

北海道での地震動評価と道路構造物の被害推定

佐藤 京¹・西 弘明²・池田 隆明³・高瀬 裕也⁴・小長井一男⁵

¹正会員 土木研究所 寒地土木研究所 研究員 (〒270-0222 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

E-mail:taka4@ceri.go.jp

²正会員 土木研究所 寒地土木研究所 上席研究員 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

E-mail:h-nishi@ceri.go.jp

³正会員 飛島建設 技術研究所 室長 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)

E-mail:takaaki_ikeda@tobishima.co.jp

⁴正会員 飛島建設 技術研究所 副主任研究員 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)

E-mail:yuya_takase@tobishima.co.jp

⁵正会員 横浜国立大学 教授 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79-1)

E-mail:konagai@ynu.ac.jp

広域分散型社会を形成している北海道では、地震により道路構造物が被災すると被災者の避難や支援物資の輸送などの救援活動が妨げられ、復旧や復興活動を阻害する要因となる。そのため、地震による構造物の被害状況を広域に推定し、二次被害を防止するための適切な対策を講ずることが重要である。本研究では、野幌丘陵断層帯を対象とした地震動評価を行い、道路橋梁に対する被害推定を行なった。さらに、被害推定結果を用いて地震による道路機能への影響度評価を検討した。また、強震動予測技術の中で最適な手法と考えられている経験的グリーン関数法を用いて強震動予測を行った。札幌市内を含む想定震源近傍において、影響が予見される地域、影響を軽減するための代替ルート、考慮すべき地震動の一例をとりまとめた。

Key Words : Nopporo Kyuryo Danso-tai, strong ground motion, BCP, damage estimation

1. はじめに

北海道およびその周辺地域は日本の中でも地震活動が活発な地域である。過去20年以内に限定しても1993年釧路沖地震 (M_J 7.5)、1993年北海道南西沖地震 (M_J 7.8)、1994年北海道東方沖地震 (M_J 8.2)、2003年十勝沖地震 (M_J 8.0) など規模の大きい地震が太平洋岸の沈み込み帯および日本海東縁部の地震発生源で発生しており、震源に近い地域では橋梁や土構造物等に大きな被害が発生している。北海道内陸部で発生する地震、いわゆる活断層の活動に起因する直下型地震は、海溝型地震に比べると少ないが、1995年の空知地方中部の地震 (M_J 5.9) や2004年の留萌支庁南部の地震 (M_J 6.1) が発生している。2011年東北地方太平洋沖地震により日本列島周辺の応力場が変化した、それ以前は北海道地域には太平洋プレートが年間約8cmの割合で近づいてきており¹⁾、東南東方向に圧縮力を受けている。その結果として、北海道内には複数の活断層が確認されており、年代を遡れば1938年と1967年に屈斜路湖付近で M_J 6を上回る地震が発生し、家屋の倒壊や道路・鉄道の被害が発生している²⁾。活断

層調査は精力的に進められているが、火山灰の堆積等による未確認の活断層の可能性も含めると直下型地震への対策も重要である。

北海道の中心都市である札幌市の南部では、2010年10月20日に M_J 3.0の地震(以下、地震A)が発生し、さらに同年12月2日にも M_J 4.6の地震が発生した(以下、地震B)。地震Bは1923年以降にこの地域で発生した地震の中で最も規模の大きい地震である³⁾。震央は野幌丘陵断層帯の想定位置とほぼ一致していることから、野幌丘陵断層帯に起因する地震の可能性が疑われる。

野幌丘陵断層帯が全体で活動した場合、地震の規模は M_J 7を超えると想定されている。野幌丘陵断層帯は北海道の北広島市から江別市にかけての人口密集帯に位置しており、札幌市にも近いことから、北海道の中で最も危険度が高い活断層の一つと考えられる。さらに、断層帯は札幌から新千歳空港や苫小牧港につながる交通・流通網の間にあり、地震により道路構造物が被災すると道路の機能低下・停止により、被災者の避難や支援物資の輸送などの地震直後の救援活動を妨げたり、復旧・復興活動を阻害する要因となる。そのため、想定される地震が

