

地盤凍結が地表面地震動に与える影響

佐藤 京¹・池田 隆明²・高瀬 裕也³・西 弘明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 (〒062-8602 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 飛鳥建設 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

³正会員 飛鳥建設 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

⁴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

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

地震被害想定や事業継続マネジメント等の検討では、その地域に想定される地震動を適切に予測することが重要である。特に広域的な範囲を対象とした場合には、基盤距離減衰式より基盤地震動を推定し、サイト特性を反映させた増幅率を用いて地表面地震動を設定することが一般的である。増幅率は検討対象地点の地盤構造を含む地盤特性により規定され、気象環境等により大きく変化しないことが前提とされている。一方、冬季に地盤が凍結する可能性がある寒冷地域では、地盤特性が変化する可能性が否定できないと考えられる。そこで、冬季に地盤が凍結する北海道で観測された地震動記録を用いて増幅特性に対する地盤凍結の影響を検討した。

Key Words : site effect, amplification factor, frozen ground, strong ground motion, damage estimation

1. はじめに

地震被害想定や事業継続マネジメントの評価では広域的な地震動予測が行われる。これらの検討においては、距離減衰式などの方法により工学的基盤（せん断波速度が400m/s以上の基盤）の地震動を評価し、検討対象地点の地盤特性を反映したサイト特性を乗じて、地表の地震動（外力）を評価する。ここで述べたサイト特性には盆地構造などの深部地盤構造による三次元的な地震動伝達特性も含まれるが、一般的には鉛直下方から入射したS波の増幅特性、いわゆる工学的基盤（せん断波速度が400m/s以上の基盤）から地表までの表層地盤のS波の増幅特性を示す場合が多い。そのため、S波の増幅特性は水平成層を仮定した一次元地盤構造でモデル化され、せん断剛性と減衰特性および非線形特性によって拘束される。

地盤が凍結するような地域では、地盤の凍結により、地盤の密度とせん断波速度のどちらか一方、もしくは両方が影響を受け、せん断剛性が変化することが考えられる。また、表層部の凍結により二次元的に地表が拘束され、増幅特性が変化することが想定される。そのため、

冬季とそれ以外の時期ではS波の増幅特性が異なる可能性がある。特に後者の要因である拘束効果は水平成層を仮定した一次元解析では説明することが困難である。

地盤の凍結の問題は古くから凍上問題として研究が行われてきた^{1),2),3)}。また、凍結地盤の特性についての研究もいくつか行われている^{4),5)}。しかし、凍結地盤の増幅特性についての研究は少なく^{6),7)}、十分検討が行われているとは言い難い。そこで、地盤が凍結する地域を対象に、夏季と冬季の地震動記録を比較し、地盤凍結が地震動に及ぼす影響を検討した。

2. 検討条件

(1) 検討対象地域

1877年から2013年の間で気象庁により観測されている記録を基に札幌、旭川、帯広、釧路の4都市における月別平均気温を整理した結果を図-1に示す⁸⁾。いずれの都市においても12月から3月までは、平均気温が0℃を下回っていることが確認できる。特に1月や2月において平均気温が最低となっており、この時期において表層地盤が凍結する可能性は高いと考えられる。

