

大阪府域内陸直下型地震（上町断層帯地震）に対する建築設計用地震動  
および設計法に関する研究

（（社）日本建築構造技術者協会関西支部プレスリリース資料（H23.7.6））

## 「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」2010年成果

平成7年の兵庫県南部地震は、内陸直下型地震動に対して、その特性に応じた対策が必要であることを強く印象づけた。大阪市はその直後、市施設のために平成9年に上町断層帯の地震動を対象とした先駆的な震災対策技術指針を取りまとめた<sup>1), 2)</sup>。その成果は民間建築物においても「極めて稀に発生する地震」の設計用サイト地震動として高層建築物等の設計に広く活用されてきた。

その後10年を経る間に活断層調査や地震動観測記録の充実、(独)産業技術総合研究所、内閣府中央防災会議等から活断層予測地震動が公表されるようになった。また民間でも各社が自主的に予測波を作成する場合もあった。さらに大阪府・市でも近年の研究成果を取り入れて活断層地震動を予測し地震被害想定<sup>3)</sup>を行っている。地震調査推進本部<sup>4)</sup>によると上町断層帯地震の平均発生間隔は8,000年と言われ、今後30年間の発生確率は2~3%で活断層では高い部類に入っている。予測地震動は一度に動く断層の大きさや、地震発生シナリオなどによりその強さに大きな幅があり、いまだ確定的に定められる状態ではないが、平成9年度の予測波や法で規定する建築設計用地震動を上回る予測地震動が含まれている。

このような状況下で(社)日本建築構造技術者協会関西支部を事務局として設計実務者を中心とした59社(2011/7/6現在)が集まり、大阪府下において法規定を超える可能性のある内陸直下型地震動に対して、如何に設計するかを研究する会を立ち上げ、関西の大学研究者からの意見を受けながら、研究を続けてきた。今回、1年半の期間をかけて上町断層帯地震動に対する大阪府域に関する研究成果をまとめた。

提案する設計法は(1)60mを超える建物や免震建物のように時刻歴応答解析により設計する建物を対象とする。(2)大阪府域を6ゾーンに分割し、それぞれのゾーンについて現行の設計レベル(レベル2)を上回る3段階レベル(3A, 3B, 3C)の設計用地震動を示す。現行のレベル2地震動と比べて3Aでは1.2倍、3Bでは1.5倍、3Cでは1.8倍程度になり、気象庁震度階では震度7におよぶものである。(3)建物は従来の設計制限値を超えた領域まで考えて、新たに限界状態Ⅰ、Ⅱの2段階の設計目標値を定めた。限界状態Ⅰは中破程度を、限界状態Ⅱは倒壊しないことを目標に設計する。これらは既存建物のチェックにも適用できる。(4)設計者は建築主と協議して3段階の設計地震動のレベルおよび2段階の設計制限値のなかから耐震グレードを定める性能設計を行う。研究会は新築建物に対して地震動レベル3Bに対して限界状態Ⅰを設計目標とするグレードⅡを推奨する。(5)耐震グレードにより建設コストは上昇する。その程度は建物により異なるが、整形な建物ではグレードⅡの場合で、全体コストが1~5%程度上昇する。(6)現時点では研究で確認すべき領域まで踏み込んでいるため、安全側に過ぎる扱いも含まれているが、研究の進展に応じて見直していく。

今回、未曾有の東日本大震災を経験し、日本の国土が如何に自然の容赦ない振る舞いに晒されているかを痛感した。このような状況下で、大阪府域内陸直下型地震がどのような規模で襲ってくるかは、未だ全く確定的ではないなかではあるが、我々、民間の設計者が自主的にその危険性に対峙し設計法を取りまとめ、法に沿った設計に加えて、「より安全安心を目指して」社会全体で耐震設計を考える魁としたい。

### (補足 1.) 長周期地震との関連について

東北地方太平洋沖地震や東海、東南海、南海地震動は海溝型地震、いわゆる長周期地震であり、上町断層地震とは地震動の性質が大きく異なる。

海溝型地震（長周期地震）は平均発生間隔 100 年～150 年程度で、今後 30 年以内に発生する確率は 50%～70%程度である。また過去の地震記録も多く予測の信頼度は高い。それに比べ上町断層地震は平均発生間隔 8000 年、今後 30 年間の発生確率は 2～3%である。活断層では高い部類に入っているが、過去の地震データは不足しており予想の信頼度は低い部類に入っている。