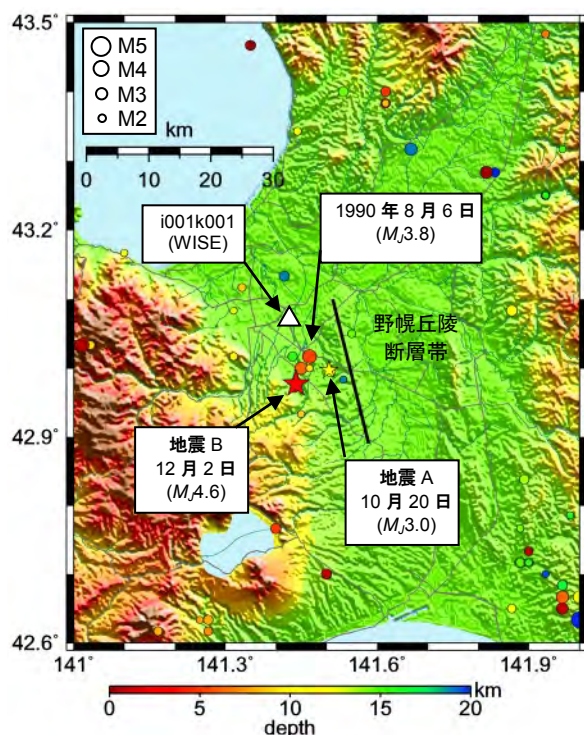


図-1 野幌丘陵断層帯の周辺で発生した地震の震源分布 (M_2 以上, 1923 年以降)

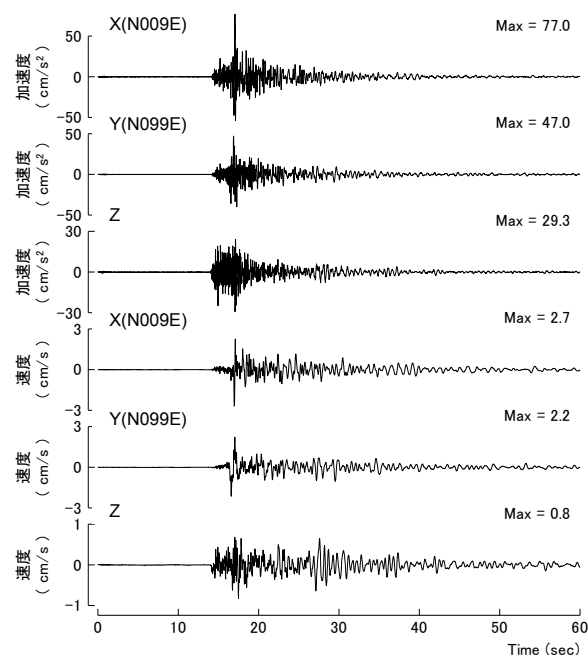
発生した際の構造物の被害状況を広域に推定し、二次的な被害を防止するための適切な対策を事前に講じておくことが重要である。

そこで、本論文では野幌丘陵断層帯を対象とした地震動評価を行い、道路橋梁構造物に対する被害推定を行う。被害推定結果を用いて地震による道路機能への影響度評価を検討した。また、強震動予測技術の中で最適な手法と考えられている経験的グリーン関数法を用いて強震動予測を行い、札幌市内を含む震源近傍地点での地震動波形を予測し、今後の地震防災対策に資するためのデータの蓄積を行う。

