

2. 提言を設計実務に適用する場合の手法と課題

2.1 概要

「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、昨年の秋までの間、「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。

2.2 入力地震動

2.2.1 活断層タイプの地震の実務設計への適用の意義と問題点

構造物の安全性を確保するための目標水準は、当該施設の規模、重要度、周辺施設や人命に対する影響、防災上の機関等様々な要因を考慮し設定されるものであり、地震多発地帯である日本では、耐震設計によりその諸元が設定される場合が多い。

「第二次提言」では、土木構造物の耐震設計において想定する地震動としてレベル1地震動とレベル2地震動の2段階の地震動を考慮するように提言されている。構造物の保有すべき耐震性能は、レベル1では「構造物が損傷しないこと」レベル2では「重要な構造物は、損傷が発生したり、塑性変形が残留しても、比較的早期に修復可能であること。その他の構造物では、構造物全体が崩壊しないこと」としている。また、レベル2地震動として内陸活断層タイプとプレート境界タイプを想定している。レベル1、レベル2の2段階の地震動を採用して行う耐震設計の考え方は、東京湾横断道路や関西新空港連絡橋で採用されていたが、レベル2地震動はプレート境界タイプを想定

していた。また、平成2年に改訂された道路橋示方書でも、RC単柱式橋脚の設計にすでに導入されていたが、レベル2地震動はプレート境界タイプを想定したものであった。

阪神・淡路大震災の経験から、「第二次提言」では、内陸活断層タイプの直下型地震を想定することが求められることとなった。本節では原子力施設を除く、一般の土木構造物に、このタイプの地震を適用しようとする場合の考え方、現状での課題などを整理し、設計実務に携わる技術者の参考に供することとしたい。

(1) 内陸活断層タイプの地震の実務設計への適用の意義

このタイプの地震動を一般構造物の耐震設計に適用することの意義は、以下の点にある。

- ①設計対象構造物の建設地点に脅威となる活断層を精度良く同定し、損傷過程を評価できる解析手法を用いることにより、耐震安全性に優れた構造物を合理的に設計することが可能になる。
- ②活断層から離れた地域では相対的に小さな地震動が設定される。限られた財源の中で構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構造物を絞り込むことにより、合理的な費用分担にもとづく耐震性の高い社会基盤施設を建設できる。
- ③一般市民に対して、耐震設計が地震動の強さと当該構造物の耐力、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積極的にPRすることが必要である。構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、われわれの二世帯、三世帯後の時代に引き継ぐことになる公共施設に関わるリスクとコスト（社会的負担）とを関連付けて、地震防災の適正な投資水準について全国レベルで議論を深めることは有意義である。

(2) 内陸活断層タイプの地震の実務設計への適用の問題点

このタイプの地震動を一般構造物の耐震設計に適用することの意義は、上述したように十分に理解できるが、その前提となる条件を満足するにはまだまだ問題点が多い。

それらは大きく分けて以下の3項目から成る。

- ・活断層の同定
- ・設計に用いる解析方法
- ・重要度と構造物建設費用との関係

以下にこれらの内容について概観する。

i) 活断層の同定

- ①規模の大きい内陸直下の活断層タイプの地震の発生間隔は、一般に海洋型巨大地震に比べ長く、構造物の耐用年数から考えると想定地震として考えにくいこと。
- 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か不明確である。
- ③仮に活断層を特定し得たとしても、活断層から地震動を予測する手法については、現状では確立されていない。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的判断が要求される。

④地中構造物のような、線または面状に連続して建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や断層運動の変位を算定することは、通常の実務設計では困難である。

⑤通常の公共インフラストラクチャーの設計を行うに当たって、それぞれ個別に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、それに必要な費用の額の大きさを考えると現実的ではない。活断層の同定や性状の調査については、地域毎の調査と調査資料の蓄積が必要であることから、例えば、地域を代表する大学内に情報センターのような機関を設置し、関連データの一元的な整理を行って、設計者に自由に提供しうるような、システムを整備することが必要と考えられる。

ii) 設計に用いる解析方法

レベル2地震動で構造物を設計するには、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、線状地中構造物のように周辺地盤の挙動に耐震性が支配され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による構造物の設計よりも、むしろ地盤を含む全体系の安定性の照査に重点がおかれる場合の各々で、耐震安全性の評価を含む設計方法が異なることは明らかである。このうち、河川堤防などの土構造物や港湾施設については、レベル2地震動に対する設計法が研究段階にあり、設計法の確立に向けて、今後の研究・開発を要するものが多いのが実情である。これらについては、各種構造物の種類毎に、2.3 以下に詳述する。

iii) 重要度と構造物建設費用の問題

①構造物は、レベル1およびレベル2の2段階の地震動を想定して耐震設計するように提言されているが、構造物の中にはこれまでレベル1地震動に対しても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ようもなく莫大なものとなる。

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能を評価する必要がある。重要度は、①構造物が損傷を受けた場合、人命、生存に与える影響度合い、②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、③地域の生活機能と経済活動に与える影響度合い、④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レベルをどのように設定するかは、住民の生命、生活に密接に関わっているため、住民に対して社会基盤施設の現状での耐震性能の水準についてわかりやすい説明を行い、地域住民に対し耐震安全性の水準とコストとの関係を説明するとともに、各管理者の立場や地域防災計画との整合性と勘案して定めようとする、確保すべき耐震性能の水準を広く提示し、それに向けての合意を得るように最大限の努力を行うことが必要である。この過程の中で住民からの意見も参考になるものは反映させる姿勢が大切であろう。基準に従って設計施工しておれば十分安全であるということ

ではなく、どの施設がどこまで耐震性を有しているかについて、また、設計で考慮するよりも大きな地震動が生じた際の配慮についても、認識させる努力が重要である。

③レベル2地震動にしても、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、ある想定でレベル2地震動の大きさを設定せざるを得ず、これを越える地震動が発生しうることを広く周知させる必要がある。

④ある構造物の耐震レベルを決定する場合、その構造物の重要度のみ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決定する必要があり、各関連機関が連携して基準類をできるだけわかりやすく、かつ体系的にまとめる努力を重ねていくことが重要と考える。

2.2.2 現行基準・暫定措置におけるレベル2の地震動の設定方法

(1) 現行基準の現状

阪神・淡路大震災により土木構造物は大きな被災を受け、構造物の耐震設計の見直しが各関係機関で行われており、レベル2地震動に対する対応が大きな課題となっている。レベル2地震動に対応すべくいち早く暫定措置が出されたのは、鉄道橋、道路橋、港湾構造物に関する耐震基準であった。また、道路橋については、暫定措置が出された後直ちに道路橋示方書の改定作業に入り、去る1月末に耐震設計関連規定の示方書・同解説が刊行された。また、鉄道関係の耐震基準については、平成9年度末を目標に改定作業を進めているところである。

阪神・淡路大震災以降にレベル2地震動について記載されている現行基準および暫定措置について以下に示す。

- ・道路橋：「道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編」，平成8年12月，(社)日本道路協会¹⁾
- ・鉄道橋：「新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料」，(財)鉄道総合技術研究所²⁾
- ・地中構造物：「下水道の地震対策についての最終提言」，下水道地震対策技術調査検討委員会³⁾，「水道技術者が当面とるべき地震対策に関する提言」，水道施設耐震改訂特別委員会⁴⁾，「新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料」，(財)鉄道総合技術研究所²⁾
- ・港湾構造物：「地震に強い港湾をめざした当面の措置について」，運輸省港湾局⁵⁾

(2) 道路橋

上述したように、平成8年12月に「道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編」¹⁾が(社)日本道路協会より発行され、従来の震度法および1923年の関東地震の際の東京周辺の地震動の強さを推定した地震レベルに加えて、内陸直下型地震を想定した地震動が設定された。

動的解析に用いる地震入力、阪神大震災において地盤上で最大の加速度が観測された地点の地震動を用いることが基本とされた。地震入力の選定に際しては記録が得られた地点および架設地点の地形・地盤条件や橋の動特性等を考慮するものとされた。

地震時保有水平耐力法に用いる設計水平震度を図-2.2.1に示す。

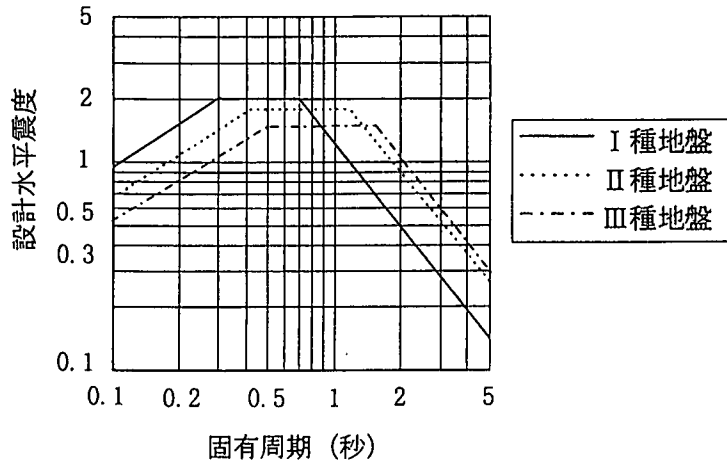


図-2.2.1 地震時保有水平耐力の照査に用いる設計水平震度¹⁾

(3) 鉄道橋

阪神・淡路大震災を受けて平成8年3月に「新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料」²⁾が(財)鉄道総合技術研究所から発行され、従来の地震レベルに加えてレベル2の地震動が設定された。

動的解析に用いる地震入力は、兵庫県南部地震規模の地震に対する検討においては、兵庫県南部地震で観測された地震動をもとに、表層地盤の特性を考慮して定めることとした。兵庫県南部地震規模の地震に対する検討に用いる加速度応答スペクトルを図-2.2.2に示す。

動的解析に用いる地震動波形は、兵庫県南部地震で観測された実地震波をその加速度応答スペクトルが図-2.2.2に示した加速度応答スペクトルに適合するように修正した適合波を用いることとされている。

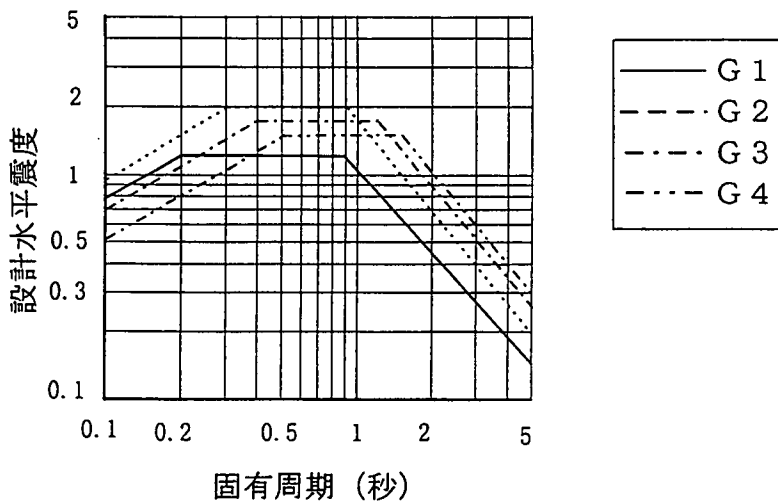


図-2.2.2 地震時保有水平耐力の照査に用いる設計水平震度²⁾

(4) ダム

阪神・淡路大震災をはじめとした過去の大規模な地震において、ダムは構造の安全性を損なうような被害はうけていない。しかしながら、阪神・淡路大震災では他の土木構造物が大きな被害を受けていることに鑑み、建設省では「ダムの耐震性に関する評価検討委員会」⁶⁾（委員長：田村重四郎日本大学教授）を設置して「震度法」で設計されたダムの耐震性について改めて検討が行われた。

ダムの耐震性に関わる重要な検討項目は、地震動の特性と地表面に生じる永久変位（ずれ）の2つである。このうち、後者については、地震断層として変位を起こす可能性のある活断層（第四紀断層）の近くには、ダム立地を避けているので、問題とはならない。したがって上記委員会では、前者に対して阪神・淡路大震災で観測された地震動特性の解析を行うことにより、ダムの耐震性の評価が行われた。

その結果、比較的震源域に近いダムサイトの基盤上で観測された地震動の最大加速度や応答スペクトル特性が明らかにされ、これに基づいて「震度法」で設計されたダムの耐震性が照査され十分に安全であるとの結論が得られた⁶⁾。このようなことから、ダムについては現行基準の見直し、改訂の動きは現在のところない。

同委員会では、ダムは社会的にも重要な構造物であるため、安全性については今後も十分な配慮を講じる必要があるとして、次の2つの項目を課題として指摘している。

- ①地震時の観測体制の強化・充実
- ②ダムの耐震設計法の高度化

このうち、ダムの耐震設計法については、従来も合理的な体系と内容の整備に向けて精力的な研究が進められてきたが、ダムの耐震設計の一層の高度化を図るため、地震動特性、堤体材料の動的特性、ダムの動的解析手法および耐震性評価手法について今後とも研究を継続する必要があるとの見解が提示されている。

(5) ガス関連施設

高圧ガス設備等耐震対策検討委員会 報告書⁷⁾（高圧ガス保安協会、1996年）の中で、今後の方向については、2段階設計法（レベル1地震動およびレベル2地震動）を採用する方針を示している。具体的には、以下のように述べられている。

【設計震度及び地震動】

$$\text{水平動 } \alpha H = \alpha H_0 \mu_1 \beta_1 \beta_2 \beta_3 : \text{鉛直動 } \alpha V = \alpha V_0 \mu_1 \beta_1 \beta_2 \beta_3$$

ここに、 αH 、 αV : 地表面における設計地震動の水平加速度、鉛直加速度

αH_0 、 αV_0 : 基準水平加速度（150gal）、基準鉛直加速度（75gal）

μ_1 : レベル1地震動 1.0、レベル2地震動 2.0以上

β_1 、 β_2 、 β_3 : 告示第515号に同じ

(6) 地中構造物

今回の地震を受け、基準の改訂作業に着手中であり、ここには耐震基準にはレベル2地震動が規定される方向で検討が進んでいる。上・下水道に関しては平成8年度中、共同溝、地下駐車場については平成9年度内、また、鉄道構造物に関しては、平成9年度中の改訂との予定で、それぞれ現

在、精力的な作業が進められている。

なお、今回の地震を受け、「水道」、「下水道」、「ガス」、「鉄道構造物」に関して、当面の処置や提言がなされており、それぞれレベル2地震動の取り扱いを表-2.2.1に示しておく。

(7) 港湾分野

港湾分野では、建築分野、道路分野と比較して明確にレベル1、レベル2と入力地震動を区別してないが、兵庫県南部地震の規模に相当するような直下型地震に対する設計に用いる地震動がレベル2に対応するものと考えられる。なお、港湾分野では基本的には震度法で設計を行い、その際に用いる震度を定めるために地盤の地震応答解析を行い応答加速度より設計震度を算定する。設計地震波は、原則として、1995年兵庫県南部地震で神戸市がポートアイランドで観測した実測波を用いる。この波は、最大加速度の水平成分は679gal、鉛直成分187galである。活断層と岸壁法線の方法性は考慮しない。

(8) 建築分野

高さが60mを越える高層建築物の構造計算では、建築基準法施行令において建設大臣の認定が必要であり、日本建築センターの高層建築物評定委員会で地震動入力を用いた動的解析による審査がおこなわれる。1986年のビルディングレター「高層建築物の動的解析用地震動について」⁸⁾においてレベル2地震動の考え方が示されている。

地震動強さは、地震波の最大速度値によって基準化することを原則としており、たとえば東京ではレベル2として50cm/sec以上が用いられる。標準的な地震動波形（エルセントロ、タフト波）、長周期成分を含む波形（八戸波）、地域特性を表す地震動波形（当該地域で観測された波、もしくは地域特性を考慮した模擬波）、等を含めて合計3種類以上が用いられる。

2.2.3 活断層による地震動の設定方法

(1) 活断層の定義¹⁰⁾

いわゆる「活断層」という用語は、「地質学的な意味での極めて近い過去に活動し、将来も再び地震断層として活動する可能性がある断層」という意味で使われることが多い。「極めて近い過去」や「将来」の地質学上の時間スケールは、工学上特に設計で考慮する偶発荷重の取り扱いとは著しく異なる。地質学的な意味で「極めて近い過去」とは、「地殻変動の発生間隔やその進行の進み方などが、現在のそれらとほぼ同一のパターンとみなしうる時代」という意味であり、わが国では、現時点も含めて第四紀の後期のことを言うのが一般的である。

工学でこの用語を用いる場合には、少なくとも「将来」を構造物の安全を確保する期間として、その設計供用期間との関連を明確にしなければならない。これは構造物の種類によって異なるが、さらに、「活断層」の用語から、現在も動き続けている断層のように受け取られやすく、混乱を招きかねないため、例えば、ダム計画・調査・設計では、第四紀（約200万年前～現在）に地表に変位を生じた断層を「第四紀断層」と定義する考え方もある⁶⁾。

表-2.2.1 兵庫県南部地震を受けての関連施設での提言および当面の処置でのレベル2地震の取扱い（平成8年12月末現在の情報による）

	名称	対象施設	基本方針	レベル2地震の地震動
下水道 ³⁾	下水道の地震対策についての最終提言下水道地震対策技術調査検討委員会 平成7年8月8日	下水道施設全般（処理場・ポンプ場、管路） 新設施設のみでなく、改訂についても言及している。なお、管路は重要な幹線等に限定している。	当면兵庫県南部地震相当の大きさを対象とするがそれぞれの地点において影響を受ける活断層を固定して地震規模を想定し、地震動の大きさを推定することが可能な場合は、その大きさをを用いる。	レベル2地震の地震動 管路；速度応答スペクトル、および地盤ひずみ量を規定（図-2.3参照）。 処理場施設；当面の処置として以下の値を用いる。 標準水平震度 0.8（第一種地盤） 0.6（第二種地盤） 0.6（第三種地盤）
水道 ⁴⁾	水道事業者が当面とるべき地震対策に関する提言。 日本水道協会、水道施設耐震改訂特別委員会 平成7年6月	水道施設全般	現行指針を基本に当該施設の立地条件（地域ごとの海洋型地震の可能性、活断層の存在、建物や都市中核機能の集積状況など）地盤の増幅特性、構造物の動的特性並びに施設の重要度を考慮して、必要に応じて地震荷重の割増しを決定する。	具体的記述なし
ガス ⁹⁾	ガス地震対策検討会報告書 ガス地震対策検討会編、資源エネルギー庁監修 1996年1月	ガス設備施設全般	供用期間中に発生する確率が低い高レベルの地震動を想定する（なお、重要度に応じて耐震性の確保目標水準照査基準をかえていく）。	具体的記述なし
鉄道構造物 ²⁾	新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料 鉄道総合技術研究所 平成8年3月	高架橋の橋台、橋脚、基礎構造物および開削トンネル	現行の基準に規定した地震動に加え、兵庫県南部地震規模の地震に対する検討を行い、構造物が崩壊しないように設計する。	兵庫県南部地震で観測された地震動を考慮して定められており、加速度応答スペクトル、加速度波形が地盤種別毎に規定されている。応答変換法入力力も速度応答スペクトル（ $S_v \text{ max}=80\text{cm/s}$, $h=0.2$ ）が具体的に規定されており、このスペクトルに適合した加速度波形も示されている。

(2) 活断層の文献¹⁰⁾

文献調査において入手しやすい文献としては、工業技術院地質調査所発行の各種の「地質図幅」、第四紀の地殻変動に関する「地質構造図」や「第四紀地殻変動図」等および各都道府県発行の「県別地質図」、国土庁発行の「表層地質図」等がある。その他のものとして、「地質学雑誌」、「第四紀」、「地理学評論」、「地震」、「地震月報」、「応用地質」等の学会誌や大学の地質関係学科や研究機関から発行されている研究報告等の文献がある。また、「新編日本の活断層－(分布図と資料)」(活断層研究会 1991)¹¹⁾も調査の初期の段階でしばしば参照される文献である。

(3) 活断層の調査方法¹⁰⁾

活断層の代表的な調査方法の1つとして、「ダム建設における第四紀断層の調査と対応に関する指針(案)」(建設省河川局開発課)が出されている。その概要は以下のとおりである。

この指針(案)は主としてダムの予備調査段階における、第四紀断層の調査と対応に関する考え方を述べている。第四紀断層に関する調査を一次調査と二次調査に分けていて、このうち一次調査では第四紀断層のダム敷近傍における存否あるいは、存在の可能性を知るための調査を行うものである。一次調査は主として、文献調査、空中写真および地形図による調査、ならびに地質概査により行う。一次調査の結果、第四紀断層またはその疑いのあるものがダム敷近傍(ダム敷およびその周辺およそ300m以内の区域)に存在するとき、あるいはダム敷近傍に存在する可能性があるときには、二次調査を実施する。