また海溝型地震はマグニチュード 8 を超え、今回のように 9 にまで至り、長い間地震動が続く。上町断層地震動の予想ではマグニチュード 7.5 程度でパルスの短時間の揺れである。

このように海溝型地震動と内陸直下型地震動ではその性質は大きく違う。特に発生間隔、発生確率ともに海溝型と比べ 1 桁以上低く、その予測の信頼度も低い。地震調査推進本部の予想も、研究調査が進展するにつれて変わっており、最近では琵琶湖西岸断層の発生確率は大きく減少し、中央構造線断層は逆に大きく増加した。

このように海溝型に比べてその逼迫性は低いと言えるが、我々は油断することなく、また慌てることなく、分からないことは多いが、できることから着々とその準備を冷静に進めるべきと考える。

### (補足 2.) 推奨グレードを選択した理由

残念ながら現在の技術レベルでは、予想の最大級の地震動で建築を設計することは日常生活での機能性を損ない、経済的には大きな負担を強いることになる。推奨グレードで設計しておけばレベル 3C の地震が生じても限界状態Ⅱには至らない可能性が高いと判断しこのグレードを推奨した。レベル 3C でも最悪のケースをカバーしているわけではないが、危険予想の確実度と対策の影響度を比較し、実現可能な判断をした。勿論、このグレードでは経済的な投資は今までよりも上昇する。社会がこれを認めるかどうかは今後の問題である。時間が掛るとは感じている。

### (補足 3.) 既存建物について

今回の地震動は法以上の  $+\alpha$  を述べている。長周期地震に比べると逼迫性は低いので慌てることはない。科学技術の進歩で安心を求める考え方が変わっていくことは寿命の長い建築物ではある程度止むを得ない。建設当時の法に適合していれば良いとする考えもあるが、新しい知見にどう適合させていくか社会全体の問題である。

どのレベルの地震動をターゲットとするか、補強が必要な場合、どのような補強が合理的か、といった大きな課題は、建物個別の事情により異なり、さらに時間をかけて研究すべきと考えている。

大規模改修や長周期地震対応などの際に一緒に対処を考えるのも一つの方法である。より安心に近づけるように考えてほしい。

### (補足 4.) 低層の建物について

低層の建物では地震動の大きさと被害の状況が必ずしも一致してない。さまざまな理由が考えられているが、いまだ明確ではなく研究課題である。それに比べて高層の長周期建物では比較的、時刻歴応答解析により観測された状態を評価できる。これにより適用建物の範囲を時刻歴応答解析により設計する建物と決めている。

ただし、今回の予測波は低層建物の短周期領域では現状の法で規定するレベルと概ね等しい

レベルと言える。兵庫県南部地震の経験からいえば、現行規定を満足する低層建物が大破・倒壊する可能性は低いと言える。

(補足 5.) 法的な扱い

建築基準法で規定する範囲を超えた $+\alpha$ の扱いである。

(補足 6.) 今後の予定

大阪府下で残り 26 ゾーンについて他の断層地震動（生駒、有馬高槻、中央構造線）を含んで設計用地震動を設定する。また建物の設計法についても不備な内容をブラッシュアップしていく。

この研究会の成果を活かして、いたずらに騒ぐことなく、冷静に着々と我々のできることを進めたいと考える。

最後に、今回の地震で亡くなられた方々へ哀悼の意を表します。

参考文献 1) 大阪市：大阪市土木建築構造物震災対策技術検討会報告書，1997.3. 2) 大阪市：大阪市土木建築構造物震災対策技術検討会建築物の耐震性向上の指針 解説編，1997.3. 3) 大阪府：大阪府自然災害総合防災対策検討（地震被害想定）報告書，平成 19 年 3 月 4) 地震調査研究推進本部：<http://www.jishin.go.jp>

以上

上町断層帯地震に対する設計用地震動ならびに設計法に関する研究

正会員 ○多賀謙蔵<sup>\*1</sup> 同 亀井 功<sup>\*2</sup> 同 角 彰<sup>\*3</sup> 同 近藤一雄<sup>\*4</sup>  
同 林 康裕<sup>\*5</sup> 同 宮本裕司<sup>\*6</sup> 同 井上一朗<sup>\*7</sup>

