

7 章 コンクリート構造物の限界状態と耐震性能

7.1 構造物の性能—損傷度—限界状態の関係

- (1) 鉄筋コンクリート構造物の非線形域の動的挙動特性及び限界状態を明らかにするとともに、限界状態を評価可能な数値モデルを確立する必要がある。
- (2) 動的挙動特性や限界状態を明らかにする上では、まず橋脚や桁あるいは壁構造といった部材単位ごとに評価し、さらに構造物全体としての評価を進める必要がある。
- (3) 鉄筋コンクリート構造部材および構造全体系の、最大耐力点までの弾塑性復元力特性や地震時の弾塑性動的挙動については、現有の解析技術である程度対応可能であるが、ポストピークの挙動については、部材の復元力特性や全体系の応答特性については解析的に追求不可能な要素が多くあり、実験的成果に期待する必要がある。
- (4) 鉄筋コンクリート構造物全体系としての非線形域の動的挙動特性及び限界状態ならびに破壊過程を明らかにするためには、特に大型動的実験装置を用いた実験的研究の蓄積が必要である。
- (5) 耐力、変形性能を合理的に向上させることが可能な新しい配筋方法、新しい合成構造、新材料の活用方策などを開発する必要がある。

耐震設計は、一般に、外力（地震動）の設定、構造物の応答値の推定、構造物に対する要求耐震性能水準を満足しているかどうかを照査することで行われる。ここで、構造物の応答値を推定するためには、構造物の非線形挙動特性を把握する必要がある。また、耐震性能を照査するためには、限界状態を明らかにする事が最も基本となる。

各種の構造要素について、要求される耐震性能を満足できる損傷の程度、および損傷度を力学的に想定できる限界状態について述べれば、以下のようなものである。

A. 柱、橋脚、はり

(1) 要求される性能を満足できる損傷の程度

- a) 耐震性能 を限度とする損傷：降伏変位に達しない。そのままでも再使用が可能。
 - ・主鉄筋は降伏ひずみに達しない
 - ・曲げひび割れの発生
 - ・斜めひび割れは発生しない
- b) 耐震性能 を限度とする損傷：残留変位が許容値以内。補修により再使用が可能。
 - ・主鉄筋は降伏ひずみを超える
 - ・曲げおよび斜めひび割れの発生
 - ・かぶりコンクリートの剥落
 - ・圧縮部コンクリートの微小な圧壊
- c) 耐震性能 を限度とする損傷：構造物の崩壊だけは免れる損傷（主鉄筋およびフープ筋の破断を防ぐ）。再使用は考えない。
 - ・主鉄筋の座屈

- ・コアコンクリートの圧壊

d) 許容されない損傷：構造物の崩壊につながる損傷

- ・主鉄筋の破断
- ・主鉄筋の座屈 + 圧縮部コンクリートの圧壊 + フープ筋の破断
- ・せん断破壊（特に，鉛直部材，橋脚）
- ・かぶりコンクリートの剥落 + フープ筋の破断

（２）損傷度を力学的に想定できる限界状態

- a) 耐震性能 を限度とする損傷：降伏変位に達しない．
- ・曲げ降伏耐力の算定は簡易法でも十分可能
 - ・せん断耐力の算定はほぼ可能で，せん断破壊を防止することも可能
- b) 耐震性能 を限度とする損傷：残留変位が許容値以内．
- ・高度な FEM 解析を用いればほぼ可能（材料の構成則）
- c) 耐震性能 を限度とする損傷：構造物の崩壊だけは免れる損傷
- ・ポストピーク挙動が扱えない現在の解析技術では，算定は不可
 - ・模型実験により推定することは可能（寸法効果を考慮）

B. 壁構造

（１）要求される性能を満足できる損傷の程度

- a) 耐震性能 を限度とする損傷：降伏変位に達しない．そのままでも再使用が可能．
- ・主鉄筋は降伏ひずみに達しない
 - ・曲げひび割れの発生
 - ・斜めひび割れは発生しない
- b) 耐震性能 を限度とする損傷：残留変位が許容値以内．補修により再使用が可能．
- ・主鉄筋は降伏ひずみを超える
 - ・曲げおよび斜めひび割れの発生
 - ・かぶりコンクリートの剥落
 - ・圧縮部コンクリートの微小な圧壊
- ＊ ＊ 壁構造の場合には，耐震性能 の損傷でも，残留変位は極めて小さい．
- c) 耐震性能 を限度とする損傷：構造物の崩壊だけは免れる損傷（主鉄筋およびフープ筋の破断を防ぐ）．再使用は考えない．
- ＊ ＊ 壁構造では，ねばりのある破壊は望めない．
- d) 許容されない損傷：構造物の崩壊につながる損傷
- ・せん断破壊

