

論文 地震規模・震源距離およびサイト増幅特性を考慮した標準地震動の補正

西 恭彦¹・朝長 光¹・石川 太郎¹・青柳 広樹²
田中 浩平³・神澤 拓³・坂井 公俊³

¹ 正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計部
(〒231-8315 横浜市中区本町 6-50-1 横浜アイランドタワー)

E-mail:nishi.tak-67y6@jr-tt.go.jp

² (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 北海道新幹線建設局

³ 正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター

鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)では、L2地震動の算定に詳細な検討が必要な条件として、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、のいずれかに該当する場合としている。北海道新幹線(新函館北斗・札幌間)では、深部地盤による地震動の著しい増幅がみられる地域が複数存在し、L2地震動の算定に詳細な検討が必要となった。そこで、より合理的なL2地震動を算定することを目的として、標準L2地震動に対して、これまで考慮していたサイト増幅特性による補正に加えて、当該区間のL2地震動で想定する地震の地震規模、震源距離に応じた補正を行った。本論文では、補正にあたっての基本的な考え方や補正係数の具体的な算定手順について整理を行う。

Key Words : seismic design, L2 ground motion, site amplification factor, attenuation characteristics

1. はじめに

鉄道構造物の耐震設計は、2012年に改訂された鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)¹⁾(以下、「耐震標準」)によっている。耐震標準の要求性能は、走行安全性、復旧性、構造体としての安全性である。これらの要求性能に対する設計地震動のうち、走行安全性については、L1地震動として示された弾性加速度応答スペクトル、復旧性については、あらかじめ妥当性が検証された地震動である標準的な弾性加速度応答スペクトル(以下、「標準応答スペクトル」)に基づき設定することができる。構造体としての安全性に対する設計地震動であるL2地震動は、建設地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動として、強震動予測手法に基づく地点依存の地震動として算定するのが原則であるが、詳細な検討を必要としない場合は、簡易な手法により標準応答スペクトルに基づきL2地震動を算定してよいとされている。

詳細な検討が必要な条件としては、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、のいずれかに該当する場合とされている。北海道新幹線(新函館北斗・札幌間)の耐震設計においては、このうちの②に該当する区間が存在するために、詳細な検討によりL2地震動の算定を行う必要があった。詳細な検討では、断層の広がりや破壊伝播の影響、距離減衰特性(伝播経路特性)、サイト増幅特性を適切に考慮した強震動予測手法により、地点依存の地震動を算定するのが一般的である。

しかし、本区間の近傍には $M_w=7.0$ よりも大きな震源域が存在しないことから、標準応答スペクトルに基づき設定される地震動(以下、標準L2地震動)にサイト増幅特性の補正を行うことで、L2地震動を算定することとした²⁾³⁾。ここで標準L2地震動は、スペクトルⅠが $M_w=8.0$ 程度の海溝型地震が距離60km、スペクトルⅡは $M_w=7.0$ 程度の内陸活断層による地震が直下で発生した場合の地震動を想定している。検討対象地域で想定される比較的規模の大きな震源域を図-1に示すが、周辺の震源域は、標準L2地震動で想定する地震と比較して、震源規模が小さく、かつ距離も比較的離れている。

そこで、より合理的なL2地震動を算定することを目

的として、標準L2地震動に対して、これまで考慮していたサイト増幅特性による補正に加えて、当該区間のL2地震動として想定する地震規模、震源距離による補正を行うこととした。本論文では、これらの補正における基本的な考え方や具体的な手順について報告する。

なお、本論文におけるサイト増幅特性の定義は、図-2に示すせん断弾性波速度 $V_s=3000\text{m/s}$ 以上の岩盤である地震基盤から耐震設計上の基盤面までの地盤増幅特性とする。また、本検討により算定した設計地震動は、主に橋りょう・高架橋の安全性照査に用いるものである。そのため、橋りょう・高架橋や土構造物を対象とした復旧性の照査には今回の地震動は使用しない。また、一般的な山岳トンネルのように耐震照査を省略しているため、復旧性と同様に、今回算定した設計地震動は使用しないこととする。

2. 耐震標準におけるL2地震動の算定方法の整理

耐震標準におけるL2地震動の算定方法を図-3に示す。L2地震動の算定に詳細な検討を必要としない場合は、簡易な手法として標準応答スペクトルに基づきL2地震動を算定することができる。詳細な検討が必要かの判断では、前述の①「規模の大きな震源域が存在する場合」については文献等による調査で確認することができる。②「地震増幅の大きな場合」については、建設地点ごとにサイト増幅特性を評価し、これを耐震標準に示される全国平均+標準偏差のサイト増幅特性と比較することで深部地盤の著しい増幅の有無を判定する。

