

(105) 釧路沖地震時の釧路市周辺における地盤凍結と液状化の分布

—リモートセンシングデータを利用した液状化危険度解析—

西松建設(株)技術研究所 正員 ○ 戸 松 征 夫
 西松建設(株)技術研究所 正員 佐 藤 靖 彦
 神戸大学工学部 正員 高 田 至 郎
 北海道大学低温科学研究所 福 田 正 己

1. はじめに

釧路沖地震(1993年1月15日)により釧路市を中心とした地域で液状化や地盤変状がみられた。地震の発生当時、釧路市での気温は氷点下であり、釧路市周辺で地盤は凍結していたとみられている¹⁾。地盤が凍結していたことが、液状化や地滑りなどの地盤被害が比較的少ない要因であったと予想される。

本研究では、地震発生時の地盤凍結の深度が地盤災害に関係があるものと予想して、まず地震時の地盤凍結深度の分布を求める。次に、人工衛星によるリモートセンシングデータを利用して液状化危険度の分布を解析する。また現地踏査を行って土質試料をサンプリングし、その粒径分析結果をリモートセンシングデータの解析結果と対応する。ただし、地震発生前後で地盤の液状化危険度は変化しないものと仮定する。

2. 釧路における地盤凍結深度の分布

地震時の地盤凍結の影響を評価するために、釧路市周辺の地質、地盤条件や地形に対応して地震時の凍結深度の分布を求め、釧路市における凍結深度の連続観測データと照合する。

なお、凍土の特徴として、次のような点が挙げられる。

- ①例年、釧路市周辺では11月中旬から継続的に地盤凍結した状態となり、表層下で4月中旬まで残る。
- ②もし積雪があると、雪の保温効果のため凍土は成長しにくい。
- ③冬季には凍土があっても土壌は乾いた状態にあり、地下水位は低くなっている。

(1) 計算方法 土の凍結深度の推定には、気温などの気象データにより地表面の熱収支を計算して平衡地表面温度を求め、これを境界条件として潜熱発生を伴う熱伝導方程式を解く²⁾。地中温度分布を求めて凍結深度を予測する。計算に用いる土質条件は、土の密度、含水比、熱伝導率、および比熱である。密度は柱状図^{1), 3)}のN値から推定し、熱伝導率はKerstenの式⁴⁾を用いて決定する。含水比と比熱は北海道での実測値を参考に決める⁴⁾。また、気象条件には釧路地方気象台のデータを使用し、92年10月1日から93年1月31日までの日毎の日射量、平均気温、風速、気圧などの気象データを与える。釧路市では12月23日から地震発生の1月15日まで降雪がなく、平均気温も氷点下の日が続いた。

(2) 計算結果 地震が発生した1月15日の凍結深度の計算結果を表1に示す。平坦地では主に砂層が堆積しており、そこでの凍結深度は40~50cmである。一方、緑ヶ岡や気象庁など火山灰、シルトが堆積する台地部では凍結深度は25~30cmと浅い。粒径が粗いと熱伝導率が大きいため凍結が進行しやすいことが反映されている。釧路市内の釧路ガスの工場敷地内では、凍結深度が連続観測されており、地震発生日の1月15日には44cmであり、最大で52cm(2月5日)であった。また、城山1丁目の

表1 釧路沖地震時('93.1.15)の地盤の予想凍結深度

No	場 所	表層土質(m)	凍結深度(cm)
1	城山1丁目37番	北海道教育大 釧路分校	砂 45.6
2	寿 1丁目2番	釧路ガス付近	砂 48.7
	寿 1丁目2番	釧路ガス付近 (舗装85cmの場合)	アスファルト 切込砂利、砂 74.0
3	南浜町32番	中央埠頭東	砂 46.5
4	北大通13丁目1番	釧路駅前	砂 46.7
5	北大通1丁目2番	旧釧路川沿い	火山灰、砂 30.9
6	柳町13番	市民の森公園南側	砂 47.6
7	中島町5番	釧路駅北側	砂礫、シルト 41.4
8	釧路西町2丁目3番	木場東側	砂 42.0
9	木場1丁目	7本-1被害付近	砂 41.0
10	緑ヶ岡6丁目	緑ヶ岡埋立場付近	火山灰 26.3
11	弊野町28番	気象庁	シルト 25.9