（２）損傷度を力学的に想定できる限界状態

- a) 耐震性能 を限度とする損傷：降伏変位に達しない．
- b) 耐震性能 を限度とする損傷：残留変位が許容値以内．

- ・ FEM 解析により，耐震性能 の損傷レベルでは，降伏耐力，最大耐力の算定はほぼ可能
- ・ せん断耐力もほぼ算定可能

C. シェル要素

- 耐震性能 を限度とする損傷：降伏変位に達しない．そのままでも再使用が可能．
 - ・ 要素内の主鉄筋は降伏ひずみに達しない
 - ・ 要素に面外曲げひび割れの発生
 - ・ 要素に斜めひび割れは発生しない
 - 耐震性能 を限度とする損傷：残留変位が許容値以内．補修により再使用が可能．
 - ・ 主鉄筋は降伏ひずみを超える
 - ・ 曲げおよび斜めひび割れの発生
 - 耐震性能 を限度とする損傷：要素の崩壊だけは免れる損傷．再使用は考えない．
 - 許容されない損傷：
 - ・ 圧壊
 - ・ せん断破壊
- ＊ ＊シェル要素が崩壊しても，全体構造は必ずしも崩壊しない．

(2) 損傷度を力学的に想定できる限界状態

- 耐震性能 を限度とする損傷：降伏変位に達しない．
- 耐震性能 を限度とする損傷：残留変位が許容値以内．
 - ・ FEM 解析により，シェル要素の降伏耐力，最大耐力およびせん断耐力，および構造体の荷重—変位および最大耐力は，ほぼ算定可能

D. 地上構造物

(1) 要求される性能を満足できる損傷の程度

構成部材のレベルにおいては，「A. 柱，橋脚，はり」および「B. 壁構造」との複合状態．

構造物としては，

- 耐震性能 を限度とする損傷：どの部材も降伏しない．そのままでも再使用が可能．
- 耐震性能 を限度とする損傷：構造全体の残留変位は許容値以内．補修により再使用が可能
 - ・ 部材もせん断破壊しない．
- 耐震性能 を限度とする損傷：崩壊メカニズムに達していない．再使用は考えない．

d) 許容されない損傷：崩壊メカニズムに達して，崩壊

(2) 損傷度を力学的に想定できる限界状態

- a) 耐震性能 を限度とする損傷：降伏変位に達しない．
- b) 耐震性能 を限度とする損傷：残留変位が許容値以内．
 - ・ FEM 解析により，荷重—変位関係は算定可能．
- c) 耐震性能 を限度とする損傷：
 - ・ 解析法の開発中．現在の解析技術からすれば，メカニズムに達していないことを算定するのは可能と思われる．

E. 地中構造物

(1) 要求される性能を満足できる損傷の程度

基本的には，地上構造物と同じである．

- a) 耐震性能 を限度とする損傷：どの部材も降伏しない．そのまま再使用が可能．
- b) 耐震性能 を限度とする損傷：構造全体の残留変位は許容値以内．補修により再使用が可能
 - ・ どの部材もせん断破壊しない．
- c) 耐震性能 を限度とする損傷：メカニズムに達していない．再使用は考えない．
- d) 許容されない損傷：メカニズムに達して，崩壊．

(2) 損傷度を力学的に想定できる限界状態

コンクリート構造物については，地上構造物と同じであるが，地中構造物の場合，周辺地盤の変形との相互作用を考慮しなければならない．地盤とコンクリート構造物との接触部分のモデル化およびその信頼度が問題となっている．現在，LNG 地下タンク等での研究開発により，耐震性能 ， を限度とする損傷レベルまでは解析が可能となりつつある．

コンクリート系複合構造物

鋼とコンクリートとの複合構造が主体であるが，弾性域を超えたレベルでの，鋼とコンクリートとの力の伝達メカニズム，特に，荷重の繰返し下における挙動に関する研究が更に必要である．

対象構造物

(合成構造)

- ・ 型鋼等をコンクリート中に埋め込んだ形式
- ・ 鋼管(丸型，角型)にコンクリートを充填した形式
- ・ サンドイッチ形式

(複合構造)