また、詳細な検討によりL2地震動を算定する場合は、伏在断層による地震についても配慮を行う必要があり、耐震標準には下限地震動として定義されている。つまり、詳細な検討により算定した地震動が下限地震動よりも小さくなる場合には、下限地震動をL2地震動として設定することになる。

本区間では、条件②に該当する区間が存在するために、詳細な検討が必要となったが、本検討で参照した耐震標準を適用して設計を行った北陸新幹線（金沢・敦賀間）、九州新幹線（諫早・長崎間）においては、条件①、②のいずれにも該当せず、図-3に示すフローにより詳細な検討が不要であることから、簡易な手法により算定するL2地震動（標準L2地震動）をL2地震動として設定している。

3. 北海道新幹線（新函館北斗・札幌間）における詳細な検討の必要性の判定

ここでは、北海道新幹線（新函館北斗・札幌間）にお



図-1 検討区間とL2地震動の想定震源（J-SHIS⁴⁾に加筆）

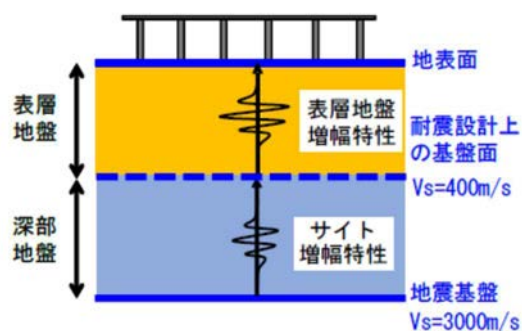


図-2 サイト増幅特性の定義

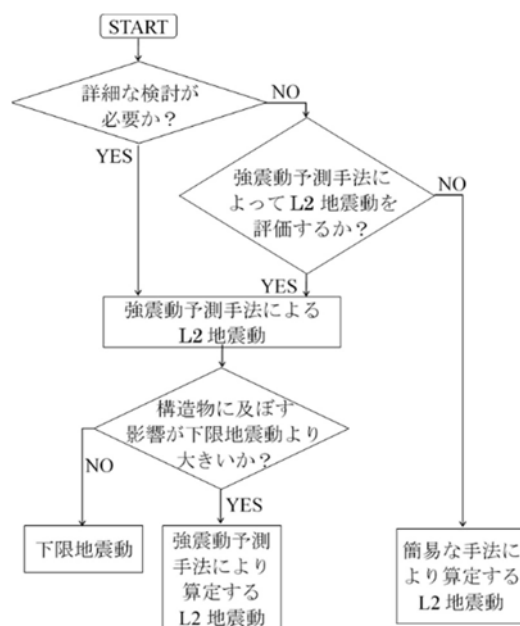


図-3 L2地震動の算定方法

いて簡易な手法により算定するL2地震動が適用可能かを判断するために、前述の①、②の条件について整理を行う。

はじめに条件①について確認を行う。建設地点近傍に、 $M_w=7.0$ を超える規模が想定される内陸活断層と、距離60km以内で $M_w=8.0$ 以上の海溝型地震の発生が想定される震源域が存在しないことを確認するため、耐震標準の

付属資料およびJ-SHIS地震ハザードステーション⁴⁾の資料(図-1)を整理した。これらの資料から、対象区間においては①の条件に該当する震源域が存在しないことを確認した。

続いて条件②について確認を行う。建設地点のサイト増幅特性の評価は、常時微動観測記録に基づく手法により行っている。この方法では、建設地点と近傍のサイト増幅特性が既知である公的地震観測点(参照点)⁵⁾で、それぞれ地表面での常時微動観測を行う。その観測記録から算定した水平動/上下動スペクトル比(H/Vスペクトル比)の2点間の比率(建設地点/参照点)によって、参照点の地表面サイト増幅特性を補正し、建設地点のサイト増幅特性を評価する。なお、常時微動観測は地表面位置で行っているため、補正したサイト増幅特性に対して、ボーリング情報等から評価した表層地盤の増幅特性(図-2)を除去することで、サイト増幅特性を算定する。