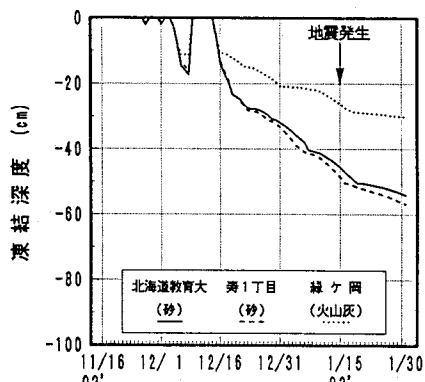


図1 予想凍結深度の経時変化(地点No.1,2,10)

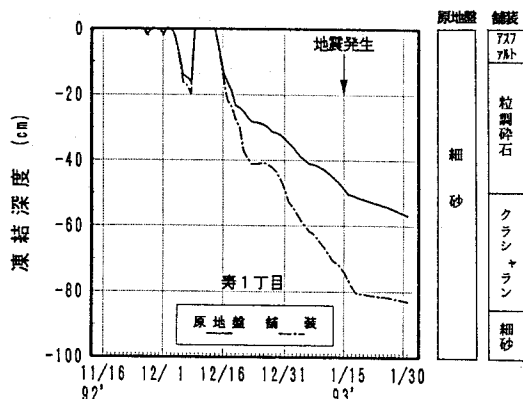


図2 舗装による予想凍結深度の影響(地点No.2)

北海道教育大釧路分校では1月15日に凍結深度は44cmであった。それらの地点における凍結深度の経時変化をシミュレートし図1に示す。計算結果は実測結果にかなり近いことを示している。

(3) 舗装面の影響 地震直後には道路などの地盤変状が少なかったことが報道されているが、それは舗装構造により凍結深度が深いことが原因したであろうと推測される。舗装構造として、85cmのアスファルト舗装を想定して凍結深度を計算した。その結果を舗装のない場合と比較して表1および図2に示す。舗装のある場合の凍結深度は74cmとなり、凍結深度が20~30cm深くなっていたことが予想される。

(4) 斜面の影響 緑ヶ岡をはじめとした地盤変状は南斜面に多く見られ、凍結深度が浅かったことが災害の発生に影響したと予想される。斜面の影響を推定するため、斜面角度によって日射量を割り増し、南斜面の場合の凍結深度を計算した。斜面角度を15度と想定すると、1月15日の凍結深度は22cmとなる。斜面向きにより条件が異なるとしても、平坦地形と比べ凍結深度が約2割程度浅くなることが導かれる。

3. リモートセンシング画像による液状化危険度の分布

リモートセンシングの赤外線波長のデータから、土壌の含水状態や地表面温度を把握し得るといわれている。ランドサット衛星のTMセンサによる赤外波長の画像(主にバンド7)から液状化地域をかなり抽出できるとされている^{5), 6), 7)}。ここでは、釧路市周辺で地震発生に近い冬季(地盤凍結状態)の画像データを分析して、画像の特徴を分析する。また、地盤凍結のない季節の画像を分析して、液状化発生地域を予想する。

(1) 冬季の画像 ランドサット5号による地震前後の画像として、1993年1月6日と1月22日の画像が得られている。1月22日の画像で釧路市周辺は全面的に雪に覆われてたため、地盤の情報を抽出する目的には適切でない。1月6日の画像は市街地にほとんど積雪がないので、この画像から地盤情報を読み取ることが可能となる。1月6日のTMバンド7の画像によりレベルの高い場所が液状化の可能性の高いところに対応すると予想し、その画像を持って釧路市周辺を現地踏査した。画像と地盤災害との関係を類推したところ、バンド7の画像には次の特徴があった。

- ①冬季の画像は他の時期に比べレベル値が低く、地表面の温度状態(凍結)を反映しているとみられる。
- ②画像には相対的にレベル値が高い地域があり、日射量の強い斜面に対応するものとみられる。
- ③構造物や舗装等による地盤の被覆程度が高い場所は、地表面の分析対象から外すことになる。
- ④経済活動や人工物による画像の特異点があり、製紙工場操業や廃棄物処分場が対応している。

(2) 地盤凍結の影響 前項で述べたように、冬季のバンド7画像には地盤の凍結による影響が強く現れている。液状化に係わる土壌含水量などの情報を取り出す目的には、温度情報を取り除くことが必要となる。一方、ランドサットのTMセンサには熱バンド(バンド6)があり、主に地表面の温度情報を把握することができる。そこで、熱バンドが低くてバンド7が高い地域を抽出したのが図3である。図3に示す地域は、熱

