

大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および設計法に関する研究会(大震研)の活動報告と指針概要の紹介



日本建築総合試験所
角 彰

活動報告

1995年1月、兵庫県南部地震により近代都市が初めて内陸直下型地震を受け、我々は大きな衝撃を受けた。

これを受けて1997年に大阪市は上町断層帯地震動を設定し、広く利用されてきた。しかしその後の調査研究を受けて、2007年に「大阪府自然災害総合防災対策検討委員会」から新たな想定地震動が公表された。これは建築基準法により定められた建築設計用地震動を大きく上回るものであり、その対応に我々は大いに当惑した。

構造家懇談会の時代から“耐震設計法を定めるのは最前線で責任を負う構造設計者が中心になるべきである。”との関西支部の信念からJSCA関西の有志が呼びかけを始め、2009年10月にこれら直下型地震動に対応すべく、5年間の期限付き

研究会(大震研)を設立した。

研究会はJSCA関西を事務局として、総合設計事務所(15社)、構造設計専門事務所(16社)、施工会社(21社)、関連企業(9社)、および公益企業(4社)の65社から構成され、大阪市には協力会員として参加頂いてきた。

研究活動は有志のメンバー(延べ71人)が集まり、五つのWGに分かれて進めた。また最新の研究成果を盛り込むために井上一朗京大名誉教授をはじめとする15名の学術委員からご助言・ご指導を頂いた。WGでの研究内容は全会員と学術委員の参加する専門委員会で報告され、討論を重ねた。5年間に専門委員会は計18回、WGは計173回開催された。2014年11月、研究会は5年間の活動を終えた。主要な成果は①倒壊設計に道を開き、必要なツールを用意した、②耐震性能グレードを定め建築主との協議を可能とした。ことと要約できる。

今後はJSCA関西の委員会として、成果の普及・改善を進めていくつもりである。若い世代の参加を強く期待している。

基準法のレベルを大きく超える地震動対策は社会の理解、覚悟が必要となる。これからは阪神大震災を経験した、我々構造設計者の実力と説得力が試されていくときである。

以降に設計指針の概要を示す。

1 章 総則 基本方針

地震動は3段階、目標限界状態は2段階とし、これを組み合わせて3段階の耐震性能グレードを定めた。建築主と設計者は協議の上でグレードを選択する。大震研はグレードIIを努力目標として推奨する。

地震動レベル

レベル3A 予測地震動の平均レベル

レベル3B より高い安全性を求め、予測地震動の70%程度を包含したレベル

レベル3C 特段の安全性を求め、予測地震動の85%程度を包含したレベル

目標限界状態

限界状態I 層の最大水平せん断耐力を維持できなくなる限界を言う。

限界状態II 層の復元力を維持できなくなる限界を言う。この限界を超えると建築物は倒壊する状態に至る。

耐震性能グレード

グレードI レベル3Aの設計用地震動に対して限界状態I以内。

グレードII レベル3Bの設計用地震動に対して限界状態I以内、またはレベル3Cで限界状態II以内

グレードIII レベル3Cの設計用地震動に対して限界状態I以内。

2 設計用地震動



日建設計
田代 靖彦

2.1 想定地震と地震動予測

設計用地震動の策定にあたっては、平成18年「大阪府自然災害総合防災対策検討委員会」作成の大規模地震被害想定を目的とした予測地震波(府市予測波)を活用する。府市予測波は近畿の主要な震源断層を設定した場合の大阪府域500~250mメッシュ毎の地震動が算定されたもの。水平動総数は約28万波となる。

2.2 設計用地震動作成の基本方針

【ゾーン区分】大阪府市標準地震動の設定ゾーニングを準用する。即ち、沖積地盤A・洪積地盤D・山地境界F・岩盤露頭Rの分類で、大阪府域を32ゾーンに区分したゾーニングを前提とする。

【種類】内陸直下型のレベル3相当の地震動を表現するものとして、以下の2種類の設計用地震動を策定する。

①フラットタイプ地震動

フラットな速度応答特性を有するター

ゲットスペクトルを設定し、模擬地震動として作成する。

②パルスタイプ地震動

長周期パルス性を有する地震動で、大阪府市予測波の中から直接選定する。

【レベル】3A(平均的)、3B(やや大きめ)、3C(更に大きめ)の3レベルを設定。

【設計用地震動レベル設定の手順】

膨大な数の府市予測波の速度応答スペクトル値($h=5\%$)を周期帯毎に統計し、ゾーン毎の設計用地震動レベルの参考とする。

・断層破壊ケース毎に、対象ゾーン内のすべての府市予測波速度応答スペクトルの周期帯毎の平均 $+\sigma$ を算定し、当該破壊ケースの代表スペクトル曲線とする。