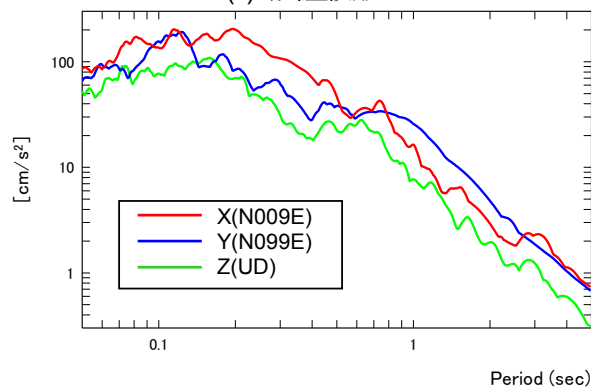
2. 野幌断層丘陵帯の概要と地震履歴

野幌丘陵断層帯は、札幌東方約15kmに位置する野幌丘陵の東麓および西麓に沿う、長さ約20kmの断層帯である⁴⁾。走向は約165度、想定される地震の規模は $M_7.1$ と推定されている⁵⁾。地震調査研究本部では、活動間隔が約7,900年、30年と50年の発生確率はそれぞれ0.38%と0.63%としている⁶⁾。図-1に実線にて断層位置（地表面トレース）を示す。

1923年以降は気象庁の地震年報³⁾、それ以前の地震は宇佐美カタログ²⁾に基づき、地震履歴を調査する。図-1に地震の規模が M_2 以上で震源深さが特定された地震の震源分布と平成22年12月2日の地震で最大地震動を観測したi001k001観測点（北海道開発局WISE）を示す。



(a)時刻歴波形



(b)加速度応答スペクトル($h=5\%$)

図-2 2010 年 12 月 2 日の地震における地震動(i001k001)

野幌丘陵断層帯の周辺では規模の大きい地震は発生しておらず、発生する地震の数も多くないが、中小規模の地震が断層帯の西側の地域で発生している。地震Aが発生する以前で最も規模の大きい地震は1990年8月6日の $M_3.8$ の地震である。

2010 年に発生した地震 A と地震 B は、既往の地震と同様に野幌丘陵断層帯の西側で発生しているが、既往の地震に比べるとやや南側で発生している。

3. 2010年12月2日の $M_4.6$ の地震地震動の分析

北海道開発局の WISE, 防災科学技術研究所の K-NET および KiK-net の合計 73 の観測点で地震動が観測されている。最も大きな地震動は WISE の i001k001 で観測されている。図-2 に加速度および速度の時刻歴波形と加速度応答スペクトル（減衰 $h=5\%$ ）を示す。

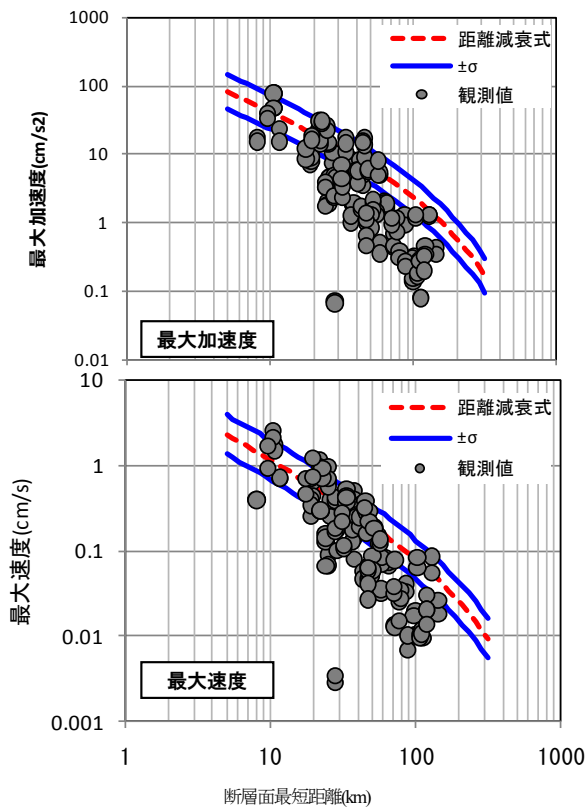


図-3 観測記録の最大値と距離減衰式との関係
(M_w 4.6, 2010 年 12 月 2 日)

