

設計用入力地震動の現状と課題

Reviews and perspective of input ground motions for design

中野 富夫*1

1. はじめに

主に超高層・免制震建築物等の構造的評価に使用する設計用入力地震動の概要を紹介し、あわせて大阪盆地における地震動の特徴を観測記録から説明する。設計用地震動は、「時刻歴応答解析建築物構造安全性能評価業務方法書」¹⁾で規定しており、表-1の4種類に分類できる。

告示波は建築基準法（以下、建基法）の地震動レベルと同等となる様に定めた地震動であり、中小地震に対応する稀に発生する地震と、大地震に対応する極めて稀に発生する地震の2種類がある。標準波は告示波の登場以前に使用していた設計用地震波を継続性保持のため残したものである。

基整促波は、近年の大地震で建築物被害への影響の大きさが認識された長周期成分に着目して、国土交通省が建築基準整備促進事業（以下、基整促）で作成した地震波である。基整促波は、告示波が一般的な大地震を表わすのに対し、地震・地盤特性を反映した上で主に長周期成分について補完するものであり、極めて稀に発生する

地震に分類される。

サイト波は、これらの地震動以外で、建設地周辺における活断層・地盤構造等の状況から必要に応じて作成する地震動である。サイト波は極めて稀に発生する地震に分類されるが、再現期間が長い地震動については参考扱いとする事も多い。

2. 告示波および標準波

告示波は平12年建告第1461号で定義した加速度応答スペクトル²⁾に対応する地震波で、地盤のせん断波速度が400 m/s以上となる工学的基盤上で定義している。これを建築物の設計に使用するには、工学的基盤で浅の表層地盤による増幅特性を、地盤の非線形特性を考慮した波動伝播解析により付加する必要がある。この解析には、一次元地盤について非線形特性を等価線形で考慮する Shake と呼ばれるプログラムを使用する事が多い。

告示波の加速度応答スペクトルは、建基法施行令第

表-1 性能評価に使用する設計用地震動

種 別	概 要	地震動の必要数	
		稀に発生する地震	極めて稀に発生する地震
告 示 波	告示のスペクトルにフィッティングする地震波	3	3
標 準 波	過去の著名な観測地震波 (El Centro NS など)	3 ¹⁾	3 ²⁾
基整促波	国交省が作成方法を定めた長周期域に特化した地震波	-	1 ³⁾
サイト波	特定の活断層について断層モデルで計算した地震波	-	(3) ⁴⁾

注1：最大速度 2,500Zmm/s。注2：最大速度 5,000Zmm/s (Z：地域係数)。

注3：指定地域のみ。注4：告示波1波以上と合わせて3波

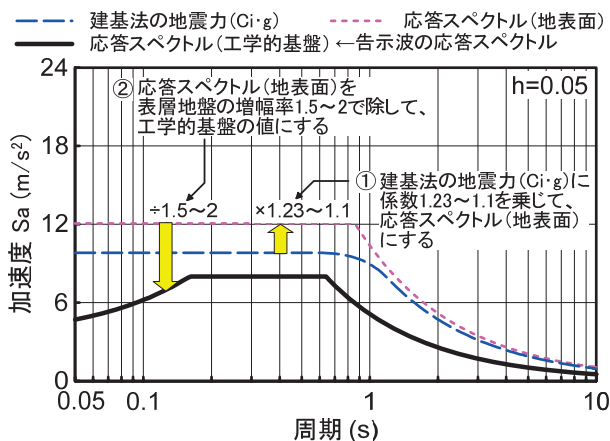


図-1 告示波と建基法の地震力との関係

*1 NAKANO Tomio：構造判定センター 構造計算判定部 審査課(兼)試験研究センター 数値解析室 上席調査役

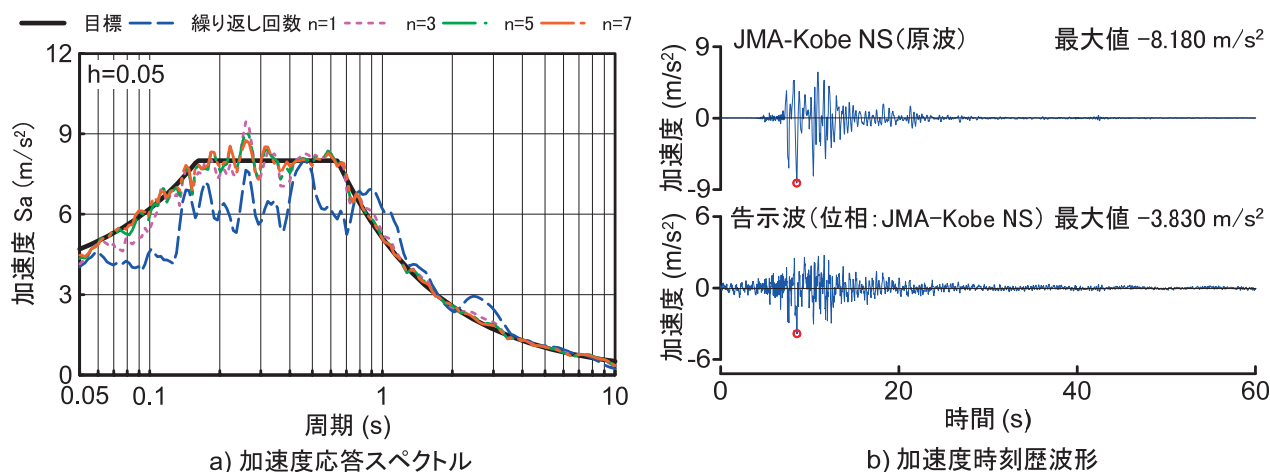


図-2 告示波の作成過程の例 (位相特性: JMA-Kobe NS)