二次調査は問題とされた第四紀断層またはその疑いのあるものの位置、規模および活動性を明らかにする。二次調査は、地形調査、地質踏査、物理探査、ボーリング・トレンチング・調査坑等による調査および活動年代測定等の調査方法の中から、適切な方法の組み合わせにより行う。二次調査の結果、要注意な第四紀断層がダム敷に存在することが判明したときには、調査結果を総合判断して、ダムの位置の変更を含む適切な措置をとるものとする。

文献10)によれば、下記のうちいずれか一項目に該当するものを、要注意な第四期断層としている。

- ①最終活動時期が10,000年前以降の断層。
- ②最終活動時期が10,000年前～30,000年前の断層(またはこの時代に変位を起こしたことが地層や地形から推定されるものを含む)で、かつ長さが長いもの(10km程度)。
- ③第四紀後期に繰り返し活動した規模の大きい第四紀断層。

(4) 地震動の推定法

i) 地震動推定手法

構造物の耐震設計に用いる地震動の設定法については、兵庫県南部地震以降、活断層をどのように考慮するかという点が1つの大きな課題となっている。ここでは活断層をどう考慮するかという問題の前に、まず一般的な地震動推定手法について概説する。

地震動の推定手法は、一般に地震の断層運動や、波動伝播特性をどの様にモデル化するかという

ことによって、大きく以下の3つに分けられる。

①理論的手法

断層運動のモデルと、地震波が媒質中を伝播し地表に到達するまでの波動伝播性状に関するモデルの両者を理論的に数式を用いて計算する方法

②半経験的手法

波動伝播性状に関するモデルを、過去に発生した中小地震の観測記録を用いてグリーン関数として与え、断層の破壊過程に合わせて重ね合わせることにより、大地震の地震動を評価する方法

③経験的手法

過去の強震記録から得られている情報を用いて、地震動の統計的性質に適合するように計算を行い模擬地震動などを作成する方法

3つの手法の内、理論的手法と半経験的手法の違いは波動伝播過程を理論・解析的に扱うか、観測記録を用いて経験的に扱うかの違いである。理論的手法では、地震動の評価を短周期から長周期成分まで予測可能であるが、短周期側の成分は波動伝播経路の微細な構造に強く影響されることが知られており、地下構造の詳細な情報と、膨大な計算量が必要となる。従ってこのような伝播経路特性の評価の問題を回避するために、中小地震の観測記録を用いる半経験的手法が実用的に用いられつつある。ただし、この際、想定断層近傍の適切な中小地震の記録を用いる必要があることに留意すべきである。

また、経験的手法には、距離減衰回帰式による推定も含まれており、限られた情報から第1次近似的な地震動を予測することが可能なため広く用いられている。ただし、この方法においても震源近傍の地震動の扱い方が確立されておらず各種手法が提案されている状況である。

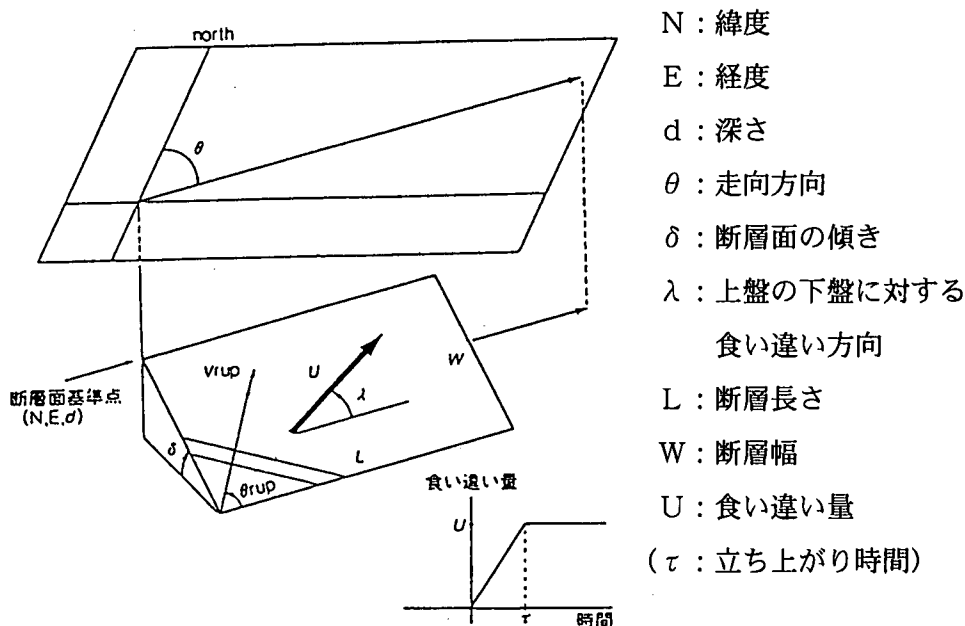
なお、これらの手法の中間的なものとして、小林・翠川の方法¹⁾²⁾などが挙げられる。小林・翠川の方法は、構造設計や被害想定でも用いられており、経験的手法の距離減衰式を用いる方法に震源の広がりや破壊過程を考慮した手法である。

地震動の推定手法について概略を表-2.2.2に示す。

なお、地震断層の静的断層パラメータの定義を参考として図-2.2.3に示す。

表-2.2.2 代表的な地震動推定手法とその分類

方法		概要	条件	備考
①理論的方法	<ul style="list-style-type: none"> ・動力学的モデル ・応力緩和モデル 	<ul style="list-style-type: none"> ・破壊力学に基礎を置き断層の破壊基準や応力条件のもとに破壊過程を解く。 ・震源過程+伝播過程に基本的にはグリーン関数を用い、近似的取り扱いをする。 ・短周期成分の推定には詳細な地下構造の情報と膨大な計算量が必要となる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・断層の大きさ ・ずれ量 ・破壊伝播速度 ・立ち上がり時間 ・断層と推定地点の位置関係 	<ul style="list-style-type: none"> ・Aki and Richards, 1980¹³⁾ ・井上, 1986¹⁴⁾ etc.
	<ul style="list-style-type: none"> ・運動学的モデル ・ディスプレインモデル 	<ul style="list-style-type: none"> ・くい違いの弾性論に基づき、弾性体に相対変位を付与したときの変形状態を解く。 ・上記モデル同様グリーン関数を用いるが、より単純なモデルで媒質の変形状態を表現できる。 ・短周期成分の推定には詳細な地下構造の情報と膨大な計算量が必要となる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・断層の大きさ ・ずれ量 ・破壊伝播速度 ・立ち上がり時間 ・断層と推定地点の位置関係 	<ul style="list-style-type: none"> ・Hartzell, 1978¹⁵⁾ ・Kanamori, 1979¹⁶⁾ ・Irikura, 1983¹⁷⁾ etc.
②半経験的方法	<ul style="list-style-type: none"> ・経験的グリーン関数法 ・統計的グリーン関数法 	<ul style="list-style-type: none"> ・発震機構や波動伝播経路を、大地震と共通する中小地震の観測波形からグリーン関数として考え、断層の破壊過程に合わせて重ね合わせる。 ・重ね合わせの際には地震モーメント、断層パラメータの相似則を用いる。 ・適切な中小地震の観測記録を用いることと、地表付近の地盤の非線形性の扱いに留意が必要。 	<ul style="list-style-type: none"> ・断層の大きさ ・ずれ量 ・破壊伝播速度 ・立ち上がり時間 ・断層と推定地点の位置関係 	<ul style="list-style-type: none"> ・翠川, 小林, 1978¹⁸⁾ ・翠川, 小林, 1979¹⁹⁾ etc.
	(小林・翠川の方法)	<ul style="list-style-type: none"> ・理論的方法に伝播経路特性として、基盤地震動スペクトルの距離減衰式を導入した方法。 ・表層地盤の重複反射理論を用いて地表の速度スペクトルを推定可能。 	<ul style="list-style-type: none"> ・断層の大きさ ・ずれ量 ・破壊伝播速度 ・立ち上がり時間 ・断層と推定地点の位置関係 	<ul style="list-style-type: none"> ・道路橋示方書 V., 1990²⁰⁾ ・Campbell, 1981²¹⁾ etc.
③経験的方法	<ul style="list-style-type: none"> ・距離減衰式による方法 	<ul style="list-style-type: none"> ・地震規模M、震央(源)距離Δをパラメータとする経験式により地震動(最大加速度、応答スペクトル)を求める。 ・限られた情報で推定可能であるが、時刻歴波形は得られない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・地震規模 ・断層と推定地点の位置関係 	<ul style="list-style-type: none"> ・大崎ほか, 1978²²⁾ ・木村, 1986²³⁾ etc.
	<ul style="list-style-type: none"> ・地震動シミュレーション 	<ul style="list-style-type: none"> ・過去に得られている強震記録の情報に基づき、地震動のいくつかの主要な特性を確定的に与え、他の条件を確率的に与えることにより、シミュレーションする。 	<ul style="list-style-type: none"> ・地震規模 ・断層と推定地点の位置関係 	<ul style="list-style-type: none"> ・大崎ほか, 1978²²⁾ ・木村, 1986²³⁾ etc.



N : 緯度
 E : 経度
 d : 深さ
 θ : 走向方向
 δ : 断層面の傾き
 λ : 上盤の下盤に対する
 食い違い方向
 L : 断層長さ
 W : 断層幅
 U : 食い違い量
 (τ : 立ち上がり時間)

図-2.2.3 断層パラメータの定義

このような断層震源モデルを用いて、対象地点の地震動を予測し、実際のプロジェクトにそれを用いる場合には、既往のレベル2地震動に相当する観測記録とこれらの手法により推定した結果との整合性について、十分な検証が行われていないことに留意し、図-2.2.3に示した各種のパラメータの不確定性を考慮して解析を行い、地震学者との十分な議論を踏まえた上で、設計技術者が工学的判断を行うべきである。

《参考文献》

- 1) (社)日本道路協会：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様，
1995年6月
- 2) (財)鉄道総合技術研究所：新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料，1996年3月
- 3) 下水道地震対策技術調査検討委員会：下水道の地震対策についての最終提言，
1995年8月
- 4) 水道施設耐震改訂特別委員会：水道技術者が当面とるべき地震対策に関する提言，
1995年6月
- 5) 運輸省港湾局：地震に強い港湾をめざした当面の措置について，1995年8月
- 6) 国土開発技術センター：ダムの耐震性に関する評価検討委員会報告書，1995年11月
- 7) 高圧ガス保安協会：高圧ガス設備等耐震対策検討委員会 報告書，1996年
- 8) ビルディングレター：高層建築物の動的解析用地震動について，1986年
- 9) 資源エネルギー庁監修：ガス地震対策検討会報告書ガス地震対策検討会編，1996年1月
- 10) 建設省河川局開発課：ダム建設における第四紀断層の調査と対応に関する指針(案)，
1984年5月

- 11) 東京大学：新編日本の活断層—分布図と資料—，活断層研究会，1991年
- 12) 翠川三郎，小林啓実：地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定，日本建築学会論文報告集 No. 282，1979年
- 13) Aki, K. and P. G. Richards(1980) : Quantitative Seismology, Theory and Methods, W. H. Freeman and Company, San Francisco, Vol. I and Vol. II
- 14) 井上涼介(1986) : やや長周期帯域における設計用入力地震動研究の展望，土木学会論文集，374/I-6, 1-23
- 15) Hartzell, S. (1978) : Earthquake aftershocks as Green's functions, Geophys. Res. Letters, 5, 1-4
- 16) Kanamori, H. (1979) : A semi-empirical approach to prediction of long-period ground motions from great earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., 69, 1645-1670
- 17) Irikura, K. (1983) : Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes, Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 33, 63-104
- 18) 翠川三郎・小林啓美(1978) : 地震動の地震基盤からの入射波スペクトルの推定, 日本建築学会論文報告集, 第 273 号, 43-54
- 19) 翠川三郎・小林啓美(1979) : 地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定, 日本建築学会論文報告集, 第 282 号, 71-81
- 20) 日本道路協会(1990) : 道路橋示方書 V. 耐震設計編・同解説
- 21) CAMPBELL, K. W. (1981) : Near-source attenuation of peak horizontal acceleration Bull. Seism. Soc. Am., 71, 2039-2070
- 22) 大崎順彦ほか(1978) : 地震波の位相特性とその応用に関する研究，第5回日本地震工学シンポジウム，201-208
- 23) 木村正彦(1986) : 模擬地震動作成における波形制御について，日本建築学会構造系論文報告集，367号，30-36

2.3 橋梁

阪神・淡路大震災では、多くの橋梁構造物に甚大な被害が生じた。橋梁構造物の破壊により、十数名の尊い人命も失われた。また、橋梁構造物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、我が国の橋梁構造物の耐震設計は、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来た。しかし、阪神・淡路大震災における橋梁構造物の被害は、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。

2.3.1 橋梁に関する被害形態と耐震設計上の課題

橋梁の耐震設計は、地震による被害を経験・教訓としながら整備されてきた。しかし、阪神・淡路大震災では、1923 年関東地震に始まり 1994 年の平成 6 年北海道東方沖地震に至るまでの間に経験した被害形態だけでなく、新たな形の被害も出現した。阪神・淡路大震災は、橋梁構造物に様々な形態の被害が生じることを示したという点では、1923 年関東地震以上の影響を、橋梁の耐震設計分野に与えたと言える。

本項では、橋梁の設計に係わる技術者が、地震によって橋梁がどのような被害を受けるかを理解するための資料の紹介、阪神・淡路大震災による被害形態およびそれより想定される耐震設計上の課題を整理した。

(1) 橋梁に関する被災報告書の整理

1923 年関東地震から阪神・淡路大震災までの地震による橋梁の被害報告書の一覧を、表-2.3.1 に示す。表中には載せなかったが、先輩諸氏の座談会という形で、新潟地震以後の地震被害の教訓についてまとめたものとして、次のような資料があるので参考にされたい。

土木研究所資料第 3277 号 道路橋の耐震設計に関する研究

—地震被害から学んだ教訓と今後の技術開発—

平成 6 年 7 月

阪神・淡路大震災における橋梁構造物の被害をまとめたものとして、次の報告書が土木学会から刊行されている。

阪神・淡路大震災調査報告 土木構造物の被害 第 1 章 橋 梁

阪神・淡路大震災調査報告編集委員会，(社)土木学会，1996 年 12 月 10 日

(2) 阪神・淡路大震災における橋梁の被害形態^{1), 2)}

現在までに得られている知見に基づいて、橋梁の被害形態の概要を整理した。それらの結果を以下にまとめる。

i) 上部構造 (桁)

上部構造に見られた被害は

- ①鋼桁における破断や変形および局部座屈
- ②コンクリート桁における剥離や脱落およびひび割れ
- ③桁の移動やずれおよび沈下

の 3 点に要約される。

表-2.3.1 主要地震とその報告書の整理

主要地震	報告書等	発行年月	発行所	
1923 関東	大正12年関東大地震震害調査報告(第三巻)橋梁・建築物之部、道路橋之部		(社)土木学会	
1946 南海(道)	南海地震および福井地震による橋梁基礎被害現存調査資料	土木研究所資料第256号	昭和43年12月 建設省土木研究所	
1948 福井	南海地震および福井地震による橋梁基礎被害現存調査資料	土木研究所資料第256号	昭和43年12月 建設省土木研究所	
1952 十勝沖	東北地方における1968年十勝沖地震災害の概要			
1964 新潟	昭和と大橋における地盤および下部構造の耐震性調査	土木研究所資料第1591号	昭和55年7月 建設省土木研究所振動研究室	
	新潟地震調査報告	土木研究所報告第125号	昭和40年6月 建設省土木研究所	
1968 十勝沖	東北地方における1968年十勝沖地震災害の概要		1968.7 土木学会誌	
	北海道地方における1968年十勝沖地震災害の概要		1968.7 土木学会誌	
1978 宮城県沖	1978年6月宮城県沖地震による橋梁震害調査報告書		昭和53年3月 宮城県土木部道路建設課	
	1978年6月宮城県沖地震被害調査速報	土木技術資料20-8'78	1978.8 土木研究所第一次調査団	
	宮城県沖地震による道路橋の被害ならびに支承部の耐震性に関する調査報告書		昭和55年3月 (社)日本道路協会他	
	1978年宮城県沖地震調査報告書		昭和55年4月 (社)土木学会東北支部	
	1978年宮城県沖地震震害調査報告	土木研究所報告第159号	昭和58年3月 建設省土木研究所	
1978 伊豆大島近海	1978年伊豆大島近海地震災害調査報告	土木研究所報告第158号	昭和57年3月 建設省土木研究所	
1983 日本海中部	昭和58年(1883年)5月28日日本海中部地震能代市災害記録 -この教訓を後世に-		昭和60年3月 能代市	
	昭和58年日本海中部地震-土木施設等災害記録-		昭和59年5月 秋田県土木部	
	1983年日本海中部地震震害調査報告	土木研究所報告第165号	昭和60年3月 建設省土木研究所	
1984 長野県西部	長野県西部地震による被害および震後体制の概要	土木研究所資料第2159号	昭和59年12月 建設省土木研究所耐震研究室	
1993 釧路沖	平成5年釧路沖地震災害調査速報	土木技術資料35-4'93	1993.4 土木研究所第一次調査団	
	釧路沖地震及び北海道南西沖地震によるRC橋脚主鉄筋脱落部の被害とその解析	土木研究所資料第2159号	平成6年6月 建設省土木研究所耐震研究室	
	最近の地震による道路橋被害の特徴	基礎工'93.12	1993.12 川島、運上、中島、星隈	
	平成5年釧路沖地震での道路橋被害について			北海道開発局土木研究所
	釧路沖地震による道路橋の被害概要			建設省土木研究所耐震研究室
1993 能登半島沖	平成5年能登半島沖地震災害調査速報	土木技術資料35-6'93	1993.6 二宮、米田、星隈	
1993 北海道南西沖	平成5年7月北海道南西沖地震被害調査速報	土木研究所資料第3204号	1993.7 土木研究所第一次調査団	
	平成5年北海道南西沖地震震害調査速報	土木技術資料35-10'93	1993.10 土木研究所第一次調査団	
	最近の地震による道路橋被害の特徴	基礎工'93.12	1993.12 川島、運上、中島、星隈	
1994 北海道東方沖	平成6年北海道東方沖地震速報		平成6年11月 北海道開発局 開発土木研究所構造研究室	
	平成6年北海道東方沖地震震害調査速報	土木技術資料37-1'95	1995.1 土木研究所第一次調査団	
	1994年北海道東方沖地震による道路橋の被害とその特徴	橋梁と基礎'95.2	1995.2 川島、高木、鈴木、長尾	
1995 兵庫県南部	平成7年兵庫県南部地震土木研究所被害調査速報	土木研究所資料第3362号	平成7年3月 建設省土木研究所	
	兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査 中間報告書		平成7年3月 兵庫県南部地震 道路橋震災対策委員会	
	兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書		平成7年12月 兵庫県南部地震 道路橋震災対策委員会	
	阪神大震災震害調査 緊急報告会資料		平成7年2月 (社)土木学会	
	土木学会阪神大震災震害調査 第二次報告会資料		平成7年3月 (社)土木学会	
	阪神・淡路大震災調査報告書(解説編)		平成8年3月 (社)地盤工学会	
	兵庫県南部地震鋼管杭基礎調査報告書(第2次)		平成8年3月 鋼管杭協会	
	兵庫県南部地震による高速道路の被害状況報告	プレストレストコンクリート Vol.37, No.5	平成7年10月 (社)プレストレストコンクリート技術協会	
	兵庫県南部地震による鉄道橋の被害	プレストレストコンクリート Vol.37, No.5	平成7年10月 (社)プレストレストコンクリート技術協会	
	兵庫県南部地震PC構造物震害調査報告	プレストレストコンクリート Vol.37, No.5	平成7年10月 (社)プレストレストコンクリート技術協会	
	鋼構造物にみる阪神大震災の教訓	JSSC No.16, 1995	平成7年4月 (社)日本鋼構造協会	
	兵庫県南部地震による鉄道施設の被災に関する調査(中間整理)		1995.8 鉄道施設耐震構造検討委員会	
	阪神淡路大震災被害分析と靱性率評価式	コンクリート技術シリーズ No.12	1996 阪神大震災調査研究特別委員会	
土木コンクリート構造物の震災対策に関する研究委員会中間報告書		1995.12 日本コンクリート工学会近畿支部		

