を定めること

課題の①は、どの構造種別においても、ビッグプロジェクトでは、提言が求めるものに近い耐震検討が既に行われており、基本的には対応可能であるものの、一般の構造物に対する設計では、実務上の対処が難しいと考えられる膨大で詳細な設計データや高度な解析技術を必要とすることである。さらに、これらの解析方法や条件の設定方法が、実現象を常に近似できるまでに確立しておらず、今後さらに、被災事例や実験結果のシミュレーションからのフィードバックを重ねていく必要があることである。

課題の②は、レベル2の地震動に対する、全国の膨大な既存不適格の構造物の耐震補強と今後の新設構造物の耐震設計を、限られた財源で合理的に進めていくために避けて通れない課題である。また社会基盤施設が国民の税金や利用料金で建設・維持されることを考えると、投資効果と耐震性の要求水準に社会的な合意形成が求められるであろうし、震災が地域住民の生活や経済活動に重大な影響を与えることを考えると、地域防災計画に従った重要度が最優先されるべきであろう。

各ワーキンググループでは、これらの課題と付随する問題の検討を行い、後述の第1章にまとめた。ただし、課題の②については、まだ部会の中で十分醸成していない状況にあるため、ここでは総括的な記述にとどめ、最終案は今後まとめる予定の報告書に掲載することとした。

また、これらの活動と併せて「耐震設計の高度化への対応状況の調査」としてアンケート

トを行い、設計実務に携わる多くの会社の状況と、土木学会等に求める要望を把握した。

最後に、これらの2つの活動の結果を受けて、「耐震設計の高度化に備える施策の提案」をすべく、3つの分科会を再編成し、検討を進めている。第3章にその中間段階での結果を報告する。

1. 提言を設計実務に適用する場合の手法と課題の検討

1.1 入力地震動

(1) 活断層タイプの地震の設計実務へ適用する意義

①設計対象建造物の建設地点に脅威となる活断層を精度よく同定し、かつ損傷過程を評価できる解析手法を用いることにより、安全性の高い建造物を合理的に設計することが可能になる。

②建造物の重要度を適切に評価し、レベル2地震動により設計する建造物を絞り込むことにより、合理的な費用分担により耐震性の高い社会基盤施設を建設することが可能になる。

③一般市民に対して、耐震設計の持つ意義、すなわち地震動の強さと当該建造物の耐力、地盤の安定といった不確定性の強い要因を扱う工学的意思決定問題であることを知らしめることも必要である。建造物の一般的な供用期間に比べて再現期間の極めて長い活断層タイプの地震動をどのように扱うべきかについて、リスクとコスト（社会的負担）とを関連付けて議論を深めることは有意義である。

(2) レベル2地震動を一般建造物に適用する場合の課題

i) 活断層の同定について

①規模の大きい内陸直下の活断層型地震の発生間隔は、一般に海洋型巨大地震に比べ長く、建造物の耐用年数から考えると想定地震として考えずらいこと。

②活断層の存在の特定も不十分であり、未確認のものも含めれば、どれをどう想定すればよいのか不明確である。

③仮に活断層を特定して建造物への影響として地震動を設定する場合、活断層から地震動を予測する手法は確立されたものはない。これに加え、活断層の諸元（断層パラメータ）の設定には種々の判断が必要であり、精度のよい予測を行うためには高度な技術が要求される。

④地中建造物のような、線または面状に連続して敷設される施設にとっては、断層からの距離、方向が異なる。また、場合によっては活断層を横切ることも生じる。このように活断層が同定できたとしても、これらの要因を考慮した地震動を設定するのは設計実務上困難である。

⑤通常の公共インフラストラクチャー（原子力発電施設を除く）の設計を行うに当たって、

当該地域の活断層の活動状況の調査を行ってその性質を明らかにすることは重要であり、施設の重要度、地域特性に応じた調査のレベルを規定して実施することが望まれる。活断層の同定については、地域毎の調査と調査資料の蓄積が必要であることから、地域を代表する大学等に委員会を設置し、新規調査および調査資料の蓄積を図る方法を提案したい。

ii) 解析方法について

①レベル2地震動で構造物を設計することは、解析手法と表裏一体であり損傷過程を考慮できる解析手法の適用が必要不可欠となる。橋梁のように震度法・地震時保有水平耐力法・線形動的解析法・非線形動的解析法とある程度解析手法が確立している分野の場合、地中線状構造物のように活断層を横切るような施設の場合、河川堤防・港湾施設・土構造物のように耐震設計として震度法がメインで構造物の設計というより地盤の安定性の方に大きなウェイトがある場合で各々で耐震設計法・評価法が異なる必要があるが、それらは現時点で確立されたものがなく、今後の研究開発を要するものがほとんどである。設計実務者として現実的に対応できるように段階的に解析法のレベルを上げていく必要がある。

iii) 重要度と構造物建設費用について

①提言では、レベル1・2の2段階の地震動を想定して耐震設計することを求めたが、構造物の中にはこれまでレベル1地震動に対してすら耐震設計がなされていないものもある。したがって、レベル2地震動ですべての構造物を対象に設計すると、その建設費用はこれまでと比べ莫大なものとなる。

②レベル2地震動の適用範囲について、構造物の重要度を考慮して保有すべき耐震性を定める必要がある。重要度は、構造物が損傷を受けた場合に人命に与える影響度合い、避難・救援・救急活動と二次災害防止活動に与える影響度合い、地域の生活機能と経済活動に与える影響度合い、都市機能の早期復旧に与える影響度合いおよび復旧の難易度の4点を総合して決定するよう提言している。このように構造物の耐震性の水準をどう設定するかは、利用者および周辺住民の生命と生活に密接に関わっているため、彼らに対して社会基盤施設の耐震性の水準の考え方について情報公開し、地域住民との合意形成が必要と考えられる。基準に従って設計施工しておれば十分ということではなく、どの施設がどこまでの耐震性を有しているかについて、明らかにする努力が求められる。

③レベル2地震動自体も、特定できるものは現時点では非常に限られており、特定できない場合には、ある想定で大きさを設定せざるを得ず、レベル2地震動で設計された構造物はすべて安全性が確保されているとは限らないことを知らしめる必要がある。

④ある構造物の耐震性の水準を決定する場合、その構造物のみの重要度で決定されるものではなく、関連する社会基盤施設全体のシステムとしての重要度を前提にする必要があり、各関連機関の連携・基準の統一化が必要となる。

1.2 橋梁

平成7年兵庫県南部地震では、多くの橋梁構造物に甚大な被害が生じた。橋梁の破壊により、十数名の尊い人命も失われた。また、橋梁の倒壊が緊急車両の通行や復旧、経済活動を妨げたとも指摘されている。新幹線の高架橋は、新幹線が営業を開始する前ということで人命を失うことはなかったが、もし営業が開始されていたら、その事故は想像を絶するものであったろうと指摘されている。

従来、我が国の橋梁の耐震設計は、設計水平震度0.2~0.3という慣性力を静的に作用させ発生応力度を許容応力度以下に留めておけば、たとえ設計水平震度よりも大きな地震力が作用した場合でも、その塑性変形能力によって大規模な地震にも耐えうると思われてきた。しかし、平成7年兵庫県南部地震における橋梁の被害は、実際に作用する最大級の地震力に対してどこまでの塑性変形ならば橋梁としての機能を失わずいられるかを照査する必要があることを示唆している。

設計技術検討部会では、損傷過程に立ち入って耐震性能を照査する方法の基本的な考え方の骨子を作成するとともに、平成7年兵庫県南部地震以後、橋梁分野で急激にその実施件数が増している非線形性を考慮した動的解析について次のような検討を行ったが、後述の設計技術力向上のための施策の提案に向け、引き続き検討を行っている。

①設計現場における動的解析の現状と課題

②非線形性を考慮した動的解析の問題点と運用方法

弾性応答で2gという地震力に対して弾性設計することは、経済性や立地条件から考えて非現実的である。今後は、非弾性域の耐震性能を照査する方法や、塑性変形能力を向上させる構造細目の充実が望まれる。平成8年12月に（社）日本道路協会から発刊された道路橋示方書・同解説V耐震設計編は、ここで検討された基本的な考え方や事項の多くが、既に具現化された形で提示されている。

橋梁を構成する橋脚、基礎構造、支承・落橋防止構造と、橋梁システムとしてのレベル2地震動に対する耐震設計の基本的な考え方（案）と、それを行う上で、現状の技術で対応可能な事項と、今後の研究課題を整理した。

(1) RC橋脚

従来、RC橋脚の耐震設計では、弾性域における地震時挙動を把握することに主眼を置き、レベル2地震動に対する損傷仮定に立ち入った耐震性能の照査が必要な場合には、地震時保有水平耐力照査が実施されていた。地震時保有水平耐力照査の対象は、一本柱形式のRC橋脚に限定され、ラーメン橋脚、ラーメン橋、アーチ橋のような不静定構造については一般に省略されていた。しかし、支持地盤が十分に固く橋脚高さの低い一本柱形式のRC橋脚を除けば、地震時の挙動が複雑であり、地盤を含めた橋梁全体の非線形を把握して耐震安全性を評価するためには、非線形動的解析が必要である。非線形動的解析が必要

な場合としては、塑性ヒンジが複数生じると予測される構造、あるいは塑性ヒンジの生じる箇所が特定できない構造であって、基本的に、不静定構造物の設計では非線形動的解析を行う必要があると考えられる。

R C 橋脚の耐震設計法に関する今後の研究課題について、非線形動的解析の精度向上のための項目、構造細目に関する項目、耐震設計法の合理化に関する項目に分けて以下に述べる。

i) 非線形動的解析の精度向上のための項目

① R C 部材の復元力特性のモデル化

- ・複合荷重下の復元力特性
- ・軟化域（ポストピーク域）での解析モデルの精度向上
- ・曲げ剛性の低下に伴うせん断耐力の低下のモデル化
- ・動的荷重下のせん断耐力に及ぼす寸法効果の影響

② P C 部材の復元力特性のモデル化

- ・橋梁の主桁のような非対称箱けた断面の復元力特性

③ 非線形動的解析手法の整備・普及

- ・非線形解析手法の解析精度の検証と適用時の解析に関わる安全係数の検討

ii) 構造細目に関する項目

- ・帯鉄筋や中間帯鉄筋のフック長・形状等の細目
- ・鉄筋の組立・コンクリートの打設・締固めの面から施工しやすい配置方法

iii) 耐震設計の合理化に関する項目

- ・耐震性能の合理的な評価指標の確立

(2) 鋼製橋脚

鋼製橋脚は、座屈現象という限界状態に関する実験が多数行われて来ており、その成果は、基準耐荷力曲線という形で設計に反映されてきている。しかし、R C 橋脚と異なり平成7年兵庫県南部地震で被害が生じるまでは、鋼製橋脚の被害例はなかったために、その耐震性能の向上を目的とした繰り返し載荷実験や振動台実験が行われる事は少なかった。

現状の技術で対応可能な事項は、許容応力度法ベースでの断面設計とR C 橋脚の分野で確立された地震時保有水平耐力法に、鋼製橋脚の非線形性（耐力特性、変形性能）を加味して照査を行うことと、鋼製橋脚の塑性変形能力を高めるための構造細目の充実である。

今後の研究課題を以下に示す。

① 許容損傷順序と許容損傷モードの明確化

② 局部座屈や残留変形をどの程度まで許容するか

③ 基礎～地盤系の変形をどの程度まで考慮するか

④ 弾塑性解析ツールの精度向上と実用化

⑤ 弾塑性解析による設計法、照査法の確立

⑥強度を上げずに変形能を高める構造細目

⑦耐震性能に優れた鋼材の開発

⑧既設橋脚の耐震補強の度合の評価（橋脚を強くすると、相対的に他が弱くなる）

(3) 基礎構造

基礎構造物は、上部構造や橋脚躯体に比較して被災後の調査、復旧等の困難性を考慮すると大きな損傷を許容することは合理的ではない。このような観点から、基礎構造物については、基礎の応答塑性率が各基礎形式の支持特性を考慮に入れた制限値を超えないこと、転倒等を生じないこと、残留変位を含め過大な変位を生じないことが必要となる。さらに、基礎を構成する各部材が所要の耐力を有する必要がある。また、基礎の安定を計る上で周辺地盤の安定は極めて重要であり、液状化や地盤流動の可能性およびその影響を慎重に評価する必要がある。