建設地点の常時微動観測は4km程度の間隔で行い、各観測地点で評価されたサイト増幅特性や地震基盤深度の分布を参考として、表-1に示す地区分類を行うとともに、地区ごとにサイト増幅特性の評価を行った。常時微動観測を行ったキロ程と参照した公的観測点(K-NET)、深

部地盤の著しい増幅の有無を表-1に示す。

この結果、深部地盤の著しい増幅がみられると判断された地区におけるサイト増幅特性を図-4 a)~e)に示す。サイト増幅特性は地震動の時刻歴波形のフーリエスペクトルの増幅倍率として示されており、いずれの観測点においても、全国平均+標準偏差のサイト増幅特性を超過している。対象地区内で複数地点の観測を行っている場合には、複数の結果が得られているが、その特徴は比較的類似している。また、これらの観測点のサイト増幅特性と参照点のサイト増幅特性の傾向が近く、参照点のサイト増幅特性が検討する地区の代表的な値とみなせる地区(長万部-1, ニセコ, 倶知安)については、参照点のサイト増幅特性も併せて示している。なお、図-4 f)の長万部-2地区のように、限定的な周期帯で超過していたり、一般的な鉄道構造物の周期帯(0.4~1.3秒程度)と異なる周期帯で超過している場合には、深部地盤の著しい増幅は見られないと判断した。図-4の結果から、各地区のサイト増幅の傾向として、長万部-1, 倶知安, ニセコは周期1.0秒を超える長周期帯が大きく、赤井川や札幌では周期0.5秒程度の短周期帯が大きくなることが分かる。

表-1 サイト増幅特性に応じた地区分類

地区	観測キロ程	参照公的観測点	増幅
北斗	149km643m	HKD156 (七飯)	無
八雲-1	182km540m 184km090m 188km800m 190km895m	HKD153 (上の湯)	無
八雲-2	199km920m 203km200m	HKD152 (八雲)	無
長万部-1	221km695m 222km335m 224km170m 225km826m 228km898m 232km200m	HKD151 (長万部)	有
長万部-2	236km000m 238km400m 242km200m 246km036m	SBSH09 (黒松内)	無
蘭越~ニセコ	263km240m	IBUH04 (豊浦)	無
ニセコ	273km905m 274km269m 277km205m	HKD146 (ニセコ)	有
倶知安	288km693m 292km084m 295km160m	HKD144 (倶知安)	有
赤井川	309km713m	SBSH09 (赤井川)	有
小樽	328km335m 332km910m	HKD140 (小樽)	無
札幌	351km941m 355km475m 360km513m	HKD180 (札幌)	有