最大加速度は 77cm/s^2 であるが、パルス成分を除くと 50cm/s^2 程度である。速度時刻歴の主要動部分にもパルス状の波形が確認される。加速度応答スペクトルは 0.1~0.2 秒付近の比較的短い周期帯で卓越が見られる。この卓越は道路橋示方書で規定されるレベル 2 地震動のタイプ II のスペクトルの卓越周期帯（I 種地盤で 0.3~0.7 秒）よりもさらに短周期側にある。

観測された加速度および速度の最大値を司・翠川の距離減衰式⁷⁾と比較する。 M_w は 4.1、震源距離を断層面最短距離として適用した。また、司・翠川の距離減衰式は、最大速度は工学的基盤で定義されているため、観測最大速度を観測地点での最大速度の増幅度⁸⁾で割戻して工学的基盤での最大値を算出した。図-3 に観測記録の最大値と距離減衰式との関係を示す。

距離減衰式は最大加速度、最大速度ともに、震源距離が 40km 程度と比較的震源に近い観測点では平均的な値を与えることがわかる。また、距離減衰式の $+\sigma$ (標準偏差) は観測記録のばらつきを概ね包絡している。

一方、それよりも震源距離が遠くなると、距離減衰式は観測記録を大きめに評価する傾向にある。遠方の観測点には、地盤の減衰が大きい火山フロント以北の観測点が多く含まれるため、地盤の減衰特性を含む地震動の伝播経路特性の影響が要因の一つと考えられる。

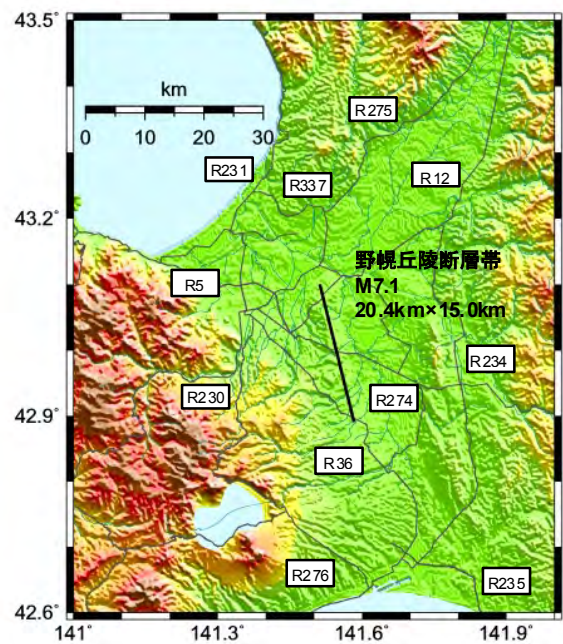


図-4 野幌丘陵断層帯と検討対象範囲

表-1 道路橋梁構造物の被害指標

最大速度 (cm/s)	25 以下	25~40	40~60	60 以上
被害状況	無被害	軽微	中規模	大規模

4. 道路構造物の被害推定

(1) 検討条件と検討方法

道路橋梁構造物の被害推定の対象範囲は、野幌丘陵断層帯を含む北緯 42.6 度~43.5 度、東経 141.0 度~142.0 度の範囲を対象とする。この範囲には、札幌市につながる主要な国道 (R12, R36, R274 等) が含まれる。図-4 に検討対象範囲を示すとともに実線で断層を示す。

地震動評価は以下の手順に従い実施する。まず、野幌丘陵断層帯を対象に、距離減衰式を用いて基盤の最大速度を算出する。地震の規模は M_w 7.1 とする。距離減衰式には、断層タイプを考慮できる司・翠川式⁷⁾の評価式を使用し、工学的基盤における最大速度を推定する。評価地点と断層との距離には、断層面最短距離を適用する。

