

サイト増幅特性を考慮した 地点依存の設計スペクトルの設定法

長尾 毅¹・木下雄太²

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非会員 前神戸大学 市民工学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

設計地震動として設定されている全国一律の加速度応答スペクトルに代わる地点依存のスペクトルについてサイト増幅特性の観点から検討した。震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の3特性を独立的に捉えれば、検討対象地点において今後想定される最大級の地震動として、3特性のうち前2特性が過去の巨大地震の観測記録と同一で、かつサイト増幅特性が検討対象地点のものである地震動を設定することが提案できる。道路橋を念頭に固有周期帯を3種類に区分し、パラメータスタディの結果をもとにサイト増幅特性の該当周期帯の値に応じて設計地震動を設定する方法を提案し、現在の設計地震動と比較している。

Key Words : *design earthquake ground motion, site amplification facotr, earthquake response analysis*

1. はじめに

地震動は震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の3つの特性によって表現できる。よって設計地震動を設定する際には、これら3特性を適切に考慮する必要がある。つまり、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¹⁾。

土木構造物の設計地震動として代表的な扱いをされる道路橋の設計地震動は道路橋示方書²⁾に規定がある。道路橋示方書はよく知られているようにこれまでに何度も改訂が重ねられており、2002年版では、建設地点周辺の過去の地震情報、活断層情報、地盤情報等を考慮して設計地震動を適切に推定できる場合にはこれによってよい旨の記載があった。ところが、2012年版においてはその規定は削除され、全国一律の規定によらなければならないこととなった。地震の規模や断層面からの距離が同程度であっても地震や地点ごとに地面の揺れの程度が大きく異なることは周知の事実であり、例えば同一地震での地点ごとの揺れの違いは表層地盤の地盤種別が同じであれば同程度といえるようなものではないこともあまねく知られた事実である。上記の周知の事実は合理的な設計地震動の設定のあり方として最新の知見を踏まえた地震動評価法の導入必要性を強く示唆するものである。この観点で道路橋示方書の2002年版から2012年版に至

る改訂経緯を眺めてみると、道路橋示方書は科学技術進歩論へのアンチテーゼを謳っていると解釈することもできるであろう。

本稿は、合理的な設計地震動として、震源依存かつ地点依存のうち、まず地点依存の地震動を設定する観点から、サイト増幅特性の情報をもとに全国一律的な現在の地震動を地点依存のものとして設定する手法について検討を行うものである。対象はレベル2地震動とする。

2. 道路橋示方書の設計地震動

(1) 設計地震動の定義と問題点の整理

道路橋示方書における設計地震動(加速度応答スペクトル)は、標準加速度応答スペクトルに減衰定数別補正係数、地震動の地域別補正係数を乗じて求められる。減衰定数は5%が標準であり、本稿でも5%を用いる。標準加速度応答スペクトルはレベル1地震動、レベル2タイプ1地震動、レベル2タイプ2地震動に対して、地盤種別毎に定められている。地盤種別は表層地盤の固有周期を1/4波長則により判定し、0.2秒未満、0.2秒以上0.6秒未満、0.6秒以上をそれぞれⅠ、Ⅱ、Ⅲ種地盤と分類する。

レベル2タイプ1地震動の標準加速度応答スペクトルはプレート境界の海溝型地震を想定した地震動であり、

1923年関東地震における地震動をもとに設定され、2003年十勝沖地震や2011年東北地方太平洋沖地震を踏まえて改訂されてきた。レベル2タイプ2地震動の標準加速度応答スペクトルは、1995年兵庫県南部地震における観測記録がベースとなっている。

このような既往の巨大地震の観測記録をベースにした画一的な設計地震動の設定方法の問題点として、構造物建設地点のスペクトルではなく日本全国の「観測」最大級スペクトルとなっている事が問題点として指摘できる。すなわち、観測記録のうちの最大のものが当該地震による最大のものであるという保証はどこにもなく、また、観測最大の記録に匹敵する揺れが将来にわたって構造物建設地点で発生するという保証もまたどこにもない。つまり、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い⁹⁾ということである。

地点依存の地震動の増幅特性という観点からは以下の点が指摘できる³⁾。地盤の特性を分類するⅠ～Ⅲ種地盤という分類はあくまで表層地盤のみの分類であるが、表層地盤の増幅特性は地点の増幅特性の一部を形成しているに過ぎず、増幅倍率のほとんどを決定している深層地盤による増幅倍率を無視している。すなわち、表層地盤の種別が同じであっても、深層地盤の増幅特性としては地点ごとに大きなばらつきがあり、浅層地盤よりも深層地盤のほうが増幅特性として構造物の耐震性能に対する影響が強いことが多い⁹⁾ことを踏まえると、表層の地盤種別のみによる分類は地震動増幅特性の分類としては片手落ちと言わざるを得ない。浅層地盤と深層地盤の増幅倍率の違いに関しては、例えば文献⁴⁾が参照できる。

深層地盤による増幅特性の重要性について例を挙げて説明する。0.6-1.0秒の周期帯を対象に、詳細は後述するが本研究で対象としたⅠ種地盤の3地点（ISKH01, MYZ017, SZOH01）とⅢ種地盤の3地点（KGWH01, TTR005, YMT006）のサイト増幅特性⁹⁾を図-1に示す。このサイト増幅特性は地震基盤から地表に至る増幅特性であり、換言すれば深層地盤と表層地盤の両方による増幅特性である。赤実線はⅠ種地盤、青実線がⅢ種地盤である。0.6-1.0秒の帯域において、表層地盤の固有周期が0.2秒以下のⅠ種地盤の増幅倍率が表層地盤の固有周期で0.6秒以上のⅢ種地盤の増幅倍率を大きく上回っている。そののみならず、Ⅰ種地盤の増幅倍率は1地点（MYZ017）を除いて2.5秒までⅢ種地盤の増幅倍率を上回っている。このように、地震動の増幅特性の違いを考慮するために導入されている表層地盤の固有周期による設計地震動の分類は実際には合理的なものとは言えない。

なお地盤種別分類について付言すれば、諸外国の基準類においては固有周期ではなく主にAVS30による分類が用いられているが、表層地盤による分類を行っている

という点においては日本の道路橋示方書と同等とみなせる。かつては深層地盤による増幅特性を精度よく評価することは困難であったが、強震観測網の発達により強震記録のスペクトル解析⁵⁾や常時微動記録を併用した解析⁷⁾を行うことも可能になっていることを考えれば、今後は速やかに深層地盤による増幅特性を考慮すべき段階にあるといえよう。

