

性能設計体系における新たな耐震設計事例 -設計地震動-

長尾 毅¹・末富岩雄²・福島康宏²・今村年成³・北原武嗣⁴

¹正会員 神戸大学教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: nagao@people.kobe-u.ac.jp

²正会員 (株) エイト日本技術開発 災害リスク研究センター (〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail: suetomi-i@ej-hds.co.jp, fukushima-ya@ej-hds.co.jp

³正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社 鉄道系部門 (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4-11-10)

E-mail: imamura_t@cfk.co.jp

⁴正会員 関東学院大学教授 理工学部土木学系 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1)

E-mail: kitahara@kanto-gakuin.ac.jp

性能設計の導入が各種基準類において謳われているものの、現実的には画一的な手法が採用されている現状に鑑み、本論文は設計者の判断により適切と考えられる手法を適用して作用の評価から断面諸元を決定するプロセスを性能設計体系における設計事例として示すことを目的とする。前編に相当する本稿では設計地震動を対象に、震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性を考慮した震源依存かつ地点依存の設計地震動の設定例を示し、基準類に位置付けられている地震動との対比を行った。

Key Words : performance-based design, design earthquake ground motion, site amplification factor

1. はじめに

土木学会地震工学委員会に設置されている耐震基準小委員会においては、平成 26 年 9 月に「性能設計体系における土木構造物の耐震設計事例集」¹⁾をとりまとめ、公表している。性能設計に関しては、国際標準規格として ISO23469 (構造物の設計の基本—地盤基礎構造物の設計に用いる地震作用—: (Bases for design of structures—Seismic actions for designing geotechnical works)²⁾があり、その趣旨に沿った設計事例集が英語版で作成されているが、当該事例集は、日本の技術者に馴染みがよいように、日本語版の設計事例集として作成されたものである。このため当該事例集は、既往の設計基準類に従う設計事例ではなく、性能設計体系における設計事例として、設計者の判断により既存の基準類の方法にとらわれない手法で設計した事例の骨格を示すことを目的としている。従って、設計結果を示すことが目的ではなく、性能設計体系における要求性能や性能規定、さらには設計法の考え方を示すことに主眼を置いている。

上記の設計事例集には付録として、各分野の耐震設計の現状を整理している。その結果を見ると、入力地震動の設定、構造物の耐震性能照査のそれぞれについて、結局は各基準類に定められた手法のみが採用されているのが現状であると言わざるを得ない。平成 13 年 3 月に規

制改革推進 3 カ年計画が閣議決定され、「基準の内容が、技術革新に対して柔軟に対応できるよう、仕様規定となっている基準については原則としてこれをすべて性能規定化するよう検討を行う」と位置付けられたにもかかわらず、画一的な方法が推奨ないしは要求される設計法として存在している。各基準とも性能設計を謳っているが、要求性能や性能規定が規定されていれば、それが性能設計を導入したことであるという、性能設計の概念(=性能のみが強制され、手法は設計者の判断により選択できる)の読み替えが実質的に行われているとみなすこともできる。

このような現状について、土木学会耐震基準小委員会で議論を行った結果として、性能設計の導入のためには単にその合理性や必要性を主張するだけでは不十分であり、性能設計を導入しない場合に生じる不都合を具体的に示す資料が必要であるという議論がなされ、新たな設計事例集を作成するための WG が設立された。本論文は、その WG における検討結果をとりまとめたものであり、前編に相当する本稿では設計地震動を取り上げる。

耐震設計を設計地震動の設定と耐震性能照査という側面に分けて考えたとき、性能設計の導入という観点で問題がより大きいのは設計地震動の設定であると考えられ

る。すなわち、既往の設計コードのほとんどが日本全国の既往最大の地震動などを参照して設計入力地震動を設定しているが、実際には地震動は構造物が建設されるサイトに固有の地震動が考えられるべきであり、サイトによってはそうした設計入力地震動は過大な地震動である可能性があるといえる。また、日本全国の最大級の地震動とはいっても、観測された記録の中での最大級でしかないことから、真に最大級の地震動が設定されているという保証はないという見方もできる。このため、既往観測最大かつ代表的な地震動で、日本中の構造物を設計する従来の考え方が、経済的に地震災害を軽減するには全く有効ではなく³⁾、地震動は震源依存かつ地点依存であることを踏まえて設定する必要がある³⁾ことが改めて認識されなければならないと考えられる。

本稿では、震源依存かつ地点依存な地震動を設定するとともに、基準類で設定された画一的な標準地震動との対比を行う。なお後編⁴⁾においては、各種構造物を対象に、具体的な設計事例を示している。

2. 地震動に影響を及ぼす諸特性

(1) 地震動の基本的な考え方

地震動は、震源特性・伝播経路特性・地盤増幅特性で表される(図-1 参照)。実際の予測では、下記のように断層面から工学的基盤上の地震動 $O_b(f)$ までと、浅層地盤の増幅特性 $G_s(f)$ の評価の2段階で行われる。また、工学的基盤での地震動の $O_b(f)$ を設計スペクトルとして、浅層地盤の増幅特性のみを地点ごとに考慮することもよく行われる。

$$O_b(f) = S(f) \times P(f) \times G_d(f) \quad (1)$$

$$O(f) = O_b(f) \times G_s(f)$$

$O(f)$: 地表での地震動

$O_b(f)$: 工学的基盤での地震動

$S(f)$: 断層での地震動(震源特性)

$P(f)$: 伝播経路の特性

$G_d(f)$: 深層地盤の増幅特性

$G_s(f)$: 浅層地盤の増幅特性

f : 周波数

(2) サイト増幅特性

国内では多くの地震観測記録が得られているので、式(1)に基づく回帰分析に基づき、各観測点における地盤増幅特性 $G_s(f)$ を評価することができる(このようにして得られたサイト増幅特性は経験的サイト増幅特性と呼ば