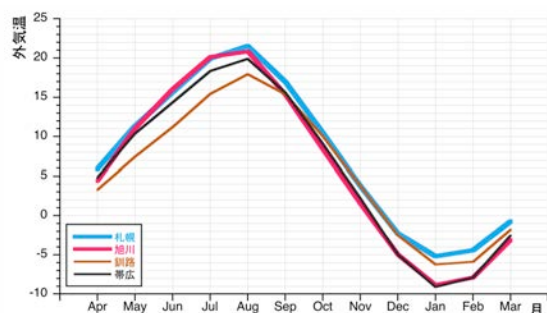


図-1 札幌，旭川，帯広，釧路における月平均気温（1877. – 2013.）

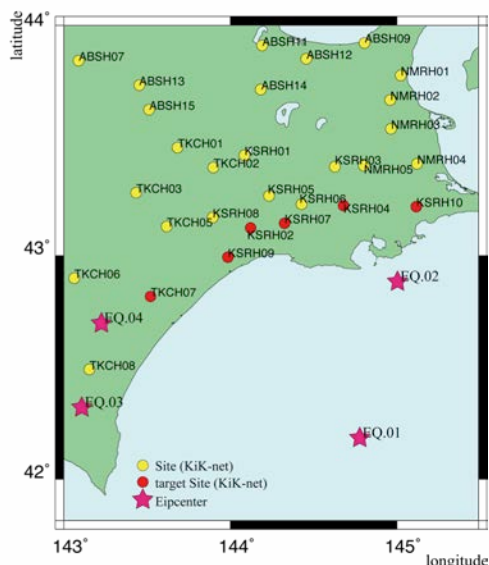


図-3 KiK-net の地震観測地点と検討に使用する地震の震央分布図

図-2 に北海道開発局道路設計要領⁹⁾に掲載されている舗装設計の際に参考としている理論最大凍結深さより算定した置換厚の分布を道東方面を抜粋して示した。

特に寒さが厳しい道東地域では、降雪が少ないこともあり、凍結深度が深い地域が広く分布しており、これらの地域では、凍上現象により地中で霜柱が成長し地表面を押し上げるために道路や土構造物、建築物等に被害を与える危険性が高いことから、良質の地盤材料に置換する対策が実施されている。その置換厚は凍結深と読み替えることができる。凍結深は内陸部の方が深く 140cm に達する。一方、相対的には凍結深が浅い太平洋沿岸域でも凍結深は 100cm に達する。そのため、この地域では冬季とそれ以外の季節では、表層の地盤特性が変化することが想定されることから、北海道の道東地域を対象に検討を実施する。

(2) 検討対象地点

地盤の増幅特性を地震観測記録から評価するため、基盤と地表で同時に地震動が得られている防災科学技術研究所の強震観測網 KiK-net¹⁰⁾の地震観測地点を検討対象地

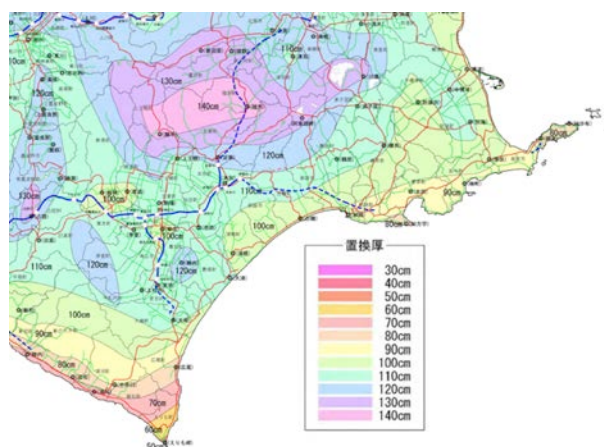


図-2 理論最大凍結深さより算定した置換厚の分布（20 年確率置換厚分布図）⁹⁾

表-1 対象観測点の概要

観測点名	緯度 経度	地表観測点 標高 (m)	地中観測点 深さ (m)	1 次元固有 振動数 (Hz)
標茶南 (KSRH04)	43.2139 144.6804	30	240	0.39
鶴居南 (KSRH07)	43.1359 144.3274	38	222	0.46
豊頃 (TKCH07)	42.8114 143.5203	9	100	0.65
阿寒南 (KSRH02)	43.1142 144.123	30	105	0.73
浜中 (KSRH10)	43.2084 145.1168	31	255	0.86
白糠南 (KSRH09)	42.9856 143.9841	27	100	0.89

点とする。

図-3 に北海道道東地域の KiK-net の地震観測地点を示す。この中から、地盤凍結深さが比較的深い地域であり、かつ地震観測記録が豊富に得られている地点として、KSRH02（阿寒南），KSRH04（標茶南），KSRH07（鶴居南），KSRH09（白糠南），KSRH10（浜中），TKCH07（豊頃）の 6 地点を検討対象地点に選定する。選定した地点を●で示す。表-1 に選定した地震観測地点の諸元を示す。