図-3 に示すように当該式を 2010 年 12 月 2 日に発生した M_w 4.6 の地震に適用した結果、断層面最短距離が 40km 以遠については、大きめの最大値を評価するが、それよりも近い地点については平均的な最大地震動を評価できており、震源周辺の地震動評価には適用可能と判断した。

工学的基盤で設定された最大速度に、各地点での最大速度の増幅度を乗じて地表の最大速度を算出する。本検討では、北海道の地域特性を考慮してコンパイルされた佐藤他⁸⁾の増幅度を使用する。図-5、図-6 に対象範囲に

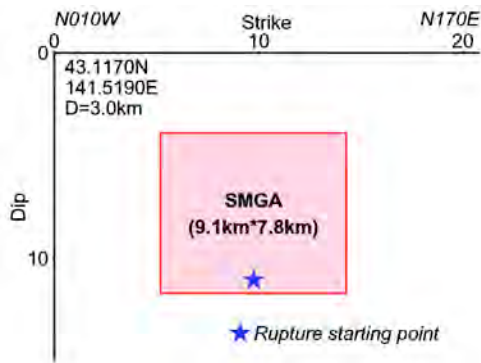


図-7 野幌丘陵断層帯を想定した震源モデル

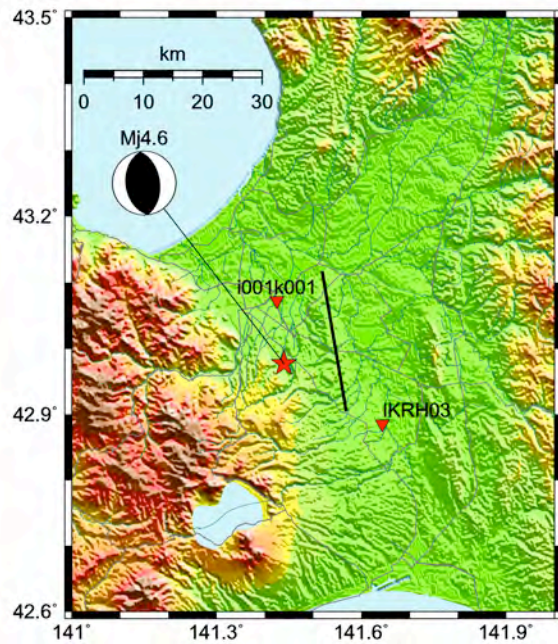


図-8 野幌丘陵断層帯位置と経験的グリーン関数として使用する余震の震央位置および強震動評価地点

標茶町に至る一般国道である。対象範囲には38橋の道路橋梁が架設されている。北広島市付近で野幌丘陵断層帯と交差するため、その付近で大きな地震動が想定されている。この地域において、中規模な被害が想定される橋梁は5橋と推定される。

国道36号と同様に、被害が発生する地域は限定されているため、事前の補強等による対応が震後の道路機能維持には有効であると考えられる。

5. 経験的グリーン関数法による地震動評価

(1) 野幌丘陵断層帯の震源のモデル化

野幌丘陵断層帯は、札幌東方約 15km に位置する長さ 20.4km、幅 15.0km の断層帯である。走向は 170 度、想定される地震の規模は $M_j 7.1$ と推定されている⁹⁾。