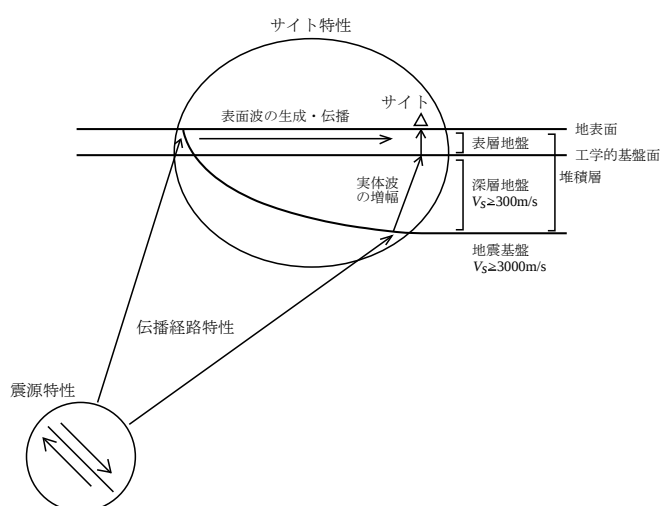


図-1 地震動の震源特性・伝播経路特性・サイト特性³⁾

れる)。野津・長尾⁵⁾は、このスペクトル・インバージョンにより、港湾、防災科研等の主な観測点における経験的サイト増幅特性を算出している。

道路橋示方書⁶⁾においては後述するようにⅠ種～Ⅲ種という地盤種別ごとに設計地震動を設定している。そこで、図-2に関東地方の経験的サイト増幅特性(地震基盤～地表)を地盤種別ごとに数例重ねて示す。

Ⅰ種地盤のサイト増幅特性は明瞭なピークを示さないことが多いが、KNG008(相模原)のように明瞭なピークを示す場合もある。ピークが不明瞭な場合も、周期0.5～1.0秒における増幅率の値は場所によって大きく異なっている。これは深層地盤の堆積層の厚さの違いなどに起因するもので、例えば山梨県境に近いTKY002(松原)で小さく、KNG010(平塚)やCHB005(銚子)は大きい。

Ⅱ種地盤でも、TKY003(青梅)やKNG004(三崎)はピークが明瞭であり、地点によりそのピークはずれている。CHB001(野田)やTKY007(新宿)のようにピークが明瞭でないものもある。

Ⅲ種地盤では、CHB019(鋸南)、SIT003(久喜)、KNG013(小田原)のように増幅率が大きくピークが明瞭な地点が少なくない。その周期は、それぞれ異なっている。増幅倍率もKNG009(厚木)のように他地点と比較すれば低めの値にとどまる地点もある。

以上は関東地方の例であるが、関東地方の例示した以外のサイトや他地方では、増幅特性が大きく異なる地点が多く存在することはいうまでもない。いずれにせよ、表層のみならず深層地盤による増幅特性はサイト毎に大きく異なるものであるため、Ⅰ～Ⅲ種地盤などといった従来型の分類法でサイト増幅特性を簡単かつ明瞭に分類できるものではないことが指摘できる。