このうち①と②は、主に支承が破壊し、支承から桁が落下したために生じた被害がほとんどである。これは、支承が有している水平方向の支持機構のみならず鉛直方向の支持機構をも失われたために生じた被害である。今後は、支承の機能の基本である、鉛直方向の支持機構の保持が地震の最中と震後に確保されるのであるならば、このような被害は、減少すると思われる。

③も、基本的には支承や落橋防止構造の破壊に起因している。橋軸直角方向へのずれ量は、阪神高速道路3号神戸線の湊川ランプや一般国道2号浜手バイパスの様に線形が曲線となっている上部構造や、名神高速道路武庫川橋のように斜角を有する上部構造において大きかった。

以上のように、上部構造の被害の多くは、支承や落橋防止構造等および橋脚の破壊に起因していることが多い。これに対して、支承や落橋防止構造および橋脚からみれば、上部構造の慣性力が大きいから破壊したという主張が当然聞かれる。しかし、上部構造の諸元が常時（活荷重）で決まっている現状を考えると、やはり、支承や落橋防止構造および橋脚の耐震性能を向上させるのが妥当と考えられる。

上部構造の被害で見逃せないものとして、阪神高速道路に取り付けられている非常用階段が落下している被害があった。高速道路の利用者の避難路を確実に確保するためには、避難施設にも耐震設計が必要なことを忘れてはならない。

ii) 支承・落橋防止構造

支承の代表的な被害事例を次に示す。

① サイドブロック部の被害

下沓と一体形式のサイドブロック部の場合は、水平地震力により脆性的に破断した例が多く、ボルト形式のサイドブロック部の場合は、ボルトの伸びや破断の例が多い。

② 荷重支持機能の損失

- ・ B P 支承におけるペアリングプレートの抜け出し
- ・ ローラー支承におけるローラーの抜け出し
- ・ ピン支承におけるピンの抜け出し、破断、支承自体の転倒

設計震度を大幅に超える地震慣性力により、i)～iii)の被害が数多く発生している。

③ 支承の損壊による主構造の被害

ピン支承やローラー支承は、その損傷が、上部構造の桁端部に大きな損傷をもたらした。

箱桁が連続する区間でこの事例が数多く発生し、早期復旧を困難にする原因となった。

④ 桁連結装置の破断、桁ウェーブの破断

支承部に発生した中規模程度以上（支承の取り換えが必要）の被害率は、橋脚のその2倍に達している。また、支承の破壊に伴って、落橋や主構造である桁端部の損壊が発生し、特に桁端部の損壊は数多く発生している。また、落橋は二次的な被害をもたらす可能性があると共に、復旧に多大な費用と、時間を要する結果を招く。しかし、被害例の中には、支承がヒューズメンバー的に機能し、桁端部に損傷をもたらさずに地震動の早期に壊れた例もあり、落橋さえ防止すれば今後の支承設計のあり方に対する示唆となりうる。

支承の形式別の被害率については、固定支承ではピン形式が、可動支承ではローラー形式が他の

形式を相当上回っており、約半数が中規模程度以上の被害を受けている。固定、可動共B P 支承がこれに次いでいる。

ピン形式や固定のB P 支承は変形性能がほとんどないため、設計震度を上回るような地震力に対して大きな被害率になったのは当然であろう。

iii) R C 橋脚

橋梁形式（単柱形式、ピルツ形式、ラーメン形式）や橋脚の構造諸元（せん断スパン比、引張鉄筋比、せん断補強筋比、軸方向応力度）などによって、被害の状況は変わっているが、基本的には次のように分類できる。

すなわち、損傷位置としては、ラーメン高架橋以外はほとんどが橋脚の基部、中間の主鉄筋段落し部に分類され、ラーメン高架橋では柱の中間はりまたは上はりの近傍であった。また、損傷モードとしては、曲げ破壊、せん断破壊、曲げせん断破壊に分類される。このうち曲げ破壊は優れた変形性能を有していることから崩壊などの大きな被害に至った例はほとんどなく、被害の大きかったものは、せん断破壊、曲げせん断破壊である。

被害の発生の最大の原因は、根本的には、設計時に想定していなかったような過大な地震力が作用したことによるが、被害を大きくした原因としては、脆性的なせん断破壊が先行したことである。その要因としては、鉄筋段落し部の定着長の不足していたこと（道路橋）、ラーメン高架橋の柱が中間ばりの存在により細長比が小さかったこと（鉄道橋）、あるいはせん断補強筋の量が不足していたこと（昭和 39 年以前の設計基準による道路橋）が指摘されている。また、鉄道高架橋については、構造物の固有周期が地震動の主要な周期帯にあり共振の影響のあったことも指摘されている。

iv) 鋼製橋脚

表-2.3.2 に、代表的な橋脚における被害例を示した。これによれば、座屈による損傷が多いが、脆性破壊や低サイクル疲労によるものもみられる。鋼製橋脚については、その素材（鋼材）は延性に富んだ材料であるが、構造部材としては、座屈によりその変形性能が支配されており、今回の地震でも、鋼製橋脚が有している座屈（耐荷力）特性が被災程度の大小を分けたと言える。

表-2.3.2 鋼製橋脚の被害の個別状況

区分	場所	被害
国道2号	浜手バイパス	ラーメン脚角柱の下段柱中間が座屈
国道43号	岩屋高架橋	T脚角柱の角溶接部が引き裂かれ4面くの字に圧壊
ハーバーハイウェイ		門型ラーメン脚の隅角部が脆性破壊
阪高神戸線	建石交差点	T脚角柱の角溶接部が引き裂かれ4面くの字に圧壊
		梁先端のRC柱との間のピンがはずれ地震力が集中か？
		柱座屈→梁座屈→死荷重集中→柱圧壊。梁先端のRC柱2本は軽傷
	二葉町	角柱下部が座屈とペンチ剥離
	浜脇	角柱が局部座屈
	JR和田岬線跨線部	丸柱下部が損傷
阪高湾岸線	新芦屋川橋	2層ラーメン脚のウェブがX形の剪断座屈
	西宮港大橋	P99 ラーメン脚が西に8cm変位し側径間が落橋
	東神戸大橋	端・中間橋脚の水平梁が剪断座屈、柱基部フランジ曲げ座屈
	六甲アイランド橋	アーチ橋が横移動し、P213 門型脚の角柱が弾性ねじり変形2.3m
六甲ライ-		橋脚が座屈
JR	三宮駅付近	脚柱（ロッカー式）がすべて山側に傾斜
神戸高速鉄道	三宮駅付近	丸脚（遠心鑄鋼管）が脆性破壊

v) 基礎構造

地震により基礎に大きな被害が生じた路線は、特に揺れの強い地域に沿って位置する、1) 阪神高速3号神戸線、2) 阪神高速5号湾岸線、3) ハーパーハイウェイ、4) 国道2号浜手バイパス等の高架道路が上げられる。また、2)、3)、4) は埋立て地盤上に建設されている。

本地域の高架橋の基礎は、約80%が杭基礎形式を採用しており、その多くは鉄筋コンクリート場所打ち杭基礎である。場所打ち杭の施工が困難な海岸線近傍や海中に位置する橋脚の基礎として、大口径鋼管杭基礎形式を採用している場合が多い。

ケーソン基礎形式は埋立て地間の水路を跨ぐ長大スパン橋梁基礎として採用されている。一方、直接基礎形式はランプ部の比較的高さの低い橋脚や神戸3号線、中国自動車道等の良好な支持地盤が地表近くに位置する場合に採用されている。

a. 基礎形式と被害

杭基礎の内、場所打ち鉄筋コンクリート杭は杭頭部分だけではなく、杭の中間部分や支持層への根入れ付近において損傷を受けている事例がある。一方、直接基礎、ケーソン基礎の場合、移動、沈下および傾斜による変状を示す事例があるが、基礎躯体が損傷を受けた事例は殆どない。

これは単に基礎構造の剛性の違いだけではなく、各基礎形式の水平力に対する支持機構の違い、さらに各設計法の有する真の安全率の違いによると考えられる。

b. 地盤と杭基礎の被災度

調査が実施された基礎杭の内、杭体に損傷がないと考えられるランクにある杭基礎の比率は、埋立て造成地盤上に建設されている5号湾岸線、浜手バイパス、ハーバーハイウェイで約50%、沖積地盤上に建設されている神戸3号線で84%、中国自動車道で100%であることが報告されている。埋立て造成地盤上の基礎が他に比較し被災度が高いのは、地盤の液状化による基礎の水平支持機能の低下、地盤の側方移動による基礎への流動圧の作用が主因であると考えられている。

また、神戸3号線立地位置と5号湾岸線立地位置とでは地震動の性質に違いがあることも指摘さ

れている。さらに、両路線の上部構造および橋脚の構造特性、建設年次の違いによる準拠した設計基準も異なっている。これらの要因も被災度に影響を与えていることが考えられる。

c. 残留変位など

地盤の液状化および側方移動によると考えられる地盤の残留変位の増大とともに、橋脚の残留変位は、基礎形式による差異があるものの増大する傾向にある。これは、地盤の液状化により地盤の水平支持機能が低下しただけではなく、地盤の横方向への移動により基礎構造が流動的な偏荷重を受けたことによると考えられる。水際線近傍に位置する構造物には、このような地盤流動の影響を受け、構造物の傾斜や基礎の海側への移動等の大きな残留変位が生じ、それが主因となり橋全体の安定に大きな影響を与えた事例も認められた。

(3) 被害形態から想定される耐震設計上の課題

上記(2)で整理した橋梁の被害形態から、今後の橋梁の耐震設計に必要とされる事項を整理した。ここに示した課題は、現時点で得られている情報を基に想定したものであり、今後、さらに研究が進めば異なる課題も明らかになる。なお、損傷過程に立ち入ったレベル2地震動に対する耐震設計法の開発などの「第二次提言」に取り上げられた事項は除く。

- ①地震の最中および震後も支承としての鉛直方向支持機構を確保できる支承構造、例えば、水平方向支持機構と鉛直方向支持機構の分離しうるようなタイプの開発。
- ②上部構造の多径間連続化。
- ③曲線や斜角を有する上部構造の慣性力の、支承や落橋防止構造および橋脚への作用機構の解明。
- ④耐震構造計画の観点からの望ましい都市内高架橋の鋼製橋脚の検討

2.3.2 レベル2地震動に対する耐震設計

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³⁾や、現在改訂作業中の鉄道橋の耐震設計基準⁴⁾は、「第二次提言」の内容および当部会でここで検討された基本的な考え方や事項の多くが反映されている。

(1) 入力地震動の問題点

我が国の地震環境を考えるとレベル2地震動としては、1923年関東地震に代表されるプレート境界で発生する海洋型巨大地震と、阪神・淡路大震災に代表される内陸直下型地震の2つのタイプを考える必要がある。内陸直下型地震に関しては、阪神・淡路大震災において比較的多数の強震記録が得られたが、海洋型巨大地震に関しては強震記録が得られていないため、地震規模が小さい海洋型地震の観測記録から外挿するということが良く行われている。平成7年兵庫県南部地震の観測記録に関しても、決して十分な量の観測記録が得られているわけではなく、気象庁震度階Ⅶの地域(激震地区)の観測記録は皆無である。

橋梁構造物が非線形域にまで及ぶ場合、地震動特性と非線形域の挙動の関係が十分解明されていない。この点に関しては、今後の研究を待たなければならない。

レベル2地震動を解析的に推定する方法として、地震学分野で発達してきた断層モデルがある。しかし、断層モデルは様々な手法が提案されており、一般化した方法があるとは言いがたい。断層モデルによる方法も、構造物の非線形動的解析と同様に、断層パラメタと断層から目標地点までの詳細な地盤情報の精度によって得られる解の信頼性が左右されるのが実状であり、得られた結果に対しては高度な判断が必要である。

基礎～地盤系の動的解析を行う場合、地表面上で観測された地震記録や定義された設計地震動を工学的基盤面位置の地震動に変換する必要がある。そのような場合、従来、重複反射理論と等価線形化法を組合わせた方法が多用されてきた。しかし、レベル2地震動のような地震動強度が大きい場合、等価線形化法によると地盤のせん断ひずみが異常に大きな値となり、等価線形化法の適用範囲外となることが多い。地盤の非線形化の度合いが大きい場合に、地表上の地震動から基盤面への入射波を同定する方法も今後の検討課題である。

(2) 橋梁を構成する各要素の耐震設計の基本的な考え方

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、今後の研究課題を以下に分類・整理した。

i) RC橋脚

従来、RC橋脚の耐震設計では、地震時の弾性的挙動を保証することが目的とされ、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、未来、非線形動的解析を用いるべきである。非線形動的解析を適用しなければならない場合としては、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る。したがって、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。

RC橋脚の耐震設計法に関する今後の研究課題として、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。

a. 非線形動的解析の精度向上のための項目

①RC部材の復元力特性のモデル化

- ・複合荷重下の復元力特性：ラーメン橋の橋脚には、橋軸直角方向の地震動により、曲げ、せん断とともにねじりが作用する。複合荷重下での復元力特性の開発が必要である。
- ・軟化域（ポストピーク域）での解析モデルの精度向上：部材が降伏した後の応力が下降する領域での応力-ひずみ曲線が、RC部材のじん性に及ぼす影響を大きく受けるので、この領域

でのその曲線の推定に関する精度向上が望まれる。

- ・ 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

ラーメン橋、斜張橋などの非対称箱桁断面の復元力特性では、上部構造も塑性化することもあり得るので、特に、P C の非対称多室箱桁断面のモデルの開発が必要と考えられる。

③ 非線形動的解析手法の整備・普及

できるだけ広範な非線形解析手法の比較を行い解析精度を検証するとともに、非線形動的解析を適用する場合の解析に関わる安全係数の取り方について検討する必要がある。

b. 構造細目に関する項目

帯鉄筋や中間帯鉄筋がコンクリートを横拘束することによりせん断破壊を防止しねばりを増加させることから、これらを適切に配置することが重要である。帯鉄筋や中間帯鉄筋は、内部コンクリートに定着する必要があることから、フック長・形状について厳しい細目が要求されるが、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の工夫が望まれる。

c. 耐震設計の合理化に関する項目

算定した部材断面の M- ϕ 応答曲線から、耐震安全性を判断するための合理的な評価指標の開発が望まれる。

ii) 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。耐震性については、阪神・淡路大震災以前から局部座屈した後の鉛直応力の大幅な低下が懸念され、一部の機関で実験研究が進められてはいた。しかしながら、R C 橋脚と異なり、阪神・淡路大震災で被害が生じるまでは、鋼製橋脚の被害例は無かったために、その耐震性能の向上を目的とした実務的な対応が必ずしも十分ではなかったのが実情であろう。

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 許容できる損傷順序と許容できる損傷モードの明確化（特にラーメン形式橋脚の場合）
- 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基礎への影響を考慮した既設橋脚の適切な耐震補強の目標水準の設定（橋脚を強くすると、相対的に他が弱くなる）

iii)基礎構造

基礎構造については、上部構造や橋脚躯体に比較して被災後の調査、復旧等が技術的にも難しく、経済的にも多大な費用がかかることから、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、基礎の安定を図る上で周辺地盤の安定は極めて重要であり、液状化の可能性やその影響、地盤流動による影響等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。

a. 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。比較的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 、地盤ばね 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。地震時における過剰間隙水圧の上昇は、地盤のせん断強さや剛性に影響を与えることは知られており、せん断強さ τ 、せん断弾性波速度 V_s 、杭の周面摩擦力度 f_s なども含めて、包括的な設計上の取り扱いを行うべきである。

b. 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礎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、キネマティックな基礎と地盤の動的相互作用による影響として明らかにされている。

基礎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合わせることになるが、厳密には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ことが必要である。

地盤流動が予想される場合は、その流動力を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。

c. 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 ④鋼管矢板基礎
- ②杭基礎 ⑤地中連続壁基礎
- ③ケーソン基礎

各基礎型式の安定計算法は、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終局強度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。したがって、地盤のせん断強さを適切に評価することが合理的な基礎の設計に不可欠であり、設計者が地盤調査結果を吟味し、設計に用いる地盤の諸定数を定めることを改めて認識すべきである。

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ばね)
- 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

iv) 支承・落橋防止構造

レベル2地震動に対しては、他の構成部材と同様に、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ことが考えられ、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。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必要である。

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地震直後の輸送機能を確保できる損傷レベルを考慮した支承や落橋防止構造における許容塑性率の設定
- ③橋脚の塑性化とのバランスを考慮した支承の設計地震力の明確化
- 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

V) 橋梁システム

橋の耐震性能については、橋梁システムとしての地震時挙動の把握とそれらの安全性照査が重要な要因となる。地震時挙動の把握は、橋梁システムが複数の非線形性を有する部材から構成されているため、基本的には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詳細なものである必要はなく、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非常に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より対処せざるを得ない。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が特に重要である。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ことが考えられる。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。しかしながら、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、現状では十分に検証されていないのが実情である。だからといって、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、レベル2地震力に対する橋梁の安全性を評価するには、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などが必ずしも十分でない状況を考えると、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ことは事実である。要は、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たり、解析結果を適切に評価しうる技術力を有する橋梁設計技術者をできるだけ早期に育成することが大切である。

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現象、桁間衝突現象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-2.3.1に示す。

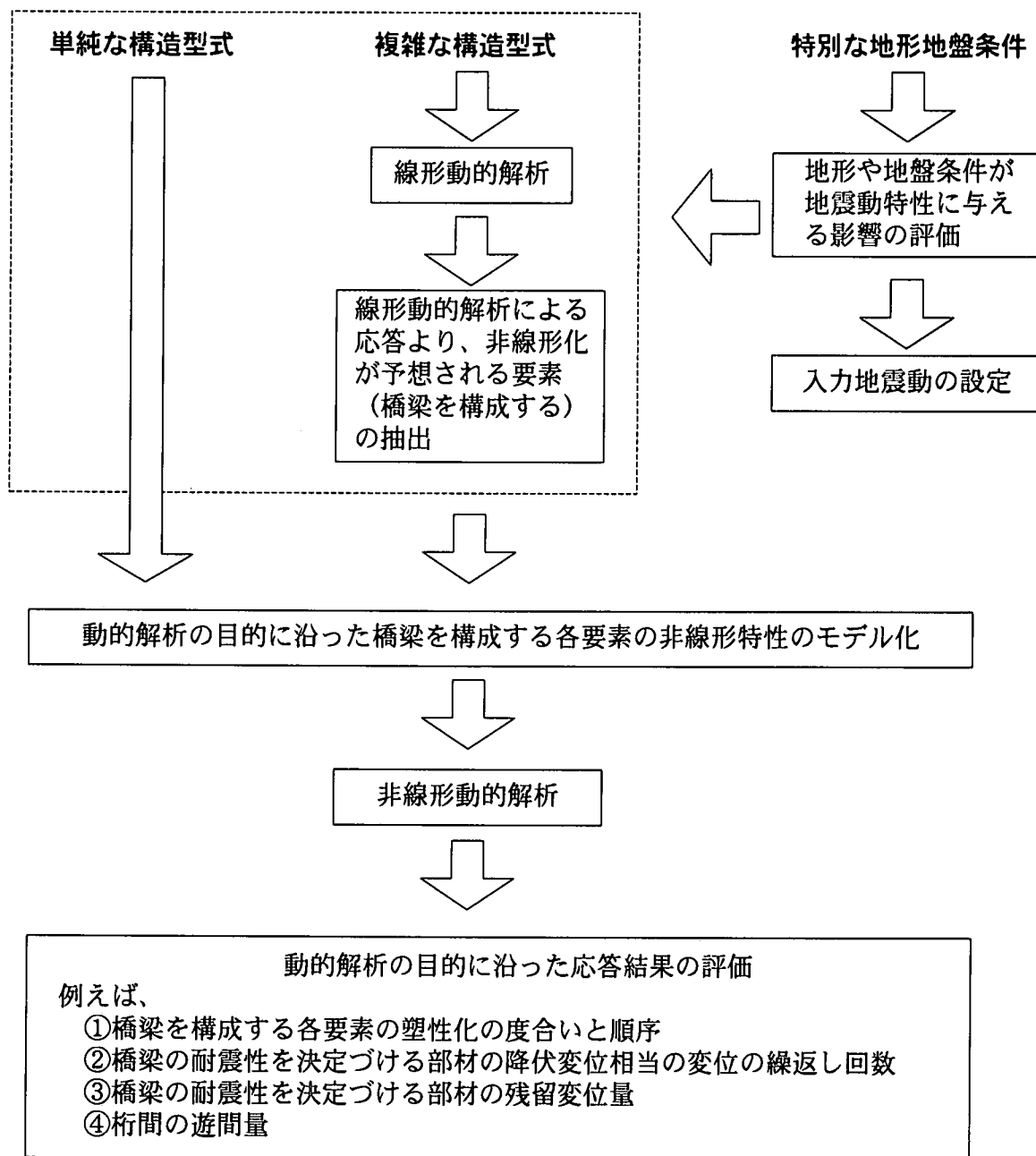


図-2.3.1 損傷過程に立ち入った耐震性能の照査フロー：橋梁システム

(3) 非線形性を考慮した動的解析^{5) ~ 12)}

大半の橋梁設計技術者は、線形動的解析による検討の経験も無く、ましてや非線形動的解析に至っては、解析できる技術者は限られており、そのような解析が出来るようになるには素養と体系的な研鑽とが必要となる。しかし、阪神・淡路大震災以後、非線形動的解析の必要性が増し、各所で非線形動的解析が実施されてきている。その実態は、市販の汎用解析プログラムの入力仕様に従って、データを入力し、出力された解析結果の最大応答断面力や最大応答変位のみに着目して、