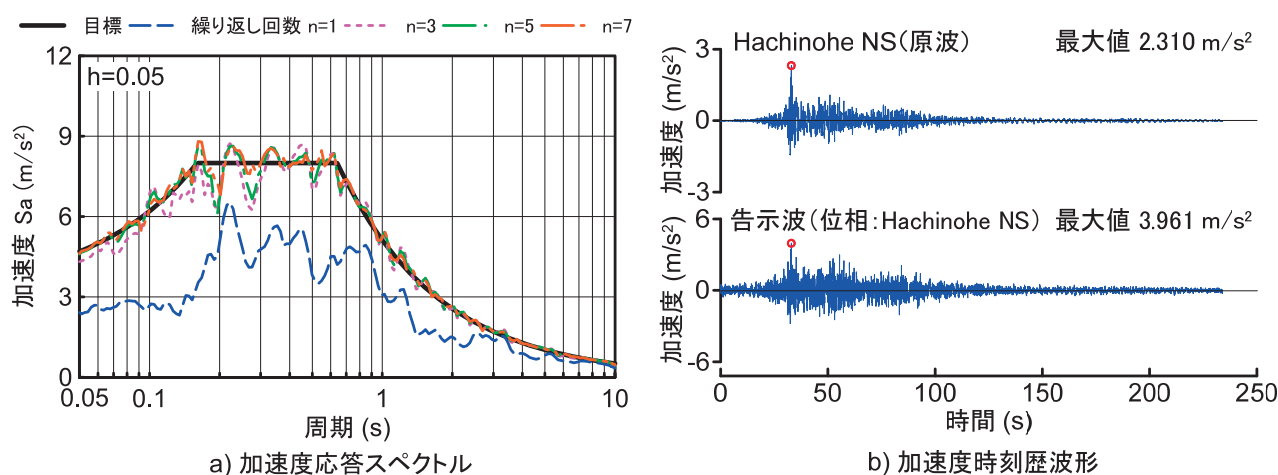


図-3 告示波の作成過程の例 (位相特性: Hachinohe NS)

88条に建築物の応答（最大応答せん断力）として規定した地震力を、応答解析に使用するため工学的基盤まで引き戻して、入力動（加速度応答スペクトル）に変換したものである。図-1に、告示波の加速度応答スペクトルと建基法の地震力の関係を示す。ここで、表層地盤の増幅率は、建基法の第一種～第三種地盤を想定した地盤モデルの応答解析結果から算出している。告示波は建基法の地震力と同等の強さを持つ地震動であり、過去の観測地震である標準波と比較して位置づけが明確である。

告示波の作成は参考文献3)に記載された方法により繰り返し計算で行い、計算に必要な位相特性は観測地震波の位相特性もしくは乱数+包絡線関数を用いる事が多い。図-2および図-3に、位相特性としてJMA-Kobe NSおよびHachinohe NSを使用した告示波の作成過程の1例を示す。告示波は、稀に発生する地震および極めて稀に発生する地震の2種類が有るが、以降は断りのない限り後者を提示する。いずれの地震波も繰り返し回数 $n=1$ では加速度応答スペクトルは目標と大きく乖離して

いるが、 $n=3$ 程度で漸近し更に n が増えるにしたがって少しずつ目標との差が小さくなる。加速度時刻歴波形の概略形状（経時特性）は、収束判定基準を満たすまで繰り返し計算を行ってスペクトルがほぼ目標に一致しても、原波のそれと大きく変化しない。

標準波は、告示波の制定以前から使用していた地震波を継続性保持のため残したもので、El Centro NS、Taft EW、Hachinohe NSを使用する事が多い。これらの地震波形データは、建築性能基準推進協会のHPからダウンロードできる。

3. 基整促波

基整促波は、告示波でカバーしていない長周期地震動による建築物被害の影響を考慮するため、2015年12月に国交省が「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策案」（以下、対策案）として、地震波データおよび作成方法を公表した地震波である⁴⁾。基整促波は、影響の大きい関東・静岡・