レベル2地震動に対する損傷過程に立ち入った耐震性能の照査において現状の技術で対応可能な事項について以下に述べる。

i) レベル2地震による液状化の判定法と設計への反映法

レベル2地震動に対する地盤液状化の判定は、地震時に地盤水平面内に生じるせん断応力の不規則性、および液状化強度に及ぼす応力の繰り返し特性を考慮する必要がある。簡易な手法として累積損傷度理論の概念を取り入れた判定法があるが、詳細な検討は地盤の有効応力応答解析を用いて行うのが望ましい。

設計時に液状化の影響を考慮する手法は、平成2年道路橋示方書に代表されるように地盤の変形に係わる定数（変形係数 E_0 、地盤バネ k 値等）を低減することを基本とし、基礎の水平方向の安定にのみ配慮している場合が多い。地震時における間隙水圧の上昇は、地盤強度に影響を与えることは知られており、せん断弾性波速度 V_s 、杭の周面摩擦力度 f_s なども含める必要がある。特に、直接基礎において一般に用いられている全般せん断破壊を元にする鉛直方向の極限支持力算定式への影響を解明する必要がある。

ii) 地震時地盤変位の影響（応答変位法の採用）

軟弱地盤では地震時に軟弱層が基盤に対し大きな相対変位を生じる。また、地盤の深さ方向土層構成が一樣でない場合（中間に軟弱層や液状化層を挟む場合等）には、変位の高次モードによる影響が無視できなくなり深さ方向に複雑な変位性状を示す。これらによる影響は近年の被災調査研究やその解析から、キネマテックな相互作用による影響として明らかにされている。

基盤部材の耐力に地盤変位の影響等が無視できない場合（一般に杭基礎形式が多い）に、所要の安全性を有していることを照査する必要がある。基礎の作用する断面力は主に上部構造の慣性力応答にともなう作用力と地盤変位による影響とを足しあわせることになるが、構造物と地盤との振動特性および慣性力と地盤変位との位相差を考慮する必要がある。

iii) 地盤流動の影響

地盤流動が予想される場合は、その影響を水平力等により適切に評価して基礎が所要の機能を満足するかを照査しなければならない。照査は、構造物の重量に起因する慣性力の影響と地盤流動の影響を同時に作用させることを基本とするが、両者の最大応答を作用させるのではなく、地盤流動の影響が生じる時刻における構造物の重量に起因する慣性力の影響を作用させる。

iv) 基礎の耐力を評価できる安定計算方法

一般に、橋梁の基礎形式として次のようなものがある。

- ①直接基礎
- ②杭基礎
- ③ケーソン基礎
- ④鋼管矢板基礎
- ⑤地中連続壁基礎

各基礎型式の安定計算方法は、①＝極限地盤反力法、②＝弾性地盤反力法、③および⑤＝複合地盤反力法、④＝（非線形）弾性地盤反力法を採用している場合が多い。また、④の大型基礎に採用されている薄肉断面からなる仮想井筒の三次元解析（一般に、「土研方式」と呼称）は③および⑤と同じ複合地盤反力法であり、地盤反力度に上限値を設けた限界状態設計手法の考え方が取り入れられている。これより、③～⑤は地盤に係わる非線形性を考慮する設計手法を採用しており、基礎の耐力評価方法とし準用することができるが、①および②は地盤に係わる非線形性を考慮できる設計手法の採用が必要となる。

今後の研究課題を以下に示す。

- ①地盤反力係数の評価（特に、水平および鉛直方向せん断バネ）
- ②地盤反力度の上限値と三次元効果
- ③基礎施工方法による影響の反映方法
（特に、設計上の分類と施工方法の分類が異なる場合に重要）
- ④基礎の降伏耐力の評価
- ⑤転倒に対する復元力の評価（特に、直接基礎形式の場合）

(4) 支承・落橋防止構造

レベル2地震動に対しては、他の橋梁構成部材と同様、支承・落橋防止構造にもある程度の損傷を許容するのが合理的である。その場合、支承・落橋防止構造の構造形式にもよるが、支承部にも相当量の変形量が発生する事になり、大規模橋梁等については支承・落橋防止系をモデル化して動的解析を行うのが望ましいと考えられる。特に変形性能の高い支承・落橋防止構造を採用した場合は、下部工の応答値に与える影響も大きいと予想されるので、この点からも動的解析の実施が有効と考えられる。同様な理由により、免震支承を採用した場合についても動的解析の実施が望ましい。

現状の技術で対応可能な事項を以下に示す。

- ①ゴム沓とダンパーを用いた免震システム
- ②連続桁橋等における地震力分散システム

- ③ 支承の水平力支持機構と鉛直力支持機構の分離
- ④ 地震後の輸送機能を確保するための鉛直力支持機構の補助装置の設置
- ⑤ 落橋防止構造への緩衝効果の付加
- ⑥ 支承及び落橋防止構造取付部の補強

今後の研究課題を以下に示す。

- ① エネルギー吸収能力に優れた落橋防止構造の開発と設計手法の確立
- ② 支承や落橋防止構造における許容塑性率の設定（輸送機能を確保できる損傷レベル）
- ③ 支承の設計地震力の明確化（橋脚の塑性化とのバランス）
- ④ ゴム沓とダンパーを用いた免震システムの適用の拡大と低コスト化

(5) 橋梁システム

橋梁システムの耐震性能照査は、橋梁システムとしての地震時挙動の把握とその照査が重要なテーマとなる。地震時挙動の把握は、橋梁システムが複数の非線形要素から構成されているため、非線形動的解析によらなければならない。その際、各構成要素の非線形モデルは、必ずしも各要素毎の耐震性能の照査で用いた非線形モデルによる必要はなく、解析目的と非線形化の度合いを考慮してバランスの良い解析モデルを作成すれば良い。これは、橋梁システムを対象とした非線形動的解析では、一部の構成要素のみ精緻なモデルを用いても、他の構成要素が技術的に粗いモデルしか用いることができない場合、その解析モデルより得られる解の信頼性は、その粗いモデルの精度によって決まるからである。

橋梁は、建築物と異なり線状構造物である。よって、地形や各基礎位置での地盤条件が大幅に異なる場合は、入力地震動や解析モデルにその影響を考慮する必要がある。

橋梁システムとしての耐震性能をどのように評価（照査）するかは、今後の研究を待たなければならない。当面は、橋梁全体系の解析モデルより得られた応答値が、各要素毎の許容値以内にあるかを比較することになる。橋梁システムとしての耐震性能を評価するという観点に立った場合は、各要素の塑性化の度合いや損傷の発生順序、桁間の相互作用等の全体系モデルでなければ得られない項目に関する評価（照査）も重要である。今後、橋脚の耐震補強が進み橋脚の剛性と強度が増すと、橋脚よりも杭基礎が先に降伏し、地震のエネルギーが杭頭の塑性ヒンジ化によって吸収されて杭基礎に思わぬ損傷が生じる恐れがある。このような場合も、橋梁システムとしての地震時挙動の把握が必要となる。

橋梁システムの損傷過程に立ち入った耐震性能の照査は、各構成要素の非線形モデルの精度等を問題にしなければ、橋梁全体系の非線形動的解析は現状の技術で可能である。しかし、その解が全体系の地震時挙動を忠実に表現しているかは疑問が残るところである。だから、非線形動的解析は信用ならないという意見も極端である。現状の技術では、大型振動台の加振能力、橋梁構造物を対象とした地震観測体制の不備を考えると、非線形動的解析は我々が手にしているツールの中で、最も精度が高いものの一つである。

最も問題となるのは、各構成要素の非線形モデルを用いてバランスの良い全体系解析モ

デルを作成し、かつ解析結果を評価できる技術者の数が少ないことである。

今後の研究課題を以下に示す。

- ①橋梁を構成する各要素の耐力と変形性能のバランスを考慮した耐震設計法の確立
- ②固定支承の破壊による桁落ち、桁間衝突等を再現できる簡易な非線形モデルの開発
- ③集中的な地震観測による全体系としての地震時挙動の解明
- ④橋梁システムとしての許容できる損傷（アクセプタブルダメージ）の明確化
- ⑤橋梁システムとしての地震時挙動の視覚化技術の実用化

橋梁システムとしての耐震性能の照査フローを、図-1.2.1に示す。

1.3 堤防・河川構造物

(1) 構造物毎の耐震設計の現状と対応方針

堤防・河川構造物に対する耐震設計の現状を整理すると、次のようになる。いずれの場合も、今後、レベル2の地震時の挙動を把握する必要がある、損傷過程に立ち入った非線形解析を精度良く行い、重要度に応じた要求水準を合理的に設定することが鍵となる。

i) ダム

現状では、第四紀断層を避けて計画されており、震度法ではあるがレベル1に対する耐震設計が行われている。兵庫県南部地震後の非線形動的解析（基礎岩盤の想定最大加速度250gal）により、現行設計法で設計されたものの安全性が確認されている。フィルダムも同様の非線形動解で解析をしているが、安全性の評価基準が確立していない。また、第四紀断層の特定方法と予測される地震動の規模の評価方法を、より高度化させる必要がある。

ii) 河川堤防

自立式特殊堤と高規格堤防は、レベル1に対する耐震設計が行われているが、一般の河川堤防の土堤は地震を考慮していない。既存堤防の延長が膨大であることから、重要度と危険度を十分に踏まえた対応が必要である。例えば、特殊堤は隅田川に見られる様に家屋が密集した所、背面に石油タンク等の構造物が位置する所などに建設される場合が多く、被災時の二次災害を大きくする可能性がある。逆に高規格堤防は、法勾配が緩傾斜であるため壊滅的破壊に至りにくい。また、標準的な堤防でも、0m地帯については二次災害を防止するための耐震設計が必要であるが、一般的な区間では、復旧しやすい構造物であるという特徴を活かし、損傷することを前提にすみやかな復旧が可能なマニュアルを準備しておくなどの対策が考えられる。

iii) 河川構造物

堰・樋門・樋管・水門・排水機場などの河川構造物は、震度法によりレベル1に対する耐震設計は行われている。しかし、地震直後の津波に対する防潮水門や、上水道の取水・下水排水等ライフラインに直結する施設として重要度が大きいため、レベル2の地震に対