それと許容値のみを比較するという、いわば、通り一遍の作業として対処している場合が多いものと思われる。非線形動的解析による照査とは、対象構造物と解析目的に合致した非線形モデルの選択に始まり、適切な精粗を有する解析モデルの作成、十分な解析結果を得るための計算条件の設定、解析結果に基づいた損傷過程の評価という創造的な思考作業を経て遂行されるべきものである。

i) 設計現場における動的解析の現状と課題

前述したように、非線形動的解析が実務設計の場に本格的に登場したのは、阪神・淡路大震災の際に得られた地震力記録により2gという大きな弾性応答加速度が作用し、構造物が破壊するという事実が現れてからである。したがって、上述のような非線形動的解析の適用の実態もやむを得ないところもあろう。今後は、レベル2地震動による損傷過程に立ち入った耐震設計が基本となることを考えると、非線形動的解析は設計プロセスの中で次のように位置付けるべきである。

非線形動的解析は、レベル2地震動に対して対象とする構造物が所要の性能を発揮するかどうか(どのような損傷を受けるか)を照査する際に用いるべき最も精度の高い挙動を予測するための手法である。

したがって、今後、非線形動的解析は、設計作業の一貫として行われるようになる。その時のためにも、我々、設計技術者の能力も高めておかなければならない。動的解析を行う技術者に必要とされる知識と技術の内容を、非線形動的解析を実施するプロセスを考慮しながら列挙する。

- ①初期状態(死荷重)や慣性力が静的に作用した場合における対象構造物の断面力の状態
- ②上部構造～支承～橋脚～基礎～地盤という各構成要素間の力のやり取り
- ③入力地震動と解析モデル上の入力地震動位置の関係
- ④入力地震動の応答スペクトル特性と構造物の固有周期の関係
- ⑤構造物の固有振動特性と地震応答に寄与する固有振動モード
- ⑥動的特性と解析精度を考慮した適切な動的解析モデルの作成
- ⑦構造物を構成する地盤・RC・鋼の非線形特性に関する基礎的な知識
- ⑧各種減衰効果(構造減衰、履歴減衰)の影響と発生原因
- ⑨降伏耐力・降伏剛性が非線形応答に与える影響
- ⑩線形応答と非線形応答の関係
- ⑪構造物を構成する各要素の塑性化の度合いからその構造物の耐震性能を判断する技術

実際に、解析を実行する技術者には、これ以外にも数値計算上の知識や技術が要求されるが、上記の各項目は、解析モデルの設定や、解析結果の評価を行うために最低限必要とされるものである。この最低限の内容が確保されるだけでも、質の高い耐震設計を行うことが可能となる。このうち、①～③は、通常の静的解析においても必用な知識と技術であり、設計技術者が当然有していなければならない構造力学的なものである。④～⑥は、線形動的解析を行う場合にも必要となる知識と技術である。⑦～⑪は、非線形動的解析を行う場合に必要となるものである。実務設計者が、⑦～⑪に関して完璧な知識と技術を有することは必ずしも必要はないが、基本的な知識を把握しておくことが望ましい。いずれにせよ設計技術者は、学習と経験を積み重ねることにより、①～⑪に示した知識と技術を身につけることに最大の努力を傾注する必要がある。

このような研鑽を積むためには、テキストが必要であるが、橋梁を対象に非線形性を考慮した動的解析の手法と照査の考え方について詳述したものは、残念ながら見当たらないのが実情である。建築の分野では、RC構造を対象に材料の非線形性の解説や非線形応答解析の手法と設計への反映の方法をわかりやすく説いたものとして、梅村の著作があるので参考にされたい。

ii) 非線形性を考慮した動的解析の問題点

非線形性を考慮した動的解析は、非線形モデルの精度にはじまり様々な問題を有しているが、RC橋脚における曲げの履歴モデルや免震支承のバイリニアモデル等、実用上十分な精度で対象とする構造物の非線形挙動を追跡できるものも幾つかある。ここでは、橋梁技術者が、非線形動的解析を設計に適用する際に遭遇するであろうと思われる問題点を数点選んで説明を加える。

a. 入力地震動の非定常性が動的解析結果に及ぼす影響

設計の場で非線形動的解析を用いる場合、最も問題となる事項として、入力地震動の非定常性がある。具体的には、同じ弾性応答スペクトル特性を有する地震動であっても、時間領域の振幅や位相の違いが応答履歴の軌跡の違いを生じさせるために、線形の動的解析では同じ答えが得られても、非線形動的解析では入力地震動の波形の相違によって結果が異なる。

b. 地盤の非線形動的解析の適用性（架橋地点の地盤条件を反映した地震動の推定）

阪神・淡路大震災以後、他地域に建設される構造物の耐震性の照査等を目的に、神戸地区での観測記録を基に、当該地域（地盤）の地震動を推定することが数多く試みられている。地震動の推定に用いられている方法の多くが、等価線形化による地盤の動的解析である。しかし、等価線形化は、あまり非線形性が強くない場合には比較的良い結果を与えるが、非線形性が強い場合にはその適用性に問題がある。事実、阪神・淡路大震災で得られた観測記録を用いた等価線形化による地盤の動的解析を行うと、地盤のせん断ひずみが非常に大きくなり、地盤が弾塑性体としての挙動をできない破壊領域に至っているという結果が得られることが指摘されている。さらに問題なのは、そのようなプロセスを経た地震動を用いて既設および新設の構造物の耐震設計が行われているという点である。

c. 履歴モデルの違いが動的解析結果に及ぼす影響

RC構造物の曲げ挙動の非線形性を表すモデルとしては、武田、武藤、深田、Cloughモデル等様々なモデルが提案されている。これらのモデルは、最大応答値が発生するまでの応答は何れの履歴モデルを用いても遜色ないが、最大応答値後の振幅レベルが小さい領域では、履歴モデルの違いが現れることがわかる。非線形動的解析結果を用いて、残留変位の照査を行う場合は、履歴モデルの違いにより残留変位が異なるという点に注意を要する。

d. その他の問題点

①収束計算法の違い

直接反復法、Newton-Raphson法、接線剛性法、初期剛性法、弧長増分法

②減衰マトリックスの評価

・Rayleigh型減衰

$$C = a_0 m + a_1 K$$

$$h_i = \frac{a_0}{2\omega_i} + \frac{a_1\omega_i}{2}$$

ω : 固有円振動数

$$\begin{Bmatrix} h_i \\ h_j \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} 1/\omega_i & \omega_i \\ 1/\omega_j & \omega_j \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix}$$

h : モード減衰定数

$$\begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = 2 \frac{\omega_i - \omega_j}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \begin{bmatrix} \omega_j & -\omega_i \\ -1/\omega_j & 1/\omega_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_i \\ h_j \end{Bmatrix}$$

・モード別減衰定数型減衰（等価減衰行列）

自由度 n ($k=1 \cdots n$) の系について、質量マトリックス M 、モード ϕ 、固有円振動数 ω_k 、モード減衰定数 h_k が既知のとき、

$$C_{ij} = m_i m_j \sum_{k=1}^n 2 h_k \omega_k \phi_{ik} \phi_{jk}$$

③ 曲げ剛性 ($E I$) の非線形性の制御法

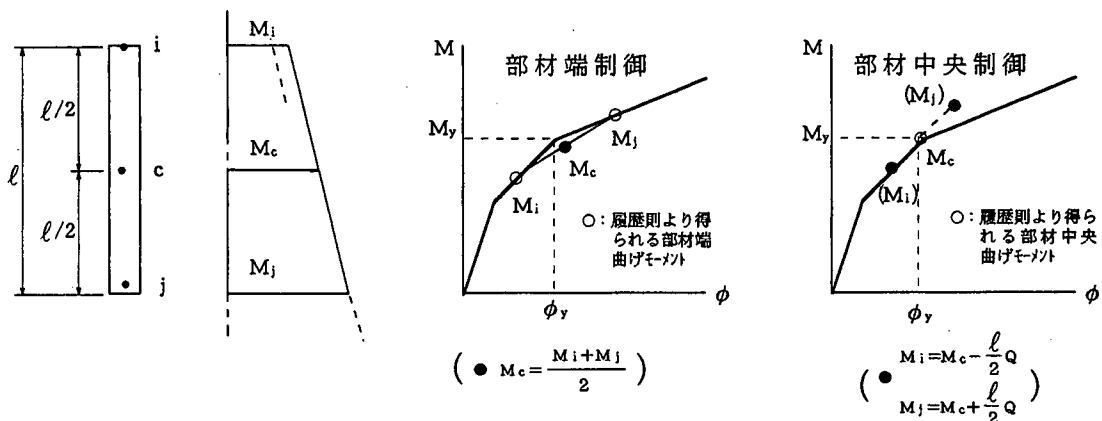


図-2.3.2 曲げ履歴の材端制御と部材中央制御

図-2.3.2 からわかるように、部材端制御によれば両部材端部の曲げモーメントは与えられた履歴則に従って定まるが、部材中央制御の場合は両部材端の曲げモーメントは必ずしも履歴則に従わない。我々が工学分野で着目するのは、主要断面すなわち部材端の曲げモーメントである。部材中央制御の場合、曲げモーメント分布を描いた場合、同一断面上で不連続になる（減衰力だけでは説明できない）場合がある。

iii) 非線形動的解析の運用に当たっての注意事項

i) では、橋梁の設計技術者における動的解析に関する経験の少なさを指摘し、今後、設計現場の中で非線形動的解析を正しく実行して行くために必要な 11 項目の知識（学習目標）について示した。設計技術者が、その 11 項目を常に意識して動的解析を実行して行くのであるならば技術者自身の動的解析に関する技術力も向上するとともに、質の高い耐震設計を実現できることになる。

非線形動的解析を実施する過程には、技術者の自助努力だけでは解決できない問題も幾つかある。その一例を ii) に示した。しかし、ii) に示した事項は、入力地震動の非定常性を除けば、解析

手法の選択、履歴モデルの選択、減衰の評価等何れも、設計者の判断に任せられる事項である。

以上のような状況を踏まえて、非線形動的解析を運用して行く上での注意事項を以下に列挙する。
なお、ここでは材料の非線形性を主な対象とする。

a. 非線形動的解析の適用範囲

非線形動的解析は、次のような現象に関しては、実用上その解析手法は、確立しているため、積極的に利用して良い。ただし、解析結果の信頼性は、非線形モデルを定める物性値の精度や利用者の能力の程度によって定まることを忘れてはならない。

- ① R C 構造の曲げの非線形挙動
- ② 鋼構造の座屈による耐力低下が起きる前（最大耐力）までの非線形挙動
- ③ 免震支承のようにその非線形性を単純な非線形パネでモデル化できる事象

これらに関しては、弾性応答と非線形応答の関係を利用したエネルギー一定則や等価線形化法を用いて非線形応答を求めても良い。他に、非線形応答スペクトルを用いる方法もあるが、非線形応答スペクトルは、その非線形特性に関するパラメータが少ない完全弾塑性型に関しては有用であるが、それ以外の非線形特性ではパラメータが膨大になるので、非線形応答に与える影響の少ないパラメータを固定する等の工夫を要する。

次の現象に関しては、実用的な解析手法は研究途上にあるので、実験等により耐震安全性を確認するか、実験等により解析精度が確認されている解析手法を用いる必要がある。

- ④ R C 構造のせん断の非線形挙動
- ⑤ R C 構造の曲げとせん断の非線形挙動
- ⑥ 鋼構造の最大耐力以後の領域の非線形挙動
- ⑦ P～ Δ 効果が無視できない構造の非線形挙動

解析手法は確立されているが、非線形モデルを定める物性値にバラツキが大きいものとして地盤が関係する現象がある。このような解析を行う場合は、何を得たいかをはっきりさせ、その量が比較的精度良く得られるように解析モデルを設定する必要がある。

- ⑧ 地盤の非線形挙動（全応力解析・有効応力解析）
- ⑨ 基礎～地盤系の非線形挙動

解析手法は提案されており、実験による検証例もあるが、解析手法が一般化していない現象として次のものがある。このような解析を行う場合は、必ず、経験豊かな技術者の意見を参考にしながら解析を行う必要がある。

- ⑩ 軸力変動を伴う曲げの非線形挙動
- ⑪ 2 軸曲げの非線形挙動

b. 非線形動的解析の解析条件

非線形動的解析の条件を定める上での注意事項を以下にまとめる。

- ① 入力地震動は、地震動の非定常性を考慮して複数の入力地震動を用いるのが良い。
- ② 入力地震動に、架橋地点の地盤条件を反映させたい場合は、地盤の非線形動的解析を行う。その際、常にせん断ひずみ分布や加速度分布と変位分布に着目しながら、解析手法の適用範囲

を逸脱していないかを確認する。逸脱している場合は、動的解析に関する経験豊かな技術者に相談する。

③履歴モデルは、対象とする構造物の非線形性を正確に表現できるものでなければならない。また、非線形モデルの適用範囲も常に意識して用いる。具体的には、RC構造の場合は、剛性低下型の最大点指向のモデルを用いる必要がある。鋼構造にバイリニアモデルを用いた場合は、それによって解析できるのは、あくまでも最大耐力点までである。

④収束計算法は、材料非線形のみを対象とするならば Newton-Raphson 法を用いるのが良い。不平衡力を小さくするための繰り返し回数は、20~30 回程度が良い。収束計算法や繰り返し回数、収束判定誤差等の選択は、対象とする非線形性によって異なってくる。

⑤減衰マトリックスは、非線形性を考慮した剛性マトリックスの弱点を補うという役目があり、その評価法は、解の収束性等を見ながら適時選択する必要がある。

- ・モード減衰定数に等価な減衰マトリックスは、解析モデルが複雑になると、解の収束性が悪くなる。但し、減衰効果を線形動的解析と非線形動的解析で整合を図ることができる。
- ・Rayleigh 型減衰は、応答に寄与すると思われる 2 つの固有振動モードを選択し、そのモード減衰定数と固有振動数から質量マトリックスと剛性マトリックスに乗じる係数を定める。
- ・剛性比例型減衰は、最も応答に寄与すると思われる固有振動モードを選択し、そのモード減衰定数と固有振動数から剛性マトリックスに乗じる係数を定める。

Rayleigh 型と剛性比例型は、解析の過程で逐次更新される剛性マトリックスを用いる方法と最初に作成する剛性マトリックスを解析の最初から最後まで用いる方法があるが、これも、解の収束が悪い場合は、前者から後者に変更するなどの試行錯誤が必要である。

⑥曲げ剛性の非線形性制御の方法は用いる解析プログラムに依存するが、用いた解析プログラムの非線形性の制御法が、解のどのような量に対しては正解値（物理的に意味のある解）を出し、どのような量に対しては数値計算上出てくるだけの量であることを明確にしておく必要がある。

c. 非線形動的解析結果の評価

非線形動的解析を行った場合、最低限、次の量を出力し、解が正しく得られているかを吟味しなければならない。

①主要な位置の応答変位波形、速度応答波形、加速度応答波形

②主要な断面の曲げモーメントの応答波形（曲げの非線形解析の場合）

せん断力の応答波形は、せん断の非線形性や曲げとせん断の相互作用が考慮できる場合は、出力する意味がある。

③用いた非線形モデルの応答履歴

④変位、加速度、曲げモーメント、せん断力、曲率（梁の非線形モデルを用いた場合）の最大応答値分布

①~④の量は、図という形で出力して、得られた解に不備がないかをチェックする。チェックは、用いた非線形モデルが意図したとおりの応答履歴を描いているかの解析モデルのチェックと、設定し

た非線形モデル応答波形全体に異常なノイズが見られるか等の収束性に関するチェックおよび、最大応答値の分布や塑性化の発生位置等の構造力学的なチェックを行う。

以上のようにして、解の妥当性が確認できたら耐震性の照査を行うわけであるが、単に最大応答値だけに着目するのではなく、各部の塑性化の度合い等も確認する必要がある。例えば、既設のRC橋脚の耐震性を評価する場合、段落し位置で応答曲げモーメントが曲げ耐力を超過していなくても、降伏モーメントを越える振幅が複数回作用する場合は、既往の被災事例を考慮して、耐震性に問題有りという判断を下すべきである。

入力地震動を複数用いた場合の応答値の評価としては、次のような評価が考えられる。

- ・入力地震動が数波の場合：最も大きい応答値を採用
- ・入力地震動が十数波の場合：最頻値を採用する。
- ・入力地震動が数十波の場合：平均値+ σ (σ ：標準偏差)を採用する。

非線形動的解析は、i)～iii)のような点に留意しても、同じ構造物を対象とした場合に解に差が出る可能性が高い。しかし、上述した事項を意識した解析結果であるならば、大幅な解のズレは防げると考える。具体的には、解のズレにより設計成果が異なることはないと考えている。

なお、上述した各種の要因に加えて、同一の解析モデルで線形の動的解析を行い、固有振動特性（各振動次数の固有周期と振動モード図）を出力しておき、それらを非線形動的解析結果の照査に反映すべきである。

(4) 動的相互作用

地震の発生により、地盤および基礎を介して地震波動が上部構造物に伝わる。上部構造物が振動することによって慣性力が発生し、その慣性力は基礎を通して再び地盤に戻される。地盤・基礎系は、この慣性力の影響を受けて振動し、その振動性状は基礎上に上部構造物が存在しない場合とは異なったものとなる。このように、地盤、基礎、および上部構造物の間に力のやり取りが生じ、それぞれの応答が各部の応答に影響されることを一般に動的相互作用（Dynamic Soil Structure Interaction；DSSI）という。地盤が岩盤のように堅固であれば、地盤（岩盤）と上部構造物の間で力のやり取りは発生するが、この場合動的相互作用は発生しない。それは慣性力が岩盤にフィードバックされても、岩盤は堅固であるため岩盤の応答は乱されず、また基礎が岩盤の応答に影響を及ぼさないからである。

動的相互作用に関する橋梁設計技術者の理解度は決して高くはない。最大の理由はそれらの解析式の難解さにある。また、動的相互作用ばねおよび減衰定数は振動数によって変化するなど、一般にその算定が複雑であることや、動的相互作用が構造物の耐震設計にどのような影響を及ぼすか（設計外力の低減につながるのか、それとも増大になるのか）など、必ずしも明確でないこともその大きな理由として考えられる。構造物の動的応答を問題にする場合、基礎・地盤系と上部構造物の動的相互作用の重要性がしばしば指摘されるが、動的相互作用が問題になる場合と、その影響が無視でき、動的相互作用が全く問題にならない場合があることに留意する必要がある。

動的相互作用は、基礎の剛性に関わる効果と、慣性に関わる効果の2つに大別される。前者をキ

ネマティックな相互作用、後者を慣性（力）相互作用と呼称している。その内容については、土木学会耐震工学委員会に設けられた、基礎と地盤の動的相互作用研究小委員会の成果¹³⁾に詳述されているので、参考にされたい。

軟弱地盤に建設された構造物は、動的相互作用の影響により応答が増幅されて危険であるといった指摘は明らかに間違いである。たとえ軟弱地盤に建設された構造物であっても、地盤の固有周期より構造物の固有周期が十分長ければ、動的相互作用の影響は無視できる。もちろん、地盤が軟弱であれば、地盤部における地震動増幅は一般に硬質地盤に比べて大きく、その増幅された地震動が構造物に入射されるため、硬質地盤上の構造物より軟弱地盤上の構造物は、地震に対する危険度は大きいことは述べるまでもないことである。