2.構造—1.荷重・信頼性

設計用地震動, 上町断層帯, 耐震設計法, 性能設計

1. はじめに

地震を対象とした性能設計では, 建設地で考慮すべき大地震動の設定と, 目標性能の具体的検証法が必要となる。現状では建築基準法の構造規定に従った2次設計あるいは超高層建築物等の構造計算の基準法で定められた範囲の最低限の性能設計といえることができるが, このうち告示にただし書きで示されているいわゆるサイト波については積極的に採用されているとは言い難い。これは, 「地震荷重の設定」は, これまで地震被害の経験を踏まえた学術的知見と高度な工学的判断に基づいて行われてきたものであり, 個々の設計者の判断に委ねられた場合に大きな評価差が出ることが懸念されるという実情によるところが大きいと考えられる。

このような状況の中で, 大阪府は兵庫県南部地震直後の平成9年に, 上町断層帯の地震を対象とした先駆的な震災対策技術指針を取りまとめ<sup>1),2)</sup>, ここに示される「大阪市 H9 年想定地震動」は, 大阪市域に建設される超高層建築あるいは免震建築などの設計に, 数多く採用されてきた。

その後 10 年を経る間に, 活断層調査や地震動観測記録の充実および地震動計算手法と計算機能力の発達など, より精度の高い強震動評価ができる状況となり, 上町断層など大阪市域に影響の大きい想定断層による地震動予測が実施されている。これらの予測波は, 現在設計で用いているスペクトルのレベルを大きく上回っているものが多く, 近年の被害地震の強震観測記録にも, 周期帯によっては現在の設計レベルを大きく上回るものも見られる<sup>3),4)</sup>。

ここでは, これら近年の知見に基づいて検討し設定した, 大阪市域で想定すべき上町断層帯地震に対する建築構造物の設計用地震動ならびに耐震設計法の基本方針について報告する。

2. 設計用地震動ならびに設計法に関する基本方針

2.1 適用範囲

大阪市域の新築および既存の建築物のうち, 高層建築物や免震建築物等, 時刻歴応答解析により耐震安全性を検討する必要がある建築物を当面の対象とする。これは, 本研究では建築物の地震時挙動を時刻歴応答解析により予測し, その変形性能に照らして耐震性能を評価することを基本としていることによる。

2.2 設計用地震動策定の基本方針

1) 既往の研究成果の活用

設計用地震動の策定にあたっては, 近年の内陸直下型地震についての強震動予測や観測記録に関する研究成果をできるだけ反映させることとし, 主として平成18年の「大阪府自然災害総合防災対策検討委員会」の成果<sup>5)</sup>として得られている予測波(以下, 大阪府市予測波という)を活用する。これは, 上町断層帯地震のほか, 大阪府域に大きな影響を与えると考えられる複数の想定地震に対して地震被害想定を目的として500mメッシュ点について得られている予測地震動である。

上町断層帯地震については, 全長58kmわたる断層が一時に動くとし, アスペリティの大きさ, 位置, 震

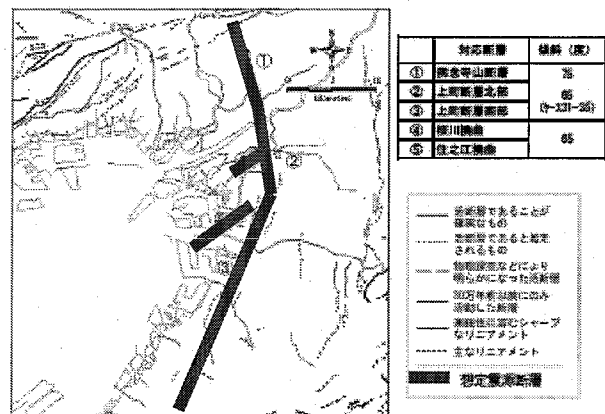


図-1 上町断層帯で想定された震源断層の位置

源位置などの不確定要素に対して 35 ケースの断層破壊シナリオを設定して作られたもので、地震動の大きさ、特長については大きなバラツキを持っている。

## 2) 3段階の設計用地震動レベル

建築の構造設計では不確定な要素の中から、発生確率、安全性、経済性などを総合的に判断して設計荷重を決定していかなければならない。大きなばらつきのある予測に対して、震災の教訓や設計実務上実効性のある対応も考慮した解決策として、想定される幅のなかで次の3段階の設計用地震動レベルを設定した。いずれのレベルも法令で定める極めて稀に発生する地震動(告示波)を超えるレベルの地震動である。構造設計者は建築主など関係者との協議のもと、いずれかのレベルを設定して設計を進めることとする。