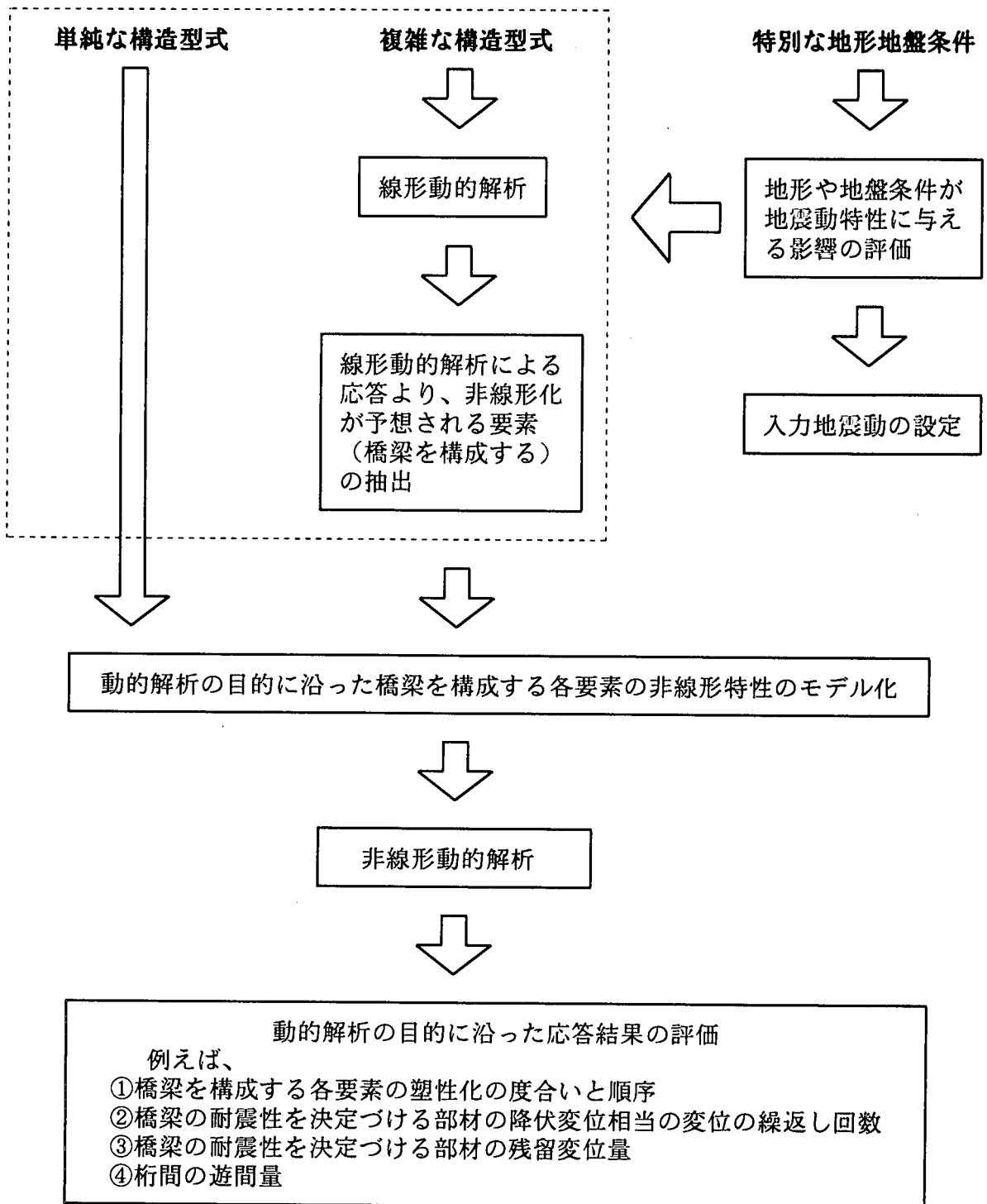


図-1.2.1 損傷過程に立ち入った耐震性能の照査フロー：橋梁システム

する配慮が必要である。

(2) レベル2地震対応設計法の適用に関する課題

i) 河川堤防

当面、適用可能な耐震性評価法は、表-1.3.1～1.3.3（河川構造物地震対策技術委員会報告書/H8.3より）のようなもので、円弧すべり法による安全率と被災事例に基づく変形予測法を組み合わせ用いることになる。

従来の円弧すべり法や自立式特殊堤の力の釣り合いによる安定計算法は、計算が容易で、滑るか否かに対して適用性を有するものの、損傷過程に立ち入って被害程度を評価できる手法ではない。堤防の耐震性能として要求される「構造物の被害により河川水による堤内浸水等の二次災害を起こさないこと」を確認するためには、変形量を予測できる手法を用いる必要がある。

解析的に変形量を予測する手法には、FEMによる残留変形解析や最小エネルギー原理に基づく地震時永久変形解析などがある。ここでは、これらの詳細に触れないが、いずれも、常に実現象を近似できるまでの、モデル化や条件の設定方法が確立しておらず、被災事例や実験から変形量を求めて、解析結果との対比を通し、妥当な判断が得られるような設計情報の蓄積を行うことが必要である。また、ごく一般的な堤防に対しても、多くの入力データを必要とする高度な解析を行うことは、設計実務上得策でなく、基礎的な設計データから、パターン化などにより変形量を概算できるような方法を模索することが望まれる。例えば、表-3.3のように安全率と変形量の関係がある精度で対応付けられれば、有用である。

ii) 河川構造物

防潮水門は、地震後の津波にその機能が必要とされる施設であり、レベル2地震時に対する耐震性が強く求められるが、津波そのものの設計荷重が非常に大きいため、レベル2地震自体には十分耐えられると考えられる。

土以外の構造物に対しては、橋梁に用いるモデル化や解析手法が適用可能であるが、ゲートや上屋の影響で1質点系ならないものや、樋門・樋管など堤体との相互作用が強く現れるもの、機能を維持するための機電設備の耐震性確保など、設計法に注意が必要である。

1.4 地中構造物

(1) 側方流動に対する検討方法

i) 現状

液状化の判定と浮き上がりに対する安全性の照査方法は規定されているものの、側方流動に関して規定した基準類は存在しない。

しかし、側方流動が地中構造物の災害の主たる要因になりうること、液状化層厚や地表

表-1.3.1 河川構造物の耐震設計で考慮する地震力

	土堤	自立式構造の特殊堤	水門・樋門
構造物の機能	<ul style="list-style-type: none"> 計画高水位以下の水位の流水の通常的作用に対して安全な構造（堤内の浸水防御）。 	<ul style="list-style-type: none"> 計画高水位以下の水位の流水の通常的作用に対して安全な構造（堤内の浸水防御）。 	<ul style="list-style-type: none"> 計画高水位以下の水位の流水の通常的作用に対して安全な構造（堤内の浸水防御）。 取水、排水、防潮、津波侵入防止などの設置目的に応じた機能
現行の地震力	<ul style="list-style-type: none"> 地震力を考えていない。 	<ul style="list-style-type: none"> 慣性力を考慮（$k_{ho}=0.2$）。 	<ul style="list-style-type: none"> 慣性力を考慮（$k_{ho}=0.2$）。（門柱、胸壁、翼壁について）
地震被害特性	<ul style="list-style-type: none"> 沈下を伴う大きな被害は液状化を伴っている。 ただし、過去の大地震に対しても堤防高の25%は残留。 	<ul style="list-style-type: none"> 特殊堤本体の被害（沈下、目地の開き、傾斜）はわずか3事例 全てに液状化が見られている。 2事例は施工年が古く、地震力を考慮した設計を行っているかどうかは不明。 	<ul style="list-style-type: none"> 機能を失うような被害は4事例のみ。 事例は施工年が古く、地震力を考慮した設計を行っているかどうかは不明。 周辺では液状化が見られている
復旧の難易	<ul style="list-style-type: none"> 土構造物であり復旧が比較的容易。 概ね2週間で緊急復旧終了。 	<ul style="list-style-type: none"> 周辺スペースが無く、早期の復旧は困難。 	<ul style="list-style-type: none"> コンクリート構造物であり早期の復旧は困難。 ただし、小口径樋門について土のうや角落し、排水ポンプ等の対応により最低限の機能確保は可能な場合もある。
確保すべき耐震性	<ul style="list-style-type: none"> 浸水等による二次災害の防御（最低限の機能の確保） 地震により壊れない堤防を目標とするのではなく、壊れても二次災害を起こさない。 	<ul style="list-style-type: none"> 多少の変形は許容するものの浸水による二次災害をさせないように地震力に対して、所要の安全性を有する構造。 	<ul style="list-style-type: none"> 多少の変形は許容するものの浸水による二次災害をさせないように地震力に対して、所要の安全性を有する構造。
地震力の当面の考え方	<ul style="list-style-type: none"> 河川水の状態により浸水被害（二次災害）の可能性のある堤防については、液状化を考慮した設計を行う。地盤条件によっては慣性力も考慮する。 液状化に対して $k_{so}=0.15$ 慣性力 $k_{ho}=0.2$ 	<ul style="list-style-type: none"> 二次災害防止の観点から、現行の慣性力を考慮するとともに地盤に対する液状化を考慮する。 慣性力 $k_{ho}=0.2$ 液状化 $k_{so}=0.15$ 	<ul style="list-style-type: none"> 二次災害防止の観点から、現行の慣性力を考慮するとともに地盤に対する液状化を考慮する。 慣性力 $k_{ho}=0.2$ 液状化 $k_{so}=0.15$
将来	<ul style="list-style-type: none"> 河川構造物の変形に対する解析手法や耐震性評価手法などの進展を踏まえ、検討する。 		

〔河川構造物地震対策技術委員会報告書／平成8年3月より引用〕

表-1.3.2 土構造物の耐震性評価法の特徴

手法	手法の概要	入力データ	評価項目 (出力)	備考
被害事例に基づく 変形予測法	種々の条件に対する安定計算結果に基づき、任意の地盤条件・外力条件に対する地震時安全率を図表から算出。 安全率から天端の沈下量を推定。	<ul style="list-style-type: none"> ・堤体形状 ・地層構成 ・堤体・地盤定数 ・地震力 ・地下水位 	<ul style="list-style-type: none"> ・被害形態 (パターン) ・被害程度 (沈下量) 	<ul style="list-style-type: none"> ・安定計算を簡便化 ・簡便な概略点検用の手法 ・対策工法の評価は不可
円弧すべりによる 安定計算法	円弧すべり計算。 過剰間隙水圧と慣性力は別々に作用させる。	<ul style="list-style-type: none"> ・堤体形状 ・地層構成 ・堤体・地盤定数 ・地震力 ・地下水位 	<ul style="list-style-type: none"> ・安全率 	<ul style="list-style-type: none"> ・比較的簡便であるが、変形の予測不可 ・構造物系の対策工法の評価は不可
FEMによる 残留変形解析 (有効応力法) (全応力法)	初期応力解析、地震応答解析、累積変形特性試験に基づく見かけせん断剛性率 G' を算出し、静的自重変形解析により地震後の永久変形量を求める。(土研方式の場合)	<ul style="list-style-type: none"> ・堤体形状 ・地層構成 ・堤体・地盤定数 ・動的変形特性 ・地震動 ・地下水位 他 (土研方式の場合)	<ul style="list-style-type: none"> ・地震後変形量 	<ul style="list-style-type: none"> ・累積変形特性試験等、動的土質試験が必要 ・力学的に正統な方法であるが、入力データが多く、費用、時間がかかる。 ・対策工法の評価が課題
最小エネルギー 原理に基づく 地震時永久変形 解析	液状化層の水平変位が正弦曲線状に分布すると仮定し、地盤のひずみエネルギーと位置エネルギーを求め、全ポテンシャルが最小になるときの変形量を求める。	<ul style="list-style-type: none"> ・堤体形状 ・地層構成 ・堤体・地盤定数 ・液状化特性 ・地震動 ・地下水位 他 	<ul style="list-style-type: none"> ・地震後変形量 	<ul style="list-style-type: none"> ・比較的簡便に変形量の推定が可能 ・対策工法の評価が課題

表-1.3.3 堤防天端の沈下量(上限値)と地震時安全率の関係

地震時安全率 F_{sd}		沈下量(上限値)
$F_{sd}(kh)$	$F_{sd}(\Delta u)$	
$1.0 < F_{sd}$		0
$0.8 < F_{sd} \leq 1.0$		(堤高) $\times 0.25$
$F_{sd} \leq 0.8$	$0.6 < F_{sd} \leq 0.8$	(堤高) $\times 0.50$
—	$F_{sd} \leq 0.6$	(堤高) $\times 0.75$

注) $F_{sd}(kh)$: 慣性力のみを考慮した円弧滑りの安全率

$F_{sd}(\Delta u)$: 過剰間隙水圧のみを考慮して円弧滑りの安全率

の傾斜から沈下量や永久変形量を算定し、被害状況と結びつけた研究、液状化層の動水圧に関する研究などが2～3存在する。

ii) 対応方法案

実務設計の流れは、図-1.4.1の手順が想定できる。この場合の各項目に対応した具体的な課題および問題点等は表-1.4.1のように整理できる。

これらの研究成果を受け、合理的な設計法を確立していくことが重要であるが、これには相当の時間が必要であり、現状での対応は、これまでの調査・研究成果を踏まえ埋設管では弾性床上の梁モデルで取り扱うことが一般的な手法方法と考えられる。これらの設計条件となる荷重（変位量、分布形状）および地盤ばね等は、既往の研究成果をもとに設定する。ただし、側方流動が構造物諸元に大きく影響する場合は、詳細な地盤調査（地盤の非線形特性などの把握）を実施し、既往提案の数値解析手法により解析的な検討を実施するのが望ましい。

iii) 今後の課題

前述の表-1.4.1を参照。

(2) レベル2の地震時の設計方法

i) 現状

トンネルや管路の縦断方向には、継手で対処できる場合が多いので、本検討では横断方向に着目し、さらに大被害のあったRC矩形断面を対象に検討した。

阪神・淡路大震災発生以前に公開されている基準・指針類で、地中構造物の横断方向の耐震設計が必須となっているものは、レベル1地震動に対しても地下駐車場のみであり、レベル2地震動に対しては原子力屋外重要土木構造物以外にない。