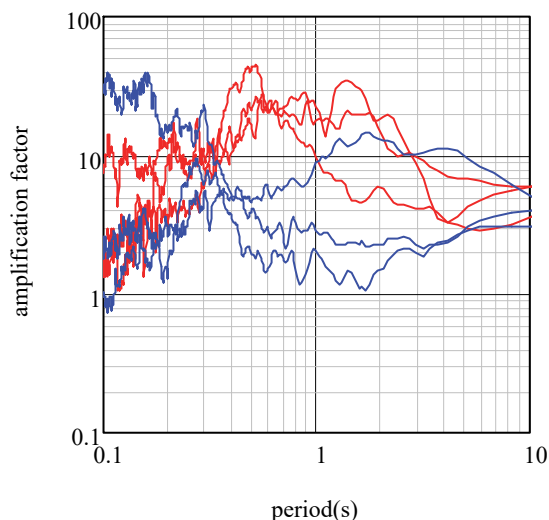


図-1 サイト増幅特性の比較

(2) 設計地震動と近年の巨大地震の比較

道路橋示方書の設計地震動は、巨大地震が発生すると観測記録の分析に基づいてスペクトル応答加速度を大きくするという改訂がなされてきた。2012年版が発行されて以降も巨大地震が発生したが、本稿の執筆に至るまでに改訂はされていない。そこで、現在の設計地震動と近年観測された地震動を比較して、“設計地震動”がどのような考え方で設定されているのかを考察してみる。

まず、支間長200m以下の道路橋の一般的な固有周期の範囲が0.5～2.0秒程度である⁹⁾ことを参照し、周期帯として0.2-0.6秒、0.6-1.0秒、1.0-2.0秒の3つ周期帯を設定した。次に、近年の巨大地震の記録から、上記の周期帯において顕著に大きなスペクトル応答加速度を示す記録を抽出した。その際、スペクトルインバージョンによりサイト増幅特性が算定されている地点⁹⁾を対象とした。1995年兵庫県南部地震におけるJR鷹取の記録は震災の帯の中で取得された貴重な記録であるが、サイト増幅特性が求められていないことと、地震動の伝播過程におけるエッジ効果¹⁰⁾という特殊な要因が強く影響を及ぼしていることが指摘されているため検討対象から除外した。ただし兵庫県南部地震によるポートアイランド（PI）の観測記録については、サイト増幅特性が求められていないものの、周辺の地盤堆積状況等からポートアイランド内の港湾地域強震観測地点のサイト増幅特性が適用できるものと判断し、港湾地域強震観測地点におけるサイト増幅特性を使用することとして検討対象に加えた。このほ

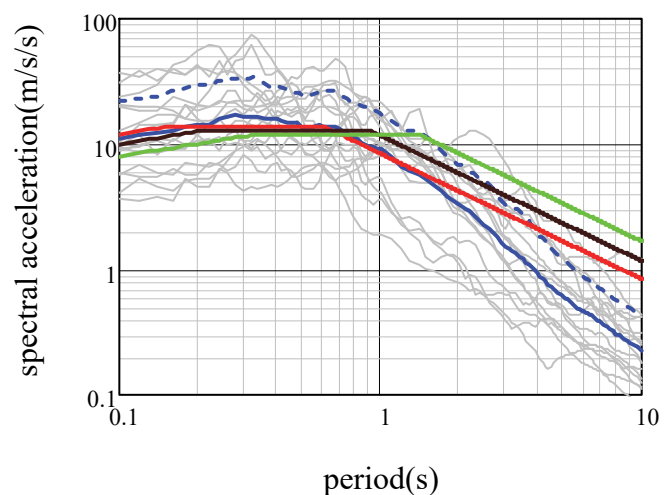
か、2004年中越地震におけるNIG021や2011年東北地方太平洋沖地震におけるMYG004についても、非常に大きな加速度最大値が記録されているが、4-5Hz程度の高振動成分が卓越する波形であり橋梁の固有周期とはずれがあることから検討対象から除外した。さらに、道路橋示方書における地盤種別の偏りにも注意した。上述したように、この地盤種別は表層地盤による分類であり、地表面の応答スペクトルに対する影響度合いは極めて限定的であるが、表層地盤の種別による地震動の違いが考慮されている現状に配慮した。

表-1 対象地震波

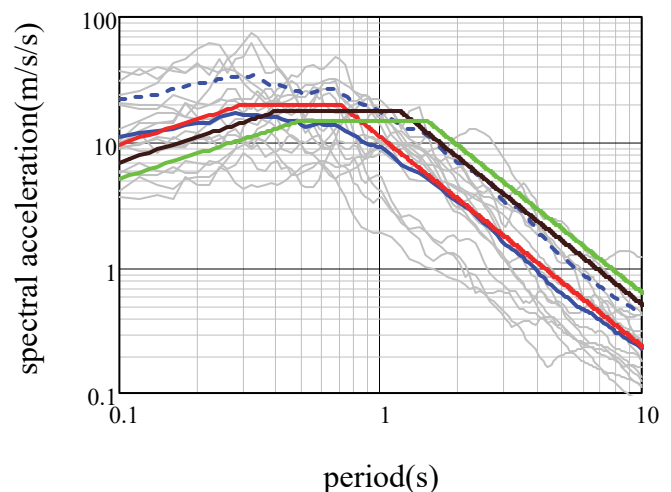
0.2-0.6s
2003年十勝沖地震 HKD086 EW(Ⅱ)
2008年岩手宮城内陸地震 AKTH04 EW(Ⅰ)
2011年東北地方太平洋沖地震 IBR003 NS(Ⅰ), IBRH11 NS(Ⅱ)
2016年熊本地震 KMMH16 EW(Ⅱ)
0.6-1.0s
1995年兵庫県南部地震 Port Island NS(Ⅲ)
2000年鳥取県西部地震 TTRH02 NS(Ⅰ), TTR008 EW(Ⅲ)
2003年十勝沖地震 HKD086 EW(Ⅱ)
2004年新潟県中越地震 NIG019 EW(Ⅰ)
2007年能登半島地震 ISK005 EW(Ⅲ)
2008年岩手宮城内陸地震 AKTH04 EW(Ⅰ)
2011年東北地方太平洋沖地震 MYG013 NS(Ⅱ)
2018年北海道胆振東部地震 HKD128 NS(Ⅱ)
1.0-2.0s
2000年鳥取県西部地震 TTRH02 NS(Ⅰ)
2003年十勝沖地震 HKD086 EW(Ⅱ), HKD098 EW(Ⅰ)
2004年新潟県中越地震 NIG019 EW(Ⅰ)
2007年新潟県中越沖地震 NIG018 NS(Ⅱ)
2011年東北地方太平洋沖地震 MYG006 EW(Ⅱ)