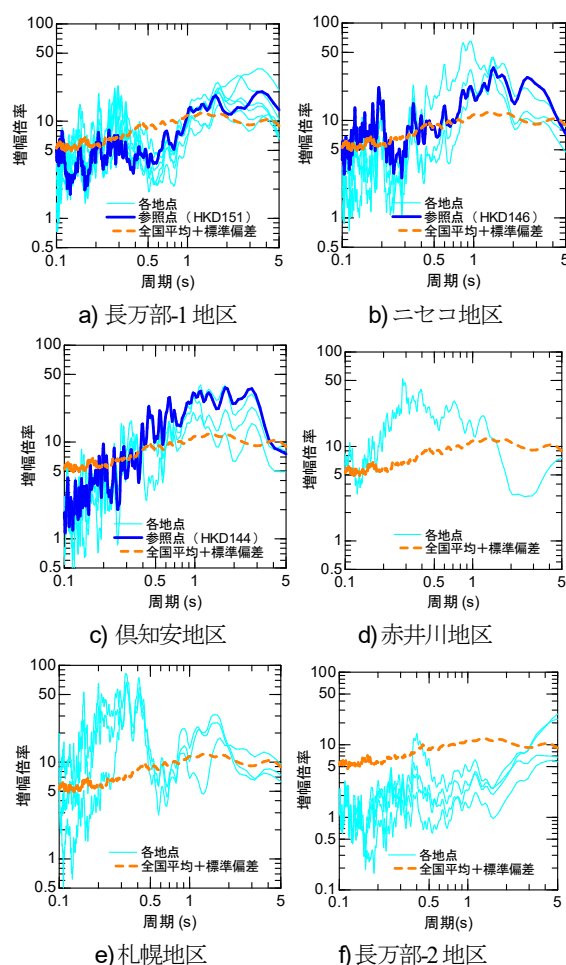


図-4 サイト増幅特性の評価結果

4. 北海道新幹線（新函館北斗・札幌間）におけるL2地震動の算定

(1) L2地震動の算定方法の検討

詳細な検討によるL2地震動の算定では、強震動予測手法による地震動評価を実施することが一般的であるが、本区間は、 $M_w=7.0$ よりも大きな震源域が存在せず、深部地盤の著しい増幅がみられるのみである。また、強震動予測を実施するにあたっては、震源域ごとに断層モデル、地点ごとにサイト増幅特性を設定した上で、地震動評価を実施する。このとき、本区間で対象となる震源域は複数存在する上に（図-1）、検討区間は延長200km以上（あかり構造物の延長は50km）の新線建設工事であるため、各構造物の建設地点で地震動を算定するのは現実的ではなく、評価を簡略化する必要があった。

また、本区間におけるL2地震動の対象震源は、L2地震動の標準応答スペクトルで想定する震源に比べて、震源規模も小さく、震源距離も遠い。そこで、標準L2地震動に対して、これまで考慮していたサイト増幅特性による補正に加えて、当該区間のL2地震動として想定する地震規模、震源距離による補正を行うこととした。

(2) サイト増幅特性を考慮した標準L2地震動の補正^{2,3)}

標準L2地震動に対してサイト増幅特性の影響を補正する際には、以下の手順で行った。

- 1) 耐震標準の標準L2地震動の時刻歴波形をフーリエ変換し、評価地点のサイト増幅特性と全国の平均+標準偏差のサイト増幅特性との比率を補正係数としてこれに乗じる。
- 2) 補正係数を乗じたフーリエスペクトルをフーリエ逆変換することで、補正したL2地震動の時刻歴波形を求める。

サイト増幅特性の補正係数は、図-4に示す地区ごとに個別に設定した。具体的には、参照点のサイト増幅特性が検討する地区の代表的な値とみなせる場合（長万部-1地区、ニセコ地区、倶知安地区）は参照点のサイト増幅特性をもとに補正係数を算定し、その他の場合（赤井川地区、札幌地区）は、複数の観測地点で算定したサイト増幅特性の平均値をもとに補正係数を算定した。

なお、補正係数が1.0を下回る周期帯の補正係数については1.0とし、全周期帯で標準L2地震動を下回ることのないように配慮を行っている。各地区で設定したサイト増幅特性の補正係数を図-5に示す。これらを用いた地震動波形の補正の例として、倶知安地区における、サイト増幅特性の補正を行った後のフーリエ振幅スペクトルと時刻歴波形を図-6、図-7に示す。補正係数は全周期帯で1.0を下回らないよう安全側の配慮を行っているが、