**レベル3A:** 上町断層帯地震を考慮する際の基準となるレベルで、大阪府市予測波の発生シナリオ 35 ケースの平均的なレベルに相当する。

**レベル3B:** 基準のレベルより高い安全性を求めて設定するレベルで、より大きなばらつき範囲をカバーするレベル。大阪府市予測波の発生シナリオ 35 ケースの70%程度を含んだ地震動レベルに相当する。

**レベル3C:** 基準のレベルに比べ、特段の高い安全性を求めて設定するレベルで、さらに大きなばらつき範囲をカバーするレベル。大阪府市予測波の発生シナリオ 35 ケースの85%程度を含んだ地震動レベルに相当する。

なお、上町断層帯地震についての35ケースの断層破壊シナリオは、断層に沿った全域に大きな地震動が生じるよう配慮して設定されているもので、それぞれの発生確率については現時点で言及されていない。したがって上記の数値は発生確率そのものに対応するものではないことに注意する必要がある。いずれにしても予測地震動のなかには非常に大きなものが含まれており、上記の設計用地震動レベルは最悪のケースをカバーするものではない。この点については今後の研究の進捗ならびに過大な入力に対する備えについての社会的コンセンサス等を踏まえて、適宜見直しを計るべきものである。

## 2.3 目標とする耐震性能

地震調査研究推進本部によると、上町断層の地震発生確率は、30年以内に2~3%<sup>6)</sup>と、決して小さ

な値ではないものの、予測地震動の大きさに大きな幅があり、個々の建設地において非常に大きな影響を及ぼす地震の発生確率は、海洋型地震に比べて低い確率であると考えられる。従って、高層建築物等の一般的な耐震性能目標よりも踏み込んだ状態に至ることを許容する。

**限界状態 I:** 終局的な限界状態 II に対してある程度の余裕があり、非倒壊の保証を目標とする限界状態として設定する。

**限界状態 II:** 最新の研究レベルを踏まえて設定する建築物が倒壊しない限界の状態。この状態を確認するためには詳細な解析や、さらなる調査・研究を必要とする場合がある。

以上のように、3段階の設計用地震動レベルと、2段階の終局安全性に対する耐震クライテリアを設ける。設計者はこれらについて建築主に背景を十分説明し、どの組み合わせを採用するかを協議し、設定する。

図-2に、これら設計用地震動レベルと耐震クライテリアの関係の概念を示す。なお、限界状態は検証方法の違い等によって若干幅のある評価となるので、その領域を斜め線で示している。