(3) 検討対象地震

前述のようにサイト特性には表層地盤の増幅特性だけではなく、三次元的な広がりを持つ深部地盤構造の影響も含まれている。2003 年十勝沖地震の際に北海道苫小牧地域では、勇払平野の盆地構造の影響により卓越周期が 7～8 秒の長周期地震動が生成された。しかし苫小牧地域では全ての地震動において長周期地震動が生成されるわけではなく、地震波の到来方向等によって影響を受けることが知られている¹¹⁾。また、地盤は強い地震動を受けた場合、せん断応力～せん断ひずみの関係が非線

表-2 対象地震の概要

地震 記号	発生時刻	震央 (緯度)	震央 (経度)	深さ (km)	規模 M _j
EQ.01	2003/9/26 15:27	42.188N	144.776E	27km	6.1
EQ.02	2005/1/18 23:09	42.878N	145.003E	50km	6.4
EQ.03	2012/8/25 23:16	42.327N	143.110E	49km	6.1
EQ.04	2013/2/2 23:17	42.702N	143.227E	102km	6.5

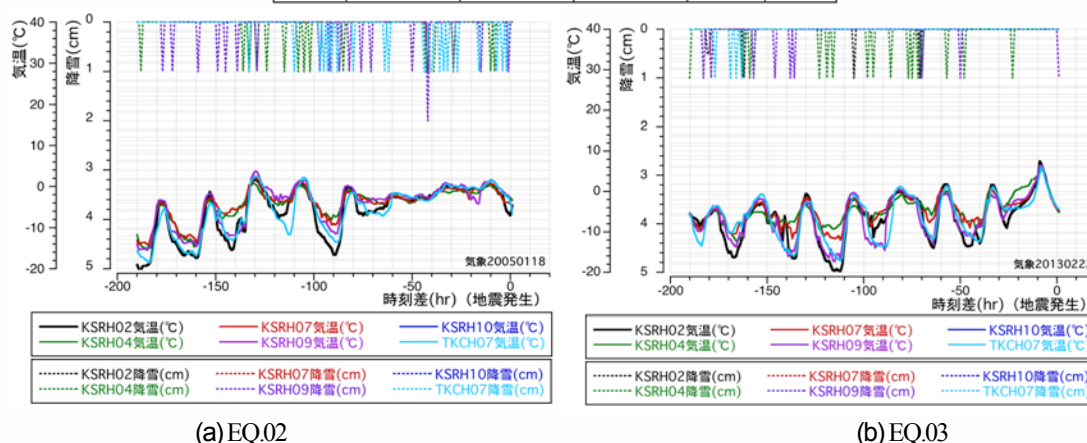


図-4 観測サイト近傍での地震発生までの外気温変動と降雪量（地盤凍結期の地震）

形性を示すことが知られている．そのため，深部地盤構造の影響と地盤の非線形特性の影響をキャンセルするため，地震動の到来方向が等しくなること，地震の規模が同じで，地震動レベルが等しくなること等を考慮して検討対象地震を選定した．

このエリアは，図-1 に示した帯広や釧路の月別平均気温から 12 月から 3 月にかけて 0 °C を下回ることが予想され，地盤が凍結する可能性が高いことから，この時期に発生した地震を地盤凍結期の記録として選定した．この地震記録と比較するために，この期間以外に発生した地震のうち，震源域，規模とも同程度のものを非凍結時期の記録として地震の抽出を行った．対象地震の概要を表-1 に，震央と観測サイトの配置を図-1 に示す．地震は 4 つ選定し，EQ-01 と EQ-03 が非凍結期，EQ-02 と EQ-04 が凍結期である．震源位置との関係により EQ-01 と EQ-02，EQ-03 と EQ-04 を比較する．

地盤凍結の可能性を確認するため，EQ.02とEQ.04が発生した時刻より概ね1週間ほどの，観測サイト近傍の気象庁観測点で記録された外気温と降雪量を示す．横軸の時間差とは，地震発生した時刻を基準として示している．

図-3 (a)，(b)より各観測点では，地震発生までの1週間は最高気温が0 °C 以下であり，地表面は冷やされ凍結しているものと想定されるから，対象とした地震観測記録を凍結期とすることは，妥当であると考えられる．