ただし、大震災でのRC矩形断面地中構造物の被害分析結果および大震災以後に発行された基準・指針類を基に、レベル2地震動の耐震設計法をまとめることが可能である。

ii) 対応方法案

従来より設計基準等で採用されてきた応答変位法を基本とし、地震荷重の設定方法として、1次元地盤の地震応答解析による詳細法と設計用速度応答スペクトルによる簡易法を用いることが可能である。耐震設計のフローを図-1.4.2に示す。

a. 地盤の地震応答解析

応答変位法の地震荷重を1次元地盤の地震応答解析より求める場合には、対象とする地盤が液状化するかどうかにより、全応力動的等価線形解析法か、有効応力動的非線形解析法のいずれかを用いる。

b. 応答変位法による耐震計算

①地震荷重の算定

レベル2地震動に対する応答変位法の地震荷重は、1次元地盤の地震応答解析結果か、設計用速度応答スペクトルのいずれかの方法により求める。水平地震力による地震荷重と

表-1.4.1 研究項目と解決すべき課題等

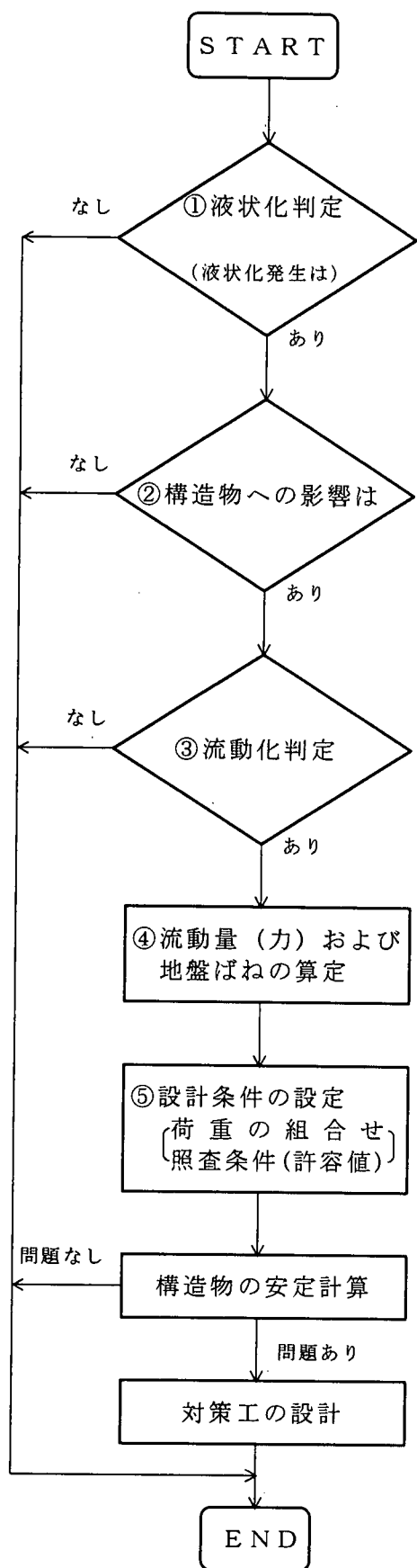


図-1.4.1 側方流動を考慮した設計の手順

研究項目	解決すべき課題および問題点
① 液状化判定	<ul style="list-style-type: none"> 地震動外力 液状化強度 判定法
② 構造物への影響度 ③ 流動化判定	<p>【構造物への影響】</p> <ul style="list-style-type: none"> 護岸等からの離れ 埋設位置(表層非液状化層、液状化層中) <p>【流動化判定】</p> <ul style="list-style-type: none"> 液状化層厚、程度および発生深度 地形、地層構成および護岸等形状・形式 <p>健全時 → 不完全液状化時 → 完全液状化時 (土質材料) → (土質～液体) → (液体)</p>
④ 流動量(力)と地盤ばねの算定	<p>【流動量】</p> <ul style="list-style-type: none"> 地盤流動量と流動圧発生メカニズムの解明(非液状化層、液状化層) 構造物形式・形状との関連;幅の影響(nB)、形状係数or抗力係数 <p>【地盤ばね】</p> <ul style="list-style-type: none"> 液状化層、軟化層、非液状化層の区分(速度効果や液状化強度の違いの考慮必要)
⑤ 設計計算法	<ul style="list-style-type: none"> 地盤流動と慣性力との重量? 地盤流動作用時の安全性照査基準
⑥ 対策工の設計	<ul style="list-style-type: none"> 対策工の安全性の確認(設計法) 構造物への影響検討

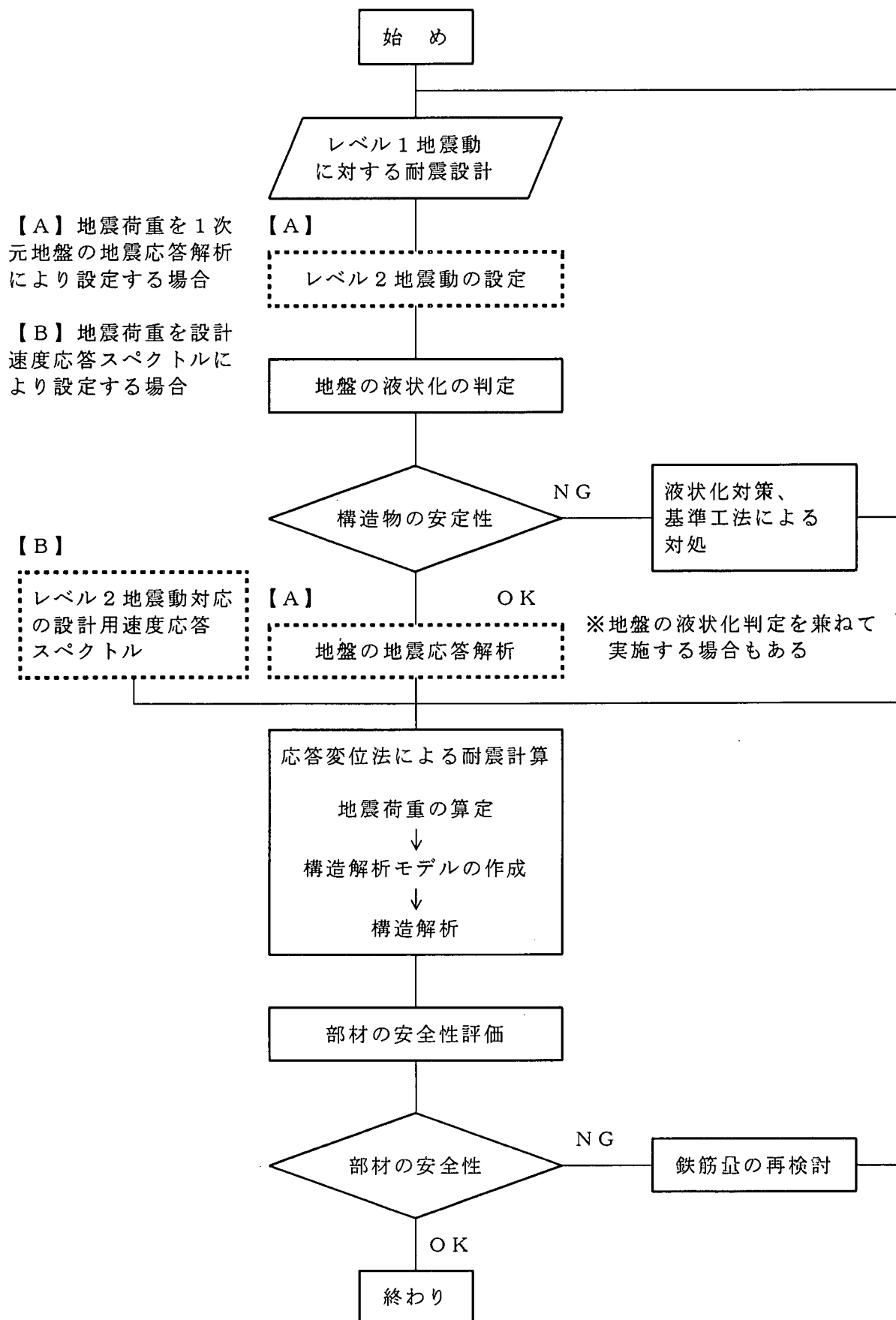


図-1.4.2 地中構造物横断方向のレベル2地震動対応の耐震設計フロー

しては、地盤の応答変位、地盤の周面せん断力、躯体および負載重量の水平慣性力、内容水の動液圧、である。液状化を考慮した地中構造物の耐震計算法は今後の課題であるが、地震荷重としては過剰間隙水圧が加わる。鉛直地震力による地震荷重は、必要に応じて考慮するものとする。

②構造解析モデルの作成

構造物の材料特性としては、曲げモーメント～曲率関係を等価線形モデルまたは非線形履歴モデルで表わす。地盤ばねは、有効拘束圧と地震時に発生する地盤のひずみレベルに応じたせん断剛性を用いて求め、必要に応じて側面の引っ張りカット等の非線特性を取り入れる。FEMモデルを用いて、地盤と構造物を同時に解くモデルもよい。

③構造解析

レベル2地震動に対する応答変位法の構造解析は、等価線形解析または逐次非線解析により行う。

c. 部材の安全性評価

部材の安全性は改訂されたコンクリート標準示方書「耐震設計編」等の限界状態設計法の考え方によるものとする。レベル2地震動に対しては、耐震性能2（地震後に機能が短時間で回復でき、補強を必要としない）か、耐震性能3（地震によって構造物全体系が崩壊しない）のいずれかの耐震性能を、構造物の重要性等により選択する。

iii) 今後の課題

①レベル2地震動対応の応答変位法における地震荷重の設定法、構造物および地盤の非線形モデル等の個々の要素について考慮方法、地盤の液状化を考慮した地震荷重の設定法、が重要な課題となる。

②限界状態設計法により構造物の安全性を評価する際に重要となるのが、構造物の限界状態であり地中構造物の種別ごとにその重要度に応じてレベル2地震動対応の終局限界状態を設定し、耐震性能2あるいは耐震性能3のいずれかに該当するかを判定する必要がある。さらに、耐震性能3について評価法を確立することが重要である。

(3) 断層や地表のずれを横切る場合の対応策

i) 現状

現行の各種設計基準等には、断層や地盤のずれに対する規定はない。水道施設耐震工法指針・解説に「地層の変化界等の地盤が不安定で危険な場所はできるだけ避ける」とあるものの、どの基準等も地盤沈下等を想定したもので、断層部を通過する場合の具体的な設計については触れていない。

断層と地下構造物に関する海外を含む文献の調査では、丹那トンネル・稲取トンネル等の事例についての報告がある。断層が横断することにより生じたトンネルのずれの事例や観測結果、断層モデルを適用し地盤の地震時の変位応答を算定したものなどがある。パイプラインについては、断層を横断する水道管の具体的な設計例の紹介、被害事例と応急対