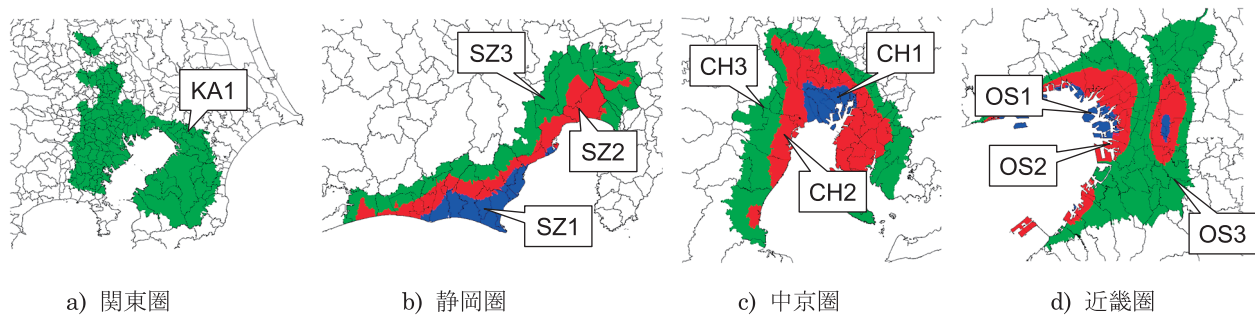
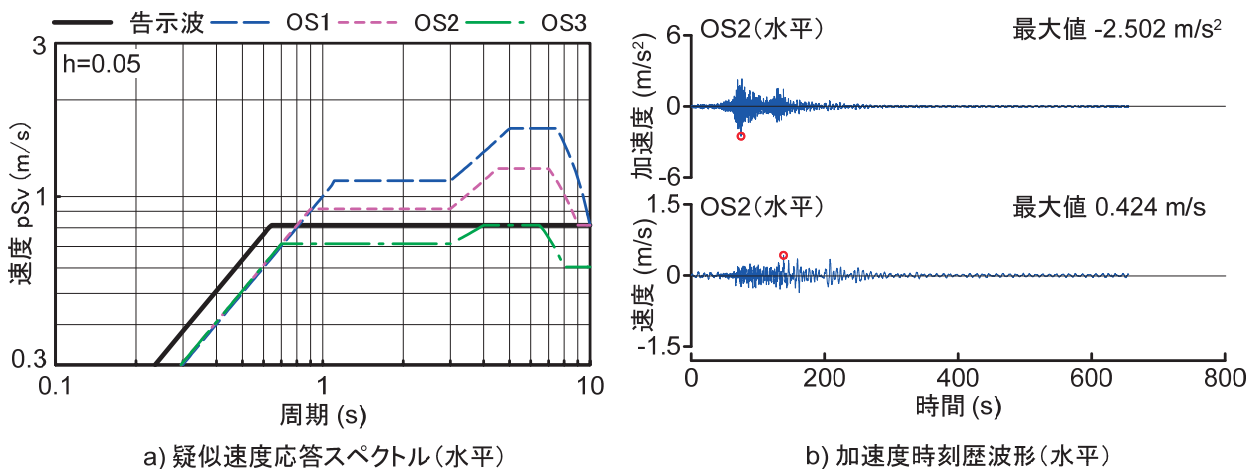
図-4 基整促波の対象区域⁴⁾

図-5 基整促波の疑似速度応答スペクトルと加速度・速度時刻歴波形

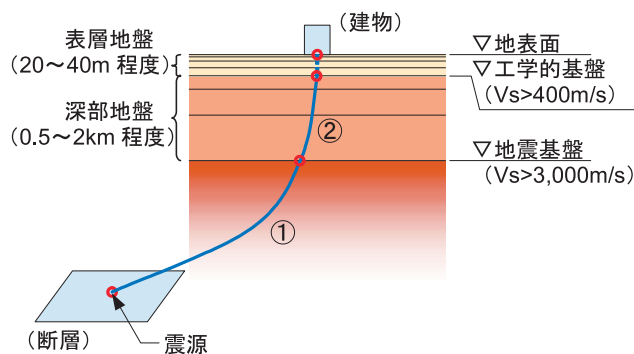


図-6 基整促波における地震動作成の考え方

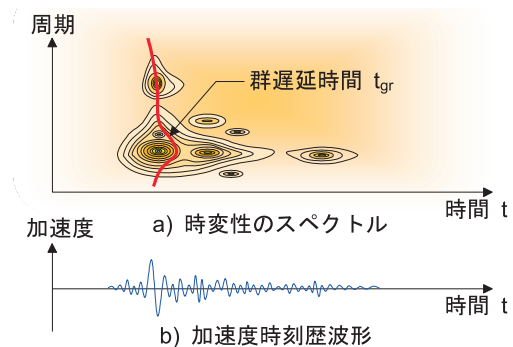


図-7 群遅延時間と加速度時刻歴波形

中京・近畿圏を主な対象としており、建築研究所のHP⁵⁾で配布する地震波をそのまま使用する。図-4に基整促波の対象区域を示す。

基整促波は、地震動の長周期成分が大きく影響した2003年十勝沖地震における苫小牧の石油タンク大規模火災を契機として、地域特性を考慮して作成した地震波である。図-5に疑似速度応答スペクトルと加速度・速度時刻歴波形を示す。疑似速度応答スペクトルpSvの卓越周期は3~8sと長周期成分が強調されている。また、

加速度・速度応答波形では主要動の長さは約200sと、告示波・標準波と比較してかなり長い。

対策案では、地震動の作成方法も示しており（参考文献5）における別紙3の方法）、対象区域が隣接する場合に限り、建築物の一次固有周期付近でスペクトルがいずれかの区域の小さい方を下回らない条件で、独自に地震動を作成できる。この方法では、加速度応答スペクトルSaおよび群遅延時間 T_{gr} を、観測波の分析結果から定めた係数データおよび地震動のマグニチュード等をパラメー