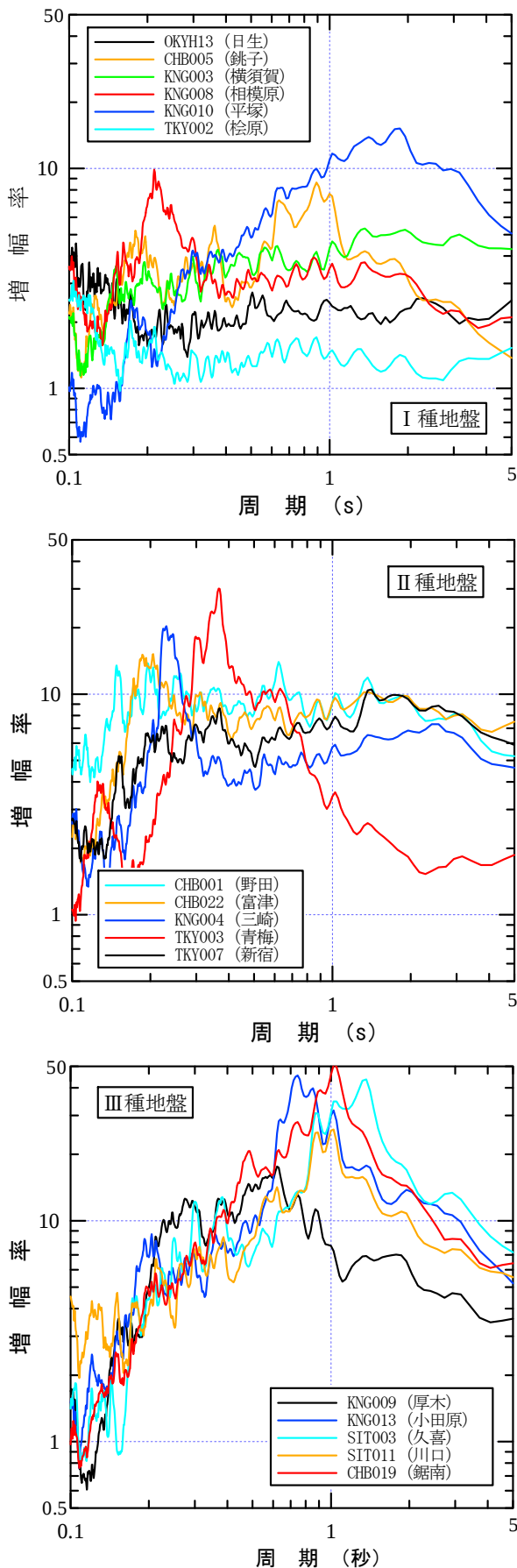


図-2 経験的サイト特性の比較

3. 各種構造物の設計地震動の設定に関する現状

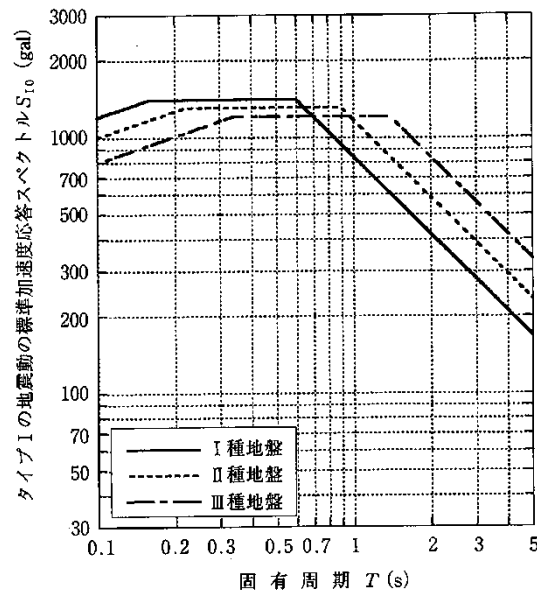
以下に、各種施設の設計用入力地震動の考え方を記し、設計者の判断の余地について整理する。

(1) 道路施設

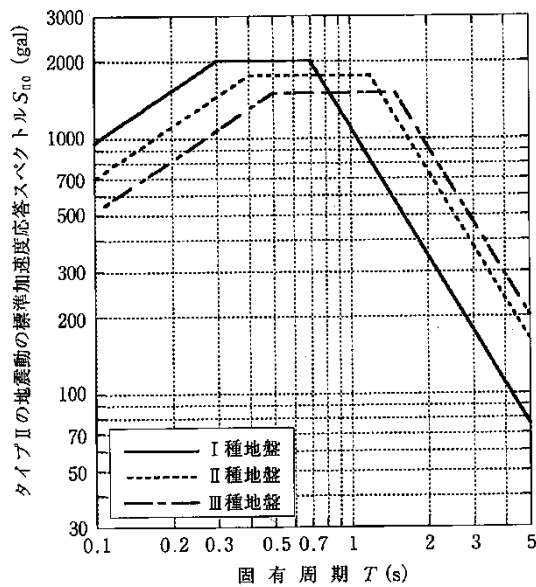
社団法人日本道路協会から「道路橋示方書・同解説 I～V」(以下、道示)⁹⁾が出版され、通達で強制力のある基準として位置づけられている。設計用入力地震動については、レベル1・レベル2地震動とも標準加速度応答スペクトルが設定されている。レベル2地震動には、プレート境界型のタイプIと内陸直下型のタイプIIがある。

図-3にタイプIとタイプIIの標準加速度応答スペクトルを示す。これに、地域別補正係数を乗じたものが、地盤種別に応じたレベル2地震動となる(III種地盤は基本固有周期 T_0 が0.6秒以上の比較的軟らかい地盤)。

道示は2012年に東日本大震災を受け改訂され、「設計地震動を個別に設定するために必要な情報を十分に得ることは現状では容易でない」と記し、個別に地震動を設定することに関する規定を無くしているため、震源依存かつ地点依存の設計地震動を用いる余地を排除している。そして、プレート境界での大規模地震の発生を考慮した上で、図-3の加速度応答スペクトルに基づいて設定するように規定している。



(a)タイプI S_{10}



(b)タイプII S_{II0}

図-3 地震動の標準加速度応答スペクトル⁹⁾

(2) 鉄道施設

「鉄道構造物等設計標準・同解説」(以下、鉄道標準)⁷⁾では、「L2地震動は、強震動予測手法に基づき地点依存の地震動として算定するものとする。ただし、詳細な検討を必要としない場合は、簡易な手法によりL2地震動を算定してもよい。また、L2地震動の算定時には、伏在断層による地震についても配慮するものとする。」と記されている。

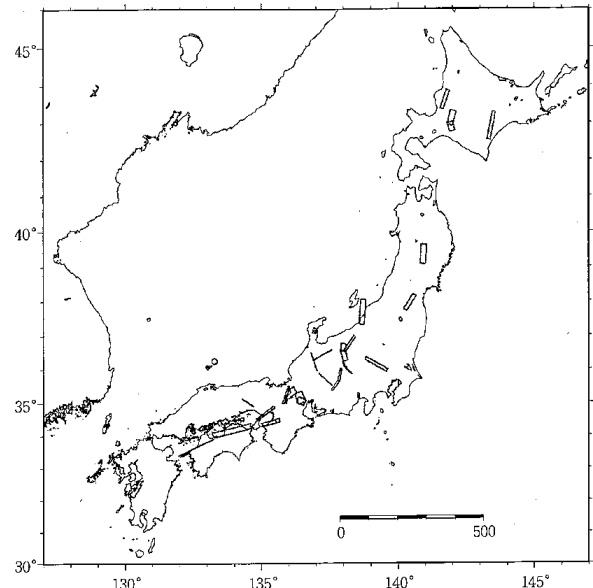
簡易な手法とは、道路施設と同様に、地表面上の設計スペクトルを用いるものである(道路施設よりも区分は多くG0地盤からG7地盤までである)。道路施設と異なるのは、工学的基盤の地震動を用いて、表層の地震応答解析を行うことも可能な点である。