策、ネットワークとしての信頼性の検討などがあった。

断層そのものについては、断層の定義、種類や特徴、発見・認定方法、活動度の分類、日本における活断層の分布等について知ることができる。

ii) 対応方法案

a. 地表またはトンネルに現れるずれ量

過去の地表の断層変位量は水平方向の方が垂直方向の変位量よりも大きいものが多く、最大値は水平方向約2.3m、垂直方向約1.5mである。阪神・淡路大震災においては、塩屋川トンネルで8cm程度のずれが生じたが、他の地下構造物の断層による被害はほとんどなかった。丹那トンネルでは最大2m、稲取トンネルでは最大73cmのずれを生じた事例が報告されている。また、クリープ的に常時ずれているものがあり、アメリカのBay Area Rapid Transitトンネルで年間約6～8mm(6～8m/千年)のずれ量が観測されている。

したがって、対象構造物が断層を横断する場合の想定ずれ量は、その活断層の過去の活動記録や現状の観測記録より推定されるべきであるが、千年で約1～2m程度と思われる。

b. 構造物側の対応方法

断層のずれ量は千年単位で評価されるものであり構造物の耐用年数との開きが大きく、また、メートルオーダーのずれ量に対して耐え得る構造とするのも技術的・経済的に困難であるから、その施設の重要度を十分検討する必要がある。

断層を横断する構造物の設計手順の基本的な考え方を、図-1.4.3に示した。設計思想としてはレベル2地震動に対する耐震性能を求め、また、対応策としてはライフラインに求められる、幹線の設定・多ルート化・ブロック化の推進・代替手段の採用等システム面からの対策を取り入れる必要がある。

また、具体的な対応策を検討するために、断層横断部における地下構造物の対応策の例を調査した。変位を吸収する可撓性の例、強度の増加、損傷時の機能確保、代替手段、ソフト面などに分類され、整理できる。

(c) 今後の課題

対策方法案は、設計上断層を考慮して実施されたものから、アイディアレベルまでであるが、いずれも断層が実際にずれてその機能を検証したものはなく、断層の位置、ずれ量を含めて、今後の研究・開発を待たなければならない。

1.5 港湾施設

i) レベル2の地震時の設計手法の現状

阪神・淡路大震災以前では「港湾の施設の技術上の基準・同解説」により、震度法による構造物全体系の安定検討と、許容応力度法による躯体断面の検討を行っている。

震災後に出された通達（港湾の施設の耐震設計に係わる当面の措置について：1995.11.1

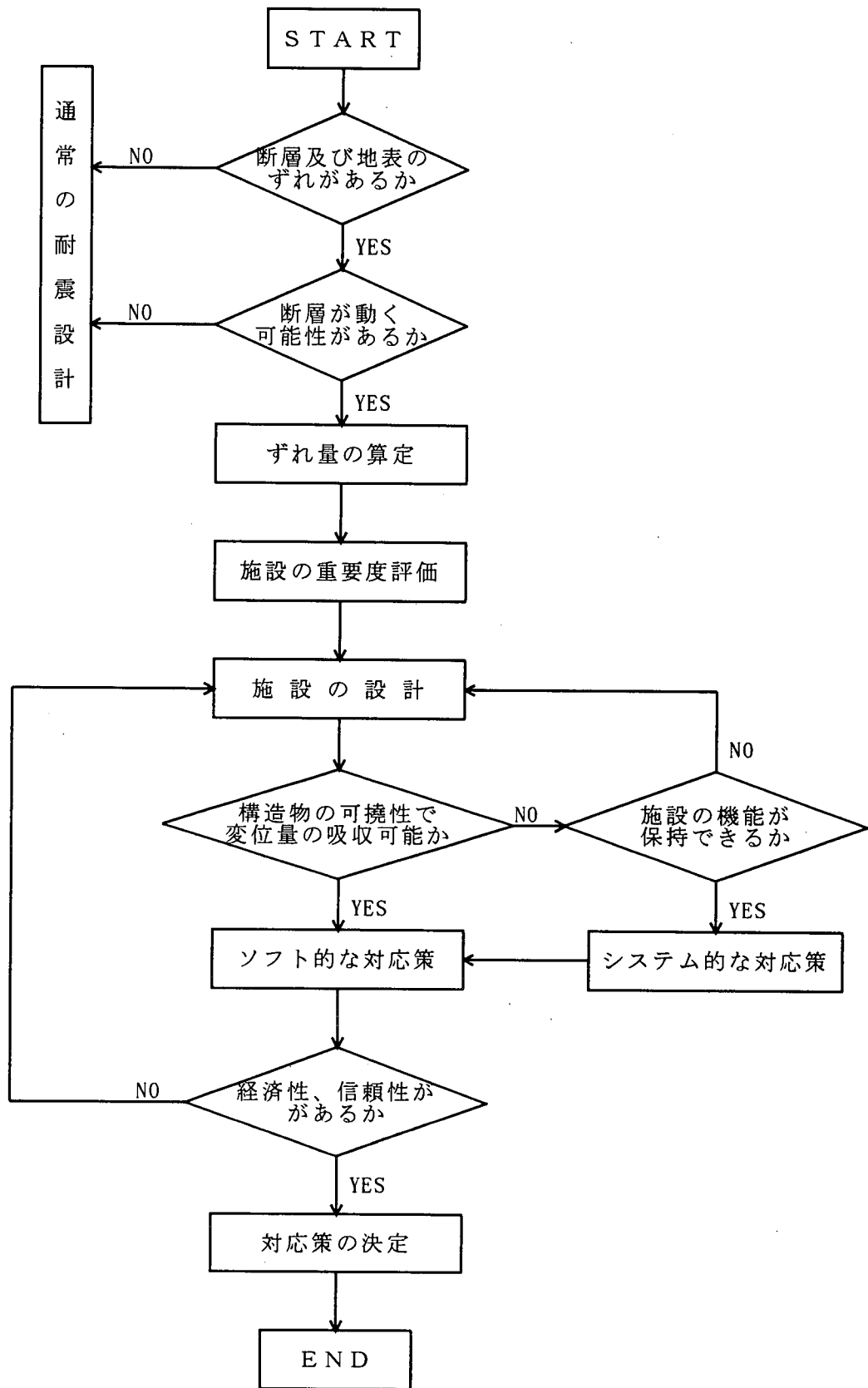


図-1.4.3 断層を考慮した設計手順

7)で、直下型地震を対象としたレベル2地震動への対応として、ポートアイランドで観測された実測波形を基盤に入力し、地盤の地震応答解析による地表面加速度を震度に換算して、震度法により設計を行うことが示された。

これらの設計法と第2次提言との関係を、表-1.5.1にまとめた。

ii) 対応策案

レベル2地震動に対する耐震強化岸壁の設計は、岸壁としての機能を確保することを目標として、震度法を用いて許容応力度設計を行い、設計された構造物の変形や耐力を後述のいくつかの方法で照査する方法で行われる。神戸港のケーソン式岸壁の被害から、設計外力以上の力が作用した場合、ケーソンは滑動することによりエネルギーを消散させ、構造物本体が損傷を受けることは基本的にはないものと判断されるため、上記の手法は、ケーソン式岸壁などの重力式構造物に関しては合理的な方法であると考えられる。

なお、ケーソン本体の滑動や沈下は、構造物背後の埋立地盤および置換え地盤の軟化が大きく影響したものと考えられているため、設計検討によりこれらの地盤が軟化しケーソンの変形により機能低下が想定される場合は、地盤改良・土圧低減等の種々の対策を行って、変形量を所定の範囲内に押さえる必要がある。

変形照査の検討方法は、既往の被害事例に基づく解析方法・地震応答解析・模型振動実験などを用いることができる。既往の被害事例に基づく解析方法では、各種の港湾構造物ごとの被害程度と入力地震動の関係や解析精度に関するデータの蓄積が継続的になされているが、予測精度の向上を図るためにも今後も引き続き種々のデータの蓄積が望まれる。地震応答解析の方法としては、FLUSHに代表されるような全応力法とFRIPのような過剰間隙水圧の上昇を考慮した有効応力法など、各種の方法がある。解析対象の構造形式・地盤状況・入力地震動の大きさなどの条件を考慮して解析手法を選択することになる。模型振動実験は、大型振動台・遠心載荷装置の整備が図られ、従来に比べ実現象に近い状況の振動実験が可能となってきた。

iii) 今後の課題

解析手法に関しては、実地震動による被害の解析、模型振動実験の数値シミュレーション解析などが精力的になされ、解析精度の向上が図られているが、今後も入力パラメータの決定手法をはじめとして各種の項目に関する一層の研究が望まれる。また種々の港湾構造物の被害と実験結果に関するデータそのものの蓄積も必要である。

1.6 地盤・土工

(1) 盛土の被害と対策

i) 現状

阪神・淡路大震災では、各種の盛土や土留めなどの土構造物も被害を受けた。被害の形

表-1.5.1 第2次提言と現行設計法の比較

	第2次提言	港湾基準	通 達
入力地震動	<ul style="list-style-type: none"> ・地域毎に活断層を固定し震源メカニズムに基づいて設定 ・兵庫県南部地震記録をもとに標準的地震動を作成 ・プレート境界に発生する巨大地震の地震動特性に関する研究 	<p>設計震度規定の中で「地震の活動度, 地震動の特性, 地震における地震動の増幅度等の調査により設計震度を精度よく定めることができる場合にはその他を用いてもよい。」という設計方針がある</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・兵庫県南部地震のポートアイランドで観測した実測波形を用いる. ・最大加速度の水平成分679Gal, 鉛直成分187Gal. ・活断層と岸壁法線の方向性は考慮しない.
保有すべき耐震性能	レベル1, レベル2	規定なし	耐震強化岸壁ではレベル2に対応
設計法	損傷過程にまで立ち入って耐震性能を照査	震度法	震度法
変 形	原位置観測や実験により評価方法や耐震性向上方法について研究の促進	な し	地震時の変形状態を検討する場合は, 既往の被害事例に基づく解析方法, 地震応答解析, 模型振動実験などを用いる.
側方流動	メカニズムと流動量の予測法に関する研究を促進	な し	水際の橋脚等の基礎については, 前面の護岸の挙動や構造を考慮して設計
液 状 化	<ul style="list-style-type: none"> ・沖積層または埋立土層で礫を多く含む土についても液状化判定の対象 ・高密度, 低繰り返し回数のもとでの液状化強度の適切な評価 ・均等係数の高い土の静的および動の変形強度特性についての研究の進展 	<p>判定方法</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ステップ1 粒度によって液状化する可能性のある土層を含む地盤かどうかの判定を行う. 可能性がなければこのステップで終了する. ・ステップ2 各土層の等価N値と等価加速度により判定を行う. 	<ul style="list-style-type: none"> ・設計対象地震に対し, 液状化を発生させないよう必要があれば液状化対策を行う. ・上記の設計地震波により応答計算から液状化の判定に必要な各土層のせん断応力を求める. ・液状化の予測・判定法は基本的には従来どおり. ・粒度・N値法における粒度範囲の検討および液状化しないとする土層の等価N値の上限の設定は, 釧路沖地震の液状化対策の効果の実績, 兵庫県南部地震の液状化発生の実状等を参考にする.