(4) 増幅特性の比較値算定方法

本検討では KIK-net の地表地震動のフーリエスペクトル

ルを地中地震動のフーリエスペクトルで除したスペクトル比，いわゆる伝達関数を増幅特性とした．スペクトル比の算定は，以下の手順に従った．なお，図化する際には，移動平均法により平滑化を行っている．

- 1) 全データを対象に加速度フーリエスペクトル振幅を算定（三成分）
- 2) 水平 2 成分のスペクトル振幅を合成し，水平方向のスペクトル振幅を算出
- 3) 地表のスペクトル振幅を地中のスペクトル振幅で除し，スペクトル比を算定（水平方向および上下方向）
- 4) 算定されたスペクトル比に対して移動平均法により平滑化を実施

3. 増幅度比による凍結地盤の影響分析

図-5(a),(b)に凍結期と非凍結期のスペクトル比を水平成分と鉛直成分について検討対象地点別に示す．検討対象地点は地盤の固有振動数の低い順に並べている．地点名称を示すキャプションの括弧内に固有振動数を示す．スペクトル比は赤色が凍結期（EQ-02，EQ-04）で黒色が非凍結期（EQ-01，EQ-03）である．

水平成分については，TKCH07 以外の 5 地点については 2～3Hz までは凍結期と非凍結期のスペクトル比には差異が見られないが，それよりも高い振動数においては凍結期の方が非凍結期に比べてスペクトル比が低下する傾向が見られる．