強震動予測手法による詳細な検討が必要な場合として、以下が記されている。

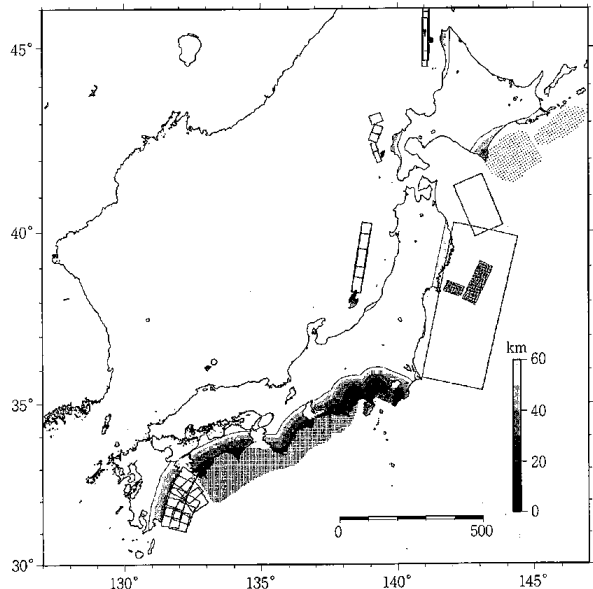
- ①モーメントマグニチュード $M_w=7.0$ よりも大きな震源域が建設地点近傍に確認される場合
- ②耐震設計上の基盤面より深い地盤構造の影響によって地震動の著しい増幅が想定される場合

①については、目安として、具体的に図-4に示されている。東海・東南海・南海地震などの巨大海溝型地震の震源断層が陸地直下に潜り込むような地点の近傍や、中央構造線などの大規模な内陸活断層などが存在する地点の近傍が該当する。

また、「震源特性、伝播経路特性、地点増幅特性を考慮した強震動予測手法に基づき、地点依存の地震動を評価する手法としては、現状では半経験的手法が耐震設計において最も適用性が高い」と記している。



(a)スペクトルIIを上回る地震が想定される活断層



(b)スペクトルIを上回る地震が想定される震源域とそれから60km以内のエリアの目安

図-4 標準応答スペクトルの想定規模を上回る地震が想定される震源域⁷⁾

(3) 港湾施設

「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁸⁾で、強制力の無い標準的な照査法が述べられている。

レベル1・レベル2ともに、震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性を踏まえた時刻歴波形として港湾毎に設計者が設定することが基本である。サイト増幅特性とレベル1地震動については、国総研HPより標準的なデータがダウンロード可となっており、これが実務で用いられる。

レベル2地震動策定で用いられる統計的グリーン関数法では、多くのパラメータを設定する必要があるので、

基本的な考え方なども「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に記されている。

地震動予測方法については「レベル2地震動については、地震動の実測値、想定される地震の震源パラメータ等をもとに、震源特性、伝播経路特性及びサイト特性を考慮して、時刻歴波形を適切に設定するものとする。」と規定されている。

レベル2地震動の評価に必要な震源パラメータには巨視的震源パラメータ（基準点位置、走向、傾斜、長さ、幅、面積、地震モーメント）、微視的震源パラメータ（アスペリティの数、アスペリティの面積、アスペリティの地震モーメント、ライズタイムなど）及びその他のパラメータ（破壊開始点、破壊伝播速度、破壊伝播様式）がある。

アスペリティの配置は、後述の破壊開始点との関係で、アスペリティ（のうちの一つ）の破壊が対象港湾に向かって進展するような配置とする。これは、指向性の影響により、アスペリティの破壊が進展する方向に向かって特に強い地震波が出ること、また、このようにして生成された強い地震波が1995年兵庫県南部地震の大被害に結びついたことを考慮したものである。具体的には図-5の配置とし、アスペリティの中心点深さは10kmとする。

その他のパラメータのうち破壊開始点は、アスペリティ位置との関連で、図-5に示す位置とする。破壊伝播速度は震源付近のS波速度の80%とする。破壊伝播様式は同心円状とする。

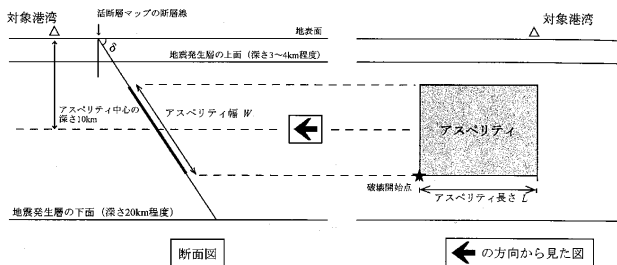


図-5 アスペリティと破壊開始点の配置

統計的グリーン関数法を用いるが、港湾の基準では、下式により対象地点での観測記録を活用して、統計的グリーン関数を作成する点が異なる。

$$A(f) = A_b(f) G(f) \frac{O_s(f)}{|O_s(f)|} \quad (2)$$

ここで、

- $A(f)$: 地表における地震動のフーリエ変換
- $A_b(f)$: 地震基盤における地震動のフーリエ変換
- $G(f)$: サイト増幅特性（地震基盤～地表）
- $O_s(f)$: 対象地点での中小地震記録のフーリエ変換
- f : 周波数

(4) ダム施設

「大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説(平成17年3月)」⁹⁾に基づくダムのレベル2地震動の設定フロー¹⁰⁾を図-6に示す。ダムサイト毎に、想定地震を検討しダムの距離減衰式を用いて入力地震動を算定するので、震源依存の考え方である。距離減衰式の平均値に標準偏差を加えた値を用いることで、安全性を担保している。ダムの距離減衰式は何度か見直されており、現在は平成23年度式¹¹⁾が用いられている。



図-6 レベル2地震動設定のフロー¹⁰⁾

(5) 高圧ガス

高圧ガス保安協会による「高圧ガス設備等耐震設計基準」¹²⁾が経済産業省から見なし基準として告示されている。レベル1・レベル2ともに標準設計スペクトルが設定されている。レベル2地震動は、対象地点の地盤構造、地体構造等を考慮して、断層解析により設定することを原則としている。しかし、現状では、それらの情報が十分に得られない地域があるため、その時は、1995年兵庫県南部地震の観測記録を用いた地盤応答解析から設定したレベル2標準設計スペクトルを用いて良いこととなっている。