選定した地震波を表-1に示す。カッコ内の数値は道路橋示方書における地盤種別である。地盤種別の評価に

あたり、K-NETサイトではPS検層データが最大で地下20mまでしかないので工学的基盤に至る地盤条件が不明であり、地盤種別を判定できない地点が存在する。それらの地点については以下の手順により地盤種別を判定した。まずPS検層データ最深部の土層はPS検層データ最深地点よりもさらに深い地点まで続き、その後に工学的基盤 ($V_s=400\text{m/s}$) が出現し、地下20mから30mまではこれら2つの土層により構成されるものと仮定した。次に、Kanno et al.¹¹⁾により表層20mの平均S波速度 (AVS20) から表層30mの平均S波速度 (AVS30) を推定し、AVS30推定値をもとに地下20mから30mまでの地盤構造を評価し、これより固有周期を算出した。表-1の観測記録をもとに加速度応答スペクトルを算出し、道路橋の設計スペクトルと比較した結果を図-2に示す。灰色細線は各応答スペクトル、青実線は平均、青破線は平均+標準偏差のスペクトルであり、赤実線・黒実線・緑実線はそれぞれ、地盤種別Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ種の設計応答スペクトルである。



(a)タイプ1地震動



(b)タイプ2地震動

図-2 近年の巨大地震と設計地震動の比較

観測記録と設計地震動と比較すると、周期1秒未満の帯域においては近年の巨大地震の強震記録の平均、周期1秒以上の帯域では強震記録の平均+標準偏差が設計地震動と概ね対応している。すなわち、レベル2地震動は構造物建設地点で想定される「最大級」の地震動であるが、これは必ずしも最大ではなく、ある程度統計的な観点で判断されているとみなせる。さらにこの周期帯の違いによるレベルの違いについて考察するならば、固有周期の短い道路橋は比較的小規模の橋であり、道路橋としての重要度が比較的低いために平均程度の値を、固有周期の長い道路橋は重要度の高い長大橋であり、より耐震性能を高める必要があるため、平均+標準偏差程度の値を、工学的判断により想定していると考えることができよう。

設計スペクトルではプレート境界地震と地殻内地震でタイプを分けているため、選定した地震動について地震のタイプによる違いを比較した結果を図-3に示す。本稿は地点依存地震動について検討するもので地震のタイプについては検討対象外であるが、選定した地震動に関してはプレート境界地震と地殻内地震で応答スペクトルの違いは顕著ではない。よって以下の検討においても地震のタイプの違いは考慮しない。

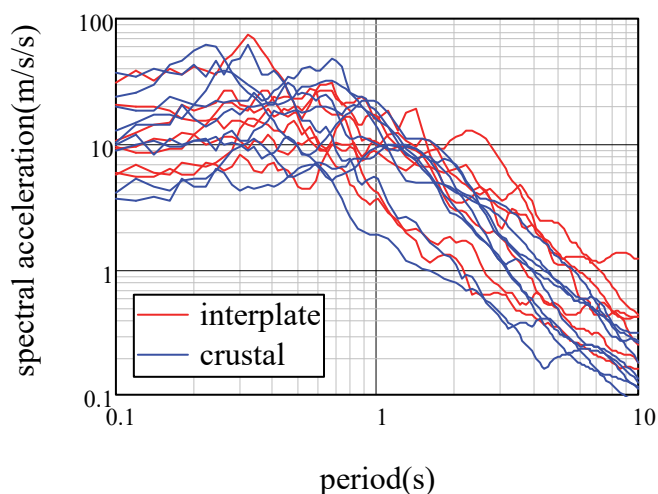


図-3 地震のタイプによる違い

3. サイト増幅特性を考慮した設計地震動

(1) サイト増幅特性と応答スペクトルの関係

サイト増幅特性が地表面地震動の応答スペクトルに及ぼす影響について検討する。表-1に示した地震波形から、表層地盤種別Ⅰ～Ⅲの地点からそれぞれ、HKD098、NIG018、TTR008を抽出して、サイト増幅特性、加速度フーリエ振幅スペクトル、加速度応答スペクトルを図-3に例示する。加速度フーリエ振幅スペクトルはバンド幅0.2HzのParzenウィンドウを用いて平滑化を行っている。

強震時の表層地盤の非線形性の影響はあるが、概ねサイト増幅特性の倍率の大きな周期帯でフーリエ振幅スペクトルの振幅は大きくなり、応答スペクトルも大きな値を示す。よってスペクトルの大小を議論する時には、該当する周期帯のサイト増幅特性の振幅に考慮する必要があるといえる。

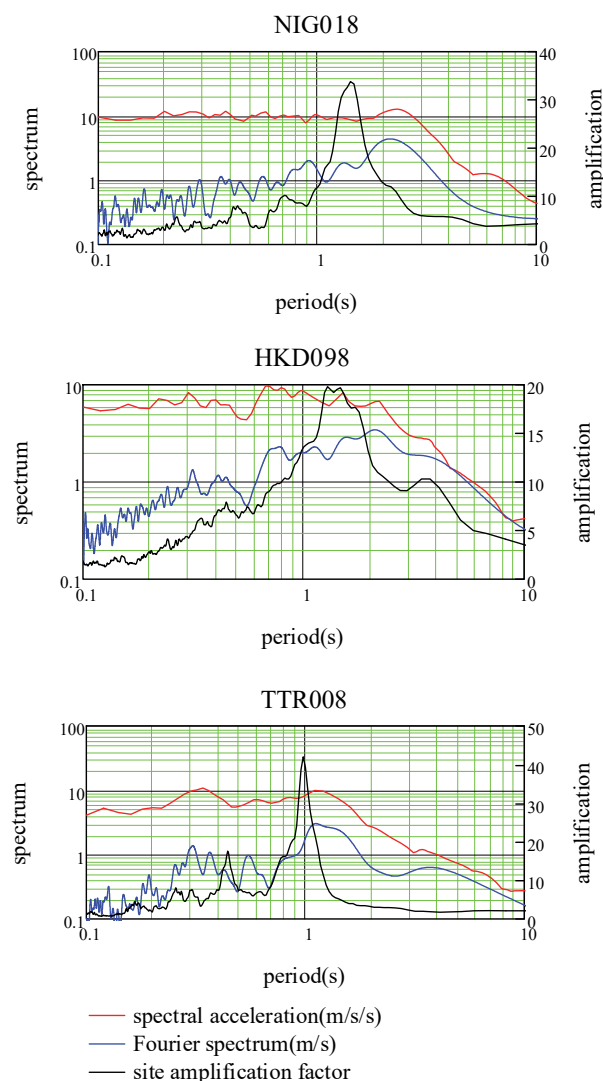


図-3 サイト増幅特性、フーリエスペクトル、応答スペクトルの関係

(2) サイト増幅特性を考慮した設計地震動の考え方

震源依存・地点依存として設定されるべき設計地震動に関して、上述のように本稿ではまずサイト増幅特性を考慮した地点依存の設計地震動の設定方法を議論する。全国各地で観測された既往の地震記録をもとにしながらも地点依存の設計地震動を設定するという立場に立つならば、観測記録に含まれる震源特性・伝播経路特性は同一で、サイト増幅特性のみが対象地点のものである地震動を「最大級の地震動」として設計地震動とする提案が