態は盛土の崩壊・変形、法面崩壊、地すべり、土留め壁の変形・倒壊などである。鉄道や道路盛土の被害は年代の古い施設や締め固めの充分でない盛土に集中して発生する傾向がみられた。また、造成地においては、丘陵部での斜面崩壊と海岸埋立地の液状化による被害がみられた。斜面崩壊はすべり面の液状化による大規模で高速な運動を伴う地すべりと埋没した原地形に沿って盛土部が移動する緩慢で継続的な地すべりおよび液状化による盛土の流動化に区分される。

ii) 対応方法案

道路や鉄道の盛土では被害が比較的小さく、復旧も早かった。特に良く締め固めた盛土は軟弱地盤上にあっても変状が小さかった。全体に、盛土や擁壁は壊滅的崩壊に到らない粘りを示したといえる。また、ジオテキスタイルなどによる補強土擁壁も高い耐震性を示した。したがって、液状化対策が充分に行なわれ、土の強度を考えて適切に施工された土構造物であれば、レベル2地震動に対しても、多少の損傷は許すが早期復旧が可能という条件を満足することはできると考えられる。

iii) 今後の課題

既設の古い施設について耐震点検を実施して靱性を評価する簡易な手法を確立し、重要度に応じて耐震性の改善をはかっていく必要がある。また、軽量盛土や補強土盛土などの耐震性について地震時応答特性の予測なども含めた検討を行ない、被害の予測と効果的な対策手法を確立する必要がある。

(2) レベル2地震動に対する耐震設計手法

i) 現状

土構造に関する現行の基準指針類を調査した結果、特殊な場合を除くと、基本的には耐震設計を行わなくともよいことになっていることがわかった。また、耐震設計を行う場合には、震度法による円弧すべり法による安定解析を行い、安全率で盛土の安定性を評価する方法が示されている。安定解析に用いる設計震度は、レベル1地震動に対応するもののみであり、レベル2地震動まで規定している基準類はなかった。

ii) 対応方法案

第二次提言では、レベル2地震動に対して土構造物が要求される耐震性能は以下の3点に要約される。

- ①重要度の高い区間の土構造物は、それらが支持する構造物や周辺の諸施設に重大な被害を及ぼさないこと
- ②被災地への緊急輸送路の確保を目的とする重要施設は、その所期の機能を維持すること
- ③その他の一般区間については、周辺に二次災害等の悪影響を及ぼさないこと

①の支持構造物に重大な被害を及ぼさないことに関しては、土構造物は、規模の大小は別として、沈下や亀裂・陥没等の地盤変状が発生することを前提として、基礎の強化など構造物の側で適切な対処方法を講ずることができれば、土構造物が大きく流動（移動）し

たりバラバラになってしまうような状態にならない限り、支持構造物に重大な被害は発生しにくく、また周辺の諸施設へ重大な被害を及ぼす可能性は小さいと考えられる。

②は、流動や崩壊が発生しなければ、ある程度の地盤変状は迅速に復旧可能であるので、短時間に復旧できることを前提とすれば、所期の機能は維持できると考えられる。

③についても、①と同様、周辺に対する悪影響と考えると、流動や崩壊が起これなければ、要求は満足できると考えられる。

以上の第二次提言に唱われている耐震性能を満足するためには、基本的には、盛土が大きく流動したりバラバラに崩壊したりして、上部の構造物が転倒したり、崩壊土砂が敷地外に流出して、二次的な被害が発生しないようにすればよいと考えられる。

既往の震害事例によれば、流動や大きな崩壊が発生しやすいのは、基礎地盤や盛土内で液状化が発生する場合と地山または基盤が傾斜している地盤が多いといわれている。

地震動の継続時間は有限であるので、流動または変形も有限にとどまると考えられ、その変形量が許容できるものであるならば、対策は必要ないといえる。従って、流動や大きな崩壊が起きやすい重要区間の土構造物は従来の安全率で安定性を評価する方式ではなく、変形量で支持構造物や周辺への影響の度合いを定量的に評価する合理的であると考えられる。一方、液状化の可能性がなく、地山や基盤の傾斜のない地盤上の土構造物の場合は従来の耐震設計法の考え方に従ってよいと思われる。

図-1.6.1に土構造物のレベル2地震動を考慮した耐震設計の考え方に関するフローチャートを示す。このフローでは、①検討対象区間（範囲）の土構造物の重要度分類を行い、耐震設計が必要な区間を抽出する。②地盤・地形調査に基づいて液状化解析などを行い、地震時に流動や大きな崩壊の可能性のある地形・地盤条件の区間を抽出する。③この区間に関しては、地震時残留変形解析を行って地震後に残留する変形量を推定し、対策工の必要性を検討する。④流動や大きな崩壊が起こる可能性の小さな区間については、円弧すべり面法による安定解析を行い、対策工の有無を検討する、という手順となっている。

iii) 今後の課題

①地震時残留変形解析については、各種の研究事例や最近実施された河川堤防の耐震点検マニュアルに示されているような、被害想定パターンに応じて、沈下量を推定する簡易なものもある。どのような方法を用いて解析するかは今後の問題であるが、2種類程度の解析手法は用意しておく必要があるだろう。すなわち、広い範囲を対象として危険区間を抽出するのに使えるような簡易な手法と、対策の有無や対策工の設計のために用いるやや詳細な手法の2種類である。

②流動の可能性の小さい土構造物の安定性の検討に用いる安定解析方法は、原則的には従来のものでよいと考えられるが、地震動レベルが大きくなると、地盤の強度なども従来用いられているような静的強度ではなく、繰り返し特性を考慮した土の強度（動的強度）を採用する必要がある。また安定解析に用いる設計震度は、土構造物の場合、他の構造物よ

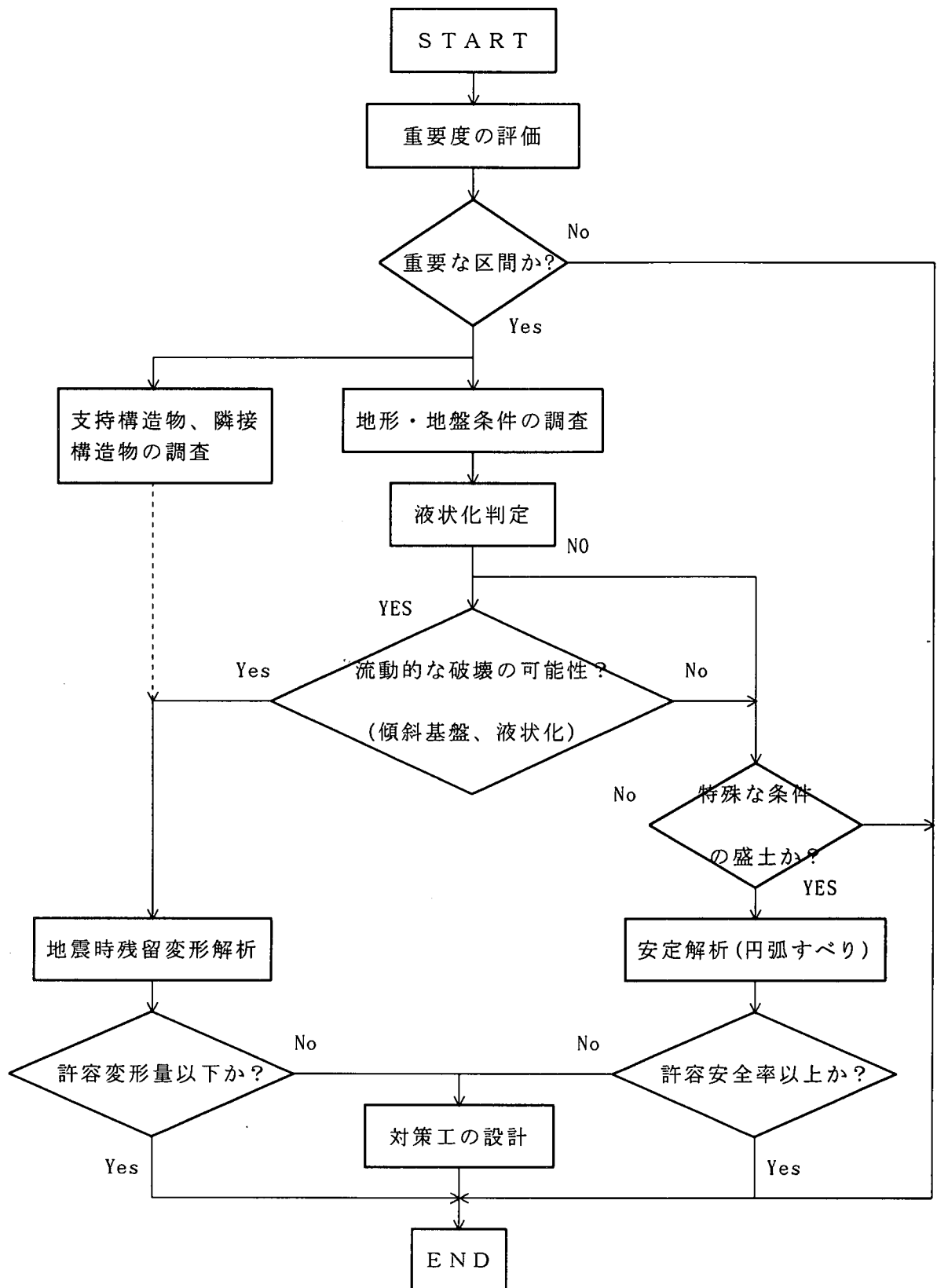


図-1.6.1 レベル2地震動を考慮した土構造物の耐震設計フロー

りも小さい値が用いられている。レベル2に対応した設計震度として、どのような値を設定すべきか今後の検討課題といえる。

安定性の検討の場合にも検討のレベルに応じて解析方法を使い分ける必要がある。

例えば、危険区間抽出には従来の震度法による円弧すべり面法を、震度法では判断が難しい場合や対策のための詳細な検討には有限要素法などによって地震時応力を算定し、その応力分布を用いて円弧すべり解析を行う方法などである。

(3) 液状化判定法と対策の考え方

i) 現状

地盤の液状化判定法に関しては、現在ほとんどすべての構造物の設計基準類に取り入れられている。これらの基準類の判定方法には粒径や細粒分の影響は取り込まれているものの、阪神・淡路大震災で問題となった礫質土を対象とした判定方法や液状化に伴う地盤流動の予測方法が示されているものはない。

また、液状化判定に用いる最大加速度または設計震度は、すべてレベル1地震動相当のものであり、レベル2地震動に対応したものはない。

一方、液状化対策工法に関してもレベル1相当の地震動を用いた液状化判定に基づいた設計が行われており、レベル2相当の大きな地震動にも耐えうる設計とはなっていない。

ii) 対応方法案

第二次提言では、レベル1地震動に対しては、構造物基礎の場合、従来の設計方法と同じく、原則的には地盤改良等で液状化しないようにすること、レベル2地震動に対しては、地盤改良による液状化防止を目指しているが、それが不可能な場合には、沈下や側方流動など、液状化が構造物に及ぼす悪影響を小さいものに抑えて、重大な損傷が発生しないようにすることが唱われている。また、地中構造物の場合には、線状構造物であるので、単体の構造物のように地盤改良による液状化防止等の対策は困難であるが、液状化による悪影響を押さえて、構造物に重大な損傷が生じないようにすることとなっている。

現行設計法における液状化の考え方と比較すると、レベル1地震動に関しては、現行設計法の考え方と変わっていないと考えられる。レベル2地震動に対する液状化検討の大きな違いは、液状化に伴う地盤流動（側方流動）の予測と、それが構造物に及ぼす影響の検討を取り入れたことである。地盤流動に関しては、未だ研究途上の問題であるが、今後、重要性が益々高まると予想される湾岸埋立地などでは、不可欠な検討項目であるので、関連研究の進展によって検討・予測方法が確立され、設計へ早期に導入されることが必要と考えられる。

iii) 今後の課題

第二次提言に対応した液状化判定・評価手法を確立するためには、次のような検討課題がある。

a. 液状化判定方法

レベル2地震動のような大きな地震動に対応した液状化判定手法を確立する上で必要な検討課題は、大きな地震動に対応するものとして、①やや密な地盤の強度評価、②地震動の等価繰返し回数の配慮、液状化判定の対象とする土質に関しては、従来、液状化しにくいとされてきた礫質土等の均等係数の高い土の液状化強度の予測方法の確立などである。

b. 地盤流動

地盤流動に関しては、研究の歴史が新しく、まだ設計手法として確立された技術とはなっていない。大きな検討課題としては次の2点が挙げられる。

- ①地盤流動の可能性および流動量の予測手段
- ②地盤流動が構造物に及ぼす影響の検討方法

2. 耐震設計の高度化への対応状況の調査

「第二次提言」で示された耐震設計技術の高度化への対応を調べるために、民間企業を対象としてアンケート調査を行った。「第二次提言」に示された耐震設計技術の高度化に備える関連企業の対応状況や発注者や土木学会に対する要望を把握するために、できるだけ具体的に調べるために、次の項目を対象とした。