タとした簡易式で計算して、これらを元に繰り返し計算で地震波を作成する。以下に加速度応答スペクトル S_a 、および群遅延時間 T_{gr} の計算式を示す。後者は正規乱数列として計算に使用するため、その平均値 μ および標準偏差 σ を記している。

$$\log_{10}\{S_a(T)\} = a_1(T)M_w + a_2(T)M_w^2 \dots\dots\dots(1)$$

$$+ b_w(T)R - \log_{10}\{R^{p(T)} + d(T)10^{0.5M_w}\}$$

$$+ c_0(T) + c_j(T) + c_{wj}(T)$$

$$\mu(f) = A_1(f)M_0^{1/3} + B_1(f)X + C_{1j}(f) \dots\dots\dots(2)$$

$$\sigma^2(f) = A_2(f)M_0^{1/3} + B_2(f)X + C_{2j}(f)$$

M_w はモーメントマグニチュード、 M_0 は地震モーメント、 R は断層最短距離、 X は震源距離、 T は周期、 f は周波数を示す。 $a_1()$ 、 $a_2()$ や $A_1()$ 、 $B_1()$ 等は係数である。 M_w 、 M_0 等は断層毎に定まる値であり、対策案に示す参考値等を使用する。

式(1)は、地震動を①震源および伝播経路、②深部地盤の増幅特性(サイト増幅特性)に分離した上で、多数の観測記録を基に M_w や R をパラメータとして関数化(回帰)している。式(1)の1～2行目が震源および伝播経路、3行目がサイト増幅特性を表しており、加速度応答スペクトル S_a はこれらの単純積となる。図-6に、基盤波における地震動作成の考え方を示す。この時、地盤を図-6に示す様にせん断波速度 V_s が3,000m/s程度以上の地震基盤、および400～3,000m/s程度の深部地盤に分離してモデル化している。この様なモデル化は、断層モデルによる地震動作成で一般的に用いられている。

地震動の作成には、式(1)の加速度応答スペクトルで表される振幅特性の他に位相特性が必要であり、基盤波では式(2)に示す群遅延時間 T_{gr} の平均値 μ および標準偏差 σ から設定する。図-7に群遅延時間と加速度時刻歴波形の関係を示す。群遅延時間 T_{gr} は、図-7に示す様に周期毎に異なる時刻歴波形の重心を意味しており、地震波形のフーリエ位相スペクトルから計算できる。この群遅延時間の平均値 μ および標準偏差 σ を、多数の観測記録を基に M_0 や X をパラメータとして関数化したのが式(2)であり、この式から計算した μ 、 σ にしたがう正規乱数を発生し、更にこれを位相特性に変換して地震動作成に使用する。

上式は地表面における地震波を表しており、必要に応じて工学的基盤に引き戻した上で、あらためて表層地盤の影響を付加する。これには対策案に示す方法を用いるが、周期1s以上では表層地盤の影響が十分小さいと考えられるので考慮していない。また、免制震デバイスや

鋼構造建築物の接合部等の、長時間の繰り返し回数による性能低下や破断の恐れが有る部位では、対策案に示す方法で累積損傷による影響を検討する必要がある。

4. サイト波(大震研波)

サイト波は、当該サイトにおける過去の地震発生履歴や周辺の活断層や地盤性状など固有の地震・地盤環境に基づいて個別に決められる地震動である。

大阪盆地のほぼ中央に位置する上町断層では、建基法のレベルを大きく上回る地震動が発生する可能性が有るが、発生頻度が数千年に一度と極端に長いため、'90年代以前にはサイト波としてほとんど考慮していなかった。そこで、上町断層の地震を対象とした設計用地震動を、民間団体である日本建築構造技術者協会関西支部(以下、JSCA関西)を中心に2009年に発足した「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」(以下、大震研)で作成して公開し、これを大震研波と呼んでいる⁶⁾。実際の設計では、大震研が配布する地震波データをそのまま使用する。

大震研波は、最新の知見を踏まえた上で設計用に作成した地震動であり、上町断層の地震による影響が強い地域では標準的に使われている。また、大震研では生駒断層等の大阪近傍の大きな活断層についても設計用地震動を作成しており、建設地点においてその影響が無視できない場合は使用を推奨している。

大震研が2015年に作成した耐震設計指針では、レベルの異なる3種類の地震動を用意しており、レベル3Aが想定する地震動の平均的なレベル、レベル3Bが平均+0.5×標準偏差、レベル3Cが平均+標準偏差を意味