図-7に基づき、「活断層の有無の判定」を行って、レベル2地震動の設定を行う点は、前述の鉄道施設と同様である。

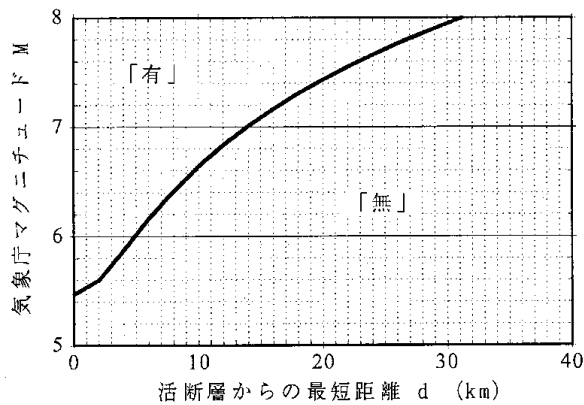


図-7 大きな地震動を与える活断層の有無の判定図

(6) 設計用入力地震動のまとめ

表現や強制力に若干の差異はあるものの、道路・鉄道等の標準スペクトルを規定している施設では、いずれもこれを上回る可能性のみ考慮するとしている。その場合も、鉄道標準では断層モデルによる強震動予測手法について記載されているが、道示では具体的な記述はない。したがって、周辺に活断層やプレート境界地震の震源域がない地点であっても、1995年兵庫県南部地震や2011年東北地方太平洋沖地震における観測地震動を概ね包絡するような、ほぼ起こり得ない揺れを想定することとなっている。

一方、港湾・ダムでは地点毎に想定地震を設定した震源依存の地震動を評価している。そして、日本は地震国であることから、震源をあらかじめ特定しがたい地震を考慮して下限の地震動を設定している。

4. 震源依存かつ地点依存の設計地震動の評価

(1) 基本的な考え方

以下の方針で、震源・地点依存の入力地震動の設定を行う。

- ・対象とする地震動はレベル2地震動とし、内陸地殻内地震を想定する。
- ・地震動は、断層モデルによる方法を用い、工学的基盤で評価する。
- ・周辺に明瞭な活断層やプレート境界地震の震源域は存在しない場所でありながらも、下限地震動よりは安全側に設定する条件とする。
- ・深層地盤(地震基盤～工学的基盤)については、地点依存で考慮することとして、経験的サイト増幅特性を用

いる。

下限地震動については、土木学会の「土木構造物共通示方書」⁹⁾では、土木構造物の耐震基準等に関する提言「第三次提言」¹³⁾でのM6.5(程度の直下型震源を考慮すること)を踏襲しており、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁸⁾でも、活断層の確認されない場合にM6.5の直下地震を考慮することとなっている。なお地震規模を表すマグニチュードには、複数あり、気象庁が公表し一般に広く用いられる気象庁マグニチュード(以降、 M_J や単に M と記す)で、上記の直下地震の大きさは表されている。一方、断層面積など地震の大きさと直接関係するのは地震モーメントから算定されるモーメントマグニチュード(以降、 M_w と記す)である。上記のM6.5の直下地震は、 $M_w=6.2$ 程度となる。

内閣府「首都直下地震モデル検討会」(平成25年12月)¹⁴⁾において検討されている「地震の発生場所が想定が難しく、都区部及び首都地域の中核都市等の直下に想定する地震」のうち、地殻内の浅い地震(さいたま市直下地震、横浜市直下地震)の地震規模としては、 $M_w=6.8$ を考慮している。この値は、2000年鳥取県西部地震に基づくが、明瞭な活断層の地震である1995年兵庫県南部地震での $M_w=6.9$ に近い。2000年鳥取県西部地震については、 $M_w=6.6$ とする評価もあり、また2004年新潟県中越地震は $M_w=6.6$ である。これは、中央防災会議「首都直下地震対策専門調査会」(平成17年7月)¹⁵⁾において検討されている「活断層以外の地殻内の浅い地震」(都心西部直下地震など)の地震規模に相当する。

以上に基づき、どこでも起こり得る下限地震動相当の $M_w=6.2$ よりは十分に大きく、明瞭な主要活断層での地震よりは小さい地震の大きさとして、本検討では $M_w=6.6$ の直下地震を設定して地震動を算定する。

(2) 計算条件

a) 震源特性

震源パラメータを表-1に示す。傾斜角90度の横ずれ断層を想定し、地震調査研究推進本部「震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」)」¹⁶⁾や、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁸⁾を参考に設定した。

また、アスペリティ・破壊開始点の設定を図-8に示す。アスペリティを1つとして、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に示されているように、指向性の影響を考慮し、破壊が対象地点に向かって進展するように破壊開始点を置いた。