- ・ RC + 鋼構造
- ・ RC+PC

耐震性能の照査法

- 1) クラス 1 の照査法：構造物を適切にモデル化し，高度な FEM 解析により，所要の入力地震動に対する応答挙動を追跡する．その結果がそのまま照査になる．
- 2) クラス 2 の照査法：地震動を応答スペクトルで静的外力に置き換え（地上構造物，地中構造物）たり，応答変位に置き換え（地中構造物）る．一方，構造物・部材の耐荷性状を，静的なレベルで，剛性，降伏耐力，最大耐力および靱性率という観点で，解析あるいは模型実験等で算定し，外的作用と比較する．

構造物の耐震性能の照査に関しては，1 回の地震についてだけでなく，構造物の供用期間中について総合的に検討することが必要となる．そのためには，維持管理方法を念頭に置いた上で，(1) 供用期間中に発生する地震の規模と回数，(2) 使用材料の経時変化，(3) 構造物における損傷の累積，等を適切に評価する手法の開発が求められる．

7.2 動的応答の評価法

- (1) 動的応答の解析手法は，地震動の表現形式や構造物の耐震性能に応じて設定し，剛性・質量分布・減衰性能を適切にモデル化する必要がある．
- (2) 前述の耐震性能 を評価する場合には，線形応答解析を行えばよい．
 - ・線形応答解析法としては，一般にモーダル法解析を用い，構造物の特性や解析目的に応じて，応答スペクトル法または時刻歴応答法を選択する．
 - ・耐震性能 は，材料の応力度が設計強度以下であること及び応答変位が許容変位以下であることを照査する．
- (3) 耐震性能 を評価するには，非線形性応答を考慮した解析法が必要である．
 - ・非線形応答を考慮した解析法としては，時刻歴弾塑性応答解析・等価線形応答解析・地震時保有耐力法（設計塑性率に基づく所要降伏加速度スペクトルを用いた解析法）などがある．
 - ・弾塑性応答解析では，部材の最大応答変形が許容変形以内であること，設計上降伏を想定していない部材・構造要素及び断面力が降伏していないこと，残留変形が許容値内であることなどを照査する．
- (4) 動的解析に当たっては，基礎—地盤系の相互作用の影響を考慮する必要がある．特に，周期の短い構造物の地震応答は，基礎—地盤系の非線形領域の動的相互作用の影響を大きく受けるた

め、これを設計に取り入れる必要がある。

- (5) 地中構造物は、慣性力だけでなく、周辺地盤の地震時変形の影響を考慮して、動的応答を評価する必要がある。このためには、地盤と地中構造物を含む FEM モデルによる動的解析法または静的解析法（応答震度法）および地盤の地震時変位を構造物・地盤バネ系モデルに作用させる方法（応答変位法）などがある。

- (1) 構造物の耐震設計は、構成部材・材料の釣り合い・変形適合条件及び構成則を 3 次元的に考慮した動的非線形応答解析によるのが理想的であるが、現実的にはこれらの一部を簡略化したものを設計に用いることになる。ただし、動的応答の効果を考慮することは必須条件であり、現段階で各種構造物の設計実務に適用しやすい動的解析法を検討するとともに、実際の地震時挙動をより正確に予測しうる動的解析法を研究・開発する必要がある。現在、地上構造物の動的解析としては、骨組みモデルによる時刻歴弾塑性解析が多く使われているが、この場合にも、モデルの設定法や除荷時を含む材料の非線形特性・減衰特性・数値積分法等を十分に検討した上で解析を行わなければならない。

- (2) 線形応答解析としては、モーダル法を用いることが一般的であるが、減衰による直交条件が成立しない場合には、複素応答法や直接積分法が用いられる。

伸縮継手部における相対変位や隣接構造物の衝突の有無、車両の安全性を検討する場合には変位振幅や周波数特性を調査する。

- (3) 非線形応答を考慮した解析では、以下の事項について照査する。

- ・部材の曲げ変形応答値と限界値
（部材の変位塑性率、塑性ヒンジ部の回転角、構成材料のひずみ）
- ・部材のせん断力とせん断耐力
- ・塑性化を想定していない部材（例えば上部構造や基礎構造）への作用力と部材耐力
- ・構造物或いは部材の残留変位
- ・変位（隣接構造との衝突の有無、構造物落下防止のためのかけ違い長、継手部の許容相対変位と回転角）

また、非線形応答解析結果の評価にあたっては、最大応答値のみでなく、変位・加速度・断面力の時刻歴波形や最大応答値分布、非線形材料モデルの応答履歴を出力し、解析モデルの特性や不備の有無或いは数値計算上の安定性を照査するのが望ましい。

なお、動的解析によって耐震設計を行う場合でも、地震動の設定や構造物のモデル化には現段階では不確定の要因が多いので、構造物の耐力が過度に小さくならないように、非線形静的解析を行って構造物全体の耐力や変形性能を検討し、降伏水平震度を把握しておくことが望ましい。