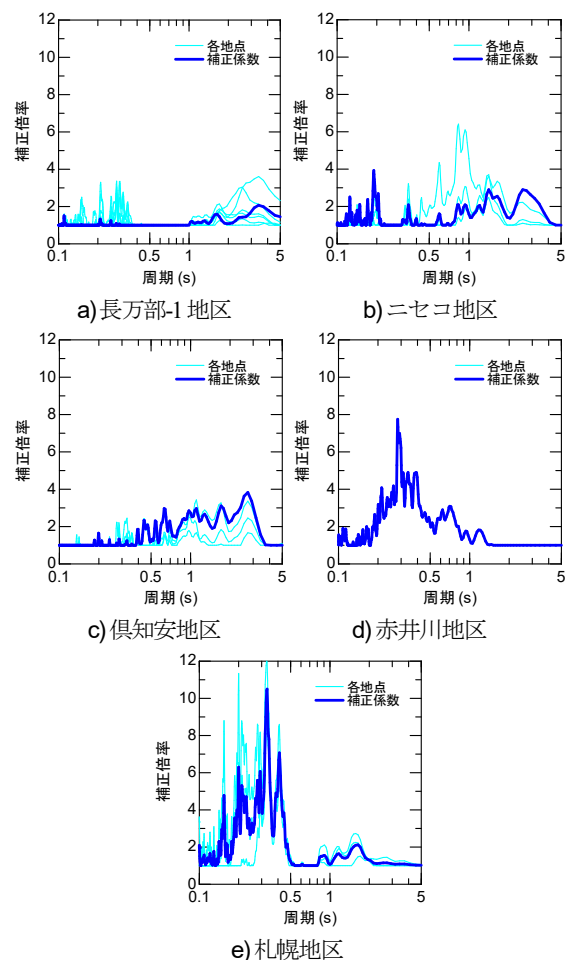


図-5 サイト増幅特性の補正係数

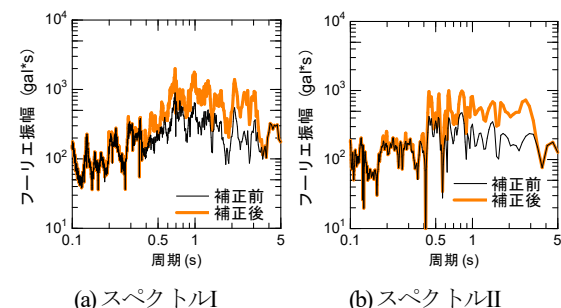


図-6 サイト増幅特性の補正スペクトル（倶知安地区）

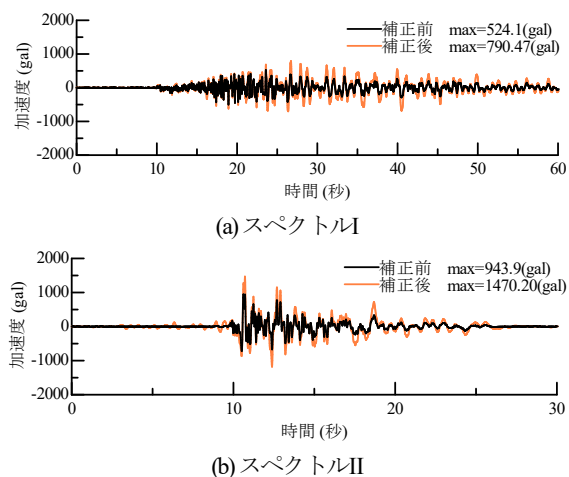


図-7 サイト増幅特性の補正波形（倶知安地区）

これらの結果を見ると、周期1.0秒を超える長周期帯で地震動が大きくなっていることが確認できる。

(3) 地震規模・震源距離を考慮した標準L2地震動の補正

a) 地震動の補正方法の整理

地震規模や震源距離を考慮する方法としては、標準L2地震動と本区間で想定されている比較的規模の大きな震源域との地震規模や震源距離の違いを、加速度応答スペクトルの距離減衰式を用いることで簡易に評価することとした。

対象とする震源は、図-1で示した想定震源のうち、耐震標準における下限地震動で想定する伏在断層の地震諸元(Mw=6.5, 距離3km)より影響が大きいと考えられるものとした。式(1)に示す加速度応答スペクトルの距離減衰式⁹⁾を用いて、検討対象の震源のスペクトルと標準スペクトルで想定される震源のスペクトルの比率を算定し、これを補正係数とした。

$$\log(pre) = a_1(M_{w1'} - M_{w1})^2 + b_{1k}X + c_{1k} + \log(X + d_1 10^{e_1 M_{w1'}}) \quad (1)$$

ここで、 $M_{w1'} = \min(M_w, M_{w01})$

ここに、 pre は加速度応答スペクトルの推定値、 X は断層最短距離、 a_1 、 b_{1k} 、 c_{1k} 、 d_1 、 e_1 は国内の地震観測記録を基に設定された回帰係数で k は地震タイプを表す。 M_w は地震規模、 M_{w1} 、 M_{w01} は振幅飽和を制御する項である。

b) スペクトルIの補正係数の算定

本区間において影響が大きいと考えられる海溝型地震は、十勝沖プレート間巨大地震(Mw=8.6)と北海道南西沖地震(Mw=7.8)がある。これらの震源と標準L2地震動のスペクトルI(Mw=8.0, 距離60km)の応答スペクトルの比を補正係数として図-8に示す。当然ではあるが、震源距離が遠くなるにつれて補正係数は急激に小さくなることが分かる。そこで、本区間で考慮する海溝型地震としては、対象路線と対象震源域の最小距離を算定し、この距離における補正係数を路線全体の補正係数として用いることとした。その結果、最短距離は十勝沖プレート間巨大地震で127km、北海道南西沖地震で73kmとなり、図-8からも非常に小さな補正係数となることがわかる。

c) スペクトルIIの補正係数の算定

本区間で影響が大きいと考えられる内陸活断層帯としては、黒松内低地断層帯(Mw=6.8)、尻別川断層帯(Mw=6.7)、伏在断層(Mw=6.5, 距離3km)がある。震源規模や距離の違いによる標準L2地震動のスペクトルII(Mw=7.0, 距離3km)の応答スペクトルとの比を補正係数として図-9に示す。震源距離が遠くなるにつれて補正係数が急激に小さくなる傾向は海溝型と同様である。