・断層破壊ケースと同数の代表スペクトルを周期帯毎に更に統計。その平均を3A、平均 $+0.5\sigma$ を3B、平均 $+\sigma$ を3Cレベルと想定。代表スペクトル集計曲線の最大値をパルスタイプ地震動の最大値設定の目安に、0.5~5秒周期帯の平均値をフラットタイプ地震動設定の目安にする。

2.3 上町断層帯地震 大阪域編

2011年に先行して発表済みの内容で、大阪域内6ゾーン(A2,A3,A4,A5,

A8,D6)を対象とする。府市予測波の断層破壊ケースは35種類ある。策定した地震動の速度応答スペクトル pSv の最大値は300cm/s(A4-EW)

2.4 上町断層帯地震 大阪域外編

上町断層帯地震の影響が大きいとされるゾーンの内、大阪市の北側に位置するD2、D4ゾーン及び南側に位置するA9,A10,D8,D10ゾーンを対象とする。対象ゾーンから想定破壊点が高い場合などで地震動レベルが小さい断層破壊ケースが存在。代表スペクトル最大値が100cm/s以下となる破壊ケースは統計から除外。概ね域内と同等な地震動レベルとなっている。策定した設計用地震動の pSv 最大値は300cm/s(A10-EW)。

2.5 生駒断層帯地震編

生駒断層帯地震の影響が大きいとされる大阪市の東側に位置するゾーン(A1,A6,A7,D5,D7,F3)を対象とする。府市予測波の断層破壊ケースは16種類ある。総じてEW方向の地震動レベルが大きく、上町断層帯大阪域での設定値を相応に上回っている。策定した設計用地震動の pSv 最大値は360cm/s(A7-EW)。



3.1 鉄筋コンクリート造

株式会社 鴻池組
太田 寛

3.1.1 基本方針

対象とする建物は、時刻歴応答解析を用いて設計を行う建物で、構造形式は純ラーメン構造、およびコアウォール形式の連層耐震壁付きラーメン構造の建物とする。耐震性能限界は「限界状態Ⅰ」と「限界状態Ⅱ」の2段階を設定する。

3.1.2 設計クライテリアの設定

限界状態Ⅰでは、層ではなく部材レベルでクライテリアを定め、検証を行う。基本的には文献1)に従って、柱、梁、耐震壁、柱梁接合部の限界部材角（限界せん断変形角）を算出し、クライテリアとする。柱の場合は、下記の3つの条件から決まる部材角のうち、最も小さな値を限界部材角（ cR_4 ）とする。

$$cR_4 = \min(cR_{s4}, cR_{m4}, cR_{a4})$$

ここで、

cR_{s4} : 曲げ降伏後のせん断で決まる限界部材角

cR_{m4} : 圧縮コンクリートの圧壊により、水平力を維持できなくなる部材角

cR_{a4} : 軸力負担能力を喪失する部材角
柱には、文献1)とは別途、軸力制限を設ける。その他、梁と耐震壁は3条件、柱梁接合部2条件のうちで最小のものを限界部材角とする。

一方、限界状態Ⅱでは、部材レベルでのクライテリアは設けない。

3.1.3 限界状態Ⅰの検証方法と課題

限界状態Ⅰの検証は、地震応答解析結果から得られる各部材の応答部材端回転角が、限界部材角を上回らないことを確認することにより行う。

検証に用いる地震応答解析モデルは、立体フレームモデルのほか、減衰を初期剛性比例型減衰とするか、類似の架構ごとに連結した質点系モデルおよび魚骨形モデルとする。

3.1.4 限界状態Ⅱの検証方法と課題

限界状態Ⅱの検証は、部材の劣化を考慮して、大変形領域での建物の挙動を追跡し、倒壊に至らないことを確認することにより行う。検証に用いる地震応答解析モデルは、立体フレームモデルのほか、魚骨形モデルによる解析とする。柱および梁

の復元力特性は図1、2のように、4折れ線でモデル化する。いずれも第3折れ点は限界状態Ⅰのクライテリアとした点である。

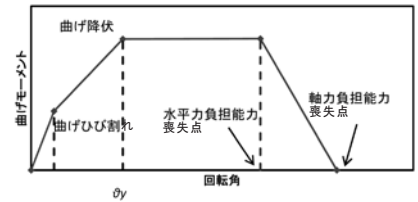


図1 柱の復元力特性

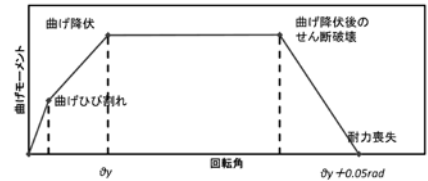


図2 梁の復元力特性

3.1.5 検討例

純ラーメン構造、コアウォール構造のほか、高さ45mクラスの建物等、合計7例を検討する。また、制振構法の検討も示す。文献1) 日本建築学会、鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説、2004