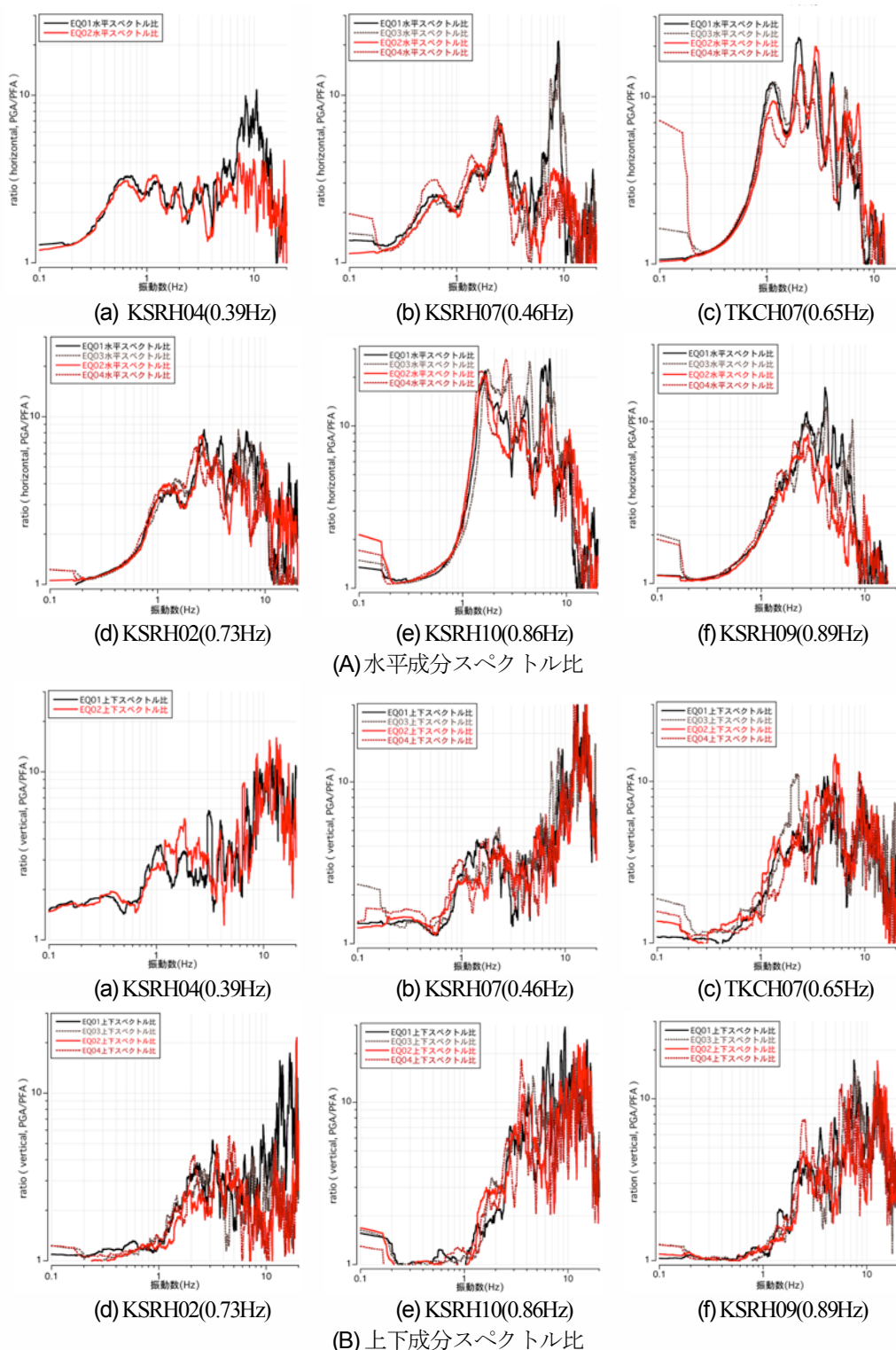


図-5 各サイトの地震別スペクトル比（暖色系; 凍結期地震）

PGA; Peak Ground Acceleration (地表面記録), PFA; Peak Foundation Acceleration (地中記録)

図-5(b)からわかるように、鉛直成分のスペクトル比には水平成分に見られたようなスペクトル比の低下は見られず、凍結期と非凍結期のスペクトル比には有意な差異は見られない。

地盤が凍結することにより、表層地盤のみかけのせん断剛性が高くなり、一次元地盤構造が変化することが考えられるが、その場合には地盤の一次固有振動数が変化

するため、一次固有振動数よりも高い振動数領域で増幅度が低下することは説明できない。そのため、地盤の凍結により二次元平面的に地表付近の地盤が拘束され、地盤の固有振動数の高次モードの震動が抑制された可能性がある。