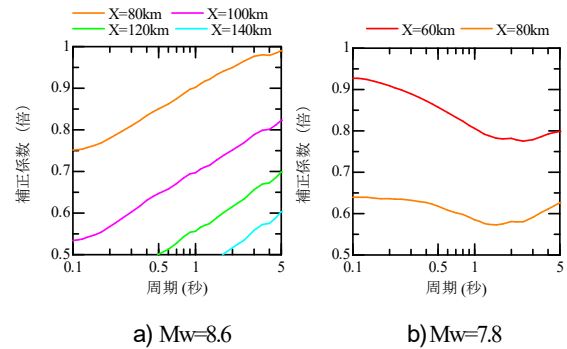


図-8 スペクトルIに対する加速度応答スペクトル比

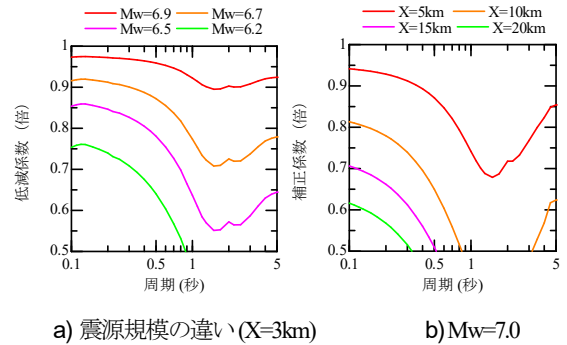


図-9 スペクトルIIに対する加速度応答スペクトル比

一方で、地震規模Mwが小さくても距離が非常に近い場合、短周期帯のスペクトルはそれほど低減しない。

図-9 a)から伏在断層(Mw=6.5, 距離3km)の補正係数は、図-9 b)のスペクトルIIにおける距離10kmの補正係数を上回っている。つまり、本区間で影響が大きい内陸活断層帯までの距離が10kmを超えた場合には、伏在断層を想定した場合の補正係数の方が大きくなる。すなわち、図-1に示す対象区間と震源の位置関係から、黒松内低地断層帯と尻別川断層帯に近接する地区以外では、伏在断層による影響が支配的になると考えられる。

(4) 地震規模・震源距離を考慮した標準L2地震動の算定

(2)のサイト増幅特性の補正係数、(3)の震源規模・距離による補正係数を、それぞれ標準L2地震動の時刻歴波形に乗じることで、震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性を考慮した標準L2地震動の補正係数を評価した。

さらに、この補正係数が1.0を下回る周期は1.0とし、全ての周期で標準L2地震動を下回らないように設定した。これは、本区間でサイト増幅特性の影響が小さい地域では、サイト増幅特性が全国平均+標準偏差を下回っているものの、標準L2地震動をそのままを用いているため、このような地点と同等以上の耐震性を付与するという配慮に基づくものである。

最終的に得られた補正係数を標準L2地震動のフリー

エ振幅スペクトルに乗じることで、各地域における基盤設計地震動を作成した。作成した基盤波を入力として、表層地盤の地盤応答解析を実施し、地盤種別毎の地表面地震動を算定した。なお、図-5 a)に示すように、サイト増幅特性の影響が比較的小さかった長万部-1では、地震規模・震源距離を考慮した補正を行うとともに、表層地盤の影響を考慮することで、最終的に評価された地震動により、標準L2地震動を用いることが可能であると判定した。その他の、標準L2地震動を用いることができないと判断された地区の地表面地震動の例としてG2地盤における弾性加速度応答スペクトルを図-10に示す。

図-5を見ると、サイト増幅特性による増幅の影響は主に、長万部-1地区、ニセコ地区、倶知安地区では周期1秒以上の長周期帯で、赤井川地区、札幌地区では周期0.5秒以下の短周期帯で大きい。一方、震源規模・震源距離を考慮した図-8、図-9の補正係数は、十勝沖プレート間巨大地震 ($M_w=8.6$) を除くと、周期1秒から2秒付近の補正係数が小さくなっている。このことから、震源規模・震源距離を考慮することで、長万部-1地区、ニセコ地区、倶知安地区の補正係数は小さくなり、地震動も標準L2地震動に近くなった。一方で、赤井川地区、札幌地区では、補正係数がそれほど小さくならず、地震動は標準L2地震動を大きく上回る結果となった。