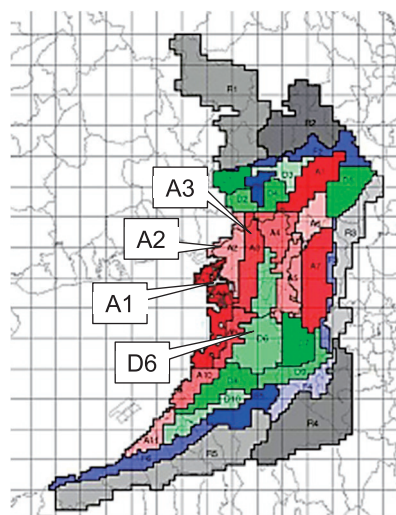
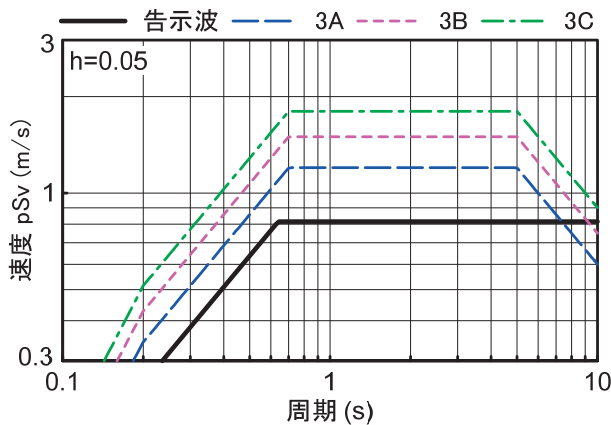
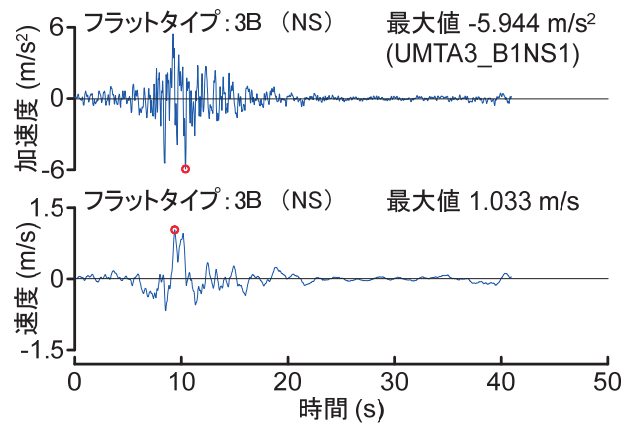


図-8 大震研波のエリア区分⁶⁾

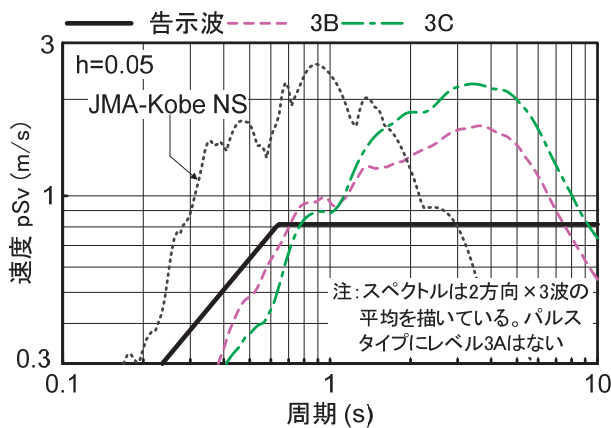


a) 疑似速度応答スペクトル

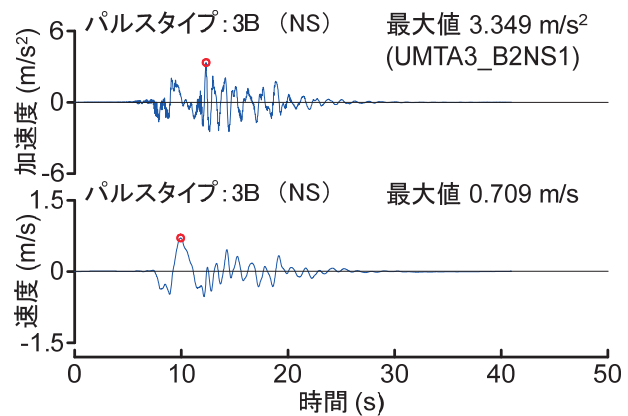


b) 加速度および速度時刻歴波形

図-9 疑似速度応答スペクトルおよび加速度・速度時刻歴波形（フラットタイプ、A3エリア）



a) 疑似速度応答スペクトル



b) 加速度および速度時刻歴波形

図-10 疑似速度応答スペクトルおよび加速度・速度時刻歴波形（パルスタイプ、A3エリア）

し、レベル3Bは3Aより2～3割大きくなる。この平均・標準偏差は、断層パラメータや破壊開始点および地盤諸元のばらつきを考慮して作成した、複数の地震波から計算している。

大震研波は、1997年に大阪市、2007年に大阪府が上町断層を対象として断層モデルにより作成した地震動を基にしており、このうち大阪府の地震動は差分法と統計的グリーン関数法により作成している。差分法は、大阪盆地の複雑な構造を三次元メッシュでモデル化して地震動を計算する方法であり、盆地特有の複雑な揺れを表現できる。ただし、短周期成分が十分に表現できないため、統計的グリーン関数法で補っている。

大震研波にはフラットタイプと、パルスタイプの2種類の地震動が有る。フラットタイプのスペクトルは、1997年に大阪市、2007年に大阪府が作成した地震動のうち、パルス状のピークが見られるもの以外について、複数の折れ点を有する直線および曲線でモデル化している。パルスタイプは、上記の地震動のうち、パルス状の

ピークが見られるものを直接選定している。更に、この地震動を模擬した正弦波も参考波として作成し、選定波の妥当性を検証している。なお、大震研波は地震動レベルが大きく、表層地盤の増幅特性が大きくなばらつきを含む恐れが有るため、これをあらかじめ評価した地表面波となっている。