できよう。このような考え方で、本研究では、過去の巨大地震時の観測記録に対して、サイト増幅特性が異なる場合の地震動を算出した。すなわち、式(1)で示される地表の規準地震動に対して、サイト増幅特性 $G(f)$ が別の地点のものであった場合の地震動を評価するものである。

$$O(f) = S(f) P(f) G(f) \quad (1)$$

ここに、 $O(f)$ ：観測スペクトル、 $S(f)$ ：震源特性、 $P(f)$ ：伝播経路特性、 $G(f)$ ：サイト増幅特性である。

規準地点を記号 R 、サイト増幅特性を新たに考慮する地点を記号 T で表現する。規準観測記録 $O_R(f)$ に含まれる表層地盤の非線形性の影響を考慮するために、吉田ら¹²⁾による地盤の非線形特性の周波数依存性を考慮した等価線形地震応答解析により工学的基盤の入射波形に引き戻しを行い、得られたスペクトルを規準観測地点の地震基盤～工学的基盤のサイト増幅特性 $G_R(f)$ で除したうえで、新たに考慮する別地点の地震基盤～工学的基盤のサイト増幅特性 $G_T(f)$ を乗じ、当該地点の表層地盤の地震応答を等価線形地震応答解析により求めて地表の地震動 $O_T(f)$ とする。等価線形地震応答解析の実施に当たり、地盤の非線形特性は安田・山口¹³⁾を用いた。地震基盤～工学的基盤のサイト増幅特性は野津・長尾⁹⁾を用いた。ただし、野津・長尾⁹⁾によるサイト増幅特性は地表～地震基盤の増幅特性であるため、その増幅特性を重複反射理論をもとにした地表～工学的基盤の増幅特性で除することで工学的基盤～地震基盤の増幅特性とした。

(3) サイト増幅特性考慮地点の選出

新たなサイト増幅特性は全国のサイト増幅特性をもとに以下の観点から代表的なものを選定した。まず上述のように周期帯として0.2-0.6秒、0.6-1.0秒、1.0-2.0秒の3つ周期帯を設定した。ここで、周期が2.0秒以上の長大橋ではレベル2地震動はサイト増幅特性を考慮したシナリオ型地震動を設定すべき、という考え方にに基づき、周期の最大値は2.0秒としている。

これらの周期帯に対して、全国の観測点におけるサイト増幅特性をそれぞれの地盤種別毎に分類し、対象周期区間毎にサイト増幅特性平均値として大・中・小の判定を行った。具体的には、0.1-10.0秒の区間で対数軸上に等間隔に100点に分割し、該当する周期におけるサイト増幅特性をサンプリングしてその平均値を算出する。

図-4に各周期帯のサイト増幅特性平均値（ASA）の頻度分布を示す。サイト増幅特性平均値の分布は各周期帯において対数正規分布に近似できる。図中の青実線は対数正規分布の確率密度関数である。次に、対数正規分布近似によって図-5に示すようにサイト増幅特性平均値の累積分布を算出した。0.6-1.0秒と1.0-2.0秒の分布は平均と標準偏差が非常に近い値であったため、図ではその2つの周期帯に対する累積分布がほぼ重なっている。この

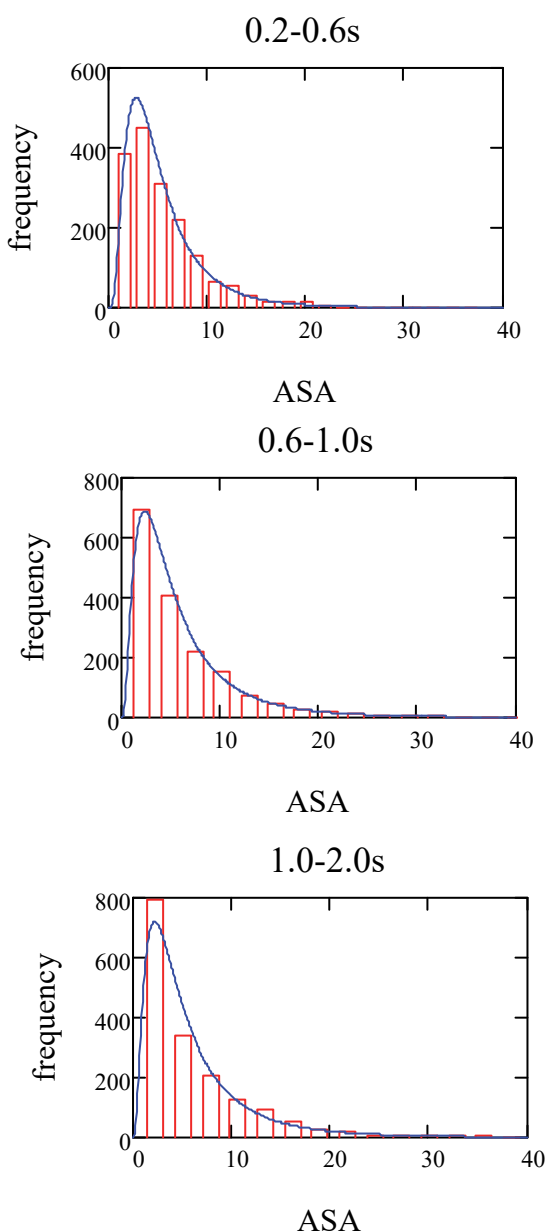


図-4 サイト増幅特性頻度分布

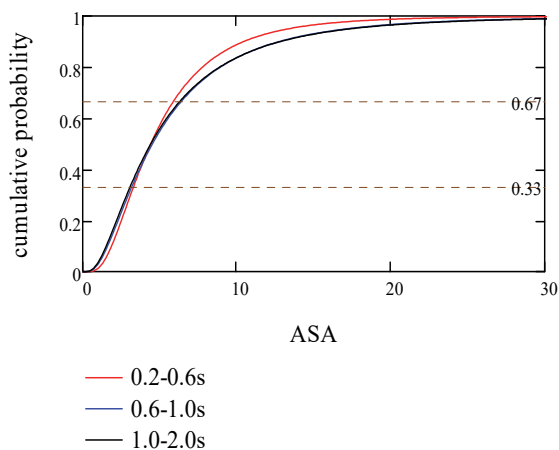


図-5 サイト増幅特性累積分布

表-3 サイト増幅特性選出地点

	type 1	type2	type3
0.2-0.6s			
small	GIFH24, KYT005, TKS011	CHBH14, MYG007, YMN011	CHB008, KSRH04, TTR005
medium	GNM007, HYG009, SMN006	KYT004, MYG013, NIG018	AKT015, HKD161, KYT002
large	IBUH06, KMM007, MYZ017	FKO015, ISK002, OITH07	ISK005, SBSH03, SZOH42
0.6-1.0s			
small	NGNH20, TCGH07, TTR003	HYGH11, IBRH11, OKY004	KGWH01, TTR005, YMT006
medium	AICH16, HKD134, SMN006	KOC002, TCGH16, WKY006	FKI003, KNG009, SRCH03
large	ISKH01, MYZ017, SZOH26	AOM024, KGS007, OIT016	IBUH03, ISK005, KYTH05
1.0-2.0s			
small	FKIH01, TCGH07, TTR003	AIC010, EHMH09, IWT004	AICH12, HYGH10, TTR005
medium	HKD057, KNG003, OIT007	KMM010, SZO025, TTRH04	FKIH05, ISK005, TTR008
large	ISK003, MYG005, SZOH26	KGS012, MYZ009, SZOH28	FKS020, IBUH03, KGS007