- ①当該企業の属性：資本金、技術者数、対象技術分野
- ②「第二次提言」に示された耐震設計技術の高度化への感想
- ③耐震設計技術の高度化に対する企業努力の内容
- ④動的解析の実績、生産方式、対応可能な技術者数
- ⑤発注者や土木学会に対する要望や期待など
- ⑥その他

配布先は全162社、その内訳は建設コンサルタンツ会社108社（構造設計に関連する建設コンサルタント各登録部門のTOP20）、総合建設業28社（土木学会土木施工委員会参加29社の内、舗装会社1社を除く）、鋼橋メーカー代表17社およびPC橋梁施工会社代表9社である。回答は上記職種、それぞれ、81社、26社、17社および4社の合計128社であった。

回収率は、同じく75%、93%、100%、44%であり、全体で79%でこの種の調査としては高い値を示した。これは、阪神・淡路大震災における土木構造物の深刻な被害状況の衝撃の大きさを物語るものである。

主な質問事項に関するアンケート結果について、全体、設計の立場（コンサルタント会社）、施工・製作の立場（建設会社、橋梁メーカー）の三つの立場から整理を行った。

【注：以下、文章中の**強調文字**は、アンケートの質問項目を示す。】

(1) 「第二次提言」に示された耐震設計技術の高度化への感想

設計の立場、施工・製作の立場ともに、**耐震設計技術の差別化の進行と対応能力の相違が顕在化すると、耐震設計技術の高度化に対して何らかの対策の必要性を感じていると**で

全体の約7割を占めており、それほど大きな傾向の違いは見られない。設計、施工・製作に係わらず、耐震設計技術の高度化への対応には敏感になっていることがわかる。

耐震設計技術の差別化の進行が自社の競争力を高めるチャンスと判断するについても、両者ともほぼ同じ割合になっている。

(2) 耐震設計技術の高度化に対する企業努力の内容

設計の立場と施工・製作の立場で職種の違いが現れている。

設計の立場で目立つのは、**耐震部門の新設・強化、動的解析などの解析ソフトの購入（予定を含む。）**および、**社内勉強会の開催**である。

施工・製作の立場では、**耐震性向上のための新しい工法や技術開発**の割合が高くなっている。動的解析などの解析ソフトの購入は、施工・製作の立場においても最も占める割合が高くなっている。

動的解析などの解析ソフトの自社開発の割合に着目すると、設計の立場よりも施工・製作の立場の方が占める割合が大きくなっている。これは、会社の規模の違いによるものと思われる。

(3) 動的解析の実績と手法・生産方式・対応可能な技術者数

動的解析の実績と手法、生産方式について、平成7年兵庫県南部地震以前の3ヶ年の状況と地震以降の状況について質問した。

①動的解析の実績については地震前の3ヶ年では、年間1~2件のものが全体で半分弱、次いで実績無しが25%弱、5~10件が18%余り、10件以上が10%強となっている。

設計の立場では、実績無しの比率が約30%と施工・製作会社の3倍弱になっているのに対し、年間10件以上とするものでは設計が施工・製作の約50%増となっている。年間1~2件のものでは逆に施工・製作が設計の1.5倍となっていることが注目される。

地震後については、全体、設計、施工・製作とも数十件以上とするものの割合が地震前に比べて、1.5~2倍程度増加している。また、実績無しが同じく2/3強に減少し、全般的に実施の機会が増加していることがわかる。

②動的解析の手法については、地震前は、全体、業種別とも線形動的解析が約75%を示しているのに対し、地震後には非線形動的解析を何らかの形で含むものが全体、業種別とも約60%となり、線形動的解析のみが30%弱に大きく減少している。これは、「第二次提言」を受けた復旧設計や耐震補強設計の機会が増加しているからと想像される。

③動的解析の生産方式については、地震前後では若干、社内対応の割合が増加しているものの職種による違いが目立つ。すなわち、設計の立場では、原則社内で行うとするものが、30%強となっているのに対し、施工・製作の立場では約60%を占めている。

原則として社外に委託するとの回答が設計の立場では地震前後で20%弱から約24%に増えているのに対し、施工・製作の立場では、逆に、約22%から18%強に減少していることも注目される。

④動的解析に対応可能な技術者数については、通常の手法に対応可能な者と高度な技術力を必要とする問題に対応可能な者とに分けて整理する。図-2.1には、通常の手法に対応可能な技術者の数を整理した結果を示す。

通常の手法に対応しうる技術者数は、設計の立場で約60%が10人未満であるのに対し、施工・製作の立場ではその比率が50%弱となっている。また、10～19人の割合については設計で約15%、施工・製作でその二倍強の32%余りと逆の傾向になっている。

高度な技術力を有する技術者の数については、業種の違いはそれほどではなく、1～4人が60～65%強、5～9人が20%前後、となっている。但し、10～19人とするものでは、設計の立場で約10%であるのに対し、施工・製作の立場では13%余りとその違いが目立つ。これは会社の規模の違いによるものと思われる。

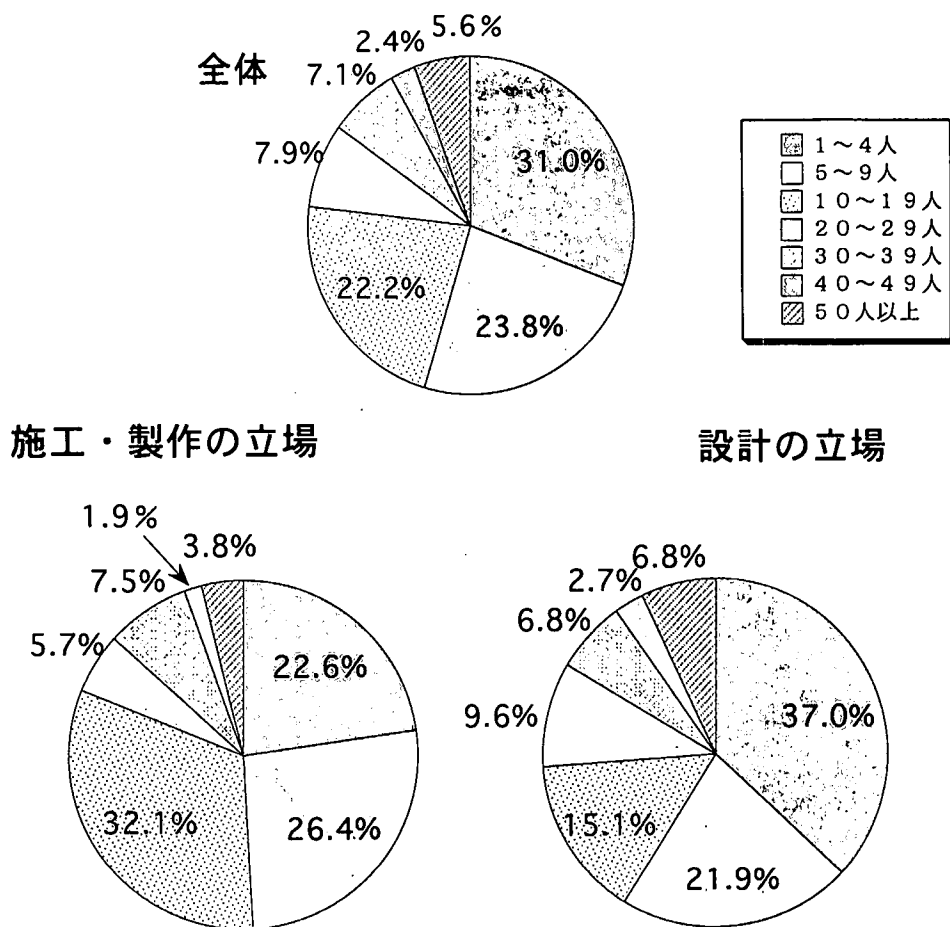


図-2.1 通常の手法による動的解析を行う技術者数

(4) 発注者や土木学会に対する要望や期待など

全体で眺めてみると最も高い割合を占めるものは、設計や施工技術の高度化、複雑化に対する正当な代価の要求である。次いで、土木学会に対して耐震設計の実務書の企画・出

版そしてセミナーの企画・開催となっている。

設計の立場では、セミナーの企画・開催や耐震工学の教育機会の増大の要望が高く、施工・製作の立場では、フルターンキーによる発注形態への変更の要望や耐震設計基準の改訂による成果の差は小さいものが良いとする意見の割合が大きくなっている。

耐震設計基準の性格として設計者の自由度を望む意見が両業種とも8%弱と少ないことは興味深い結果である。

(1)～(4)までの調査結果を踏まえて、設計技術検討部会が本来対象としている、設計の立場についての調査結果に関するまとめと考察を行う。

現状での対応能力であるが、平成7年兵庫県南部地震以前の動的解析に関する調査結果をみると、年間10件以上の動的解析を実施してきた会社は12%しかないことがわかる。

「第二次提言」では非線形動的解析が基本となっているが、構造物の地震応答を決定づける、構造物の固有振動特性と地震動の関係等は線形動的解析を数多く実施することにより得られるものであり、平成7年兵庫県南部地震以前と同様な感覚で（何の自助努力もせずに）いると、耐震設計の高度化に対応できない会社が多数出てくることがわかる。このような現状は、各社においても認識されているようであり、「第二次提言」や自助努力に関する調査結果からもその様子が伺える。当然、平成7年兵庫県南部地震以前から動的解析の実施件数が多い会社は、地震以後においてもその数は多く、耐震設計の高度化は他社との差別化のチャンスとしている会社も数社ある。

土木学会への要望としては、耐震設計に関する実務書の刊行やセミナーの実施が多く、何をどう勉強して良いかがわからない会社が多いようである。これは、平成7年兵庫県南部地震以前の動的解析の実績を考えると当然かもしれない。

発注者への要望としては、耐震設計の高度化にともなう設計作業量の増加に伴う発注金額の増加に関する要望が最も多かった。

設計基準に関しては、細かく規定して欲しいが、基本的な考え方のみを規定して欲しいを上回った。

今回のアンケート結果を設計の立場を対象に総合的に評価すると、次の3点を上げることができる。

- ①従来から、動的解析の実績が多い会社は、耐震設計の高度化にも対応できる。しかし、その数は、数社にとどまる。
- ②従来、あまり動的解析を行って来なかった会社も、耐震設計の高度化に対応すべく、勉強会、プログラム開発等の自助努力を進めている最中である。
- ③自助努力を進める上で、適切かつ実用的な情報の提供を土木学会に望んでいる。

3. 耐震設計の高度化に備える施策の提案

3.1 設計技術者の役割

(1) 背景と目的

阪神・淡路大震災の反省から、安全で安心できる社会環境の創出、公共施設および構造物の計画・調査・設計および維持更新の必要性に関する社会的な認識（地域防災計画の見直しや耐震設計の高度化、既存不適格の構造物の耐震補強の推進など）が急速に高まった。

最近の社会情勢、たとえば財政状態の悪化や高齢・少子社会の到来、産業の空洞化などによる将来動向に対して、規制緩和や行財政改革の実施が必要であるとの見解が世論の大勢となっている。この中で公共事業のあり方に対する批判的見解が多く、識者から指摘されている。これを受けて、建設省など関連省庁では、事業の効率的遂行に関する方策の推進、CMや建設費の縮減方策の検討などの積極的な取り組みが為されているところである。

このような対応は防災対策への投資や支出の増加に対して、負の要因となる可能性も考えられる。また、時間の経過とともに阪神・淡路大震災の記憶が薄れ、上述した膨らみかけた災害軽減対策の必要性の議論が冷静になりつつあることも事実であろう。

一方では、最近の社会の動きの特徴として、PCやEWSおよび高性能ソフトの普及やINTERNETの活用などによる高度情報化の一層の促進とそれらによる設計生産現場への波及効果は大きいものがある。