図-8に大震研波のエリア区分、図-9および図-10にフラットタイプおよびパルスタイプの地震波に関する、疑似速度応答スペクトルと加速度および速度時刻歴波形を示す。フラットタイプの疑似速度応答スペクトルでは、ほぼ全周期帯で大震研波が告示波を上回っている。最大加速度は 5.944 m/s^2 、最大速度は 1.033 m/s で、加速度で概ね 3.8 m/s^2 、速度で 0.5 m/s 程度となる告示波と比較して、各々1.6, 2倍程度となる。パルスタイプでは、スペクトルのピークは周期3～4s、速度振幅は告示波の2倍以上となっている。図中には阪神大震災におけるJMA-Kobe NSのスペクトルもあわせて示しているが、スペクトルの速度振幅は大震研波のそれと近くなってい

る。最大加速度は 3.349 m/s^2 、最大速度は 0.709 m/s とフラットタイプよりやや小さく、告示波と比較して各々0.9, 1.4倍程度となっている。

5. 性能評価での実績

これらの地震波の作成方法・使用波数には、設計者の考え方や建設地の地震・地盤環境によりばらつきがあり、当所が評価した案件における実績を調査した結果を以下に紹介する。調査は2019～2021年の3年間に性能評価を実施した高層建築物および免震建築物62件について行い、表-2にその結果を示す。告示波の位相特性は、観測波（JMA-Kobe NS、Hachinohe NS）と一様乱数を使用するものが51件、観測波のみ（前者に加えてTohoku NS）を使用するものが10件と両方で全体の9割以上を占める。

基整促波は、対象区域内の40件はOS1～OS3等の配布波をそのまま使用しており、別紙3の方法で地震波を作成したものはなかった。なお、対象区域外だが参考として別紙3の方法により、地震波を作成したものが6件有る。これらは南海トラフからやや離れるがその影響が懸念される地域であり、断層モデルの作成を要しない簡易法として別紙3の方法を用いている。

大震研波は、対象区域内の34件のうち29件で利用されている。これらは全て上町断層の地震を対象としており、大震研で検討している生駒断層等を対象としたものはなかった。大震研波に加えてサイト波も検討しているものが4件有る、これらは1997年に大阪市が公開した地震波を極めて稀に発生する地震、大震研波を参考波として検討している。大震研波を使用しないものが3件有る、これらはJ-SHISの公開波を使用したものと、サイト波として断層モデルにより独自に敷地位置における地震動を作成したものである。

サイト波は、大震研が対象とした上町断層・生駒断層以外の断層が敷地近傍にある場合に使用するもので、21件が該当する。断層モデルを作成せずJ-SHISの公開波を使用したものが2件、その他の公開波を使用したものが3件有る。その他の公開波は、南海トラフについて内閣府が公開したもの⁷⁾のほかに、敷地近傍で観測した近年の大地震の記録を調整して用いたものが有る。断層モデルにより作成する予測波は、統計的グリーン関数法（以下SGF）が多いが堆積盆地の影響を考慮しないと長周期成分が不足するので、これを深部地盤について一次元でモデル化した波数積分法、もしくは三次元で詳細にモデル化した差分法で補う事が多い。ただし、震源と

表-2 性能評価での実績（2019～2021年）

種 別	項 目	件 数
告 示 波	位相特性は観測波＋一様乱数	51
	位相特性は観測波のみ	10
	その他	1
基整促波	対象区域内	40
	区域外だが参考として検討	3
	別紙3で作成（区域内）	0
	〃（区域外：参考）	6
大震研波	対象区域内案件	31
	大震研波を使用	28
	大震研波＋サイト波	4
	大震研波を使用しない	3
サイト波 ²⁾	サイト波使用案件	21
	公開波（J-SHIS）	2
	〃（その他）	3
	予測波（SGF）	5 ¹⁾
	〃（SGF＋波数積分法）	4 ¹⁾
	〃（SGF＋差分法）	2 ¹⁾
	〃（その他の手法）	7 ¹⁾

注1：予測波の作成手法は、複数波を異なる手法で検討している場合が有るので合計は一致しない

敷地がやや遠く地震動レベルも小さいと推測する場合、簡易的にSGFのみを用いるケースも見られた。

6. 設計用地震動の課題

以上に述べた様に、2015年に国交省により導入された基整促波、および上町断層・生駒断層を対象にJSCA関西が提案した大震研波は、従来の告示波・標準波で十分に表現出来なかった、海洋型地震による長周期・長時間の振動や、直下型地震におけるパルス状の振動といった地震動の長周期成分を補完する役目を果たしている。その背景には、近年、免震構造物やタワーマンション等の長周期建築物の増加で、長周期地震動によるこれらの建築物への被害が懸念されている事が上げられる。

長周期地震を久田は表-3の4種類に分類している⁸⁾。これらのうち長周期・長時間地震動が基整促波、指向性パルスが大震研波に相当する。フリングパルスは、敷地が断層の直下に有る場合に問題となるが、現状では有効な対策方法が見当たらない。複合型パルスは、2018年熊本地震のKiK-NET益城および熊本県益城町役場・西原村役場の観測記録で周期2～3s付近の大振幅パルスが認められた事で注目を集めた。阪神大震災の観測波では周期1s付近にピークが認められたが、この観測記録は条件によっては更に長周期で大振幅のパルス波が発生する可能性がある事を示している。今後、このような地震動がどのような断層・条件で発生するか検討を進め、必要に応じて新しい検討用地震動を追加する事が望まれる。