動的相互作用の問題で、設計上に留意しなければならないことは、上部構造物の卓越周期の長周期化と応答倍率の変化である（一般的には逸散減衰の増加により、応答倍率は低下するが、上部構造物の卓越周期の長周期化により、それが地盤の卓越周期に漸近した場合、応答倍率は著しく増大することがある）。このことが構造物の耐震安全性に大きな影響を及ぼすことは明らかであり、動的相互作用の影響を考慮した耐震設計法の確立の必要性は高いと言えよう。

動的相互作用の影響を設計指針に取り入れている例としては、米国の Applied Technology Council が策定した建築物に対する暫定耐震基準（ATC-3）¹⁴⁾、ならびに我が国における住宅・都市整備公団の公団住宅に関する耐震設計指針（案）¹⁵⁾があるのみである。いずれも動的相互作用ばね、ならびに減衰定数を、振動数に依存しない形で簡便に定められるようにしている。

動的相互作用の影響を勘案した耐震設計基準類を策定するために検討しなければならない技術課題は少なくない。以下にその内の代表的なものを列挙する。

- ①種々の基礎形式に応じた動的相互作用ばね、ならびに減衰定数の定義式の検討：杭基礎はもとより、様々な基礎形式ならびに地盤条件に対応できる動的相互作用ばね、ならびに減衰定数が簡便に定められる設計式について検討し、その有効性を明らかにする必要がある。杭基礎の場合は、通常群杭基礎となり、群杭効率の合理的な定め方が重要となる。
- ②種々の基礎形式に応じた有効入力動の定義式の検討：自然地盤の応答に、有効入力動係数を乗じる形で有効入力動が定義できるが、様々な基礎形式ならびに地盤条件に対応できる有効入力動係数について検討する必要がある。
- ③レベル2地震入力の場合のような、強震動に伴う地盤の非線形地震応答に対する合理的な配慮：地盤の非線形地震応答を考慮する場合、動的サブストラクチャ法のような応答の重ね合わせ法は、基本的に適用できなくなる。Penzien モデルのような質点ばね系モデルを採用する場合でも、地盤の非線形地震応答に伴う群杭効率の変化など、検討すべき課題は少なくない。さらに、阪神大震災では、液状化に伴う地盤の側方流動によって杭基礎をはじめとする基礎構造物に大きな被害の発生が見られたが、このような現象に対応する耐震設計法の検討も急がれている。
- ④地盤の非線形化の度合いが大きい場合、動的相互作用効果がどの程度効果を発揮するかについても明確にする必要がある。

2.3.3 橋梁における重要度の考え方

橋梁構造物に要求される地震時の安全性は、それが含まれる路線の機能と重要度によって変わる。本項においては、大地震後の救急・消火や応急復旧といった、事態の展開に大きな影響を及ぼす道路橋を対象に論を進めることとする。阪神・淡路大震災における被災経験を踏まえて改訂された「道路橋示方書 V. 耐震設計編（平成8年12月）」では、橋の重要度に応じて必要とされる耐震性能を確保することを耐震設計の基本方針としている。しかし、道路橋示方書では、橋梁の重要度をどのようなプロセスや考えで定めるかについては言及されていない。橋梁を含めた公共構造物の重要度は、次のような要因から構成されると考えることができる¹⁶⁾。

- ①人的損失度：人が傷害を受けたり、死亡したりする度合い。
- ②物的損失度：構造物自身および内部の物品が損傷することによる損失の度合い。
- ③機能損失度：地震直後の災害復旧や救助などのためにその構造物に要求される機能の損失の度合い。
- ④危険波及度：周辺に及ぼす影響の危険性の度合い。

重要度は、①～④の項目を何らかの形で評価し定められるべきものであるが、その際、①～④の重みは、対象とする構造物毎に異なる。

以上のように、橋梁の重要度は、単純に定めることはできない。例えば、大地震の際には、人命さえ無事であれば、その機能が停止しても良いという考え方があるかも知れない。しかし、橋梁の輸送機能が失われた場合、復旧や復興作業に与える影響や、経済活動に与える影響が大きいことが阪神・淡路大震災の反省としてあげられている。本節では、橋梁として、どの程度のダメージ（被害）であればアクセプタブル（許容できる）となるか¹⁷⁾の議論に資することを目的に、橋梁に期待される震後機能、橋梁の重要度について述べる。さらに、耐震補強における補強の優先順位についても言及する。これらは、本来、土木技術者だけの議論だけでなく、社会的合意形成が必要となる。

(1) 橋梁に期待される震後機能

橋梁に期待される震後機能は、耐震性能の目標水準と言い換えることもできる。震後機能への考え方は、橋梁への係わりかたによって異なる。具体的には、橋梁を設計する立場と、橋梁を利用する立場では異なる。それが顕著な形で現れたのが、阪神・淡路大震災における阪神高速道路への評価である。

例えば、太田¹⁸⁾は「阪神・淡路大震災では、阪神高速道路が倒壊したことによる直接の死者数は少ないが、輸送機能を寸断したことによって、高速道路は死者数を増加させた。仮に、輸送能力が毎時5 km～10kmでもあったら、どれだけの人が死ななくてすんだのかを具体的な数字として出す必要がある。」と述べている。もう一つの例として、阪神高速道路倒壊事故死における遺族賠償初提訴がある。阪神高速道路では、高架橋の倒壊により16名もの死者を出したが、1名の遺族が国家賠償法に基づき損害賠償を求めている。原告側弁護団のコメントの中に、「公共構造物である道路は、家屋などより高い安全性が求められる。」という言葉がある¹⁹⁾。

交通工学研究会の機関誌”交通工学”は、その特集²⁰⁾の中で、交通インフラの被害により被災地内外に深刻な状況を生み出したことを指摘している。

- ①唯一通行可能な国道2号線にあらゆる交通が集中、2号線は麻痺状態となり被災地内の救急・救命活動に重大な支障をきたした。その結果、神戸港の麻痺と併せて効率的アクセス手段がなく神戸市は陸の孤島状態に陥った。
 - ②被災地外からの緊急車両が進入できず、救援・復旧活動の著しい傷害となった。
 - ③日本の陸上の東西物流ルートが遮断され、経済活動に多大な損害をもたらした。
 - ④幹線が遮断されたことによる長距離トリップが迂回路（国道9号、53号等）に集中、交通渋滞を広範囲に波及させると同時に、設計荷重を越える重量車両の通過により健全であった道路にも大きな損傷を与えた。
 - ⑤鉄道網の遮断により大量の通勤・救援交通機能が停止し道路交通のいっそうの混乱を招いた。
- 以上のような点を踏まえると、橋梁に期待される震後機能として、次の二つをあげることができる。

- ①想定した以上の地震が襲来しても、道路利用者や周辺住民の人命の安全は必ず確保する。
- ②想定した以上の地震が襲来しても、道路としての輸送機能は、最低限確保する。

橋梁の重要度にかかわらず①は必ず満足されなければならない耐震設計の目標水準である。②は重要な橋梁のみ要求される目標水準である。

①と②の目標水準に基づいて耐震設計された橋梁であっても、自然の力の前では技術に絶対の安全はないことを認識し、個々の構造物の耐震性の強化だけでなく、多重で多様な交通システムの整備が必要である²¹⁾。具体的には次のようになる。

- ①拠点間を複数のルートで連結する多重なネットワークを整備することに加え、異なる耐震特性を持つ多様な交通基盤を組合せ、それらの相互の結節性を確保する。
- ②複数のルートを整備する場合には、地域の特性に合わせて異なる耐震性を有する多様な構造形式を確保すべきである。

(2) 橋梁の重要度

橋梁の重要度は、基本的にはそれを計画および管理する公的機関によって定められるが、そのような場合、重要度は交通量等の指標のみから画一的に定められることが多く、震災時の物資流動という視点が失われがちとなる。例えば、経済効率最優先の思想に基づいた総期待費用最小化原則に基づく重要度の設定等がそれにあたる²²⁾。本項のはじめに記したように、橋梁の重要度は、次の4つの要因を考慮して決めることが考えられる。

- ①人的損失度
- ②物的損失度
- ③機能損失度
- ④危険波及度

耐震設計上の主要度を考える場合には、①～④の時系列的な変化や各要因に対する情報量が問題となる。

橋梁の計画および設計の段階において、①～④の度合いを想定して橋梁が建設されたとしても、供用後に、計画および設計段階で想定したと必ずしも同程度となるとは限らない。計画および設計

段階において重要と判断された橋梁は良いが、その重要度が相対的に低いとされた橋梁が、供用後、周辺環境の変化に伴い重要な輸送経路となる場合もあり得る。これは、後述する耐震補強の優先度にも関わってくる。

①～④に関する度合いの判断は、上述したような可能性も考えられるため、橋を単体として対象に取り上げるのではなく、当該地域の地域防災計画（震災編）に規定された路線の性格・分類と整合させることの方が合理的になるものと思われる。

橋梁の重要度を決定する際のもう一つの問題点は、重要な橋梁があれば、当然、重要でない橋梁も出てくるといふ点である。本来、平等に還元されるべき税金が、重要とされた橋梁の耐震性能の向上には多く投じられ、相対的に重要度が低い橋梁においては多く投じられないというアンバランスが生じる。いわゆる、耐震性能とコストの問題である。

上述のように、橋梁の重要度を定めるためには、橋梁の重要度が時系列的に変化する可能性があることと、重要な橋梁と相対的に重要度が低い橋梁に対する耐震性能の水準に関する格差の存在について、社会的な合意形成が必要であろう。前者に関しては、定期的な地域防災計画および耐震補強実施計画の見直しにより対応できるが、後者に関しては、上述したように地域住民や利用者を含めた幅広い議論が必要である。議論のポイントとしては、次のような内容が考えられる。

- ①設計で考慮した地震動を実際には上回る確率があり、それに対しては人命に関わるような損傷は生じさせないような配慮を行うこと。
- ②相対的に重要度が低い橋梁は、重要度が高い橋梁よりも耐震性能の必要水準が低いこと。
- ③重要度が高い橋梁の耐震性向上策に要する費用負担のあり方。例えば、それを国民全員で負担するのか、地域住民で負担するのか、といった問題。
- ④橋梁の地震に対するアクセプタブルダメージの社会的合意形成の必要性。

(3) 耐震補強における優先順位

既設橋梁に対する耐震補強の優先順位は、上述した①～④の要因に加えて、耐震補強に当てることができる財源規模、耐震補強工事の難易度、耐震補強工事による交通遮断が経済活動に与える影響等を加味して、新設橋梁の重要度よりは細かな優先順位のランク分けが必要と考えられる。

この問題は、「第二次提言」の中でも指摘されているように、今後の重要な社会的課題の一つであり、合理的な計画手法の確立に向けて土木学会も含め、関係機関で早急に取り組むべきである。

なお、大都市における既設地震防災上の重要度と耐震補強の優先順位については、街路網としての地震後の交通特性のシナリオを想定して検討・提案された佐藤^{2,3)}らの研究成果が参考になるものと考えられる。

《参考文献》

- 1) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書，建設省，1995年12月
- 2) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：土木構造物の被害第1章 橋梁，(社)土木学会，1996年12月
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，(社)日本道路協会，1996年12月
- 4) 西村：鉄道構造物に関する耐震設計法の見直し，コンクリート工学，Vol. 34, No. 11, PP. 83-85, 1996年11月
- 5) 大月：非線形地震応答解析，(株)長大社内資料，PP. 1-3, 1996年1月
- 6) 小谷：RC造建築物の地震応答解析の現状と問題点，コンクリート工学，Vol. 31, No. 8, PP. 15-23, 1993年8月
- 7) 木村訳：パソコンで解く振動と力，丸善，PP. 68-70, 1989年12月
- 8) 梅村：鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法・続(中層編)，技報堂出版，PP. 281-282, 1982年12月
- 9) 鋼構造新技術小委員会，耐震設計研究WG：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術，土木学会鋼構造委員会，PP. 10-16, 1996年7月
- 10) (社)道路協会：道路橋示方書・同解説 耐震設計編，(社)日本道路協会，PP. 148-162, 1990年2月
- 11) R. W. Clough, J. Penzien：DYNAMICS OF STRUCTURES -Second Edition-, McGraw-Hill, PP. 234-237, 1993年
- 12) 柴田著：最新耐震構造解析，森北出版，PP. 118-144, 1988年12月
- 13) 土木学会耐震工学研究委員会動的相互作用小委員会：基礎・地盤・構造物系の動的相互作用-相互作用効果の耐震設計への導入-, (社)土木学会, PP. I-15-I-19, 1992年9月
- 14) Applied Technology Council：Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings, National Bureau of Standards Special Publication 510, 1978年
- 15) 住宅・都市整備公団：公団住宅地震入力評価指針・同解説(案)，1987年
- 16) (社)日本建築学会：地震荷重-その現状と将来の展望-, (社)日本建築学会, PP. 48-59, 1987年11月
- 17) 「アクセプタブルダメージ」とは何か，日経アーキテクチュア，日経BP社，PP. 105-115, 1995年7月17日号
- 18) 太田 裕：震度情報から被災程度を推定するシステムを，土木が遭遇した阪神大震災，日経BP社，PP. 182-183, 1995年7月
- 19) 神戸新聞：平成9年1月13日夕刊一面(社会)記事「遺族賠償初提訴へ」
- 20) 黒田勝彦：阪神・淡路大震災と交通，特集阪神・淡路大震災と交通，交通工学，VOL. 30, No. 3, 交通工学研究会，PP. 11-14, 1995年7月

- 21) 三浦真紀：交通システムの信頼性向上に関する調査結果の概要，道路，PP. 64-67，1996 年 6 月
- 22) 長尚：「acceptable risk」と「forced risk」（話題提供原稿より）
- 23) 佐藤次郎、篠崎之雄、佐伯光昭、磯山龍二：大都市における既設道路橋の地震防災上の重要度の評価手法，土木学会論文集，No. 513/I-31，213-223，1995. 4

2.4 堤防および河川構造物

阪神・淡路大震災における堤防や河川構造物の被害は、橋梁・高架構造や地下鉄で生じたもの比べて、それほど著しくなかったことは事実である。

中でもダムはコンクリート重力式にあっては被害は生ぜず、フィルタイプでは天端に亀裂を生じたものが数例認められたのみで、全体として耐震性は保持されたと考えられる。

水門、桶門や自立式構造の特殊堤では、本体に軽微な亀裂や裏込め盛土部分の陥没が目立つ程度であった。これに対して、土堤では地盤条件の良否によって被害の程度が異なり、軟弱な地盤が厚く堆積している阪神間を大阪湾に流入する大河川では、液状化の発生による沈下や亀裂などが生じた。その顕著な例が淀川左岸の大阪市此花区西島地区で、延長約 2 km 弱の区間で最大 3 m も沈下し、液状化対策を含む大規模な復旧工事が行われた。

本節では以下、これら構造物の耐震設計の現状と「第二次提言」への対応の基本的な考え方およびレベル 2 地震動に対する設計法の整備に必要な技術課題をとりまとめる。

2.4.1 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、第四紀に入って活動したと考えられている活断層（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、0 m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の地震に対する配慮が必要である。

2.4.2 レベル2の地震動に対する設計法の適用に関する課題

i) ダム

レベル2地震動に対する解析方法としては、「ダムの耐震性に関する評価検討委員会報告書」¹⁾で照査に採用した手法によることが考えられる。

すなわち、コンクリートダムは減衰が小さく近似的に弾性体と評価できることから、動的解析には振動形解析法（モーダルアナリシス）を用いてよい。今後の課題としては、入力地震動、貯水の影響の評価、減衰定数の評価、継目の評価、安全性の評価法等があげられる。

一方、フィルダムは材料が非線形性を有するため、非線形解析を適用する必要がある。課題としては、入力地震動の設定、材料の強度、変形特性、減衰特性、解析手法、解析結果の評価方法等があげられる。

ii) 河川堤防

当面、適用可能な耐震性評価法は、表-2.4.1~2.4.3²⁾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るようになる。

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-2.4.3のように安全率と変形量の間関係がある精度で対応付けられれば、有用である。

iii) 河川構造物

防潮水門は、地震後の津波にその機能が重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。

2.4.3 重要度の考え方

河川構造物の重要度について、特にレベル2地震力を考えた場合、堤内地への浸水の可能性および被災した場合、復旧に要する期間の長短といった二次災害への拡大要因を第一義的に考える必要がある。例えば、沿岸大都市に広く分布する海拔0m地帯を抱える河川堤防や一旦被害を大きく受けた場合、復旧が難しいと考えられる特殊堤などの重要度は高いものと分類する必要がある。いずれにせよ、河川構造物についてはレベル1地震力に対しても必ずしも十分な耐震設計が為されていないものが多いことから、今後の課題として重要度の考え方を早期に確立して、古いものに対する耐震補強を重要度の高い順に実施していくことが望まれる。

《参考文献》

- 1) 国土開発技術センター：ダムの耐震性に関する評価検討委員会報告書，1995年11月
- 2) 河川構造物地震対策技術委員会報告書，H8年3月

2.5 地中構造物

阪神・淡路大震災において多くの地中構造物が被害を受けた。被害の特徴の第一としては、それまで比較的安全とされたきた地下鉄や共同溝のようなRC製ボックスカルバートの被害があげられる¹⁾。神戸高速鉄道大開駅ではプラットフォームのRC製の中柱が破壊して上床版が落込み、上の道路が最大2.5m沈下した。神戸市営地下鉄の三宮駅、上沢駅ではコンコースのRC製中柱に斜めひび割れが生じ、この他に地下鉄トンネルにおいて隅角部および側壁に縦断方向のクラックやコンクリートの剥落が見られた。共同溝においても隅角部に縦断方向にクラックが入るなどの被害が見られ、さらに目地では縦断方向に衝突、開口による漏水が発生した。被害の特徴の第二としては、埋立地における小口径管路の被害があげられる²⁾。埋立地では護岸が側方変位し液状化に伴う側方流動が発生しており、小口径管路の継手部の損傷はこれによる地盤の永久変形が原因と考えられている。

土木学会の「第二次提言」では、これらの被害の特徴を踏まえてレベル2地震動に対して地中構造物が保有すべき耐震性能と耐震設計法を示している。ここでは、「第二次提言」に取り上げられた課題の中から、側方流動に対する検討方法、レベル2地震動に対する設計法、および断層や地表のずれを横切る場合の対応策、について現状の技術と今後の課題を示すとともに、地中構造物における重要度の考え方に言及する。

表-2.4.1 河川構造物の耐震設計で考慮する地震力²⁾

	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の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の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の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"> 周辺のスペースが無く、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。 		

表-2.4.2 土構造物の耐震性評価法の特徴²⁾

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。	・堤体形状 ・地層構成 ・堤体・地盤定数 ・地震力 ・地下水位	・被害形態 (パターン) ・被害程度 (沈下量)	・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。	・堤体形状 ・地層構成 ・堤体・地盤定数 ・地震力 ・地下水位	・安全率	・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)	・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)	・地震後変形量	・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。	・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	・地震後変形量	・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-2.4.3 堤防天端の沈下量(上限値)と地震時安全率の関係²⁾

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

《参考文献》

- 1) 建設省土木研究所：平成7年(1995年)兵庫県南部地震災害調査報告，土木研究所報告，第196号，平成8年3月
- 2) (社)日本水道協会：1995年兵庫県南部地震による水道管路の被害と分析，平成8年5月

2.5.1 側方流動に対する検討方法

現行基準類には、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、液状化による地盤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、この側方流動が地中構造物の地震被害の主たる要因になりうる。これに関する調査・研究の現状は、液状化層厚や地表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ものがある。また、これらの研究成果をさらに進め、地中構造物の耐震設計に反映するため、新潟地震や兵庫県南部地震での側方流動による地盤変位量の実測値を基に設計用地盤歪みと地盤変位等を規定する方向で、基準の改定を進めているものもある。

上述した基準類の改訂を受け実務設計に反映することとなるが、その作業の手順は、図-2.5.1に示すように想定される。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を表-2.5.1にまとめる。

これらの課題に対する調査・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、埋設管では図-2.5.2に示すように、弾性床上の梁モデルで取り扱うことが一般的な手法と考えられる。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せざるを得ない。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定量的な検討を実施するのが望ましい。