3.2 鉄骨造

株式会社 大林組
西村 勝尚

3.2.1 基本方針

建物の耐力劣化を部材レベルで評価し、耐震性能目標は部材の耐力劣化限界（限界状態Ⅰ）、倒壊限界（限界状態Ⅱ）の2つを設ける。対象とする建物のレベル2地震動に対する崩壊形は梁が先行降伏する全体崩壊形とする。

3.2.2 設計クライテリア

限界状態Ⅰの性能目標である耐力劣化限界に対する設計クライテリアは、溶接接合部破断あるいは局部座屈による耐力劣化を対象とし、実験結果のデータを基に部材の最大塑性回転角および累積塑性回転角を指標として以下に示す項目に関して設定する。局部座屈による耐力劣化限界は最大耐力の90%の耐力を保持できる塑性回転角とする。

- (1) 梁端溶接接合部の破断限界
- (2) 柱端溶接接合部の破断限界
- (3) 柱、梁の局部座屈による耐力劣化限界

(4) コンクリート充填鋼管柱の耐力劣化
限界および破断限界

3.2.3 限界状態Ⅰに対する検証方法

柱、梁の塑性ヒンジ部に関して、最大塑性回転角および累積塑性回転角が破断限界以下、片側の累積塑性回転角が耐力劣化限界以下であることを検証する。また、制振部材あるいは耐震ブレースは設計で想定している性能が喪失しないことを検証する。

検証の指標である最大塑性回転角あるいは累積塑性回転角の算出するための解析モデルと解析上の留意事項を規定する。

上下動による軸力の増減は、柱の破断限界、耐力劣化限界および柱梁曲げ耐力比を算出する場合に考慮することとする。

水平2方向入力に対する検討方法として、建物主軸2方向の地震応答解析でよい場合と斜め方向入力あるいは2方向入力に対する地震応答解析を行う場合の規定および検証方法を示す。

3.2.4 限界状態Ⅱに対する検証方法

検証用地震動に対して倒壊に至っていないことを確認することとし、解析上の倒壊の定義は「PΔ効果を考慮した上で水平

方向の復元力が喪失すること」とする。検証のための地震応答解析モデルとしては立体フレームモデルあるいは魚骨形モデルとする。

立体フレームモデルの部材のモデル化は復元力特性および履歴特性は耐力劣化領域までの挙動および溶接接合部破断を考慮することが可能なモデルとし、実験結果を安全側に評価したモデルとする。実験結果を基にした耐力劣化あるいは破断を考慮した具体的なモデル化手法を提示する。

魚骨形モデルによる検証については、整形な平面形状を有し、建物主軸方向と架構方向が一致する形状の建物を対象とし、立体フレームモデルの地震応答解析結果との比較により、安全側に評価することが可能な復元力特性の設定方法を提案する。

3.2.5 検討例

魚骨形モデルによるパラメトリックスタディ、質点系モデルによる検討例、立体フレームモデル(5例)、魚骨形モデル(2例)による限界状態ⅠあるいはⅡに対する検討例等を示す。



3.3 免震構造

竹中工務店
前野 敏元

3.3.1 基本方針

免震材料に関しては、せん断変形や面圧が限界範囲内であることを確認する。

擁壁との衝突に関しては、質点系モデルによる動的衝突解析による方法と、エネルギーの釣合を考慮した静的な方法を「衝突設計」として提案する。

制動力を発揮する装置を用いて擁壁との衝突を回避する「制動設計」も提案する。

3.3.2 設計クライテリアの設定

限界状態Ⅰを以下のように定める。

擁壁との衝突を許容するが、下記3項目は満足する。

- ・免震材料(積層ゴム)が破断しない
- ・支承材は荷重支持能力を保持している
- ・上部構造は限界状態Ⅰを超えない

中間層免震建物の免震層下部構造は、上部構造荷重を支持できる能力を保持し

ている。

3.3.3 限界状態Ⅰの検証方法と課題

(1) 衝突設計

時刻歴応答解析の結果、免震建築物が擁壁に衝突する可能性がある場合や、免震部材の破断を防止するために取って上部構造を擁壁と衝突させるような場合に衝突設計を行う。衝突設計の手法を2例提案する。

1) 質点系による動的衝突解析

免震層を含む建物を質点系あるいは部材系モデルに置換し、擁壁及び背面土の水平剛性・耐力を適切に評価した復元力をもつ要素を設定し、動的解析を行う。

衝突した場合の免震層の応答変位、上部構造に生じる応答加速度、層せん断力、層間変位等が直接的に求まる。建物応答には、衝突ばねの剛性、耐力などの復元力特性が大きな影響を与える。