表-1 想定地震(M_w 6.6)の震源パラメータ

震源特性		設定値	備考
巨視的震源特性	傾斜角 δ	90.0 deg	
	モーメントマグニチュード M_w	6.6	
	地震モーメント M_0	1.00E+19 Nm	Kanamori(1977) $\log M_0 = 1.5M_w + 9.1$
	気象庁マグニチュード M_J	7.1	武村(1990) $\log M_0 = 1.17M_J + 10.72$
	断層面積 S	424.0 km ²	Wells and Coppersmith(1994) $S = 4.24 \times 10^{-11} M_0^{1/2}$
	長さ L	24.0 km	$S = LW$
	幅 W	18.0 km	(地震発生層深さを3~21kmとし、2km単位に丸める)
	静的応力降下量 $\Delta\sigma$	2.79 MPa	Eshelby(1957) $\Delta\sigma = (7/16) \cdot M_0/S^{3/2}$
	S波速度 V_s	3.5 km/s	
	密度 ρ	2.8 g/cm ³	
	剛性率 μ	3.43E+10 N/m ²	$\mu = \rho V_s^2$
	平均すべり量 D	0.69 m	$M_0 = \rho DS$
微視的震源特性	断層全体の短周期レベル A	1.14E+19 Nm/s ²	壇ほか(2001) $A = 2.46 \times 10^{10} \times (M_0 \times 10^7)^{1/3}$
	アスペリティの面積 S_a	81.0 km ²	壇ほか(2001) [円形クラック]
	アスペリティの平均すべり量 D_a	1.38 m	Somerville et al.(1999)、石井ほか(2000) $D_a = D \times 2$
	アスペリティの地震モーメント M_{0a}	3.82E+18 Nm	$M_{0a} = \rho D_a S_a$
	アスペリティの静的応力降下量 $\Delta\sigma_a$	14.89 MPa	Madariaga(1979) $\Delta\sigma_a = (S/S_a) \cdot \Delta\sigma$
その他の震源特性	アスペリティの実効応力 σ_a	14.89 MPa	$\sigma_a = \Delta\sigma_a$
	破壊伝播速度 V_r	2.8 km/s	片岡ほか(2003) $V_r = 0.8 \times V_s$
	アスペリティのライズタイム τ_a	0.71 s	片岡ほか(2003) $\tau_a = 0.25 \cdot W_a/V_r$
	高周波遮断周波数 $f_{\max}$	6.0 Hz	鶴来ほか(1997)

b)伝播経路特性

伝播経路における媒質の減衰を表すQ値については、関西地方周辺の地震から算定された次式¹⁷⁾を用いる。

$$Q(f) = 63.8 f^{0.00} \quad (3)$$

c)サイト特性

地震基盤から工学的基盤までのサイト増幅特性は、野津・長尾⁹⁾によるKiK-net日生(OKYH13)のサイト増幅特性に基づく東備港(日生地区)の増幅特性¹⁰⁾を用いる。周辺に明瞭な活断層やプレート境界がなく、硬質地盤であることから選定した。サイト増幅特性を図-9に示す。増幅率は小さく、5Hz以下で明瞭なピークは見られない。

サイト位相特性の補正には、OKYH13の地表で観測された2003年12月13日12時32分の播磨灘の地震(M4.6)の強震記録を用いる。この加速度時刻歴波形を図-10に示す。

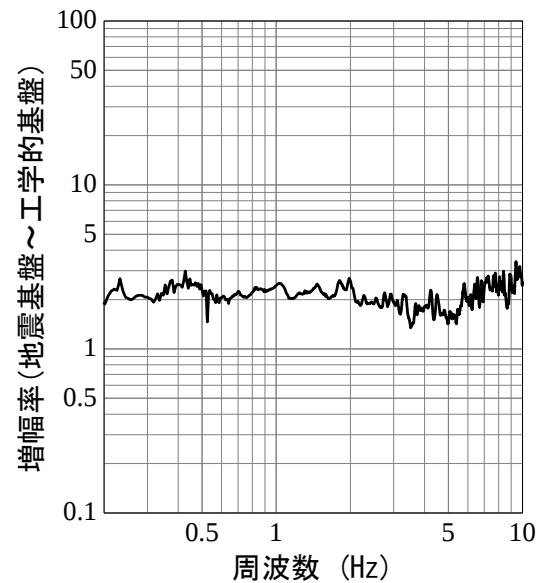


図-9 対象地点における地震基盤～工学的基盤のサイト増幅特性(KiK-net日生:OKYH13での観測記録から算定)¹⁰⁾

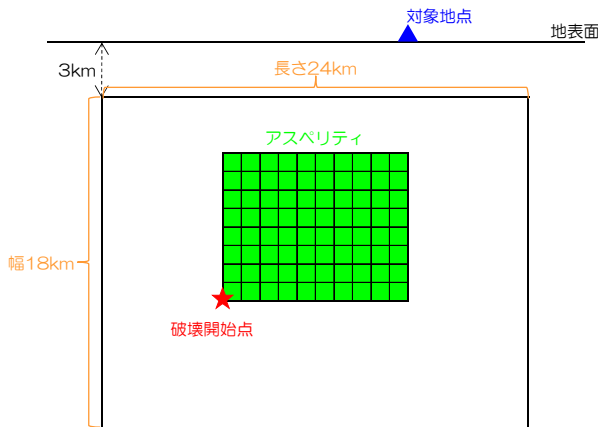


図-8 想定地震のアスペリティ・破壊開始点と対象地点との位置関係

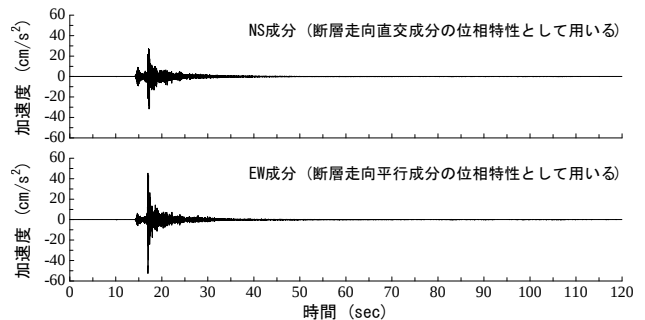
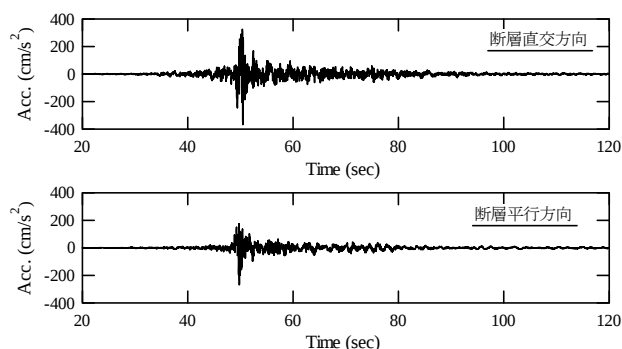