- (4) 基礎—地盤系の相互作用を考慮するための最も簡便な手法は、地盤をバネにモデル化して、全体構造系の長周期化と減衰定数の増大の影響をモデルに取り入れることである。しかしながら、特にレベル 2 地震動を対象とする場合は、バネの非線形剛性や減衰・有効入力地震動など検討

すべき課題は多い。

- (5) 地中構造物では、慣性力の影響より、地震時に周辺地盤が変形し、その地盤変形により構造物が強制変形させられることの影響が大きい。したがって、地中構造物の耐震設計においては、地盤の変形を正確に把握することが重要であり、構造物以外に、地盤の非線形特性（剛性、履歴特性）も良く調査した上で、動的解析を行う必要がある。また、地中構造物では、地上構造物以外にその変形性能が重要になるが、損傷した場合の機能回復には問題があるので、限界状態や照査法を十分に検討した上で設定する必要がある。

7.3 耐震診断および耐震補強

7.3.1 耐震診断

- (1) 耐震診断については、建設年代、準拠基準、概略の構造物特性や地盤条件などによる簡便な1次診断の後、耐震補強を必要とする場合については、耐震性能の詳細検討のための2次診断を行う必要がある。
- (2) 2次診断に当たっては、耐震基準の最新版で定められた設計地震動、地震応答評価のための解析モデル、目標耐震性能レベルを用いることを標準とするのが良い。
- (3) 既設構造物の耐震診断に当たっては、新設構造物の耐震設計で必要とされる調査項目に加え、使用条件の変化、増改築、周辺環境の変化、変状と劣化など影響を考慮する必要がある。

- (1) 既設構造物の耐震診断は、新設構造物の耐震設計と基本的に同様の考え方でこれを行って新設構造物と同等の耐震性能を確保することを原則とした。耐震診断の対象となる既設構造物の数は一般に多く、各構造物に対して新設構造物の耐震設計と同じ手順で検討することは必ずしも合理的でなくかつ経済的でない。そこで、解析モデルに簡易モデルを、照査方法に簡易法を用いて良いこととした。

レベル2の設計地震動に対する耐震性能については、構造物の崩壊に対する限界状態を確保することは最低限必要である。耐震性能を新設と同等に引き上げることが施工上または経済上困難な場合が考えられる。このような場合には、構造物の重要度を十分勘案したうえで、地震後の早期復旧体制や機能の代替性の整備などによるソフト面の対策を講じる必要がある。また、撤去・新設も視野に入れた検討も必要である。

構造物の建設年代や準拠した設計基準によって構造物の大略の耐震性能が決まるので、これに関わる資料を耐震基準類に掲載することを原則とした。

耐震診断は経済性を考えて1次診断と2次診断に分けて行うことを推奨した。1次診断においては建設年代、準拠基準、概略の構造特性および地盤条件等により、耐震補強を必要とする構造物および2次診断による耐震性能の詳細検討を必要とする構造物を抽出する。2次診断では1次診断により詳細検討が必要と判断された構造物を対象に、設計図書、地盤条件をもとに

設計地震動に対して所要の耐震性能を有しているかどうかを診断し、補強を必要とする構造物を抽出する。

- (2) 既設構造物では建設後に使用条件が変わったり、増改築が行われたり、あるいは直近に異種構造物が構築されるなど周辺の環境が著しく変化していることがある。そのような構造物は、設計図書だけで耐震診断を行うことはできず、構造特性の現況を考慮した耐震診断を行う必要がある。また変状が生じたり劣化した構造物は、新設構造物における耐震設計法の考え方だけでは誤った判断を下す恐れがある。変状による発生応力やこれに起因する破壊モードと耐力の変化、劣化に伴う材料強度や鉄筋とコンクリート間の付着強度の低下を考慮して耐震診断を行うことが必要となる。
- (3) 実構造物では一般に設計用値よりかなり大きい強度の材料が用いられることが少なくないことから、実際の特性値と設計における特性値の相違を耐震診断において考慮して良いこととした。ただし基準類によっては、新設構造物の耐震設計における破壊モードの判定やじん性率の算定において、材料強度の実際と設計用値の相違を考慮したものもある。したがってこの規定は、耐震基準類の基本的な考え方を十分理解して適用しなければならない。