2) エネルギーの釣合に基づく検討法

擁壁に衝突する時点の、上部構造の運動エネルギー $\Sigma(1/2 \cdot mv^2)$ を上部構造が吸収できるエネルギーと比較することにより検討する。建物が吸収できるエネルギーが衝突時の運動エネルギーより大きい

場合は倒壊しないと判断できる。上部構造が吸収できるエネルギーは、静的増分解析によって得られる各層のQ- δ 曲線における面積増分($\Sigma Q \cdot \Delta$)の和とする。

(2) 制動設計

制動装置を免震層に設置することにより、免震層の過大変形を抑制し、免震部材の破断を防止する制動設計により限界状態Ⅰ以下に抑えることが可能である。

3.3.4 限界状態Ⅱの課題

限界状態Ⅱを以下のように定める。

- ・免震部材が破断等により荷重支持能力を喪失した結果として上部構造が限界状態Ⅱに至る状態
- ・擁壁への衝突等により上部構造が限界状態Ⅱとなる状態
- ・中間層免震建物の免震層下部構造が荷重支持能力を喪失した状態。

3.3.5 検討例

- ・提案された各種積層ゴムの復元力モデルを用いた地震応答解析結果
- ・衝突設計の検討例
- ・E-ディフェンスにおいて実施された実大免震建物の衝突加振実験
- ・制動設計の検討例



3.4 基礎構造 4 解析法の検証

日本建築総合試験所
長瀬 正

3.4 基礎構造

本研究会で提案するレベル3の設計用地震動を用いて下部構造の設計を行うためには、基盤入力に対する地盤解析が必要となる。提供される基盤入力はパルス波でありその卓越周期や表層地盤の増幅特性について計算例を用いて説明している。

基盤地震動は地盤のせん断波速度が $V_s=500\text{m/s}$ の基盤位置で計算されているので、 $V_s=400\text{m/s}$ を工学的基盤とした従来の設計用地盤資料では、地盤解析に必要な 500m/s に至る地盤 V_s データが不足する。そこで、大阪府市から本研究会に供与された資料から、 $V_s=500\text{m/s}$ までの深い地盤データを提供している。

液状化解析を含む地盤解析手法として、等価線形解析、逐次非線形全応力解析および逐次非線形有効応力解析があり、適宜使い分けられる。また比較的入手

の容易な解析ソフトとして、等価線形解析プログラムSHAKEや有効応力解析プログラムYUSAYUSA, ShakePROなどがあり、それぞれある程度習熟することが求められる。なお、設計者の便宜を考慮して、液状化解析の簡易計算法として提案される手法についても紹介している。

杭の設計では、建物からの地震慣性力と杭周辺地盤の変形の2つを考慮する。地盤変形については液状化や V_s が急変する場合の地盤動特性の変化が支配的となるので、解析事例に即して、手法と課題についてまとめている。

設計法には、従来の応答変位法に基づく分離型モデルと杭-地盤-建物系の動的相互作用を考慮するPenzienモデルに代表される一体型モデルがある。解析事例によれば、両者とも杭の塑性挙動を考慮することで、従来の設計内容でもレベル3Cの入力に対して、杭は崩壊メカニズムに達することはなく、倒壊・崩壊しない可能性があることが示されている。

4 解析法の検証

本研究会では、上町断層地震など従来のレベル2を超える過大な入力地震動に対する設計クライテリアとして、レベル3B

地震動に対して、最大耐力を超えるが余震に耐えることができる限界状態Ⅰとすることを推奨している。限界状態Ⅱは $P\Delta$ などの負剛性や脆性破壊で復元力がゼロとなる倒壊・崩壊点であり、限界状態Ⅰが倒壊・崩壊までどの程度の余裕を有しているのかを評価判断するためにも必要な指標である。したがって倒壊・崩壊までを精度よく解析できるプログラムが本研究会の設計法には必須となることから、魚骨形モデルを用いた解析プログラムfishを、設計者が利用可能なように整備し、考慮すべき $P\Delta$ 効果、減衰、下層部変形集中、倒壊判定条件について理論的背景と例題を解説している。

また、震源近傍の地震動に現れる1~2波程度の衝撃的な長周期パルスの特徴とするパルスタイプ地震動に関して、基礎地盤との動的相互作用の影響や制振効果の程度などを検討している。

最後に、本研究会の提案する設計を展開するために、社会との接点として設計者が理解しておくべき、提案波の計測震度や上町断層の地震確率について資料をまとめていく。