以外の原因によりバンド7のレベルが高い地域であり、液状化危険度の高いところを示すと推定した。抽出された地域には、地盤災害のあった釧路西港、東港、木場町などの地域が対応する。ただし、冬季の画像から、日当たりの良い傾斜地に液状化危険度の高い場所があっても、抽出することは難しい。

(3) 秋季の画像 積雪および地盤凍結のない時期のリモートセンシング画像を同じように分析する。1990年10月29日に撮影された画像を用いて、バンド7のレベル値の高い地域を抽出し、バンド6(熱バンド)の高い地域を差し引いたものが図4である。ただし、港湾地域で図3の画像と類似するようにしきい値を設定してある。秋期の画像では斜面によるレベル値の高まりはほとんど現れない。図4で抽出されたところの多くは郊外の湿原地域にあたる。市街地では冬季の画像とほぼ同様に分布し、市街地周辺では昭和、北園や、旧釧路川流域の貝塚四などの地域が抽出される。これらの地域は、凍結のない時期に地震に襲われたなら、液状化の可能性が高い地域であろうと推定される。1989年5月19日の画像も参照したが、その抽出地域の分布は図4と似ている。

これと同じ手法を能代市周辺の画像⁷⁾に適用し、日本海中部地震による液状化調査結果と比較したところ、両者に良好な対応がみられた。ただし、地点を厳密に特定する目的でなく、危険地域が落ちていなければ良しという大まかな利用に限られる。

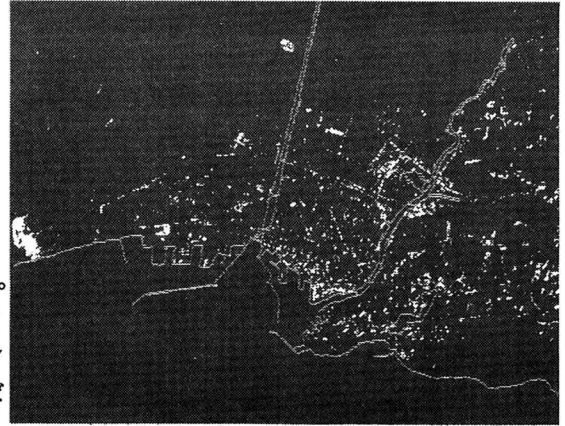


図3 冬の画像を用いた釧路市周辺の液状化分析図
【二値化レベル値：バンド7>19 and バンド6<57】



図4 秋の画像を用いた釧路市周辺の液状化分析図
【二値化レベル値：バンド7>30 and バンド6<115】

4. 土質試料による液状化判定とリモートセンシング画像との対応

今回の釧路沖地震で液状化した地点やリモートセンシング画像から液状化の危険性が高いと予想した地点から土質試料を採取し、粒径分布を調べた。

(1) 土質試料の分析 採取した試料は21サンプルであり、採取位置とその分析結果および地盤変状の有無を表2に示す。試料の判定は、港湾基準⁸⁾より液状化の可能性のある粒径分布の範囲に従い判定した。図5には特に液状化の可能性が高いと判定された5サンプルの粒径分布を示す。噴砂と思われる東港のアスファルト流出周辺と木場で採取した試料は、特に可能性の高い範囲に入っていた。なお、実際に液状化被害のあったフェリー埠頭や漁業市場東側の試料が判定Cとなったのは、礫分の多い埋戻し土を採取したためと思われる。試料判定の結果を地盤変状と対比すると、試料採取の深さと液状化層の