表-2.5.1 研究項目と解決すべき課題等

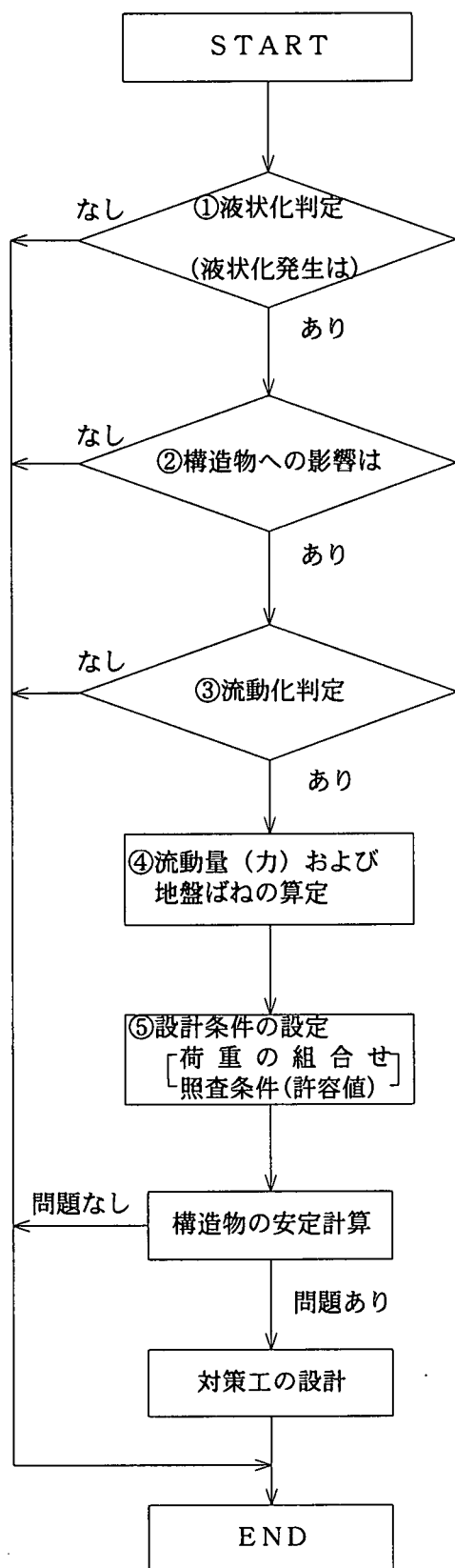
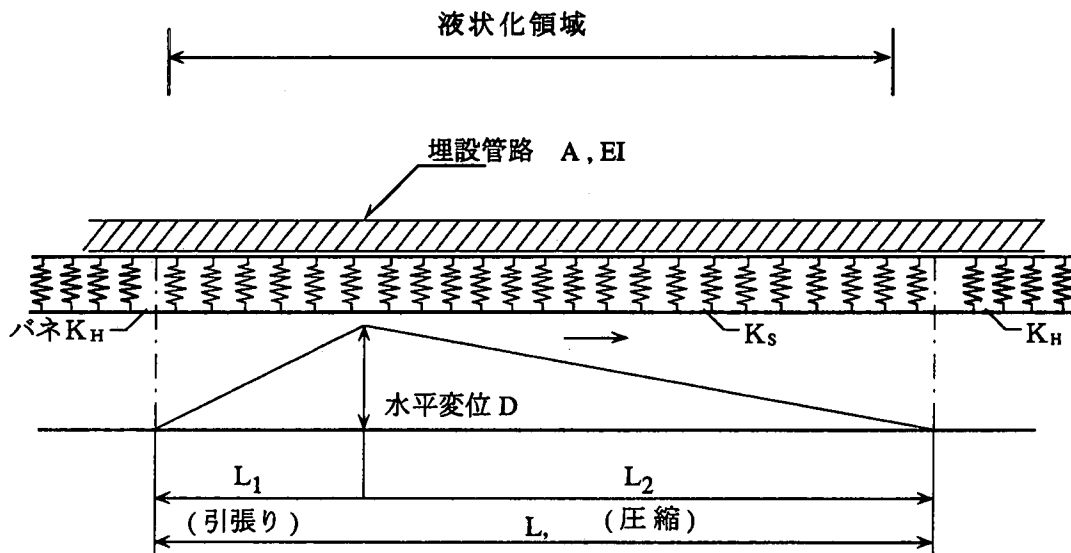


図-2.5.1 側方流動を考慮した設計の手順

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>流動発生時刻と進展過程 液状化層はΔuの発生により物性が変化する</p> <p>健全時 → 不完全 → 完全 → 液状化時 → 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杭力係数 <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

注) 研究項目中の①～⑥は図-2.5.1参照。



- L, L_1, L_2 : 地形, 液化層の分布から定める
 D : 液化層厚, 地表面の傾斜等から定める
 K_H : 液化化しない場合のパネ
 K_S : 液化化した場合のパネ

図-2.5.2 埋設管路での側方流動に対する計算モデルの例

2.5.2 レベル2の地震時の設計法

(1) 耐震設計法の現状

トンネルや管路の縦断方向には、継ぎ手で対処できる場合が多いため本検討では横断方向に着目し、さらに阪神・淡路大震災で大被害のあった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¹⁾のみであり、レベル2地震動クラスに対しては原子力屋外重要土木構造物²⁾以外にない。

(2) 現状技術による耐震設計の可能性

大震災でのRC矩形断面地中構造物の被害分析結果³⁾および大震災以後に発行された基準・指針類^{4), 5)}を基に、レベル2地震動の耐震設計法をまとめる。ここでは、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-2.5.3に示す。

i) 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化化するかどうかにより、全応力法による動的等価線形解析法か、有効応力法による動的非線形解析法のいずれかを用いることができる。

ii) 応答変位法による耐震計算

a. 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⁵⁾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は、地盤の応答変位、地盤の周面せん断力、躯体・負荷重量の水平慣性力、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。

b. 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す。地盤ばねは、有効拘束圧と地震時の地盤のひずみレベルに応じたせん断剛性を用いて求め、必要に応じて構造物と地盤との間に引張力が作用した場合は、ばねが切れるノーテンションモデル等の非線形特性を取り入れる。

c. 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形解析により行う。

iii) 部材の安全性評価

部材の安全性評価は改訂されたコンクリート標準示方書「耐震設計編」⁴⁾の限界状態設計法の考え方によることができる。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。

(3) 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の考慮方法、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。特に、地中構造物の機能、例えば、地下鉄のような多数の人命に係わるものやライフライン施設を複数収容する共同溝、そして、単一の施設を収容する単独同道などの種々のものが考えられるが、それらに応じて、耐震性能2の具体的な安全性の確保水準をどのように定めるかについては、早急に取り組むべき課題である。

《参考文献》

- 1) (社)日本道路協会：駐車場設計・施工指針 同解説，平成4年11月
- 2) (社)土木学会原子力土木委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル，1992年9月
- 3) 例えば、佐俣千載，長光弘司，山本一敏，森 伸治：非線形応答変位法による地下鉄駅舎の被災メカニズムの考察，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，PP. 231-238，1996年1月。
- 4) (社)土木学会：コンクリート標準示方書 耐震設計編，平成8年7月。
- 5) (財)鉄道総合技術研究所：新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料，平成8年3月。

2.5.3 断層や地表のずれを横切る場合の対応策

(1) 現 状

「第二次提言」には、地中構造物が保有すべき耐震性能として、地震断層を横切る場合の対策について述べられているが、現行の各種設計基準等を調査したところ、断層や地表のずれに対する規定はほとんど見られない。地盤変化の大きな所等に対しては可とう性構造物を使用したり、二重管、複数化、緊急遮断弁の設置等の記述はある。また、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。

(2) 文献調査

断層と地中構造物に関する海外を含む文献の調査を行った。

i) トンネル

1930年の北伊豆地震の際に、丹那トンネルの切羽に対して直交水平方向に、2mの変位が生じた¹⁾。1978年の伊豆大島近海地震では、稲取トンネルにおいて最大73cmの変位が生じた¹⁾。クリープタイプの断層としてはロサンゼルススのハイワード断層で年6～8mmのずれが観測されている²⁾。ロサンゼルススの下水道トンネルの設計³⁾では、800年毎にマグニチュード6.5の地震で20cmのずれが生じるか、1600年毎にマグニチュード7.0の地震で45cmのずれが生じると予測している例がある。

ii) パイプライン

大阪の小野原断層を口径1800mm水道管が横断する場合⁴⁾や、横須賀の武山活断層を口径1200mmの水道管と900mmの下水管が横断する場合⁵⁾の設計例がある。また、ロサンゼルススのユッカ溪谷のランダース断層で数百カ所の水道管が破壊された例がある⁶⁾。ハイワード断層では、断層による地表のずれ位置を30mから150mの範囲とし、ずれ量を0.5mから3mと推定している例⁷⁾がある。また、被害事例と応急対策、ネットワークとしての信頼性を検討した事例⁸⁾もある。断層横断部の対応策としてはパイプの強度で対応することは難しく、可撓性継ぎ手を用いて変位を吸収する方法が一般的のようである。

iii) 共同溝

断層横断部の具体的な設計事例はほとんどなかったが、フレキシブルジョイントを用いて駆体の応力を低減したり、断面を大きくすることにより、応力の軽減をはかった設計例がある⁹⁾。

(3) 断層運動について

断層には、周期的な地震にともなって変位を生じるものとクリープ的に常時ずれているものがある。どちらも1000年オーダーでは数mの動きになる。活断層の活動の程度を活動度と呼び、1000年当たりの変位量が1m~10mのものをA級、0.1m~1mのものをB級、0.01m~0.1mのものをC級と分類している¹⁰⁾。断層沿いに生じた変形帯の幅(W)とそこに生じた正味の変位量(d)の比(d/W)を調査することにより、将来出現し得る断層地形の形状の予測や変位量の推定を行う方法¹¹⁾もある。

(4) 地震の際の活断層による地盤に生じるずれの大きさ

阪神・淡路大震災の際の代表的な断層のずれとしては、野島断層で水平1.8m、垂直1.5mであった。我が国における過去の地震断層の水平、垂直ずれ量を例に示すと、濃尾地震では水鳥断層でそれぞれ4m、6m程度、北丹後地震の際には郷村断層で2.3m、0.5m、山田断層で0.8m、0.7m、鳥取地震の際の吉岡断層で0.9m、0.5m、鹿野断層で1.5m、0.25mであった。また、福井地震では福井断層で2m、0.75mであった⁴⁾、なお、古く1662年の琵琶湖西岸地震では、同断層で2.5m、1.3mずれたことが推定されている¹²⁾。

(5) 断層を考慮した設計の考え方

断層横断部の設計ではレベル2地震動を目標に設計すべきであるが、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。また、破壊された場合も構造物の機能に重大な支障が生じないようにし、かつ短期間で復旧が可能な範囲の損傷に留めることが必要である。また、機能を維持できないものについては、複数化・ブロック化・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。トンネルや共同溝では、大きな変位に追従したとしても、断面の確保が必要である。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-2.5.4に示した。

(6) 施設別の対応策

断層の横断部で、現在使用されている施設別の対応策の例を調査し、分類した。①構造的な対応策としては、力で抵抗するには限界があり、変位を吸収する可とう性構造物の採用が一般的である。②システム的な対応策としては、拡幅、ダブル化、ブロック化、二重化等がある。③ソフト的な対応策としては、早期復旧するためのスペースの確保や二次災害防止のための防水性の向上等がある。

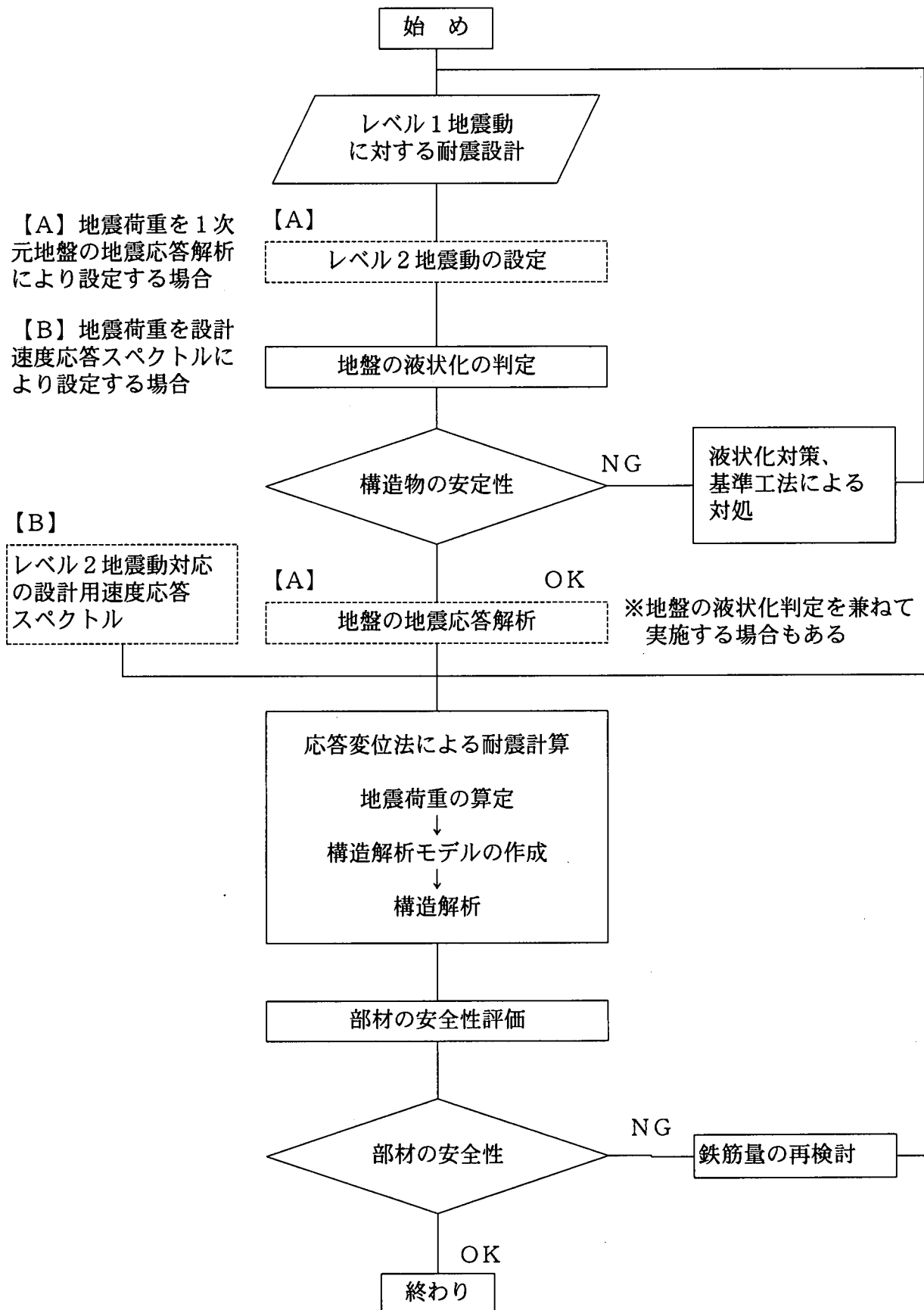


図-2.5.3 地中構造物横断方向のレベル2地震動対応の耐震設計フロー

(7) 今後の課題

活断層については未解明な部分も多く、活断層の位置、長さ、履歴、ずれ量等を解明するための調査を今後行っていく段階にある。地震の再現期間も数百年単位の幅での予測である。ずれ量も数十 cm から数mの幅があり、構造的に対応するのは容易ではなく、費用的にも大きな負担になる。現在では、ある程度の変位に対応できるように設計し、施設が破壊され機能を損なう確率をできるだけ下げ、万一の場合の代替策や復旧方法を確保するなどの体系的な対応策を講じるのが現状の妥当な水準と考えられる。

今後は、ハードな対応として大変位吸収性能や高い止水性能を有する継手等の使用資材の開発や性能向上などの取り組み、ソフトな対応としては変位発生検知装置を活用した震後対応システムの開発などが考えられよう。

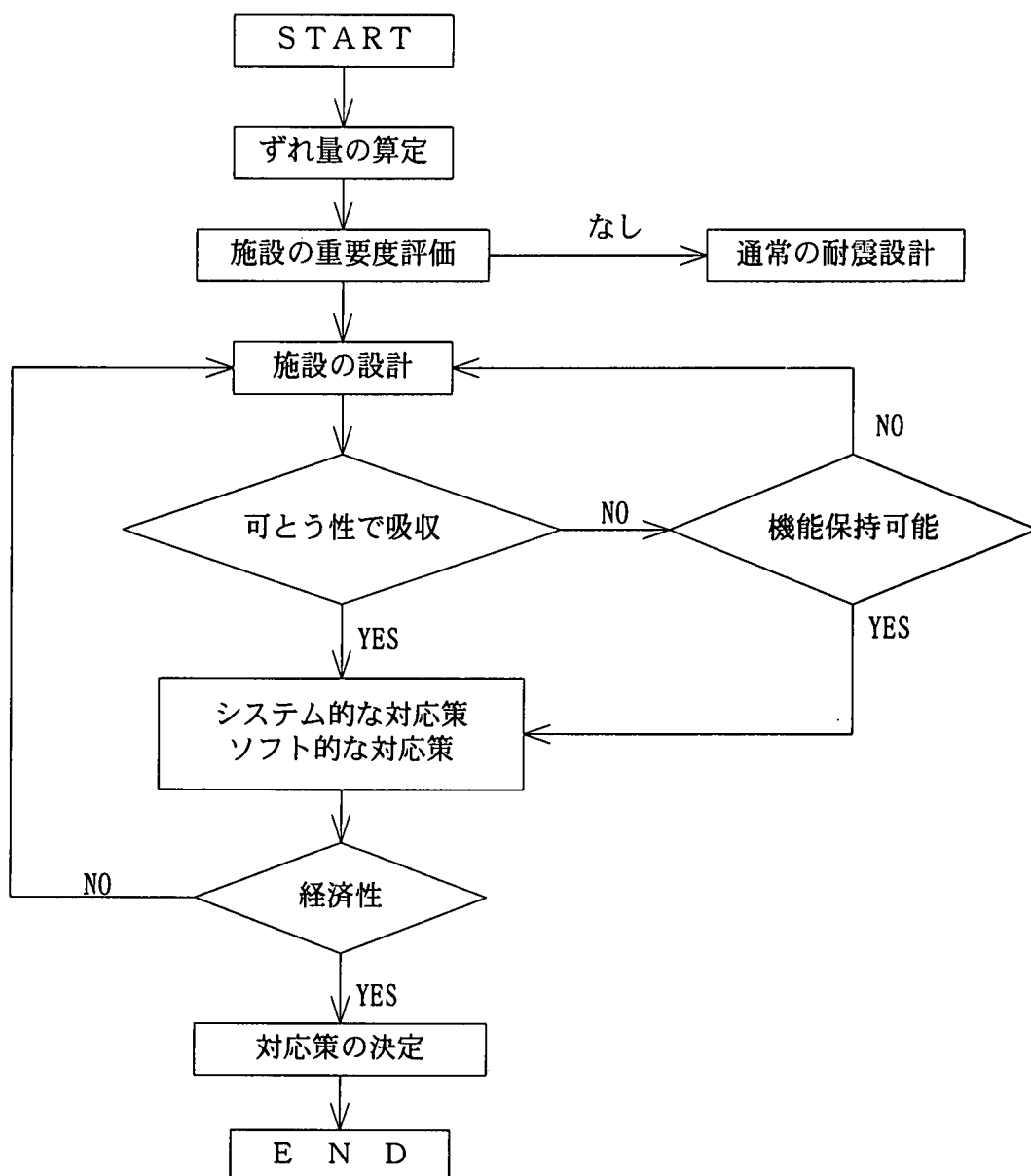


図-2.5.4 断層を考慮した設計手順

《参考文献》

- 1) 鉄道と地震, 活断層と鉄道構造物, 池田俊雄 (国鉄構造物設計事務所), VOL. 38, No. 9, pp. 23354-23357, 1995
- 2) Hayward 断層における Bay Area Rapid Transit トンネルの挙動, Behavior of the Bay Area Rapid Transit Tunnels through the Hayward Fault. BROWN I R, BREKKT L, KORBIN G E (San Francisco Bay Area Rapid Transit District, California), No. PB-82-127705, 224p, 1981
- 3) 震動とずれに耐えられるトンネルの設計, "Shake and slip to survive" - tunnel design, DESAI DB, CHANG B (Daniel, Mann, Johnson, & Mendenhall); MERRITT J L (B. D. M. Corp.), K8905 03 (0-87335-083-9) Proc 1989 Rapid Excav Tunn Conf, pp. 13 - 30, 1989
- 4) シールド工法による断層か所掘進, 大岩根誠 (大阪府庁水道部), G0370B 大阪府建設技術発表会論文集 VOL. 11th, pp. 297 - 300, 1984
- 5) 活断層を通過する太田和配水幹線築造工事の報告, 猪狩弘和 (横須賀市水道局), 第 47 回全国水道研究発表会, 平成 8. 5
- 6) 1992 年 6 月 28 日カリフォルニア州ランダース地震 (Ms 7.5) 及びビッグベア地震 (Ms6.6) の時のライフラインの挙動, Lifelines Performance in the Landers and Big Bear (California), Earthquakes of 28 June 1992. LUND L V (Technical Council on Lifeline, Earthquake Engineering, New York), B0145A (BSSAA) (0037-1106) Bull Seismol Soc Am, Vol. 84. NO. 3, pp. 562-572, 1994
- 7) 断層横断区域にある大口径パイプラインの性状, Behavior of Large-Diameter Pipeline at Fault Crossings, T. P. Desmond, M. S. Power, C. L. Taylor, and R. W. Lau PIPELINES AT FAULT CROSSING, P297
- 8) カリフォルニア州水道プロジェクトに対する信頼性, JICST CN 81A0165753, Reliability of the California state water project., KIREMIDJIAN A S (Stanford Univ., Calif.), A0478B (ASMSA) Pap Am Soc Mech Eng, NO. 80 - C2 - PVP - 63, pp. 1 - 10, 1980
- 9) フレキシブルジョイント付き共同溝の地震挙動, JICST 91A0829255, Seismic behavior of common ducts with flexible joints. FUCHIDA K (Yatsushiro National Coll. Technology.), AKIYOSHI T (Kumamoto Univ.), S0494A, 日本地震工学シンポジウム論文集, VOL. 8th, NO. Pt 2, pp. 2079-2084, 1990
- 10) 日本の活断層図「地図と解説」 活断層研究会編, 東大出版会, 1992
- 11) 地質調査所月報 (第 32 巻 第 10 号)
- 12) 朝日新聞 1996. 9. 4 夕刊