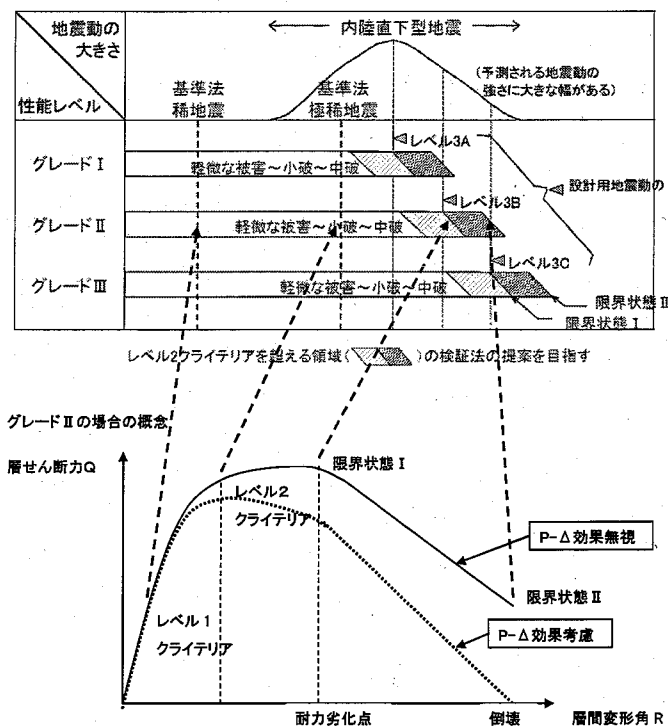


図-2 設計用地震動レベルと設計クライテリアの関係例

### 3. 設計用入力地震動の概要

#### 3.1 想定地震と地震動予測

今回主として採用した大阪府市予測波の作成手法、基本パラメータは以下のようなものである。

- ・想定された震源断層：図-1 による（断層長さ：58km）
- ・想定された断層破壊ケース：35 ケース
- ・工学的基盤の波形作成手法：波形合成法として統計的グリーン関数法を用いて、せん断波速度 500m/s 相当以上の工学的基盤面における地震動波形を計算
- ・地表面における地震波の作成：周波数依存を考慮した等価線形地盤応答解析により地表面の地震動波形を計算

#### 3.2 ゾーニング

大阪府市の構造物耐震対策検討において、主として土木構造物検討用に用いる「標準地震動」を選択するにあたって、大阪府域のゾーン区分を行っている<sup>7)</sup>。これは、常時微動観測による地盤の増幅特性、内陸活断層（主に上町断層）からの距離などをもとに大阪府域を合計 32 ゾーン（大阪市域は図-3 に示す 6 ゾーン）に分割し、表層地質分布、沖積層相当の層厚分布、1995 年兵庫県南部地震時のアンケート震度分布、予測地震の特性値分布などとの対応が考慮されているものである。ここでも、同様のゾーン区分を設定し、ゾーンごとに設計用入力地震動を定義することとする。

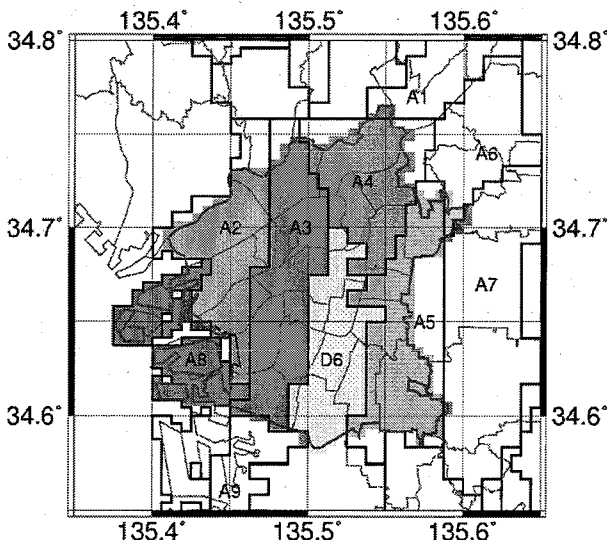


図 2.17 内陸直下型地震に適用するゾーン分割（新ゾーン分割（内陸））  
（大阪市域拡大）

D（緑）：洪積地盤 A（赤）：沖積地盤

図 3 大阪市域のゾーニング<sup>7)</sup>

#### 3.3 入力地震動を定義する地盤面

水平地震動は地表面で定義するもので、実際の使用においては、地下 2 階程度までの建物の場合の基礎固定モデルまたは SR モデルに入力する地震動として使用する。基盤波が必要な場合も想定し工学的基盤 ( $V_s=500\text{m/s}$ ) の地震動も提示する。

#### 3.4 水平方向設計用入力地震動

大阪府市の予測波形を分析すると、比較的フラットな応答スペクトル形状を示すケースもある一方で、非常に大きく、かつ周期特性の明瞭なケースがある。このような地震動の傾向を反映するものとして、水平方向設計用入力地震動は、下記の①フラットタイプ地震動と②パルスタイプ地震動の二つを併せて設計に用いるものとして提示する。