図-10 位相特性の補正に用いる加速度時刻歴波形

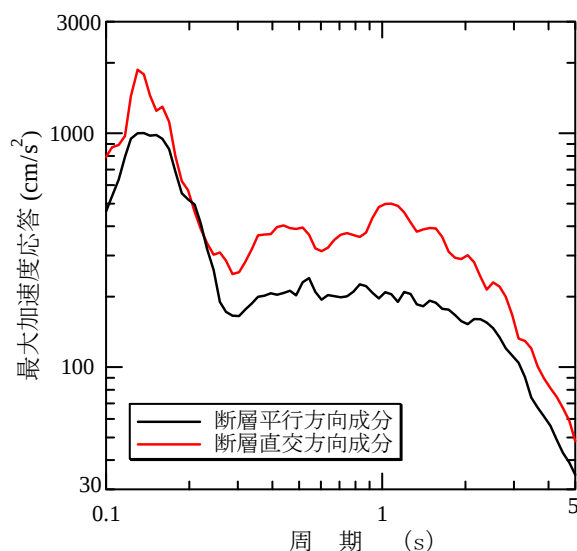
(3) 計算結果

(2)で示した条件を用いて、地震動の計算を行う。ここでは、港湾施設のレベル2地震動設定において標準的な手法となっている、古和田ほか¹⁹⁾の経験的サイト特性を考慮した統計的グリーン関数法を用いる。

工学的基盤における地震動の加速度時刻歴波形とそのスペクトルを、図-11に示す。



(1) 加速度時刻歴波形



(2) 加速度応答スペクトル (減衰5%)

図-11 工学的基盤における地震動

(4) 表層地盤による増幅

表層地盤の地震応答解析により、上記の工学的基盤地震動から地表面地震動を算定する。表層地盤については、「鉄道構造物等設計標準・同解説 設計計算例 鉄筋コンクリート橋脚（杭基礎）」⁷⁾を参考に、表-2のように設定する。すなわち、観測記録として用いたOKYH13は硬質地盤であるが、表層条件は少し軟らかいものとして算定する。なお、モード解析による表層地盤（1層～4層まで）の固有周期は、 $T_g=0.46(s)$ である。道示でのⅡ種、鉄道標準でのG3地盤に相当する。

GHE-S モデル²⁰⁾を用いて、一次元全応力非線形解析を行う。土の非線形特性は、拘束圧依存性を考慮でき対象とする土質の範囲が広い、安田・山口の方法²¹⁾を用いる。

得られた地表における加速度波形を図-12、加速度応答スペクトル（減衰5%）を図-13に示す。非線形解析により、基盤で見られた0.13秒付近の大きな成分は小さくなっている。本検討で算定したMw6.6の地震動は、道示のレベル2地震動や鉄道標準のL2地震動より、明らかに小さく、断層直交方向での周期1秒強の成分でも道示の1/2程度である。また、鉄道標準のL1は、概ね上回る大きさとなっている。破線は地域別補正係数0.85を乗じたものである。鉄道標準では、L2では地域別補正は行わない。地域別補正を行っても、周期0.3～0.8秒での道示のスペクトルと本検討による値とは大きな差がある。

表-2 表層地盤モデル

層番	層厚 (m)	土質区分	N値	γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (度)	Vs (m/s)
0	3.30	埋戻土	—	18.0	—	32	146.5
1	2.60	砂質土	10	18.0	—	29	146.5
2	5.00	砂質土	15	18.0	—	31	167.7
3	4.00	粘性土	4	15.0	50.0	—	134.9
4	6.40	粘性土	10	16.0	100.0	—	183.1
5	—	砂質土	50	20.0	—	38	400.0

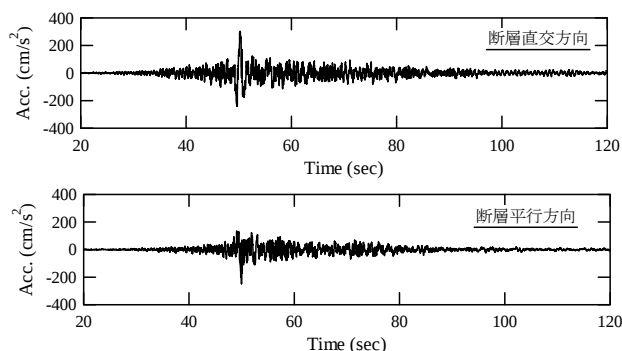


図-12 地表における加速度波形

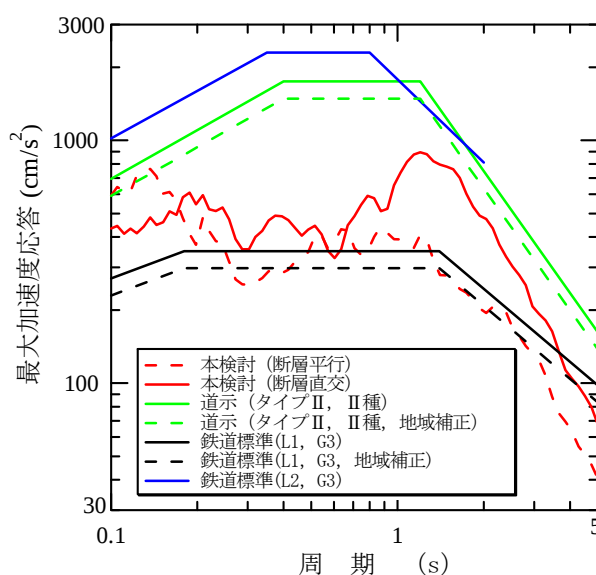


図-13 地表における加速度応答スペクトルと設計スペクトルの比較 (減衰5%)