構造物の耐震照査は、地区ごとに地盤種別に応じた時刻歴波形や所要降伏震度スペクトルを整備して行うこととしている。赤井川地区、札幌地区では、構造物の固有周期によっては応答が大きくなると想定されるため、こうした固有周期を避けるような構造計画を行うとより合理的な設計となると考えられる。

5. まとめ

北海道新幹線（新函館北斗・札幌間）では、深部地盤による地震動の著しい増幅がみられる地域が複数存在し、L2地震動の算定に詳細な検討が必要となった。そこで、標準L2地震動を基準として、これまで考慮していたサイト増幅特性による補正に加えて、地震規模、震源距離による補正を行った。本論文では、補正にあたっての基本的な考え方や補正係数の具体的な算定手順について整理を行った。その結果、サイト増幅特性のみを考慮して

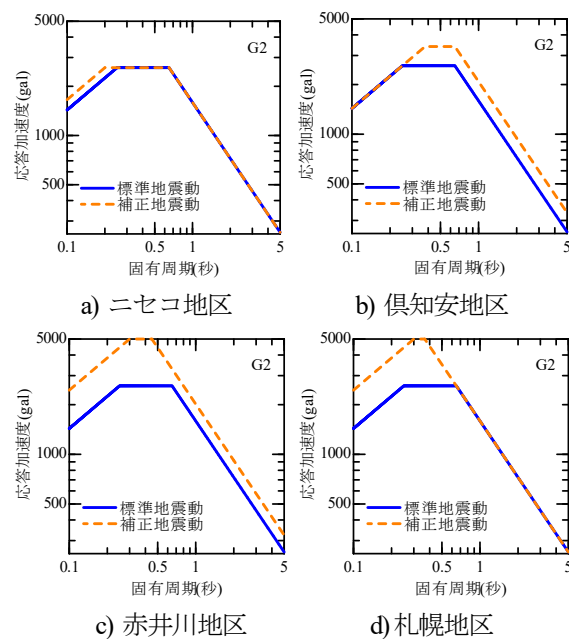


図-10 G2地盤の弾性加速度応答スペクトル

いた場合と比較して、地表面位置の地震動レベルで大幅に小さくなる地点も見られる等、より合理的な設計地震動を得ることができた。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善，2012.
- 2) 朝長光，西恭彦，青柳広樹，神澤拓，坂井公俊：常時微動観測に基づくサイト増幅特性評価とこれを考慮した設計地震動評価，第23回鉄道工学シンポジウム，2019.
- 3) 青柳広樹：北海道新幹線（新函館北斗・札幌間）における設計地震動の評価，JREA，Vol.63，No.1，2020.
- 4) 防災科学技術研究所：J-SHIS 地震ハザードステーション，<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>（2020年1月参照）
- 5) 国土技術政策総合研究所：サイト増幅特性及び、強震観測地点情報，<http://www.ysk.nilim.go.jp/kakubu/kouwan/sisetu/site.html>（2020年1月参照）
- 6) Morikawa, N., Fujiwara, H. : A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake, *Journal of Disaster Research*, 2013.

(2020.4.3 受付)

DESIGN GROUND MOTION CORRECTED BY EARTHQUAKE MAGNITUDE, SOURCE DISTANCE AND SITE AMPLIFICATION

Takahiko NISHI, Hikaru TOMONAGA, Taro ISHIKAWA, Hiroki AOYAGI
Kohei TANAKA, Taku KANZAWA and Kimitoshi SAKAI

In the 2012 design standard for railway structures, the following cases are mentioned as cases in which detailed examination is necessary for the calculation of L2 ground motion: (1) cases in which a source larger than $M_w = 7.0$ is found near the construction site, and (2) cases in which significant amplification of seismic ground motion is assumed due to the influence of the subsurface structure deeper than the engineering bedrock. In Hokkaido Shinkansen (Between Shin-Hakodate-Hokuto and Sapporo), there are some regions where significant amplification is observed by deep subsurface structure, and detailed examination is required for calculation of L2 ground motion. Therefore, in order to estimate more rational L2 ground motion, correction was carried out for standard L2 ground motion according to site amplification, earthquake magnitude, and source distance. In this paper, the basic approach in the correction and the calculation procedure of the correction coefficient were arranged.