7. 大阪盆地の長周期地震動

以上で、業務方法書¹⁾に関連した設計用地震動の説明は終わるが、大阪盆地では主要動のあとに「あとゆれ」と呼ばれる継続時間の長い長周期波が連続する特徴があるので⁹⁾、その概要について説明する。

図-11に、2011年東北地方太平洋沖地震における長周期地震動の伝播状況を示す。観測記録はK-NETを使

用し、加速度時刻歴について周波数フィルターにより4s付近の成分を抽出した後、平滑化してNS,EWの二乗和平方根値を計算し、更にこれを時刻毎に地図上に並べてコンタ図を作成した。地震動は震源である東北方向から到来するが減衰の程度は様でなく、大阪盆地付近では地震動はすぐに減衰しない。特に大阪湾沿いでは、時間 $t=345$ sとなる最後の図でも十分に減衰していない。

表-3 長周期地震動の分類 (文献8から抜粋)

名 称	特 徴	主な成分	代表的な観測記録
長周期・長時間地震動	遠い大規模震源から発生した長周期地震動が堆積盆地・平野で増幅し、継続時間が非常に長い表面波となる。基板と堆積層の剛性比が大きいと明瞭な卓越周期を生じる	堆積層表面波	・1923 年関東大震災の東京本郷の変位波形 ・2003 年十勝沖地震の苫小牧波
長周期パルス	指向性パルス	震源断層の強震動生成域などで生成され、破壊伝播の進行方向で断層面に近い観測点に現れる。一般に断層面に直交する成分が卓越するが、横ずれ断層でも破壊伝播が上昇する場合は断層平行成分に現れる場合もある。	実体波 ・1994 年ノースリッジ地震のNew Hall 波 ・1995 年兵庫県南部地震のJMA 神戸波
	フリングパルス	地表地震断層など浅い大規模な断層すべりに起因し、断層近傍の観測点で、断層すべりの方向に現れる。変位波形では永久変位をとみなうステップ関数状の波形を示す。	断層のすべりに起因 ・1999 年台湾集集地震の石崗波 ・1997 年ランダース地震のLucene Valley 波
	複合型パルス	横ずれ断層の断層直交・上下型成分や、横ずれ断層の断層平行成分(破壊伝播が観測点にむかって上昇する場合)では、指向性パルスとフリングパルスが同方向に卓越する。このため、2 種類のパルスが同位相で重なって大振幅のパルス波となる場合がある。	実体波、断層のすべりに起因 ・2018 年熊本地震の KiK-NET 益城波、益城役場波、西原村役場波

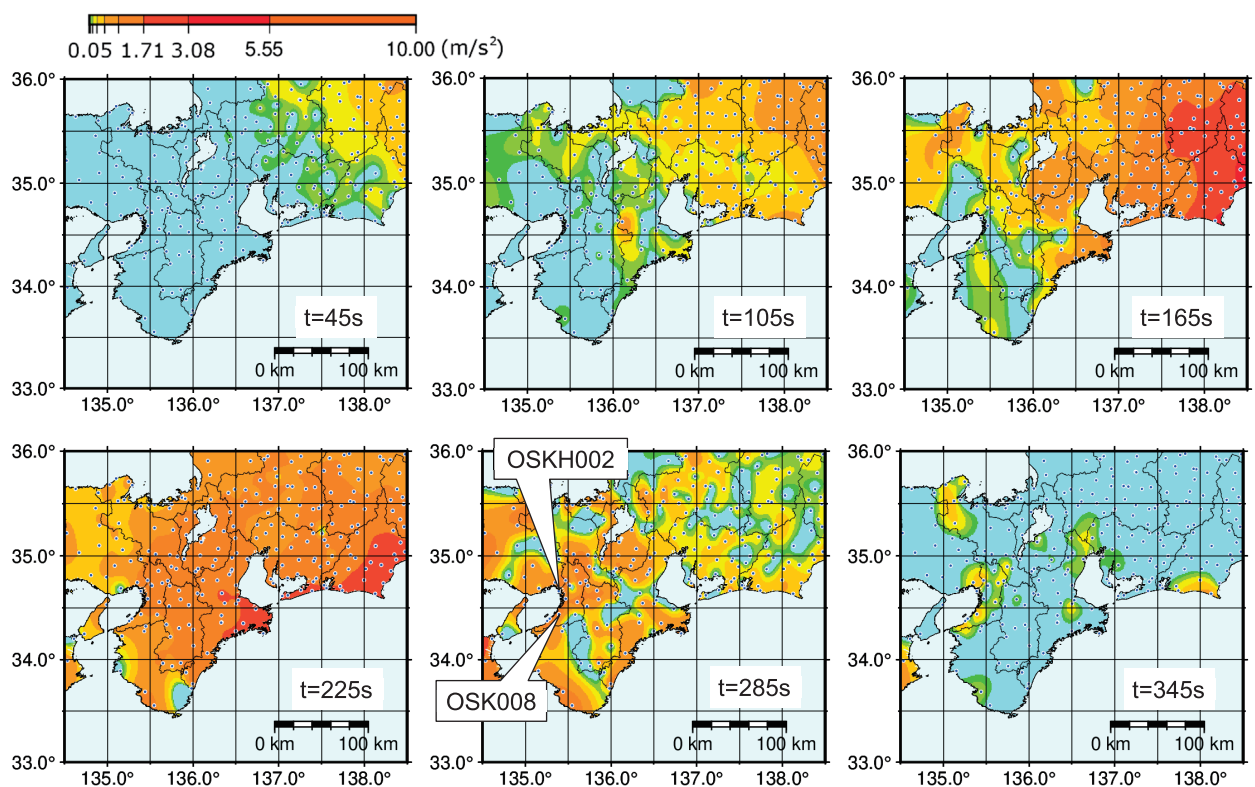


図-11 長周期地震動の伝播状況 (2011年東北地方太平洋沖地震、周期4s付近)