2.5.4 地中構造物での重要度の考え方

地中構造物の多くは、都市機能を支えるライフライン施設自体もしくはそれらを収容するものである。

重要度に関わる要因は、基本的には2.3.3に述べた橋梁と同様であるが、地中構造物の場合、それが大規模に被災した場合は復旧工事が大規模なものとなり、工費が莫大なものになるとともに工期も長期間に及ぶことになるので、管路類のように比較的占用幅の小さいものと共同溝、地下鉄、地下通路などの躯体幅の比較的大きいものに分けて考える必要がある。すなわち、被災した場合の影響の度合いを考えて、特に道路下に建設する場合には、その占用スペースの大小に着目して、大きいものの重要度を高めることが考えられる。

2.6 港湾施設

2.6.1 港湾施設の被害概況

阪神・淡路大震災では、兵庫県をはじめとして大阪府、徳島県の港湾施設に被害が生じた。特に、神戸港は大半の港湾施設が被災し、地震直後の港湾施設はほとんどが麻痺状態に陥った。岸壁、護岸の被災の形態に関しては、港湾施設の設計震度、構造形式により被害の程度に明確な相違が見られたようである。港湾施設の設計震度に着目して被害程度を検討すると、設計震度の小さな施設は大半のものが被害を受けた。

一方、神戸港の中で最大の設計震度を持つ耐震強化岸壁である摩耶埠頭地区の3パースはほとんど被害がなかった。この3パースは、他の岸壁に比べて設計震度を大きく設定することで耐震性を高めた耐震強化岸壁である。構造形式についてみると、被害の程度は栈橋式等の軽い構造物に比べ、ケーソン式、ブロック式等の重量の重い構造物の被害が大きかった。

ポートアイランドのコンテナパース等の大型岸壁の被災形態は、ケーソンが海側に最大5m程度滑動するとともに、最大2m程度の沈下を起こしている。ケーソンが滑動したにも関わらず、岸壁法線自体は概ね直線を保ち、ケーソン本体にもひび割れ発生などの損傷は見られなかったようである。ケーソン式岸壁の被災のメカニズムを検討するために、岸壁の被災状況の整理、大型水中振動台を用いた模型振動実験、有効応力解析による動的解析が実施され、被災原因は以下のように考えられている。

- ①設計で想定した以上の地震時慣性力と土圧が作用したことに加え、ケーソン背後の埋立地盤及びケーソン直下の置換土層の過剰間隙水圧が上昇し、これらのせん断抵抗が低下したことによって生じたと推定される。
- ②埋立地盤及び置換土層のせん断抵抗の低下の影響により、ケーソン式岸壁の変形を、地震動のみの影響による変形の2倍程度まで大きくしたものと推定される。
- ③埋立地盤、置換土層のせん断抵抗の低下がケーソン式岸壁の変形の増加に与えた影響の割合は、おおよそ1：2と推定される。

2.6.2 レベル2地震に対する設計法

(1) 第二次提言と現行設計法の比較

耐震性能の考えとして、「第二次提言」では以下のように記述している。

- ①重要度の高い区間に対して、重点的に耐震性の強化を図ることを基本とする。
- ②レベル1地震動に対して、重要度の高いものについては機能維持と健全性を保持する。その他の一般の区間については、周辺に悪影響を及ぼさない程度の損傷は許容するが、短期間に復旧可能とし、全体的な機能が早期に回復できることを目標とする。
- ③レベル2地震動に対して、重要度の高い区間にあるものについて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生じさせないことを目標とする。

これらの提言の内容を実際に港湾施設を対象にあてはめると、被災地への緊急輸送路の確保を目的とする重要施設（例えば耐震性強化岸壁等）は、レベル2地震動に対して、その初期の機能を維持することを耐震性能の目標とし、その他の一般の区間にあるものについては、周辺に2次災害等の悪影響を及ぼさないことを目的とすることが考えられる。

なお、解説文中には、岸壁の設計では重要度に応じた所定の性能を保持できるレベルに変形・変位が収まるように設計することをすすめている。

液状化に関する検討課題としては「第二次提言」では以下の記述がなされている。

- ①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とするなどの改善を図るべきである。
- ②高密度、低繰り返し回数のもとでの液状化強度を適切に評価できるよう基準等を改訂する必要がある。
- ③均等係数の高い土の静的及び動的変形強度特性についての研究の進展が望まれる。

港湾施設の設計は、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」により震度法にしたがって設計を行っている。また、震災後に通達¹⁾が出され、直下型地震を対象とした設計法（レベル2地震動対応の手法）が示された。

「第二次提言」では、レベル2地震動に対して、港湾施設に以下に示す事項を要求している。

- ①重要施設（耐震強化岸壁）は、初期の機能を維持する。
- ②周辺施設に重大な被害を生じさせない。

「第二次提言」と現行設計法の比較を参考までに表-2.6.1にまとめる。

(2) 第二次提言を受けた設計法の考え方と課題

i) 被害調査、実験及び解析からの考察

ケーソン岸壁の被害は、ケーソン基礎部分の置換砂の影響が大きく、上部²⁾によれば、岸壁のはらみ出し量、天端沈下量及び被災変形率は置換砂の層厚が大きいほど被害は大きい。

すなわち、ケーソン岸壁の被災変状に置換砂が影響を与えたことが推察される。したがって、ケーソン岸壁の設計では置換砂層の厚さを考慮でき、かつ、岸壁の変形を取り込んだ手法の採用が望まれる。

菅野ら³⁾は、1/17 縮尺模型を用いて水中振動台実験を行った。また、井合ら⁴⁾は2次元有効応力解析を実施した。これらの実験、解析からケーソンが捨石マウンドとの境界で直線的に滑る挙動ではなく、ケーソンの変形は置換土層の地震動による軟化に伴うせん断変形が支配的であったことがわかった。

ii) 設計法の考え方

ケーソン岸壁の損傷原因は、置換砂及び背面埋立土層の影響によるものが大きい変形状態をみると、ケーソンがマウンドにめり込み、また、基礎置換砂の変形も大きい。この挙動は、現行設計法での単純なケーソンとマウンドとの境界面における滑動及び地盤支持力の照査では表現できない。これを震度法による設計法（極限釣合法安定解析）の中に取り入れるためには、過剰間隙水圧の上昇度に依存する置換砂層のせん断抵抗力低下の評価をどのように扱うかである。

レベル2地震動を用いた設計を行う場合、一つの考え方として通達で出されている震度法による静的設計法（直下型地震を対象とした耐震強化岸壁の設計法）がある。

設計地震動は、ポートアイランドで観測された実測波形であるため、この手法はレベル2対応と考えられる。しかしながら、この手法は地盤応答解析により求まる最大応答加速度をある換算式により震度に換算したあと、極限釣合法安定解析を行うため、損傷過程に立ち入った手法とはなっていない。

地震時の変形を考慮するためには、周辺地盤との相互作用を考慮する必要がある。この構造物と地盤の動的相互作用は、構造物が大きくなるほど、また、周辺の地盤が軟らかいほどその効果は大きくなるため、設計においてこの考えを導入することが望まれる。

構造物と地盤の動的相互作用の効果を考慮した解析手法としては、①2次元有効応力法、②剛体・地盤ばねモデル、③個別要素法等が考えられる。

(3) 設計実務上の課題の検討

レベル2地震動を考慮した震度法により、設計実務を行う場合の問題点としては、①置換砂上のケーソン岸壁への震度法の適用と具体的な安定性の照査水準の設定、②地盤ひずみが大きくなる地盤での1次元等価線形応答解析の適用、③応答加速度から設計震度への換算、④動的挙動の概念の導入の難しさ、⑤設計された構造物の巨大化等がある。

設計法として震度法を採用するのであれば、実際の地震時挙動に近づけるように構造物に作用する外力が動的解析とどのように異なるかを明らかにしていくことが必要である。

設計で変形を考慮するためには、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⁵⁾。

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、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。

表-2.6.1 第2次提言と現行設計法の比較

	第二次提言	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決定 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 	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良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。	<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。 最大加速度の水兵成分 679 Gal、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。
測方流動	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"> 沖積層又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及び動的変形強度特性についての研究の進展 	判定方法 ・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震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及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硬化の実績、兵庫県南部地震の液状化発生の実状等を参考にする。

地震応答解析の方法としては、有限要素法による FLUSH に代表されるような全応力法と過剰間隙水圧の上昇を考慮した有効応力法がある。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。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、近年、解析精度の向上が図られている。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開発が望まれる。解析に用いるプログラムも広く一般に普及されておらず、また、解析に用いる地盤の非線形性の取扱いも十分に解明されていないこともあり、一般の設計者が上記の手法を用いて設計するためには、今後の研究開発が望まれる。

模型振動実験に関しては、大型振動台、遠心载荷装置の整備が図られ、実現象に近い状況の振動実験が可能となってきている。地震による実被害と実験結果との整合性も図られつつあるが、今後とも種々の港湾構造物の被害と実験結果に関するデータの蓄積が望まれる。栈橋などの杭構造物の設計に関しては、被害状況に関するデータの蓄積、解析手法の精度の向上を図ることにより、今後は杭の損傷過程に立ち入った耐震性能評価の向上が望まれる。

2.6.3 港湾施設の重要度の考え方

(1) 港湾施設の機能別分類

港湾は海陸の接点に位置し、海陸交通を円滑に結びつける機能のほか、生産、生活等の諸機能をもつ複合的な空間として重要な役割を果たしている。この本来の機能に加え、阪神・淡路大地震以後、防災拠点、物流拠点としての必要性が認識され、岸壁から内陸幹線道路までのシステムとしての機能の重要性も検討すべきである。

(2) 重要度の設定

従来、港湾施設の重要度については、設計水平震度を決定する際に重要度係数として採用され、実績を重ねてきた。その中で重要度は施設の機能や震災を受けた場合の人命、環境、財産への影響、地域の経済・社会活動への影響、復旧の難易度等により、特定、A、B、Cに級わけされている。レベル2地震動に対しても基本的には同様な考え方を取り入れることとし、さらに、防災拠点としての連携的役割を担うシステムとしての一連の施設を追加し、それらを最重要な級として位置づけ、その他については、レベル1地震動に対する従来設計における構造物の種別とを対比させて、レベル2地震動に対する施設の重要度階級の設定を検討した。表-2.6.2に各施設のレベル2地震動に対する重要度の考え方を提案として示した。

実際の設計への適用にあたっては、施設の種別や規模の大小のみにとらわれず、施設が被害を受けた場合の影響について詳細な検討を行うことが望ましく、また、許容損傷程度及び耐震性能目標値を決める必要がある。

(3) 許容損傷程度の設定

施設の重要度は、耐震補強の優先順位を決定する要素であるとともに、レベル2地震動に対する設計に適用する場合には、構造物の耐震性能や許容損傷程度を決定する際の基本となる。レベル2地震動に対する設計法が確立されていない段階で、構造物の許容損傷程度を論じるのは難しいが、一応、現時点で考えられる重要度と許容損傷程度及びそれを超えた場合の影響等をまとめて表-2.6.2に示しておいた。これは、あくまで一つの提案であり、今後レベル2地震動に対する設計法及び評価方法の確立を目指して発展させるべきである。

《参考文献》

- 1) 港湾の施設の耐震設計に関わる当面の措置について, 1995年11月17日
- 2) 上部達生, 高野剛光, 松永康男: 兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(神戸港のケーソン式大型岸壁の被災分析), 港湾技研資料, No. 813, PP. 127~146, 1995年9月
- 3) 菅野高弘, 三藤正明, 及川 研: 兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(ケーソン式岸壁の被災に関する模型振動実験), 港湾技研資料, No. 813, PP. 207~252, 1995年9月
- 4) 井合 進, 一井靖二, 森田年一: 兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(ケーソン式岸壁の有効応力解析), 港湾技研資料, No. 813, PP. 253~280, 1995年9月
- 5) 地震対策に関する港湾技術セミナーテキスト, PP. 66, 1996年10月

表-2.6.2 重要度の考え方

種別	レベル1地震動(従来設計)				レベル2地震動に対する評価				重要度階級
	構造物の性格	重要度係数	施設例	二次提言耐震性能	耐震性能目標値	許容損傷程度	許容損傷程度を越えて損傷した場合の影響	修復に費用を要するが市民生活、経済活動等への影響は少ない。修復の緊急性もない。	
C級	特定及びA級以外の小規模な構造物で容易に復旧が可能なもの	0.5	小規模な土留め護岸で背後に重要な施設が無い場合。公園・緑地護岸等	I-2		大規模な土砂流出がなければ、部分的倒壊も可	修復に費用を要するが市民生活、経済活動等への影響は少ない。修復の緊急性もない。	C	
B級	特定、A、C級以外のもの	1.0	小規模な係留施設、物揚場、小型船係留施設、マリナー施設(中規模護岸(背後に重要施設がない)) 小中規模防波堤	I-2	II-3	水平移動などの変形により船舶接岸不能でも可 護岸は水平蛇行変形及び一部転倒は可 防波堤も同上	機能が停止し、修復に費用、期間を要するが、人命、環境及び経済活動に重大な影響はない。	B	
A級	①構造物が被害を受けた場合、多くの人命・財産の損失を与える恐れのあるもの ②震災復興に重要な役割を果たすもの ③有害物又は危険物を取り扱う構造物で、被害を受けた場合に人命又は財産に重大な損失を与える恐れのあるもの ④構造物が被害を受けた場合、関係地域の経済・社会活動に重大な影響を及ぼすもの。 ⑤構造物が被害を受けた場合、復旧にかなりの困難が予想されるもの	1.2	大規模埋立護岸	I-1	II-2	通常の埋立護岸はある程度の水平移動は可 大規模な土砂の流出は不可 ・水平移動等の変形により船舶接岸不能となつても、若干の補修により機能を維持できる程度 ・重力式の場合、転倒・地盤破壊は不可 ・杭、矢板の部材応力は局部的に降伏状態になつても可 管理型廃棄物の汚水の漏出を、短時間で阻止できる程度の変形は可	人命・環境・直接的な影響は少ないが、二次災害の恐れがある。 直接的な影響は少ないが、二次的な影響がある。	A2	
			水深7.5m以上の係留施設、フェリー及びびコンテナ船岸壁、危険物取り扱い岸壁、固定式・軌条式クレーンのある岸壁	I-1	II-2	短期間で補修・機能回復出来る程度の変形は可 護岸と構脚では初期機能を保持する変形量が異なるため、最終的には構脚基礎等背後構造物自体で対処することが望ましいが、困難な場合には、背後構造物に大きな影響を与えない変形量とする。	人命・環境には影響が少ないが、機能が停止するため一時的に経済活動市民生活への影響がある。		
			廃棄物埋め立て護岸	I-1	II-2	短期間で補修・機能回復出来る程度の変形は可	環境汚染への影響が大きい。		
			防波堤、親水護岸	I-1	II-2	短期間で補修・機能回復出来る程度の変形は可	人命・環境への影響は少ないが補修が長引くと二次災害の恐れがある。		
			背後に構脚等の重要構造物のある護岸	I-1	II-2	短期間で補修・機能回復出来る程度の変形は可 護岸と構脚では初期機能を保持する変形量が異なるため、最終的には構脚基礎等背後構造物自体で対処することが望ましいが、困難な場合には、背後構造物に大きな影響を与えない変形量とする。	背後構造物が独立した耐震性能を維持できれば問題は無い。一体的に計画されている場合は重大な影響がある。		
特定	A級構造物の性格の内①～③の程度が著しいもの	1.5	耐震強化岸壁 耐震強化岸壁 背後荷捌地 荷役機棟 上屋、ターミナルビル等 緑地・広場・公園等 臨港道路	I-1	II-1	初期の機能(船舶の接岸、荷役等)を維持できる程度の軽微な変形までとする。 補修なしで接岸可能 重車両の通行可能な平坦性及び舗装構造の保持 荷役機棟が稼働可能な軽微なII-1損傷 災害対策本部、医療施設として多くの人々が安全に使用できること 一部、緊急物資や重機等の集積が可能で平坦性の保持(液状化防止)。 但し、避難用地等はその後、重機で補修して広げることが可能。 岸壁から内陸幹線道路までの車両走行が可能で平坦性及び舗装構造の保持、液状化防止。	機能が停止すれば経済への影響は大きい。救急活動も停止。 一部でも損傷すれば救急活動及び経済活動に重大な影響がある。 (防災拠点としての機能が著しく損なわれる。)	特定	
なし	防災拠点としての連続的役割	なし		II-1				特定	

2.7 地盤および土構造物

2.7.1 盛土の被害と対策

(1) 盛土の被災形態と原因

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。被害の形態は盛土の崩壊・不同沈下、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。一部では基礎地盤が緩い箇所での被災もみられたが、大規模な盛土流出は少なかった。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全体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。また、宅地地盤の締め固めが充分でない盛土部における沈下や擁壁の損傷がみられた。

(2) 盛土の被災事例

道路や鉄道の盛土ではRC構造物の破壊や擁壁倒壊に比較して被害が小さく、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ので、耐震性を過度に向上させる必要はない。

(3) 盛土の対策の考え方

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。

さらに、レベル2地震動による土構造物の損傷の可能性と、それによる一時的なリスク増大については、情報を公開して社会的認知を得ることも必要と考えられる。

2.7.2 レベル2地震動に対する耐震設計手法

(1) 現行の耐震設計手法

現行の土構造物の設計方法には補足的に耐震計算法が示されているものもあるが、基本的には耐震設計を行うことは義務付けられてはいない。

「道路盛土」、「鉄道盛土」、「宅造地盤」に関する関連規定においては、耐震設計は地盤・地形条件や重要度などを考慮して、必要な場合に行うことが示されているが、その方法は震度法によるものである。用いる設計震度は、他の構造物の許容応力度法に対応するレベルの値（レベル1）

であり、より大きなレベル2地震動を想定した手法は示されていない。

土構造物において、耐震設計が必要な場合の条件をまとめると次のようになる。

①地盤・地形条件

- ・液状化が生じる可能性のある砂地盤
- ・特に軟弱で地震時に著しい変状を生じる恐れのある粘性土地盤
- ・基盤や地形（山）が傾斜している地盤上の盛土

②構造物の条件

- ・復旧が困難で道路交通に大きい影響を与える区間
- ・隣接する重要構造物に二次的な被害を与える区間
- ・重要度が高いと考えられる擁壁
- ・高い盛土及び擁壁

(2) 地盤・土構造物に対する「第二次提言」の内容

「第二次提言」においてレベル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事に関しては、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）したり崩壊し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については、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、流動や崩壊が起こらなければ、要求は満足できると考えられる。