図-6(a)に凍結期のスペクトル比を非凍結期のスペクトル比で除した水平成分のスペクトル比の比を示す。

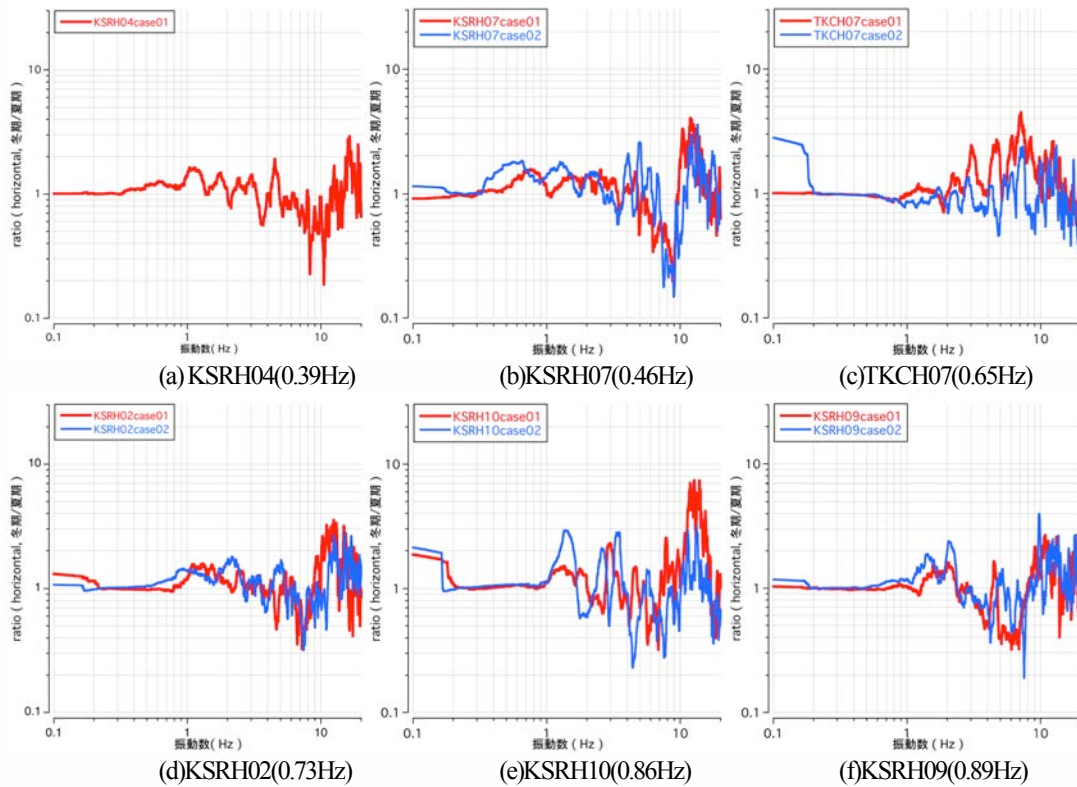


図-6 非凍結・凍結地盤のスペクトル比の比較（水平成分）

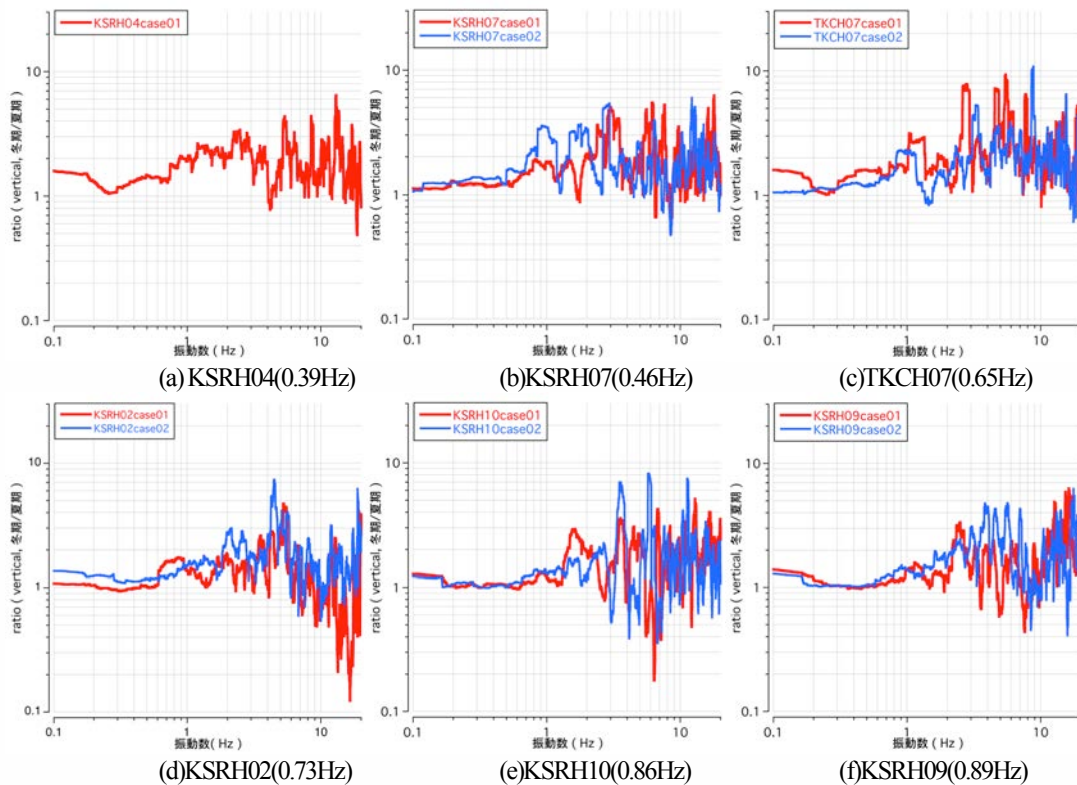


図-7 非凍結・凍結地盤のスペクトル比の比較（上下成分）

TKCH07を除くとスペクトル比の比は2~3Hzまでは1.0程度であるが、そこから9~10Hz程度までは1.0を下回り、それよりも高い振動数では1.0を上回る。複数のサイトで同様の傾向、つまり1次元固有振動数との関係性が低く、さらに震源域特有のものとも異なると想定され