5. まとめ

本研究では、各種施設の設計用入力地震動を概観した上で、震源依存かつ地点依存の地震動について検討した。本研究により得られた主要な結論は以下の通りである。

- ①. 道路・鉄道など標準設計スペクトルを規定している場合、これを上回る地震動が作用する可能性がある場合のみ、標準地震動以外の設計地震動を考慮する。その場合も、鉄道標準では強震動予測手法など具体的に記述されているが、道示には具体的な記述はない。
- ②. 港湾施設、ダム施設では下限地震動を設けた上で、対象地点での想定地震を設定した地震動が策定される。
- ③. サイト増幅特性は地点によって大きく異なり、増幅が小さい地点で強震動予測を行った場合、M7.1相当 ($M_w=6.6$) の地震を直下で想定しても、各種の基準類で定められた設計地震動よりも明らかに小さい地震動となる。

想定外の被害を引き起こさないためには、設計用入力地震動を大きくするよりも、揺れの大きさに関係なく最悪の事態を防ぐ対策（危機耐性）や保守・点検など、検討・実施すべきことは多くある。地震動評価においては、まだ未解明な点が多く課題は多いが、工学・理学的成果を設計用入力地震動算定に活かす方法を開発し、サイト固有の入力地震動を用いることが経済的に、また論理性や説明性の観点からも合理的と考えられる。逆に断層近傍では、既往観測記録に基づく現行の設計スペクトルを一部の周期帯では上回ることも少なくなく、設計スペクトルが必ずしも安全側とは言えない場合があり得ることも留意が必要である。

謝辞：本論文は、土木学会地震工学委員会・耐震基準小委員会に設置された「性能設計体系における設計事例集作成WG」における議論内容を中心に取りまとめたものである。検討に参加いただいたWGメンバーに感謝します。

参考文献

- 1) 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会性能設計事例集作成 WG：性能設計体系における土木構造物の耐震設計事例集, <http://committees.jsce.or.jp/eec201/node/15> (2016 年 8 月 31 日閲覧)。
- 2) 日本規格協会：ISO23469 Bases for design of structures - Seismic actions for designing geotechnical works (構造物の設計の基本―地盤基礎構造物の設計に用いる地震作用 英和对訳版), 2006.
- 3) 土木学会：2016 年制定 土木構造物共通示方書 性能・作用編, 2016.
- 4) 今村年成, 坂井康伸, 平井俊之, 長尾毅, 北原武嗣：性能設計体系における新たな耐震設計事例-構造設計-, 第 36 回地震工学研究発表会, 2016.
- 5) 野津厚, 長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, No.1112, 2005.
- 6) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説, 2012.
- 7) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 2012.
- 8) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2007.
- 9) 国土交通省河川局：大規模地震に対するダム耐震性能照査指針(案)・同解説, 2005.
- 10) 三石真也, 島本和仁：[講座]大規模地震に対するダム耐震性能照査について, ダム技術, No.274, pp.6-39, 2009.
- 11) 佐々木隆, 伊藤壮志：地震動の距離減衰式の改良, ダム技術, No.338, pp.17-28, 2014.
- 12) 日本ガス協会：高圧ガス導管耐震設計指針, 2004.
- 13) 土木学会 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会：土木構造物の耐震基準等に関する提言「第三次提言」, 2000. <http://www.jsce.or.jp/committee/earth/propo3.html> (2016 年 8 月 22 日閲覧)。
- 14) 内閣府 首都直下地震モデル検討会：首都直下の M7 クラスの地震及び相模トラフ沿いの M8 クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書, 2013. http://www.bousai.go.jp/kaigirep/choubou/senmon/shutochokkajishinmodel/pdf/dansoumodel_01.pdf (2016 年 8 月 22 日閲覧)。
- 15) 中央防災会議 首都直下地震対策専門調査会：首都直下地震対策専門調査会報告, 2005. <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/choubou/senmon/shutochokkajishinsenmon/pdf/houkoku.pdf> (2016 年 8 月 22 日閲覧)。
- 16) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」), 2016. http://www.jishin.go.jp/main/chousa/16_yosokuchizu/recipe.pdf (2016 年 8 月 22 日閲覧)。
- 17) 鶴来雅人, 澤田純男, 宮島昌克, 北浦勝：関西地域におけるサイト増幅特性の再評価, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.577-586, 2002.
- 18) 国土交通省 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 港湾施設研究室：レベル 1 地震動 (<http://www.ysknlim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/sisetu.html>)
- 19) 古和田明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎：経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.514, pp.97-104, 1998.
- 20) 野上雄太, 室野剛隆：S 字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定, 土木学会地震工学研究発表会論文集, Vol.30, No.2-0014, 2009.
- 21) 安田進, 山口勇：種々の不撓乱土における動的変形特性, 第 20 回土質工学研究発表会講演集, pp.539-542, 1985.

NEW EARTHQUAKE RESISTANT DESIGN EXAMPLES IN THE
PERFORMANCE-BASED DESIGN FRAMEWORK
-DESIGN EARTHQUAKE GROUND MOTION-

Takashi NAGAO, Iwao SUTOMI, Yasuhiro FUKUSHIMA, Toshinari IMAMURA
and Takeshi KITAHARA

Although the performance-based design framework has been introduced to almost all the technical standards, the practical design follows all the specifications stated in the technical standards. This paper aims at showing new earthquake resistant design examples in the performance-based design framework that designers apply the appropriate method according to the design conditions regardless of the specifications in the technical standards. Authors discussed the evaluation method of the design input earthquake ground motion considering source, path and site amplification characteristic of the site of interest. The evaluated source and site specific earthquake ground motion was compared with those specified in the technical standards.