①フラットタイプ地震動：フラットな速度応答特性を持つ設計用応答スペクトル  $pS_v$  で入力地震動を定め、このスペクトルに適合する模擬地震動

②パルスタイプ地震動：予測波から選定された卓越周期特性の強いパルス性地震動

これら①と②の地震動は、それぞれ、各ゾーンについて、3 段階のレベル毎（地震動②はレベル 3A はなし）に各方向 3 波ずつ提示する。

地震波形の一例として、ゾーン A3 のレベル 3B のパルスタイプ地震動 EW を図-4 に示す。

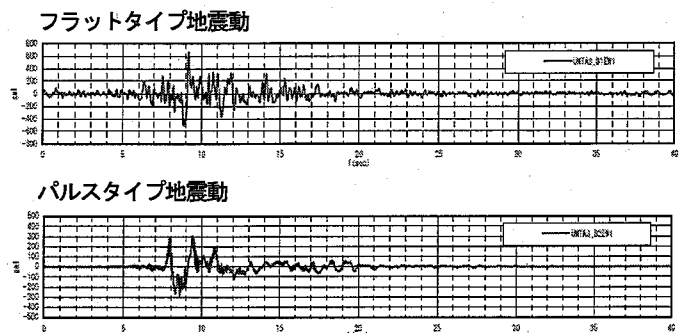


図-4 入力地震動波形例 加速度 ( $\text{cm/s}^2$ )  
ゾーン A3 レベル 3B EW

ゾーン A3 の EW 方向を例に、フラットタイプ地震動の設計用応答スペクトル  $pS_v$  を図-5 に、そのレベル 3B 地震動の  $S_v$  を図-7 に、パルスタイプ地震動（レベル 3B）の  $S_v$  を図-8 に示す。いずれも減衰定数は 5% である。図-5 には、比較のため、標準波 3 波（最大速度  $50\text{cm/s}$ ）の  $S_v$  を重ねて示す。また、図-6 には参考に  $V_p=125\text{cm/s}$  の正弦波パルス 1 波による  $S_v$  を示す。

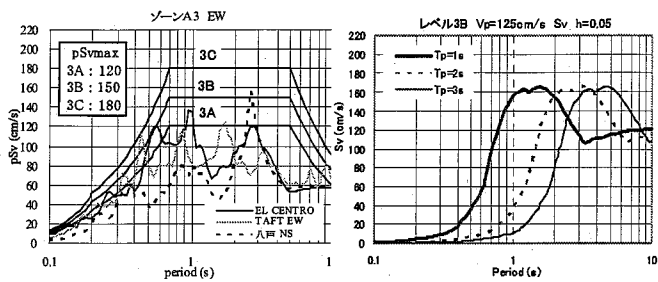


図-5 フラットタイプ地震動設計用応答スペクトル

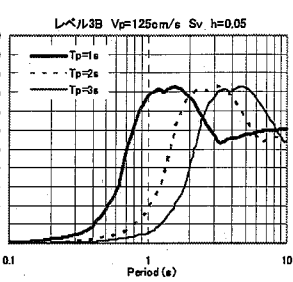


図-6 正弦波パルス速度応答スペクトル

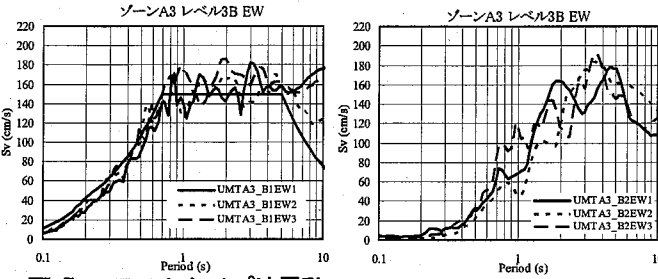


図-7 フラットタイプ地震動レベル3B EW Sv

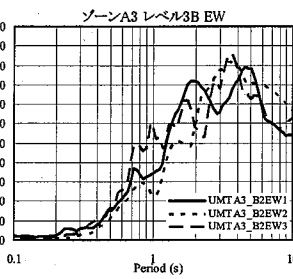


図-8 パルスタイプ地震動レベル3B EW Sv

フラットタイプ地震動は、ゾーンにより多少の差はあるが、レベル2の告示波と比べて3Aレベルはおよそ1.2倍前後、3Bレベルは1.5倍前後、3Cレベルは1.8倍前後、パルスタイプ地震動は周期帯によってはそれを上回る強さである。

高層建築物の応答変形の程度を、Rmax 応答スペクトルで評価する。本応答スペクトルは、高層建築物の層間変形角に対応する固有モードの特性と振動特性を仮定し、モーダル解析により略算した建物全体の最大層間変形角応答（弾性応答）を表すものである<sup>8)</sup>。ゾーンA3のレベル3BのEW方向を例に、Rmax 応答スペクトルを図-9に示す。横軸は、1次周期を表す。両地震動とも、Rmaxはおよそ1/50前後である。