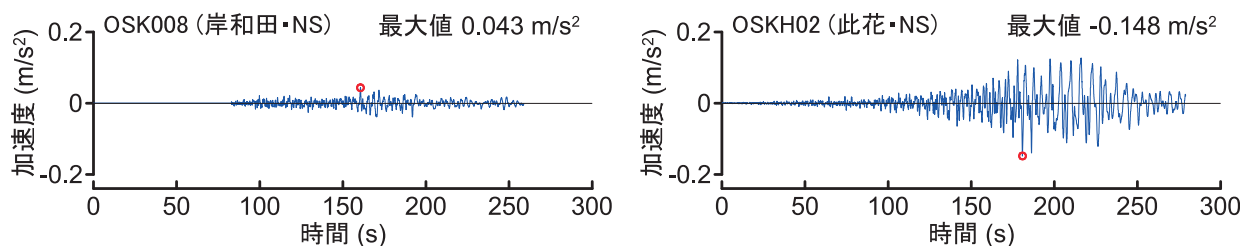


図-12 OSK008およびOSKH02の加速度時刻歴波形（2011年東北地方太平洋沖地震）

図-12に、OSK008およびOSKH02の加速度時刻歴波形を同時刻となる様にして示す。これらの観測点の位置を図-11中に示すが、両者の直線距離は25km程度である。OSK008では加速度時刻歴波形は160s付近でピークに達して緩やかに減衰するが、OSKH02ではピークに達した後も約50sにわたって定常的に振動し続ける。最大加速度もOSKH02の方がOSK008の3倍程度大きい。この様に地点によって地震動に大きな差が生じるのは、深部地盤の不整形性が原因の一つと推測される¹⁰⁾。現状の設計用地震動では、このような局所性を考慮するのは難しく、更に高精度な地震波を作成するには、地点毎の深部地盤構造を出来る限り正確に把握する必要がある。

8. おわりに

主に超高層・免制震建築物等の構造的な性能評価で使用する設計用入力地震動についてその概要を説明した。2015年頃に導入された基整促波および大震研波により、従来の告示波が反映していない、大振幅や長周期の地震動をカバー出来る様になり建築物の耐震安全性は大きく向上したと考えられる。

2018年熊本地震では周期2～3s付近の大振幅パルスが認められ、十分な検証が必要だが今後設計用地震動への反映が必要となる可能性もある。また、敷地が断層の直上に有る場合、建築物に影響を与える大きな地表変位については、現時点で有効な対策方法が見当らない。地盤調査を精密に行って基礎直下を横断していないことを確認する必要がある。

1995年兵庫県南部地震や2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録からは、深部地盤の不整形性により局所的な地震動増幅が認められ、また断層近傍では断層面上の滑りの不均質性がそのまま地震動に現れるので、今後発生が予想される大地震では、基整促波・大震研波を超える可能性もある。詳細な深部地盤構造の把握や、それを反映した高精度な設計用地震動の策定が望まれる。その際には建築学会が取りまとめた「最新の地盤震動研究を活かした強震波形の算定法」¹¹⁾が参考になる。

【参考文献】

- 1) 日本建築総合試験所：時刻歴応答解析建築物構造安全性能評価業務方法書，2021。
- 2) 建築行政情報センター・日本建築防災協会：2020年版 建築物の構造関係技術基準解説書，8.1 超高層建築物等の構造計算，pp.487-492，2020。
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課ほか：2001年版 限界耐力計算法の計算例とその解説 付録10 設計用地震動時刻歴作成手法，pp.270-2276，2001。
- 4) 国土交通省：超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について，https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/jutakukentiku_house_fr_000080.html（2022年12月）
- 5) 建築研究所：長周期地震動対策に関わる技術資料・データ公開特設ページ，<https://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/lpe/>（2022年12月）
- 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：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耐震設計指針，2015。
- 7) G空間情報センター：内閣府 中央防災会議 東海地震、東南海・南海地震等に関する専門調査会，<https://www.geospatial.jp/ckan/organization/naikakufu-004>（2022年12月）
- 8) 久田嘉章・田中真也：2016年熊本地震の地表地震断層近傍の強震動特性と建物被害調査，日本建築学会，第45回地盤震動シンポジウム，pp.8-23，2017。
- 9) 鳥海勲：平野の地震動特性について，第4回日本地震工学シンポジウム，129-136，1975。
- 10) 天藤潤一・永野正行・上林宏敏：大阪湾沿岸部における長周期地震動の地盤増幅特性および地震波入射方向と上町断層帯の地盤構造の影響，日本地震工学会論文集，第15巻，第7号，pp.131-140，2015。
- 11) 地盤震動小委員会：最新の地盤震動研究を活かした強震波形の算定法，日本建築学会，2009。

【執筆者】



*1 中野 富夫
(NAKANO Tomio)