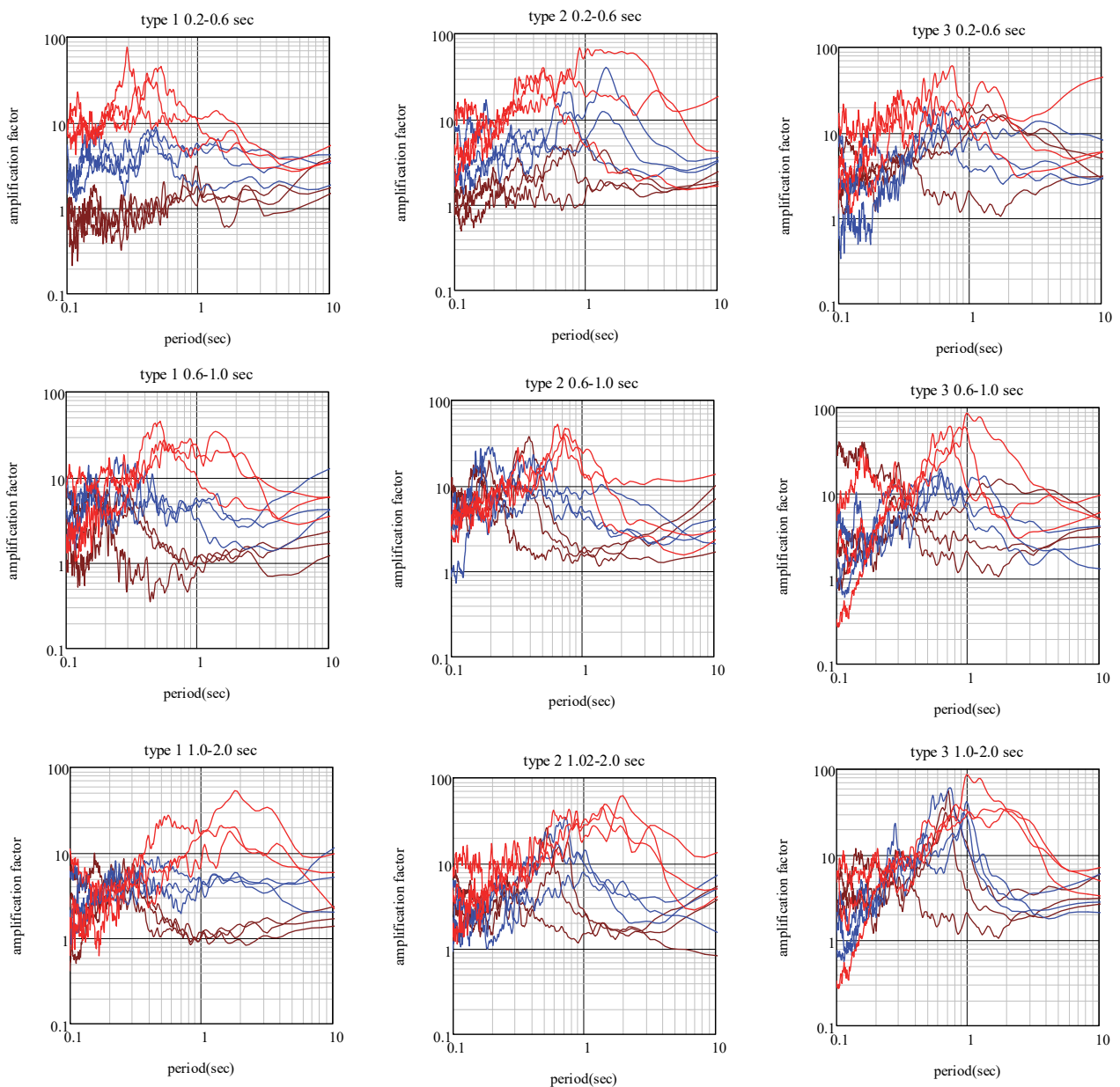


図-6 サイト増幅特性

結果をもとに、表-2に示すように累積分布0-1/3の範囲をサイト増幅特性小、1/3-2/3の範囲をサイト増幅特性中、2/3-1の範囲をサイト増幅特性大として分類する。野津・長尾⁹⁾によるサイト増幅特性は全国で1695地点存在する。そのうち、Ⅰ種地盤は1067地点、Ⅱ種地盤は439地点、Ⅲ種地盤は81地点である。各地盤種別ごとに、各周期帯でサイト増幅特性平均値の大・中・小からそれぞれ3地点を地域に偏りがないように全国から選出した。これより、各地盤種別、各周期帯で9地点ずつ、合計81地点を今回の研究対象に用いた。選んだ地点の一覧は表-3に示すとおりである。選定地点の表層地盤のPS検層が工学的基盤に達していないため地盤種別の判定が行えない場合は2. (2)と同様の方法で地盤構造を設定した。選出した地点のサイト増幅特性は図-6に示すとおりである。図中、赤・青・茶各線がサイト増幅特性平均値大・中・小に対応する。

表-2 サイト増幅特性平均値の分類

周期(s)	0.2-0.6	0.6-1.0	1.0-2.0
小	0~3.30	0~3.19	0~3.08
中	3.30~5.88	3.19~6.39	3.08~6.30
大	5.88~	6.39~	6.30~

(4) 地震動の評価

規準地震動は表-1に示す15地震波であり、サイト増幅特性を入れ替え、仮想地震動を求める地点は表-3に示す81地点である。これより、合計1215個の仮想地震動が今回の研究では得られる。この1215個の仮想地震動を基に、現行の道路橋示方書における設計地震動と比較を行う。なお表-3では複数回選ばれているサイトや規準地震動と同じサイトが存在するが、本研究では周期帯・地盤種別・サイト増幅特性に着目した統計分析を行うので、それぞれの項目別にデータ数が同じであることを重視して重複は許容している。