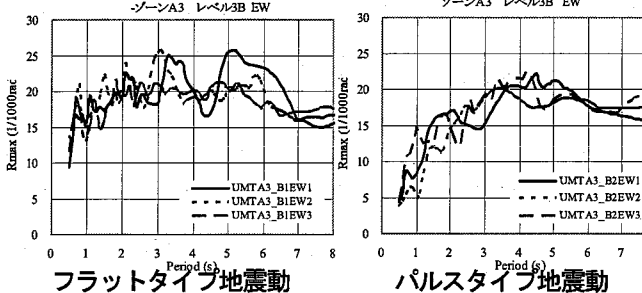


図-9 レベル3B地震動EW Rmax 応答スペクトル

このほか、図-6に示すようにパルス性地震動を近似するものとしてパルス振幅  $V_p=100\sim 150\text{cm/s}$ 、パルス周期  $T_p=1\sim 3$  秒の正弦波パルス<sup>9)</sup>を、初期設計段階等で有効な検討用地震動として提示している。

3.5 上下方向設計用入力地震動

上下地震動も地表面で定義し、予測地震動をもとに、水平地震動と対応するように下記の地震動を提示する。

- ①フラットタイプ地震動と組み合わせる上下地震動：フラットな加速度応答特性を持つ設計用応答スペクトル  $vSa$  で入力地震動を定め、これに適合する模擬地震動
- ②パルスタイプ地震動と組み合わせる上下地震動：選定した水平地震動の予測波と対の上下動成分

①の  $vSa$  フラットレベルについては、水平地震動と対応するように、カバーする予測地震動のばらつき範囲を設定する。また、水平地震動との組み合わせにおいては、水平地震動による応答との同時性を考慮する。

5. おわりに

本報告は、構造技術者協会関西支部が主催して活動している「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」の成果の一部である。研究会会員および専門委員会の学識経験者のご協力ご指導に対して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大阪市：大阪市土木建築構造物震災対策技術検討会報告書，1997.3.
- 2) 大阪市：大阪市土木建築構造物震災対策技術検討会建築物の耐震性向上の指針 解説編，1997.3.
- 3) 亀井功，西影武知：現状の設計用地震荷重と予測地震動との対応，大阪を襲う内陸地震に対して建物をどう設計すればよいか？日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会シンポジウム資料，pp.25-29，2008.3.
- 4) 林康裕・森井雄史：予測地震動に対する建築物の応答，大阪を襲う内陸地震に対して建物をどう設計すればよいか？日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会シンポジウム資料，pp.31-41，2008.3.
- 5) 大阪府：大阪府自然災害総合防災対策検討（地震被害想定）報告書，平成19年3月
- 6) 地震調査研究推進本部：<http://www.iishin.go.jp>
- 7) 大阪市：<http://www.city.osaka.lg.jp/kikikanrishitsu/cmsfiles/contents/0000042/42642/p54-60.pdf>
- 8) 亀井功，佐藤浩太郎，林康裕：モーダル解析によるパルス波地震動に対する多自由度系の層間変形角応答特性，日本建築学会構造系論文集，第649号，pp.567-575，2010.3.
- 9) 鈴木恭平，川辺秀憲，山田真澄，林康裕：断層近傍のパルス地震動特性を考慮した設計用応答スペクトル，日本建築学会構造系論文集，No.647，pp.49-56，2010.1.

\*1 神戸大学大学院 工学研究科 教授・博(工) Prof., Dept. of Arch. Eng., Kobe Univ., Dr. Eng.  
 \*2 大林組 大阪本店構造設計部 Structural Eng. Div. Osaka Head Office, Obayashi Corp.  
 \*3 日本建築総合試験所 博(工) General Building Research Co. of Japan, Dr. Eng.,  
 \*4 東畑建築事務所 TOHATA ARCHITECTS & ENGINEERS INC.  
 \*5 京都大学大学院 工学研究科 教授・工博 Prof., Dept. of Arch. and Archi. Eng. Kyoto Univ., Dr. Eng.  
 \*6 大阪大学大学院 工学研究科 教授・博(工) Prof., Dept. of Archi. Eng. Osaka Univ., Dr. Eng.  
 \*7 岡山理科大学総合情報学部建築学科教授・工博 Prof., Dept. of Arch., Okayama Univ. of Science, Dr. Eng.