る。一方、鉛直成分のスペクトル比の比については、スペクトル比=1.0を中心とした変動は見られるが、水平方向と比較するとスペクトル比には明瞭な特徴は見られない。

4. 結論

冬期に地盤凍結の可能性がある寒冷地域では、時期によって地盤特性が変化する可能性が否定出来ないことから、北海道で観測された地震動記録を用いて増幅特性に対する地盤凍結の影響を検討した。

北海道の気象より地盤凍結の可能性のある12月から3月までに発生した地震を凍結期地震として抽出し、その震源域と同一で、同程度の規模の2組4地震を対象に観測6サイトの記録を対象として、地中から地表へ伝達される地震動のスペクトル比を分析した。

その結果、地盤の凍結により振動数に依存する増幅特性に影響を与えることが明らかになった。しかし、影響を受ける振動数領域は地盤の1次固有振動数よりも高い振動数であることが確認されたことから、構造物の地震時応答に与える影響は低いと考えられる。

しかしながら、高次の固有振動数に明確な違いが確認されたことに加え、さまざまな構造物へ与える影響については検討不足であるため、継続的に関係資料の収集と分析を行う。

謝辞：本検討では、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) 久保宏：道路舗装の凍上とその対策，土と基礎，Vol.29, No. 2, pp. 9-14, 1981.
- 2) 小川 正二，亀井健史，福田誠，佐々木嘉仁：粘性土地盤における凍上現象に関する基礎的研究，土木学会論文集, No. 382, pp.149-156, 1987.
- 3) 真井耕象：凍上被害とその対策について，土と基礎，Vol.1, No.1, pp.7-13, 1994.
- 4) 福田正己，井上正則：凍土の動的性質について I，低温科学，物理篇，第31輯，pp.245-259, 1973.
- 5) 井上正則，木下誠一：凍土の圧縮強度と動的性質，低温科学，物理篇，第33輯，pp.243-253, 1976.
- 6) 鈴木秀夫：日本の気候と気候区，古今書院，41-62, 1962.
- 7) 草刈敏夫：寒冷地における地盤凍結が木造住宅の振動特性におよぼす影響，釧路工業高等専門学校「紀要」，第39号，pp.39-42, 2005.
- 8) Xiong, F., Yang, Z. and X. Gang: Seasonally Frozen Soil Effects on the Dynamic Behavior of Building Structures, *Proceedings of the 14th World Conference of Earthquake Engineering*, 2008.
- 9) 北海道開発局：北海道開発局道路設計要領，2014.
- 10) 防災科学技術研究所：強震観測網，<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>(2014年9月7日閲覧)
- 11) 高瀬裕也，池田隆明，佐藤 京，西 弘明：北海道における長周期地震動に関する検討，その2：K-NET 苫小牧における長周期地震動の生成特性，土木学会北海道支部平成21年度年次技術研究発表会，No.A-63, 2010.

EFFECT OF SURFACE LAYER FREEZE TO STRONG GROUND MOTION

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

It is important in considering the business continuity management and earthquake damage estimation is that it is to properly predict the ground motion to be expected in the area. In ground motion prediction that target wide area, to estimate the ground motion of the foundation by using the attenuation characteristic which is proportional to the epicentral distance. And can be calculated using the amplification characteristics that are transmitted from the ground based on the seismic ground surface is common. Amplification characteristic is one that has been defined from the ground characteristics and ground structure, and are an average of not considering the change in the characteristics temporary affected by weather. On the other hand, the possibility that the ground is frozen in a cold region is high and if the situation continued, it can not be denied the possibility of soil characteristics change. So, by using the observed records of Hokkaido ground freezes in winter, it was investigated the effect of ground freezing on the amplification characteristics.