このような状況の中で専門職業人としての設計技術者に期待される役割を、改めて整理・検討し、具体的に提案することを目指している。

(2) 社会基盤施設を整備する立場として求められる役割

ここでは経験10～15年程度以上のキャリアを有する設計技術者を想定し、高度化する耐震設計法に対処するための課題・役割について以下に整理した結果をまとめる。

①「第二次提言」の内容を理解し、阪神・淡路大震災ばかりでなく内外の既往の地震被害の状況を把握し、専門家としてふさわしい新しい知識や技術の修得を積極的に図る。

②研究の進展の著しい耐震工学の成果に目を向け、関連情報の把握と実務設計面への適用可能性について関心を払う。

③業務の遂行に当たっては次の事項に留意すべきである。

- ・サイトの地形、地盤そして構造全体系の観点から耐震安全性の確保を念頭に置いた構造計画を適切に行うとともに地盤調査計画を含む合理的なマネジメントと課題の発見とそれらの解決、成果の照査に積極的なリーダーシップを発揮すること

- ・耐震設計基準類の適用に当たっては、表現の背景・前提を十分理解して、その趣旨をわきまえ適切に解釈し、耐震設計の基本を誤ることの無いよう弾力的に配慮、運用すること

- ・高度情報化社会における設計の陥穽、すなわち、計算・解析万能に対する注意喚起を行

うことのできる総合的判断力を身につけるように研鑽するとともに若手技術者に対する適切な教育、指導を行うこと

・発注者に対しては、耐震設計の重要性、基準等の基本的な内容とそれらの背景・前提についてわかりやすく説明を行い、理解を促すよう努めること

(3) 大地震直後の望まれる協力・支援内容

首都圏や大阪などの広域的な都市域にレベル2地震動が生じた場合を想定する。阪神・淡路大震災の状況から考えると地震直後には相当な混乱が生じることが想定される。このような場合、設計技術者として何ができるかを考える。当人が地震の発生時に①被災地域内に居た場合、②被災地域から離れたところに居て地震の影響を受けない場合の二つの状況に加えて、さらに会社・自宅・出張先もしくは外出先に居た場合のつごう6ケースに分類される。

現在検討中であるが、基本的には、本人が安全でかつ家族・親族の安全が確認された後、住民または国民の義務として個人の立場で行うボランティアと、会社や組織に所属する専門家の立場で大きな責任を伴いながら行う行為とに分かれるであろう。

3.2 設計技術者の技術力向上に関する施策

(1) 概要

第2次提言の内容と設計実務の現状との間には、多くの解決すべき課題があるのが実情である。中でも特に重要な事項は、地震時の動的な挙動と、レベル2地震動の作用時に考慮すべき限界状態（変形形態および程度、損傷の許容水準など）を具体的に設定することや、動的解析を適切に行い、設計に反映させることである。

しかしながら、従来では、震度法による許容応力度設計法が慣用的に用いられてきたこともあって、発注者および実際の設計業務を行うコンサルタントの中で、これらの要求にただちに対応しうる能力や経験を有する者は残念ながら極めて少ない状況にある。

このような状況にある設計実務に携わる技術者の耐震設計に関わる問題発見、解決処理能力の向上を図るために、土木学会として講じられる施策を検討した結果、次のことが効果的と考えられる。

①耐震設計および動的解析について平易に解説した実務書の企画

②セミナー、講習会などの開催企画

これらの企画にあたっては、今後、設計実務面で実施される機会が増加するものと思われる動的解析の精度確保のための方策についても含むことが肝要であり、そのための着目すべき要因についても整理した結果をまとめている。

(2) 耐震設計および動的解析に関する実務書の企画

基本コンセプトを次のように考えた。

- ①実務書は、入門書と実践書（中級編）の2本立てとする。
- ②入門書は、動的解析について全く知識がない技術者を対象とし、動的解析の基本について理解できるように、平易に分かりやすい表現を用いて記述する。
- ③実践書は、ある程度動的解析について素養がある技術者を対象とし、留意点を明示し技術者が実務を行う場合の参考書的、マニュアル的なものとする。構造物を構成する各要素の非線形特性（挙動と破壊モードおよび構造諸元との関係）を理解して貰うとともに、設計で用いる解析手法によって、その非線形性をどこまで再現でき、何が再現できないかを理解して貰うこととする。さらにその解析手法により設計された構造物の耐震性をどのように照査するかセンスを実例を通して理解して貰う。
- ④取り扱う対象構造物は、橋梁（地上構造物）、地中構造物（RCボックスカルバート、シールド）、地盤とする。
- ⑤解析法についてはレベル1地震、レベル2地震に対応したものを述べる

⑥入門書の内容

橋梁技術者で変形法を詳細に知らなくても、平面フレーム解析等により設計しているのが現状であり、ましてや動的解析法について詳細に理論を説明しても大半の技術者には理解しづらく、途中で挫折し結局その本が難しすぎると諦めてしまう。従って動的解析の理論については既存の参考文献を紹介し、本書は、入力定数（地震動、材料定数、減衰定数、地盤定数）、解析結果の見方、評価法について具体的に述べるものとし、技術者が実際に動的解析のプログラムを用いて解析できるように工夫をする。

- ⑦阪神・淡路大震災で得られた新しい知見をできる限り盛り込む。

(3) セミナー・講習会などの開催企画

期 間：セミナーは合宿制で3～5泊程度、講習会は1日

対象者：①入門編：設計経験者2～3年程度であり震度法以外の耐震設計を全く行っていない人

②中級編：震度法以外の耐震設計をある程度行っている人

③上級編：動的解析の経験がある人

講 師：コンサルタント、建設会社の設計実務担当者

内 容：①入門編：耐震設計の基礎（語句、手法、動性等）・道路橋示方書の内容

②中級編：一般的な1次元、2次元の動解

③上級編：有効応力解析、非線形解析（コンピュータによる動的解析の実行についても、可能性を検討する）

(4) 動的解析の精度確保のための方策

動的解析の精度確保のためには下記に示す3つの要素が各々精度を確保する必要がある。

i) 解析ツールの解析法の妥当性の向上について

線形動的解析においては解析方法の相違が解析結果の精度に及ぼす影響度合いは比較的

少ないが、非線形動的解析においてはせん断の非線形の取扱い、軸力変動の影響の取扱い等により、解析結果は全く異なったものになってしまう。実務設計で動的解析を用いて設計および照査を行うには、解析結果に対してあるレベル以上の妥当性がなければならない。現在使用可能なプログラム、および将来開発されてくるプログラムについて、ブラインドテストおよびベンチマークテスト等により信頼性のある解析ツールを設計の場に提供する必要がある。

ii) 材料定数の精度向上

解析ツールがほぼ妥当との評価を受けたものであったとしても、次に問題になってくるのが解析に用いる材料定数の設定である。線形解析においてすら材料定数の相違により、結果は当然異なってくる。非線形解析においてはさらに不確定な定数が増加してくるためより一層材料定数の設定が重要になってくる。用いるべき諸定数についてある程度明確なものと、まだ不明確なものを情報を公開し、不明確なものについてはどこまで解っていてどこから解らないのか知らしめる必要がある。ブラックボックス化されることは極力さけるべきである。

iii) 担当技術者の能力向上

これまで、設計技術者は設計基準に従ってマニュアルまたは計算例に従って設計してきたが、動的解析に関してはそのような基準、マニュアルはまだ完備されている状態ではなく、各技術者が各種の文献により技術習得をしている状態である。解析方法各種の材料定数に関する知識を身につけていることが必要で、使用する解析ツールの設定条件をよくわきまえて、適切な材料定数を入力して始めて精度の高い解析結果が得られる。

3.3 設計品質向上に関する施策

(1) 目的

耐震設計の高度化を達成するためには、設計技術の向上が必要であるとともに、その技術を如何に有効に機能させるかということが要請される。これを具体化するためには、技術者や企業の能力の向上とともに、それらを有効に発揮させるためのシステムが同時に改善されることが肝要である。すなわち、耐震設計の高度化のためには、技術の開発、技術を駆使する側の能力の向上、それを支えるシステムの改善が車の両輪のごとく推進されなければならないと考えられる。

ここでは、前述の3つの柱のうち、システムの改善に焦点を当て、設計品質の向上という切口から検討を行なって、その施策を提案することを試みようとするものである。

(2) 現状の分析

i) 作業および内容の概要

耐震業務を実施する際の発注から成果提出までの流れとそこで用いられている手段の中

で、耐震設計の高度化を達成するについて、どのような問題があるのかを分析する。また、企業や技術者、個人の能力を有効に発揮させるためには、どのような点が欠けているかということ进行分析する。

ii) 具体的な結論のイメージ

a. 発注（段階）における問題点

契約約款等、契約行為に係る制度上の現状を検討する。また、先に実施されたアンケート結果を検討し、受注する側の現状について問題点を明らかにする。

- ①現状では耐震技術の実行能力がコンサルタントすべてに一律ではない。
- ②連続性のある構造物を分割して設計の発注を行うと、耐震設計の合理的な実施の妨げとなることが考えられる。
- ③著作権や知的所有権が確保されないシステムとなっているため、耐震技術の開発意欲を削いでいる。

b. 業務実施段階における問題点

設計共通仕様書や設計の手引きなど業務実施に関わる様々な規定において、耐震設計を推進するためには何が欠けているか、すなわち耐震に関する規定がどの程度に扱われているかの実情を把握する。

- ①例えば、建設省の「設計業務共通仕様書」に耐震に関する項目がない。
- ②耐震が意識されていないため、例えば、建設省関連の調査・設計業務実績データを登録した情報システムである「TECRIS」においても耐震のKey Wordがない。

c. 品質保持に関する問題点

- ①耐震検討・設計に関するチェック、レビューを充実させる必要があり、そのためには耐震問題に造詣の深い総合的技術力を有する照査担当技術者を充てる必要がある。

d. その他の問題点・現状

- ①耐震設計に対する意識が単なる荷重の問題としてとらえられてきたため、技術的分野全体で希薄であった。
- ②耐震技術に関する評価が、いわば縁の下の力持ちのようなものであるため、技術者の関心を引きつけ難い面がある。
- ③種々の構造物の設計の一部として耐震は入っていたが、耐震技術という分野の意識がややもすると欠けていた感がある。

(3) 問題点の分類と改善策

問題点の分析を踏まえ、改善のための課題を整理、分類する。また、それに対する改善策を述べる。問題点については次の3つの側面に分類される。各々の課題ごとの改善案・アイデアとしては、現時点で例えば次のものが考えられる。

i) 技術者へのインセンティブの付与

- ①技術士制度の改善（耐震に関する設問などを各部門で義務づける。）

- ②技術力の評価と表彰（優秀な耐震技術の評価と、それを社会に示す方策の提案）
- ③著作権や知的所有権の付与（技術検討成果の公表を容易ならしめ、社会的貢献への努力を広くPRする。）

ii) 品質管理システム活用の充実

- ①耐震設計の高度化に応じた歩掛りの改訂
- ②レビュー、チェックシステムの整備（チェック、レビューのフロー、項目、内容の程度）
- ③ベンチマークテストの実施による耐震設計・解析関連ソフトの精度の確保
- ④設計レビューとしてのチェックシステムの導入（設計計算対応ソフトでは計算途中段階の出力や最終結果の出力項目等が簡単に選定できるシステムを導入し、解析結果のチェックが容易にできるソフトを開発する）
- ⑤教育・研修制度の充実（大学や公的機関との共同研究や国内および海外留学制度の充実・活用）

iii) 業務発注システムの改善

- ①応答解析、地盤の液状化や流動化といった技術的課題のある業務について、プロポーザル方式の積極的採用、およびプロポーザルの内容を正当に評価しうる透明性の高いシステムの整備
- ②橋梁を例にとると、地盤の調査計画および結果の吟味を含み、連続性のある構造では広範囲の全体系としての耐震をも考慮する構造計画を発注するようなシステムへの変更
- ③技術評価制度の見直し、あるいは設計者の創意工夫と適切に評価しうるような発注システムの構築
- ④共通仕様書等の改訂（耐震に関する条項の追加など）

(4) 改善案実行のための問題点と現状での実現性の検討と施策の提言

上記(3)で提案された改善案を実行するための問題点や解決のための手段、実施可能性を検討・評価し、現時点で有効かつ実現性のある施策を提言する。また、その他の改善案についても将来の方向性を提案する。