観測記録ISK005、考慮したサイト増幅特性KNG009を例として、一連のプロセスの結果を付図-1に示している。巨大地震を対象に等価線形地震応答解析を行う場合、工学的基盤から地表に至る増幅特性に関して高周波側で倍率が1.0を大きく下回って過小評価となり、工学的基盤への引き戻し波が過度に大きな振幅となるケースがあるが、本研究では上述のように吉田ら¹²⁾による地盤の非線形特性の周波数依存性を考慮した等価線形地震応答解析を行っており、そのような現象は生じていない。

得られた応答スペクトルについて、地盤種別毎に図-7に示す。グレー細線は個々の応答スペクトル、赤太線は対数平均、青太線は対数平均+対数標準偏差である。図-8には対数平均、対数平均+対数標準偏差の応答スペク

トルを地盤種別毎に示した。黒・青・赤がそれぞれタイプⅠ、Ⅱ、Ⅲであり、実線が対数平均+対数標準偏差、破線が対数平均である。対数平均および対数平均+対数標準偏差応答スペクトルを比較すると、Ⅰ種地盤の値はⅡ種地盤、Ⅲ種地盤の値と比較して0.5秒以上の周期帯で若干小さい傾向があるものの、その違いは顕著なものではない。また、対数平均+対数標準偏差応答スペクトルを比較すると、Ⅲ種地盤の値はⅠ種地盤、Ⅱ種地盤の値と比較して0.4秒以下の周期帯で若干小さい傾向があるものの、その違いはやはり顕著なものではない。

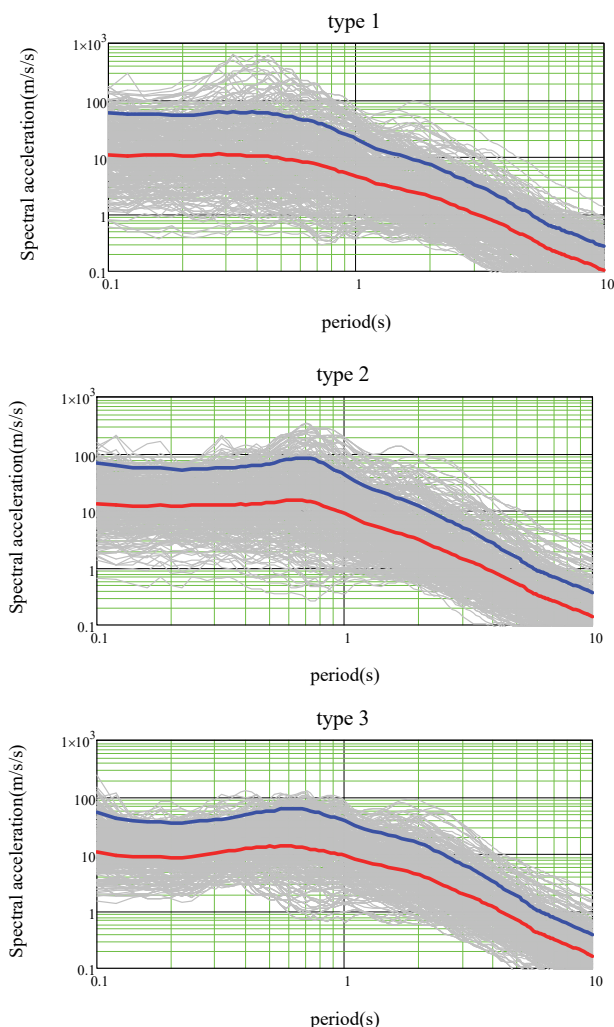


図-7 応答スペクトル (地盤種別)

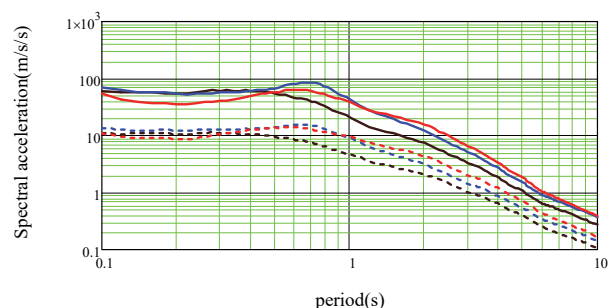


図-8 応答スペクトル (代表値)

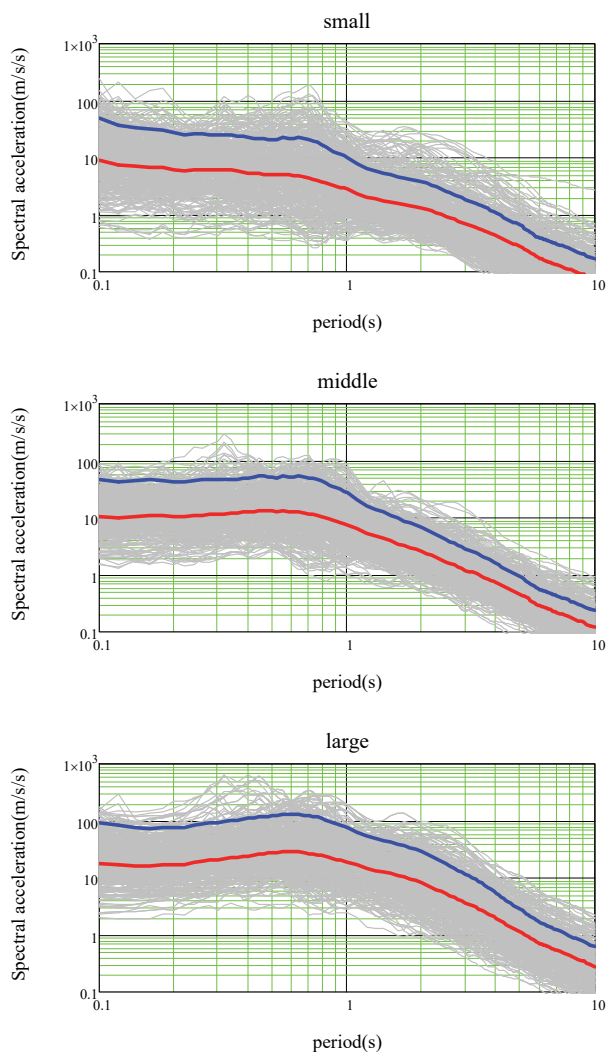


図-9 応答スペクトル（サイト増幅特性平均値別）

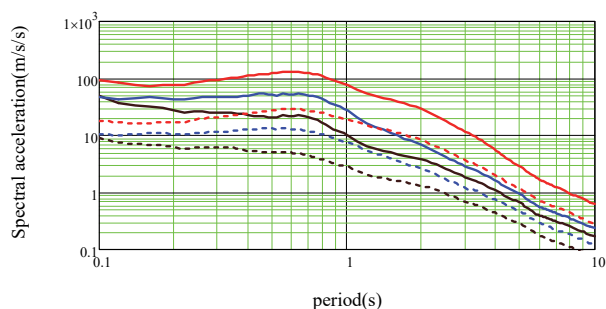


図-10 応答スペクトル（代表値）

次に、得られた応答スペクトルをサイト増幅特性平均値の大・中・小の区分毎に図-9に示す。グレー細線、赤太線、青太線は図-7と同じである。図-10には対数平均、対数平均+対数標準偏差の応答スペクトルをサイト増幅特性平均値別に示した。黒・青・赤がそれぞれサイト増幅特性平均値小、中、大であり、実線が対数平均+対数標準偏差、破線が対数平均である。サイト増幅特性平均値で分類した場合は、サイト増幅特性平均値が大きいほ