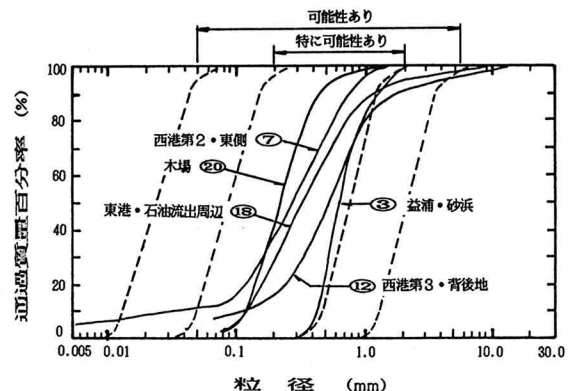


図5 液状化の危険性の高い試料の粒径分布

深さが異なるため、対応の良い場合がみられる。また、緑ヶ岡の地盤変状は試料判定と対応が良いこと、および南東斜面で凍結深度が浅かったことが特徴として記される。

表2 砂の試料採取位置と液状化分析結果

No	地名・場所	採取深度	試料採取状況	① 変状	② 試料判定	③ 駐む 冬秋	④ ②③ 対応
1	益浦海岸・崖上	-10cm	海岸崖上の表土	×	C	××	○
2	益浦海岸・斜面	0	東向斜面の表土	×	C	××	×
3	益浦海岸・砂浜	0	砂浜の乾た部分	×	A	××	×
4	益浦・背面空き地	0	埋立地の表土	×	C	××	○
5	西港第1・漁船埠頭	-50cm	アスファルト下	○	B	××	△
6	西港第1・フェリー	-1m	コンクリート下	○	C	×○	△
7	西港第2・東側	-0cm	中央道路脇表土	○	A	○○	○
8	西港第2・西側	-1m	アスファルト下	○	B	○○	△
9	西港第3・東側	-20cm	コンクリート下	○	B	×-	△
10	西港第3・道路脇	0	舗装背後の表土	×	B	×-	×
11	西港第3・背後地	0	埋立地の表土	×	B	××	×
12	西港第3・背後地	0	埋立地の表土	×	A	××	×
13	釧路川・東側河川敷	-10cm	芝生の下表土	×	C	×○	×
14	木場・歩道橋脇	0	荒地の表土	○	B	○○	○
15	旧釧路川・東側河川敷	0	通路脇の表土	×	B	○○	○
16	緑ヶ岡・斜面崩壊現場	0	崩壊土砂の表面	○	C	××	○
17	春探湖・春探公園斜面	0	斜面の表土	×	B	×○	○
18	東港・777排水流出近く	0	舗装上の噴砂	○	A	××	△
19	東港・漁卸市場東側	-10cm	事務所脇の表土	○	C	××	△
20	木場・ニチイ反対側	0	表土上の噴砂	○	A	○○	○
21	東港・漁業埠頭先端	-10cm	アスファルト下	○	B	××	△

試料判定 A:特に液状化の可能性あり B:液状化の可能性あり C:可能性少ない
対応欄の△:表面が舗装で覆われている場所

5. まとめ

釧路沖地震発生時の釧路市周辺での地盤凍結深度を、熱伝導モデルにより推定した。計算の結果、凍結深度は土質により変化し、砂質地盤で40~50cm、シルト質で25~30cmであったと推定される。舗装道路では凍結が進みやすく、凍結深度70cm前後に達していたであろう。また、南斜面では地盤の凍結深度が多少浅くなる。1993年釧路沖地震では、これら地盤凍結の状態が地盤災害の発生に深く関係したものと判断される。

衛星リモートセンシングの赤外線波長帯データを用い、地表面温度および土壌含水の情報を通じて、釧路沖地震時による液状化危険度の分布を導いた。もし地盤が凍結していなければ、今回程度の地震動により、釧路市周辺の湿原地域や河川流域などで液状化がかなり広範囲に発生したことが秋期の画像より推測される。

これらの分析結果は現地踏査結果と大きく矛盾しないものと判断した。ただし、リモートセンシングデータは、構造物や舗装等により地盤が被覆されている場所、および工場操業や廃棄物処理場などの場所で液状化の分析が困難なため、十分に検討していない。今後の研究課題として残されている。

謝辞 調査に当たり御協力頂いた北海道教育大学・矢作裕教授、釧路ガス(株)小村三樹氏に感謝致します。

- 参考文献**
- 1) 柳沢栄司・菅野高弘・村山良之：1993年1月15日釧路沖地震被害調査報告-2地盤被害、土木学会耐震工学委員会、1993.3.
 - 2) 福田正己・石崎武志：平衡地表面温度による土壌凍結深推定モデル、雪氷、42-2,71-80,1980.
 - 3) (社)北海道建築士会釧路支部：釧路市の地盤、1982.
 - 4) 久保宏：道路における凍上とその対策、土の凍結-その制御と応用-、土質基礎工学ライブラリー-23,土質工学、91-124,1983.
 - 5) 後藤恵之輔・坂元誠・沢園佳稔・陶野郁雄：液状化地盤のランドサットデータ特性、土質工学研究発表会講演集、Vol.21, No.2-1, 831-832, 1986.
 - 6) 栗田哲・岸田英明・北山浩平：液状化した地域におけるランドサットTMデータのバンド特性、土質工学研究発表会講演集、Vol.25, No.1, 119-120, 1990.
 - 7) 戸松征夫・奥石肇・佐藤靖彦・細川勝巳：リモートセンシングデータを利用した液状化危険度予測の基礎的研究、土木学会年次学術講演会、Vol.47, No.1, 80-81, 1992.
 - 8) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、2-169, 1979.