震源のモデル化は既往地震に基づく経験的關係式を用いて実施する¹⁰⁾。震源の不均質性は、釜江・入倉のモデ

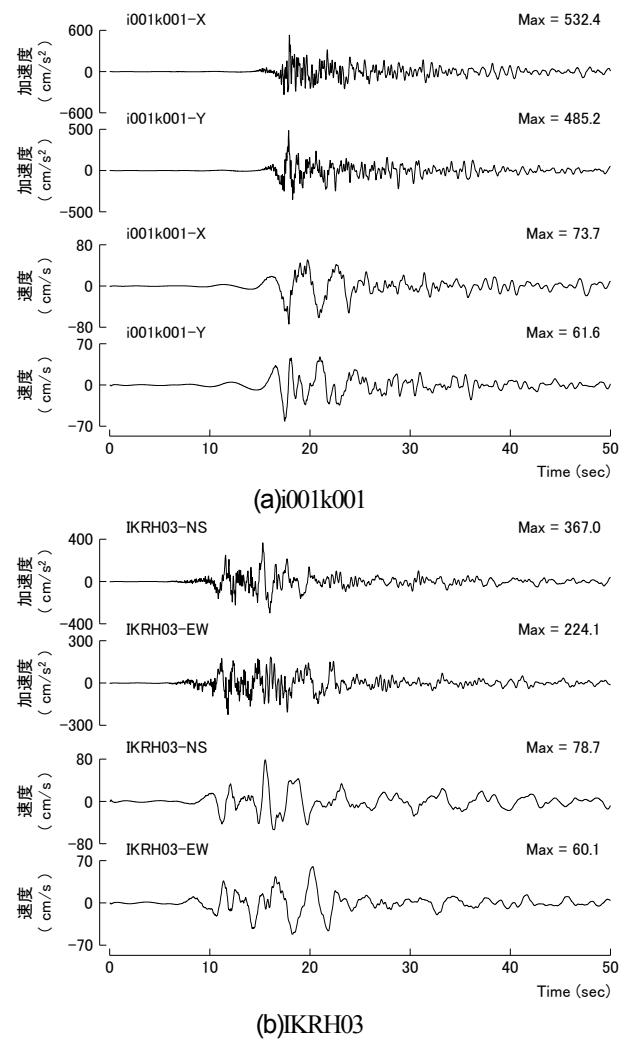


図-9 i001k001 および IKRH03 における強震動評価結果 (加速度、速度時刻歴)

ル化手法¹¹⁾に従い、均質な矩形の強震動生成域 (Strong-motion Generation Area, SMGA) を断層面上に配置することにより考慮する。本検討では、1 個の SMGA を断層の中央に配置し、破壊開始点は SMGA の中央下部に設定した。図-7 に震源モデルを示す。既往の強震動シミュレーションでは、震源周辺の地震動は SMGA から生成される強震動に支配されることが指摘されているため¹²⁾、強震動評価ではアスペリティのみを考慮し、背景領域は考慮していない。

経験的グリーン関数には、2010 年 12 月 2 日に発生した地震 $M_j 4.6$ の観測記録を使用した。図-8 に余震の震央位置を示す。地震モーメントは気象庁の CMT (Centroid Moment Tensor) 解に従い、面積および応力降下量は、震源近傍の IKRH03 (防災科学技術研究所: KiK-net 観測点) の地中観測波から求めた震源変位スペクトルからコーナー周波数を読み取り円形クラックの式から評価した。地震動には長周期側有効周期を考慮して 0.2~10.0Hz のバンドパスフィルターを適用した。破壊速度は 2.5km/s、せん断波速度は 3.5km/s と仮定した。経験的グリーン関