ど、応答スペクトルの値も大きくなっている。例えば、周期1秒におけるスペクトル応答加速度の対数平均+対数標準偏差の値は、サイト増幅特性大・中・小の順にそれぞれ80、30、10 m/s^2 程度となっており、顕著な違いがある。対数平均についても同様で、サイト増幅特性の大きさと応答スペクトルの大きさが対応している。このように、サイト増幅特性平均値で対象地点を分類することで地点依存の合理的な設計地震動が設定できるといえる。

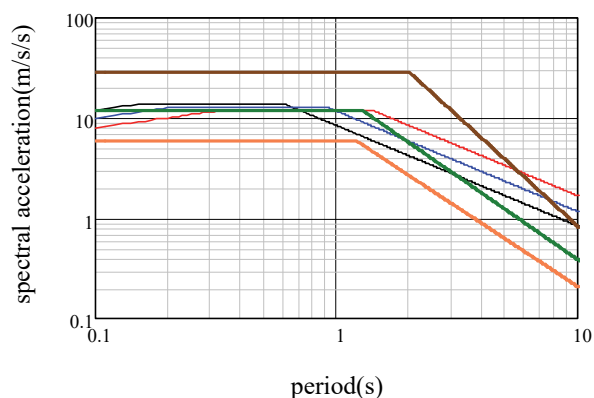
(5) サイト増幅特性を考慮した設計地震動

得られた結果をもとにサイト増幅特性平均値の分類に応じた設計応答スペクトルを提案する。提案する設計スペクトルは、上述のように道路橋示方書の設計地震動の現状を分析した結果として、1.0秒未満は平均、1.0秒以上は平均+標準偏差に相当する値である。その際、平均のスペクトルと平均+標準偏差のスペクトルとを周期1秒で結合するとスペクトルに不連続が生じるため、短周期側の平均のスペクトルを周期1秒を超えて延長し、平均+標準偏差のスペクトル値と一致する位置で両者を結合する。最終的に、得られた結果の最大包絡となるように設計スペクトルの関数を作成した。結果を現在の設計スペクトルとともに図-11に示す。

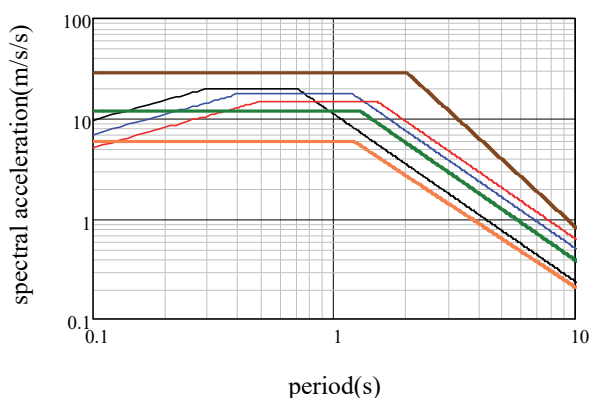
図中、太茶実線、太緑実線、太オレンジ実線が、それぞれサイト増幅特性平均値が大・中・小の地点における提案スペクトルであり、青実線は平均、青破線は平均+標準偏差のスペクトルであり、黒実線・青実線・赤実線はそれぞれ、地盤種別Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ種の現行設計法の設計応答スペクトルである。本研究の目的は地点依存のスペクトルを示すことであり、震源依存については検討していないが、海溝型・内陸直下型という区分は震源依存性に対応したものは考えられず、本研究の提案としてはタイプ1、2の区分は行わない、ということになる。

提案する設計スペクトルと現在の設計スペクトルを比較すると、提案スペクトルはタイプ1地震動についてはサイト増幅特性平均値中の場合に現在の設計スペクトルと一致し、サイト増幅特性平均値大の場合にはより大きな値、サイト増幅特性平均値小の場合にはより小さな値となるため、全国平均的には従来と同じ建設費用で合理的な設計が行えるといえる。タイプ2地震動については、現在の設計スペクトルは1秒未満の周期帯で全種、1秒以上の周期帯ではⅡ種・Ⅲ種地盤の応答スペクトルがサイト増幅特性平均値中と大の中間程度であり、全国平均的には従来よりも建設費用を抑えながら合理的な設計が行えるといえる。

提案する設計スペクトルの関数は表-4に示すとおりである。



(a)タイプ1地震動



(b)タイプ2地震動

図-11 提案スペクトル

表-4 提案スペクトル

ASA	spectral acceleration(m/s/s); S_0	
small	$T < 1.2$	$1.2 \leq T$
	$S_0 = 6.0$	$S_0 = 8/T^{19/12}$
middle	$T < 1.3$	$1.3 \leq T$
	$S_0 = 12.0$	$S_0 = 18/T^{5/3}$
large	$T < 2$	$2 \leq T$
	$S_0 = 29.0$	$S_0 = 133/T^{11/5}$

* T is the natural period (s)

4. 結論

本研究では、地点依存の合理的な設計地震動を設定する観点から、サイト増幅特性の平均値を指標とした設計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)現在のレベル2地震動に対する設計スペクトルと近年の巨大地震の強震記録のスペクトルを比較すると、周期1秒未満では強震記録の平均、周期1秒以上の帯域で

は平均+標準偏差が構造物建設地点で想定される「最大級」の地震動である設計地震動と概ね対応している。これは道路橋の重要度等を考慮したうえでの工学的判断に基づいているものと推察される。

(2)サイト増幅特性の区間平均値を指標に大・中・小に分類したうえで、近年の巨大地震の記録についてサイト増幅特性が異なる場合の応答スペクトルを評価し、周期1秒未満において平均、周期1秒以上において平均+標準偏差に対応した設計スペクトルを提案した。提案スペクトルと現在の設計スペクトルを比較すると、概ね全国平均的には従来と同程度または若干経済的に、合理的な設計を行うことが可能となると考えられる。

謝辞：K-NETおよびKiK-netの強震観測記録については独立行政法人防災科学技術研究所のホームページ (<http://www.kik.bosai.go.jp>)より入手しました。ここに感謝します。