この規定は耐震補強に要する費用が高額でかつ計算上のわずかな数値の差異で耐震補強が必要と判断された構造物に対して適用される。一般に基準類における設計耐力式には式の単純化と汎用性が図られるが、その結果として特定の範囲の構造物に対しては必要以上の安全率が課せられていることがある。そのような構造物に対しては、安全率が他に比べて小さくならない範囲で設計式の基になった資料などを参考に耐力評価を行って良いこととした。

7.3.2 耐震補強

- (1) 耐震補強工法の選定に関しては、工法の信頼性、社会的条件、経済性、環境条件、構造上のバランス、保守・管理の難易度、被災度の同定の難易度などを考慮する必要がある。
- (2) 補強すべき構造物が多数存在する場合には、構造物単体としての重要度に加え、周辺地域における地震発生の切迫度、地震防災上の緊急度、ならびに経済性などを考慮して、耐震補強の優先順位を決定する必要がある。

- (1) 補強の効果は一般に模型実験の結果を基に推定することになる。RC 巻立て補強のように RC の設計法がそのまま適用できるものは良いが、そうでない工法は実験データが豊富な場合を除いて実構造物における例えばせん断スパン比、軸方向鉄筋比、横方向鉄筋比、軸応力度および補強量などの諸量が模型実験のそれとほぼ類似していることが必要である。土木構造物の場合は一般に縮小実験に依らざるを得ず、工法によっては上述の鉄筋比などのほかに寸法に関する相似比および寸法効果の影響も考慮する必要がある。

補強後の部材に対して RC 部材の耐震設計の考え方が適用できるのは、一般に補強部材の荷

重—変位履歴特性が RC 部材のそれと類似する場合に限られる。したがって、補強後の特性が著しく相違する工法による場合には、新設構造物の耐震設計とは別の考え方が必要になることがある。

- (2) 社会的条件とは、例えば耐震工法に必要となる専門技術者の必要人数が確保できるかどうかというようなことである。
- (3) 構造上のバランスとは、例えば橋脚の耐震補強において補強後の耐力が基礎の耐力を下回るように工夫し、大きな地震動による損傷を基礎でなく橋脚に集中させるようにして震後の補修の手間と費用を軽くするようなことである。
- (4) 被災度の同定の難易度とは、大きな地震動を受けた後の構造物の供用性を被災直後の外観から即座にある程度判断できるかどうかということである。

7.4 新構造の開発と実構造への適用

- (1) 強震時における構造物の安全性および性能の向上をはかるため、新構造や新材料の開発を進め、実構造物への積極的な適用を図るべきである。
- (2) 地震時の構造物の性能を向上させる手法としては、
 - 高耐震性構造
 - 免震構造
 - 制震構造などの採用が考えられ、これらの技術開発を積極的におし進めるべきである。

兵庫県南部地震時における神戸海洋気象台の NS 方向の記録の加速度応答スペクトル ($h = 0.05$) は、周期 1.0 秒以下の短周期領域において、2.0G を越す値を示した。この値は、1980 年の道路橋示方書の設計地震力の約 7 倍、1990 年のその約 2 倍に当る。こうした高地震力に対して、従来の耐震設計法で対処しようとする、約 8 程度の高塑性率を仮定しても、約 0.4 程度設計震度（降伏強度）が必要となる。この耐震設計は、大断面部材の採用により可能となるが、構造物が高塑性率の地震応答を経験すると、残留変形が大きくなり、地震後の機能が失われたり、修復して再利用するのが困難となる場合がある。従来の耐震設計法の問題点については、兵庫県南部地震により、数多くの経験を積んだ所である。

公共構造物は、大地震後もその性能をある程度保持することが要求されている。こうした高い耐震機能を満足させるためには、ねばりと強度でもって高地震力に耐えようとする従来型の耐震設計法から、構造物への作用地震力そのものを積極的に低減しようとする、免震や制震などの新構造および部材や装置の性能を飛躍的に向上させる新材料の開発を進め、実構造物への積極的な適用を計るべきである。

地震時における構造物の動的応答や発生部材力を低減する原理としては、次のようなものがあ

り，各々において，各種の構造やデバイス等が現在盛んに開発され，一部はすでに実用化されている．

- ・ 構造物への入力地震動の遮断
（滑り支承，浮体構造など）
- ・ 地動の卓越周期と構造物の固有周期の分離
（免震構造，長周期構造など）
- ・ 非線形復元力特性による非共振と履歴によるエネルギー消費
（弾塑性耐震設計，可変剛性構造など）
- ・ エネルギー吸収性能の増大
（各種エネルギー吸収装置，新材料など）
- ・ 変形性能の増大
（フレキシブルジョイント，免震地下構造など）
- ・ 制震力の付加
（アクティブ，ハイブリッド型制震装置など）