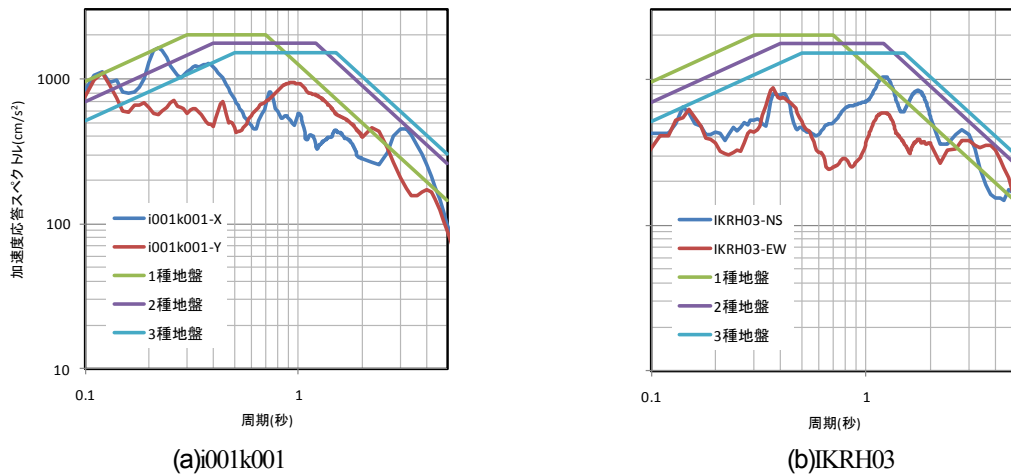


図-10 i001k001 および IKRH03 における強震動評価結果（加速度応答スペクトル，減衰定数 5%）

数法には Inkura の波形合成法¹³⁾を使用した。

(2) 強震動評価結果

経験的グリーン関数法は，対象地点の地震動が，大地震（想定地震）と小地震（経験的グリーン関数法に用いた地震）の地震の相似則と震源スペクトルの相似則に基づき，経験的グリーン関数の線形な重ね合わせで表現されるため，本震時に地盤の強い非線形性が生じる可能性のある軟弱なサイトでは，合成波形が過大評価となる場合が多い。本報告では，非線形性の影響の少ない比較的硬質な地盤における観測地点を比較評価対象として，i001k001 地点（北海道開発局：WISE 観測点，札幌市白石区米里）と IKRH03 地点（千歳市釜加）の 2 地点での地震動評価結果を紹介する。

図-9 に i001k001 と IKRH03 の加速度および速度の時刻歴波形を示す。i001k001 は橋梁架設地点のため，観測方位は橋軸(X:N009E)と橋軸直交方向(Y:N099E)である。i001k001 の速度波形には，断層破壊の指向性効果によると考えられるパルス状の波形が見られる。このような波形は，1995 年兵庫県南部地震や 2000 年鳥取県西部地震の震源近傍で見られており，構造物の被害と大きく関係すると考えられる。最大速度は 70cm/s を超えており，1995 年兵庫県南部地震と同程度の振幅を有する。IKRH03 は最大加速度は 400cm/s² とあまり大きくないものの，最大速度は 78cm/s と i001k001 よりも大きい。i001k001 が最初にパルス状の波形が見られるのに対して，IKRH03 では S 波の到達から 5 秒後付近に振幅の大きいパルスが見られる。

図-10 に i001k001 と IKRH03 の加速度応答スペクトル（減衰定数 5%）を道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編¹⁴⁾（以下，道示）で規定されたレベル 2 地震動のタイプ II の加速度応答スペクトルとあわせて示す。i001k001 の加速度応答スペクトルは，0.5 秒から 1.0 秒付近の振幅は小さいものの，それ以外の周期帯は道示の 1 種地盤のスペクトルと同程度である。IKRH03 は 1.0 秒以上の周

期帯の振幅が i001k001 よりも大きく，2 種地盤のスペクトルと同程度である。

7. 結論

地震による構造物の被害状況を広域に推定し，二次被害を防止するために資する基礎資料の充実のため，野幌給料断層帯を対象に検討を行った。

野幌丘陵断層帯に起因すると考えられる地震が平成22年10月20日以降に複数発生し，周辺の地震履歴を調べるとともに，最も規模の大きい12月2日の地震の地震動の分析を行った。その結果，震源近傍の地震動は短周期成分が卓越していること，震源周辺の観測地点の平均的な最大地震動は司・翠川の距離減衰式で評価できることがわかった。一方，遠方の観測点は過大評価となり，地盤の減衰を含む地震動の伝播経路特性の影響が要因と考えられた。今後は，地震規模や深さなどをパラメータとして，距離減衰式の適用範囲に関する調査も必要と考える。