参考文献

- 1) 土木学会：土木構造物標準示方書，性能・作用編，2016年制定，2016
- 2) 公益社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012.
- 3) 長尾毅，末富岩雄，福島康宏，今村年成，北原武嗣：性能設計体系における新たな耐震設計事例-設計地震動-，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 73，No. 4，p. I_832-I_840，2017.
- 4) Y. Fukushima, T. Nagao, J. Oshige and I. Suetomi: Ground motion evaluation for intra-plate earthquake by different site amplification factors and source models, 7ICEGE, pp.2484-2492, 2019
- 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.112，2005.
- 6) Y. Fukushima and T. Nagao: Variation of Earthquake Ground Motions with Focus on Site Amplification Factors: A Case Study, Engineering, Technology & Applied Science Research Vol. 9, No. 4, 2019, 4355-4360
- 7) 長尾毅，平松和也，平井俊之，野津厚：高松港における被害地震の震度再現に関する研究，海洋開発論文集，第22巻，pp.505-510，2006
- 8) 長尾毅，山田雅行，野津厚：常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に関する研究，構造工学論文集 Vol.56A，pp.324-333，2010
- 9) 公益社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編に関する参考資料，2015.
- 10) H. Kawase. The Cause of the Damage Belt in Kobe: "The Basin-Edge Effect, " Constructive Interference of the Direct S-Wave with the Basin-Induced Diffracted/Rayleigh Waves, Seismological Research Letters, Vol.67, pp.25-34, 1996
- 11) T. Kanno, A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, Y. Fukushima. A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data, Bulletin of Seismological of society of America Vol.96, No.3, 2006

- 12) Yoshida, N., S.Kobayashi, I. Suetomi, and K. Miura. Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping, Soil Dyn. Earthq. Eng., Vol.22, 2002, 205–222.
- 13) Yasuda, S. and Yamaguchi, I.: "Dynamic shear modules

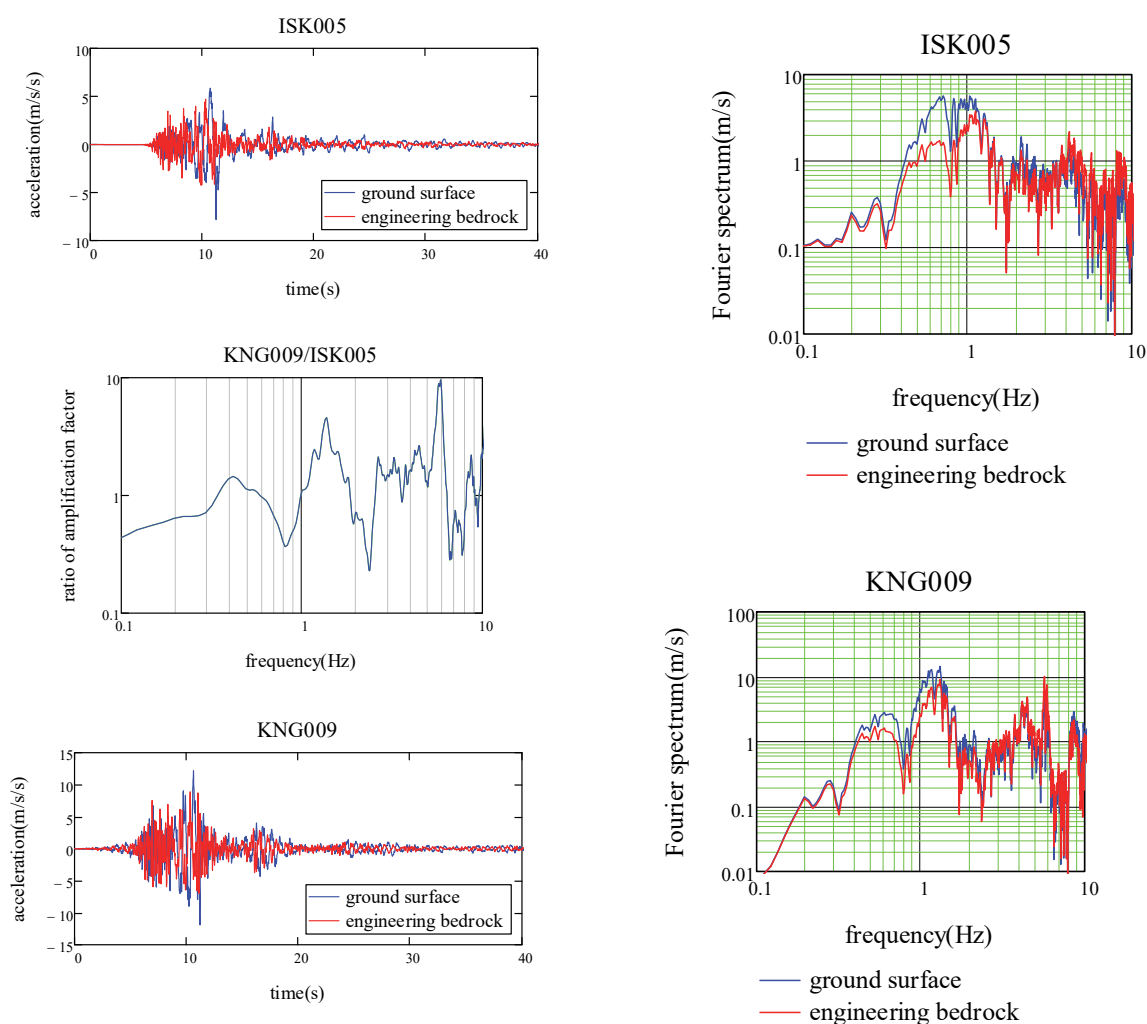
obtained in the laboratory and in-situ," Proc. Symp. on Evaluation of Deformation and Strength of Sandy Grounds, JSSMFE, pp. 115-118, 1985.

SITE-SPECIFIC DESIGN EARTHQUAKE GROUND MOTIONS FOR HIGHWAY BRIDGES CONSIDERING SITE AMPLIFICATION FACTORS

Takashi NAGAO and Yuta KINOSHITA

Design specifications for highway bridges in Japan stipulate the level-two design earthquake ground motions as the maximum credible ones at sites of interest. Design earthquake motions for highway bridges, however, were determined mainly by use of the past large earthquake record observed all over the country. Earthquake ground motions are governed by source, path and site amplification characteristics at sites of interest. When one considers past large earthquakes occurred near the sites where the site amplifications were very different from the observation points, observed earthquake ground motions are thought to be very different from the observed ones.

In this study, earthquake ground motions specified in the design specifications were compared with those considering other site amplification characteristics than those at the observed points. The result of the study showed that design earthquake ground motions are to be specified in accordance with the site amplification factors at sites of interest.



付図-1 検討例