「第二次提言」では、対象区間の重要度分類を行い、重要度の高い区間についてのみ、耐震設計の必要性を説いていると解釈される。その意味では、レベル1地震動に対しては、現行の耐震設計手法でも対処可能であると考えられる。しかし、現行の設計基準では、構造物の重要度の分類と重要度を判定するための方法が明示されていないので、その検討が今後、必要になると考えられる。

現行の設計基準類には、レベル2地震動に対する耐震設計手法が示されているものはない。しかし、この場合もレベル1地震動と同様、耐震性を保持すべき重要度の高い区間の定義が問題になってくるので、このような区間がどの程度あるのかを事前に十分に検討した上で、耐震設計法を考えるべきである。土構造物の場合には、他種構造物に比べて、レベル2地震動に対して耐震性能を保

持しなければならない構造物・区間が少ないと考えられるので、そのような区間の検討が必要となった場合には、個別の解析を行うことによって対処が可能であると思われる。

(3) 土構造物の耐震技術の現状

地震時における円弧すべり法による盛土や堤防などの安定計算手法は基本的には常時の安定計算手法と同じである。常時か地震時かの違いはこの時に作用する力が重力に起因する自重のみか、さらに地震動の慣性力を静的な荷重に置き換えた力が加わるかの差のみである。従って、地震の影響を静的荷重に置き換える震度法による地震時の安定解析手法は常時の安定計算法を少し拡張することによって容易に導かれる。

また、通常行われている斜面安定解析の中に過剰間隙水圧を考慮する方法が最近よく用いられるようになってきている。

震度法によって得られる安全率の値は土の強度と震度に大きく依存しているので、この二つの量を正しく評価して安定解析を行っているかどうか重要な問題となる。強度については通常、静的強度をそのまま用いることが多いが、動的載荷条件を考慮した土の強度を正しく評価する必要がある。設計震度としては慣用的に0.1~0.2程度の値が用いられているが、これは上部構造の設計震度との整合性を図った結果ではないかと思われる。

地盤や土構造物は、常時における安全率(1.2~1.5)がそもそも小さいので少し大きな震度を作用させると安全率は簡単に1.0を割ってしまう。しかし、このように計算上安全率が1.0を割るような場合でもほとんど無被害という例も多い一方で、計算上かなり大きな安全率を有している場合でも実際の地震の際に崩壊している例も少なくない。これは、地震力によって土の強度が低下してくる効果を考慮に入れていないことが原因の一つと考えられる。

このように最近の解析法も含めて既存の安全解析法ものつ問題点は、イ) 時間的に変化する地震外力を静的荷重に置き換える場合に、土構造物の振動特性が必ずしも適切に考慮されていないこと、ロ) 地震時の繰返し応力による土の強度すなわち動的強度を考える必要があること、の2点に集約できる。

震度法による慣用的な手法に対して1970年代になってからより地震被害に対応した動的強度を用いる安定性検討が試みられるようになってきた。さらにコンピュータ技術の進歩に伴って、盛土を弾性体(または粘弾性体、弾塑性体)とみなし、地震応答解析結果を用いて安定性を検討する詳細な手法がおこなわれてきつつある。また、地震後に残留する沈下や水平変位量などの変形を予測する方法は、最近行われてきつつあるが、まだ確立された方法はない。

土構造物の耐震診断を行なう方法も、従来の震度法を用いた円弧すべり解析と地震時残留変形予測の2つの方法を組み合わせたものになる。この方法には現状では多くの問題点と課題があり、実用化したものは少ないが、鉄道盛土では沈下と安定を考慮し、沈下量算定モノグラムを用いた簡易な手法を採用している。また、土構造物の耐震補強技術はすべり安全率確保のための多めの地盤強化と地震時残留変形量を低減する技術を必要とする。盛土については地震時沈下に対する側方流動防止工の模型実験などに基づく対策工の施工例もある。

(4) レベル2地震動に対する土構造物の耐震設計の考え方

土構造物の地震時安定性検討で用いられる設計震度は、他の構造物に比べて一般に小さく、他の構造物に比べて1/2程度の設計震度で安定性の検討を行っている場合が多い。この理由は、土構造物の地震時安定解析において、他の構造物と同じレベルの設計震度を用いると、安全率が許容値を下まわる場合が多いこと、既往の地震で設計震度を上まわる地震動を受けても甚大な被害が生じていない盛土も多いこと等から、このような設計法が取り入れられたと考えられる。土構造物は他の構造物、材料に比べて強度は小さいが、液状化のように急激に強度を失う現象を除くと、破壊状態を定義づけるのが非常に難しく、大きな地震動に対してもある程度の粘りを発揮する構造物、材料といえる。

レベル2相当の大きな地震動を考慮した設計法を考える場合に、このような土構造物あるいは土特有の性質を考慮しなければ、設計不能になるか、むやみに過大な設計を余儀なくされてしまう恐れがある。従って、現行設計法に取り入れられている震度法をそのまま適用することは妥当ではない。

「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方が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-2.7.1 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がある地形・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。

(5) 設計実務を行う場合の問題点と課題

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。

2.7.3 液状化の判定法と対策の考え方

(1) 地盤の液状化に関する現行の指針・基準類

現在、液状化判定方法が示されている各種設計基準・指針類はほとんどの構造物に及んでいるが、設計基準類が制定または改定された年や対象とする構造物の種類によって液状化判定方法は少しずつ異なっている。これらの違いは、判定方法が検討された時代の液状化に関する技術レベルや構造物の液状化に対する余裕度（構造物の堅固さや復旧の容易さ、想定する地震力など）に起因していると考えられる。

液状化判定法は限界N値法と F_L 法に大別されるが、最近の判定方法は F_L 法を採用しているものも多い。両手法の違いは判定に用いる地震力が明示されているかどうかである。 F_L 法は、地域や地盤条件に応じた地震力を設定して液状化判定を行うことができる。一方、限界N値法で考慮する地震力の大きさは既往の被害地震（例えば新潟地震）で推定または観測された地震動の強さをもとに設定されたものである。従って F_L 法のように地域や地盤の違いに応じて地震力を変えることはできない。

液状化強度の推定は、 F_L 法や限界N値法に拘わらず、どの基準もN値を用いて算定することを基本としている。しかし対象土の粒度特性によっても液状化の強度が異なってくるので、現在の基準ではN値と粒度組成の両方から液状化強度（ F_L 法）または限界N値を設定することになっている。

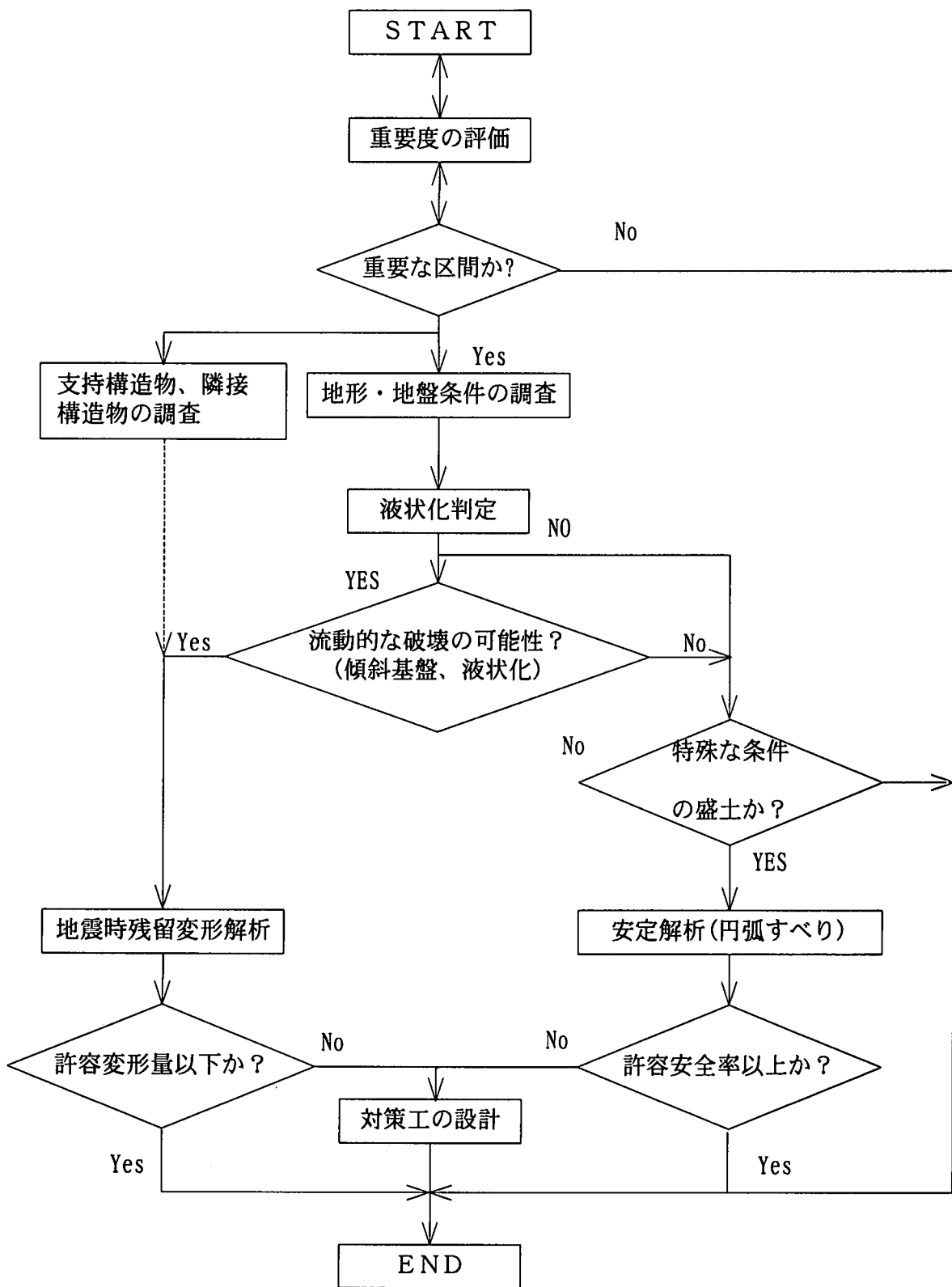


図-2.7.1 レベル2地震動を考慮した土構造物の耐震設計フロー(案)

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。

(2) 液状化判定法の現状

現在用いられている液状化の予測方法を分類すると、次のようになる。

- ①地形・地質や液状化履歴をもとにした概略の予測方法
- ②一般の土質調査・試験結果をもとにした簡易な予測方法
- ③室内液状化試験や地震応答解析を行う詳細な予測方法
- ④模型振動台実験や現場振動実験による特殊な予測手法

①～④の各方法は、調査目的、調査段階、構造物の種類や重要度に応じて使い分けられるが、一般的には、特定の構造物を対象にした指針・基準は、②の方法が多く用いられており、特に詳細な検討を要する場合には、③の方法を併用することが提案されている。また、④については特殊な構造物や地盤等に適用される。

液状化判定に用いる最大加速度または設計震度は、平成8年12月に刊行された「道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編」および「限界状態設計法による基礎構造設計指針(案)」(平成5年10月、(財)鉄道総合技術研究所)を除き、すべてレベル1地震動相当のものである。

(3) 液状化対策の現状

現在提案されている液状化対策はその方法により次の2つに大別される。

- ①地盤の締め固めや固定などにより液状化の発生を防止したりドレーンを設けて液状化の悪影響を防ぐ方法
- ②地盤が液状化しても構造物が安全のように設計する方法

①の液状化防止対策は、以下に示す液状化発生のための3つの条件の一つ以上を取り除くことを対策の原理としている。

(a) 砂質土であること、(b) ゆるく堆積していること(N値が低い)、(c) 水で飽和していること(地下水位以下にあること)。

①のためにとられる方策が地盤改良やドレーンであり、対策工法の種類に応じて対策の仕様に関する設計方法が確立されてきている。

ただし、改良範囲については、いくらかは提案されてはいるものの設計方法として確立されるに到っていないのが現状である。

また、②のためにとられ方策が地盤の液状化を考慮した基礎構造の設計であり、道路橋示方書・同解説や建築基礎構造設計指針などに導入されている。さらに、①、②を組み合わせることで信頼性を高く、経済的な方策も提案されている。

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。

(4) 今後の液状化判定方法と課題

「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、線状地中構造物の場合には、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は、図-2.7.2に示す手順で行うことが適当であると考えられる。

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、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。

レベル1地震動と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、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が、研究の歴史が新しく、また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、

- 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

の2点が挙げられる。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。

なお、上述したレベル2地震動に対する液状化判定方法と地盤流動が構造物基礎に及ぼす影響については、平成8年12月に刊行された「道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編」に具体の規定が我が国で初めて示されることになった。その中では上述した課題について、建設省土木研究所での最近の研究成果をもとにした見解がまとめられているので参考にされたい。

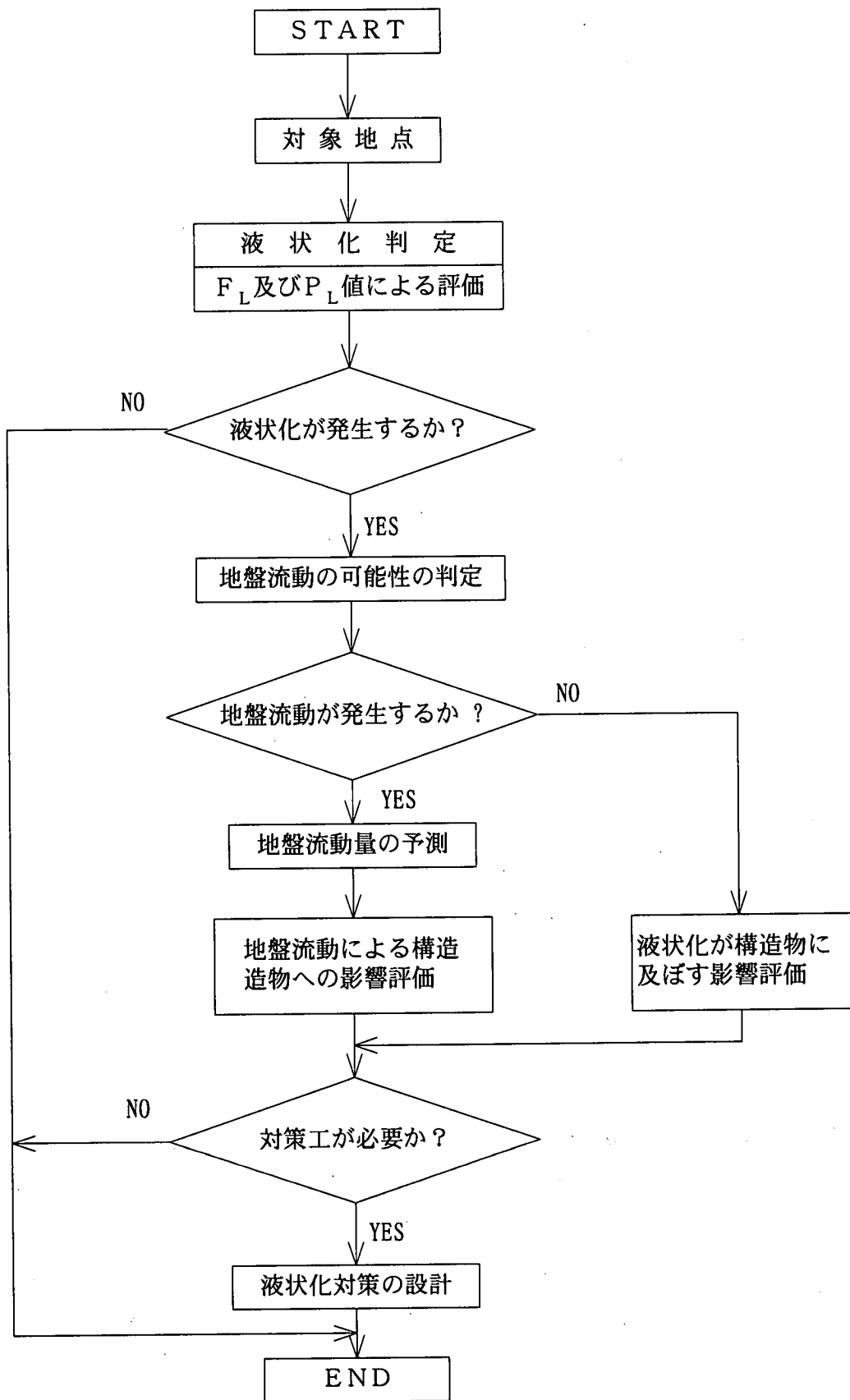


図-2.7.2 レベル2地震動を考慮した液状化の判定・評価フローチャート

2.7.4 地盤・土構造物における重要度の考え方

(1) 現行設計基準類における重要度の考え方

これらに示された考え方をまとめると次のようになる。

- ①交通や沿道諸施設に大きな影響を与える区間（道路盛土など）
- ②復旧が困難な区間
- ③隣接する「重要構造物」に二次的な被害を与える区間
- ④重要な目的を持つ路線に関わるもの

しかし、これらの重要度を客観的に評価する方法や考え方については、他の構造物の重要度も含めて明確に示されていない。

(2) 許容される被害と重要度関係

許容される被害と重要度の関係について、「第二次提言」では「人命・生存に与える影響」、「二次災害防止活動に与える影響」、「生活機能と経済機能に与える影響」を考慮することとし、重要度の高い区間について要求される耐震性能を次のように示している。

<レベル1地震動>

- ①構造物自体の機能を維持する
- ②地震後も当初の設計条件を保持する

<レベル2地震動>

- ①それらが支持する構造物や周辺の施設に重大な被害を生じさせない
 - ②ただし、被災地への緊急輸送路の確保を目的とする重要施設については所期の機能を維持する
- しかし、現行の設計では2段階設計法の考え方はなく、許容される被災程度について明確に示したものはない。したがってレベル2地震動を考慮した場合の重要度の考え方や該当する耐震対策について述べたものはない。

(3) 地震動レベルを考慮した重要度の考え方

「第二次提言」では、盛土などの土構造物は延長が長い、ある程度の損傷に対しては復旧が容易なので、全延長にわたって高い耐震性をもたせる必要はなく、重要度の高い区間に対して重点的に耐震性を強化することとしている。盛土などの土構造物は、大きく流動したり完全に崩壊（倒壊）したりするような状態にならない限り、周辺の諸施設への重大な被害や二次災害を引き起こすことはないと考えられる。土構造物は一般的には耐震設計を行わないが、基礎地盤が液状化することが予想される場合などには地震時の安全性を検討することになっている。したがって重要度を判定する方法が明確になれば、レベル1地震動に対して要求されている耐震性能に対しては現行の耐震設計手法で対処が可能であると考えられる。

しかしレベル2地震動に対しては、地域全体に発生している被害の状況を考慮した場合、構造物の重要性は平常時やレベル1地震動時とは異なるものとなり、対象となる構造物と確保すべき機能

は次のようなものとなる。

①人命確保のため損傷を許す度合が厳しく限られるもの

→高速走行鉄道の盛土など

→道路や家屋に隣接した土留壁など

②損傷（一時的機能の喪失）を許すが、容易な復旧が可能であるもの

→緊急輸送路（緊急啓開道路など）

③海拔0m地帯の河川堤防で堤体の変状により堤内地の広い範囲に浸水を生じさせる可能性の高い場合

このような構造物の耐震性能を判定するためには、土構造物の地震時残留変形についての解析が必要になると考えられる。この手法については、河川堤防の耐震点検マニュアルに示された沈下量の予測手法のような簡易な手法のほか、変形に影響をおよぼす土のダイレタンシー、初期せん断応力、剛性低下、圧密などのパラメータを組み合わせる解析を行なう方法が最近では試みられているがまだ確立された手法となっていない。

(4) 重要度別の耐震対策

地震動レベルを考慮した重要度の考え方について現在のところ明確な方向性は明らかにされていないが、道路などの耐震性の水準は、路線の重要度と復旧の難易度とを組み合わせ、決定されるものと予想されるので、このような考え方に適合した設計概念を確立する必要がある。

技術者はレベル2地震動においても機能を厳密に確保しなければならないような構造物に対する変形予測手法に関して必要性に応じた各手法とその精度について習熟する必要があると考えられる。

また、早期に復旧する必要がある土構造物については、あらかじめ損傷を前提とし、立地条件から考えられる二次災害の程度と容易な復旧工法を考慮した設計を提示できる技量が必要になると考えられる。

《参考文献》

- 1) 道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編，平成8年12月
- 2) 限界状態設計法による基礎構造設計指針(案)，平成5年10月，(財)鉄道総合技術研究所