野幌丘陵断層帯の地震を想定した広域地震動評価を行い，得られた地震荷重に基づき道路橋梁構造物の被害推定を実施し，得られた結果を用いて地震による道路機能への影響度評価を実施した。今後，被害指標の最適化等を行い，被害推定結果の精度向上を図ることが，北海道の地震災害対策を検討する上で重要である。

経験的グリーン関数法により，野幌丘陵断層帯を対象とした地震動評価を行った。震源近傍では最大加速度が 500cm/s²，最大速度が 70cm/s を超える強い地震動が予測された。また，加速度応答スペクトルは，道示に規定されたレベル 2 地震動のタイプ II と同程度であった。

野幌丘陵断層帯は北海道の中でも危険度が高い地震発生源であるため，今後も地震観測データを蓄積し，今回予測された地震動に見られる特徴的な波形の分析や，予測精度の向上を図っていきたい。

謝辞：本検討では，WISE，K-NETおよびKiK-netの地震

観測記録を使用させていただきました。

参考文献

- 1) 海上保安庁,
<http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KOHO/chikaku/kaitei/miyagi0410.pdf>, (2013/9/12参照),
- 2) 宇佐美龍夫：最新版 日本被害地震総覧，東京大学出版会
- 3) 気象庁：地震年報
- 4) 中田高，今泉俊文：活断層詳細デジタルマップ，東京大学出版会
- 5) 地震調査研究推進本部：地震ハザードステーション，
[http://wwwold.j-shis.bosai.go.jp/\(2013/9/2参照\)](http://wwwold.j-shis.bosai.go.jp/(2013/9/2参照))
- 6) 地震調査研究推進本部：全国を概観した地震動予測地図(平成18年9月25日)
- 7) 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文報告集, No. 523, pp.63-70, 1999.
- 8) 佐藤京，西弘明，上明戸昇，池田隆明：北海道の地震動観測記録を用いた表層地盤の増幅推定，構造工学論文集, Vol.54A, pp.256-265,2008.
- 9) 佐藤京，西弘明：地震の発生確率を考慮した橋梁構造物の地震被害推定手法，土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, I-605, 2010.
- 10) 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」），2008年4月11日，
[http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/08apr_kego/recipe.pdf\(2010.12.2参照\)](http://www.jishin.go.jp/main/kyoshindo/08apr_kego/recipe.pdf(2010.12.2参照))
- 11) 釜江克宏，入倉孝次郎：1995年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集, 第500号, pp.29-36, 1997.
- 12) 池田隆明，釜江克宏，三輪滋，入倉孝次郎：経験的グリーン関数法を用いた2000年鳥取県西部地震の震源のモデル化と強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集, No.561号, pp.37-45, 2002.
- 13) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motions using empirical Green's function, Proceedings of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium, pp. 151-156, 1986.
- 14) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2012.

(?)

STRONG GROUND MOTION ESTIMATION IN HOKKAIDO AREA AND DAMAGE ESTIMATION OF THE ROAD BRIDGE STRUCTURES

Takashi SATO, Hiroaki NISHI, Takaaki IKEDA, Yuya TAKASE
and Kazuo KONAGAI

Hokkaido, the second largest island in Japan, is wide open with some major cities sparsely distributed. Once a deadly earthquake happens somewhere inland of Hokkaido, it can affect seriously major transportation services suspending rescue and restoring operations. Therefore mapping a rational tactics for recovering transportation services based upon a reliable scenario of events is vital before everything. A scenario is developed for the island's largest metropolitan area, Sapporo, and its suburbs with Noppero Terrace fault system considered as causative. The empirical Green's function method is used to estimate seismic motions in the target area. Then its impact on the major road network is estimated assuming a strong correlation between peak ground velocity and extent of damage to bridges.