

港湾の被害

菅野・田地・丸本

1．港湾地域強震観測網による強震記録およびその特徴

(1) フーリエスペクトル

各港で得られた記録のフーリエスペクトルを図-1に示す（フーリエスペクトルにはバンド幅0.05HzのParzen windowを作用させてある）。釧路港では周期1-2秒程度の成分が非常に強いことがわかる。釧路港の記録については後に1993年釧路沖地震の記録と詳しく比較する。釧路港以外の観測点については、比較のため、背後に釧路港のフーリエスペクトルを薄く示している。十勝港では周期1-2秒程度の成分が少なく、最大加速度は大きかったが、岸壁にとっては釧路港ほど厳しい揺れでなかったことが伺える。この原因については、地下構造の影響などが考えられる。浦河港の周期1-2秒の成分は十勝港よりは強い。石油貯蔵施設が被害を受けた苫小牧港では周期5秒以上の長周期成分が強かったことがわかる。函館港では周期4秒程度の成分が強かった。

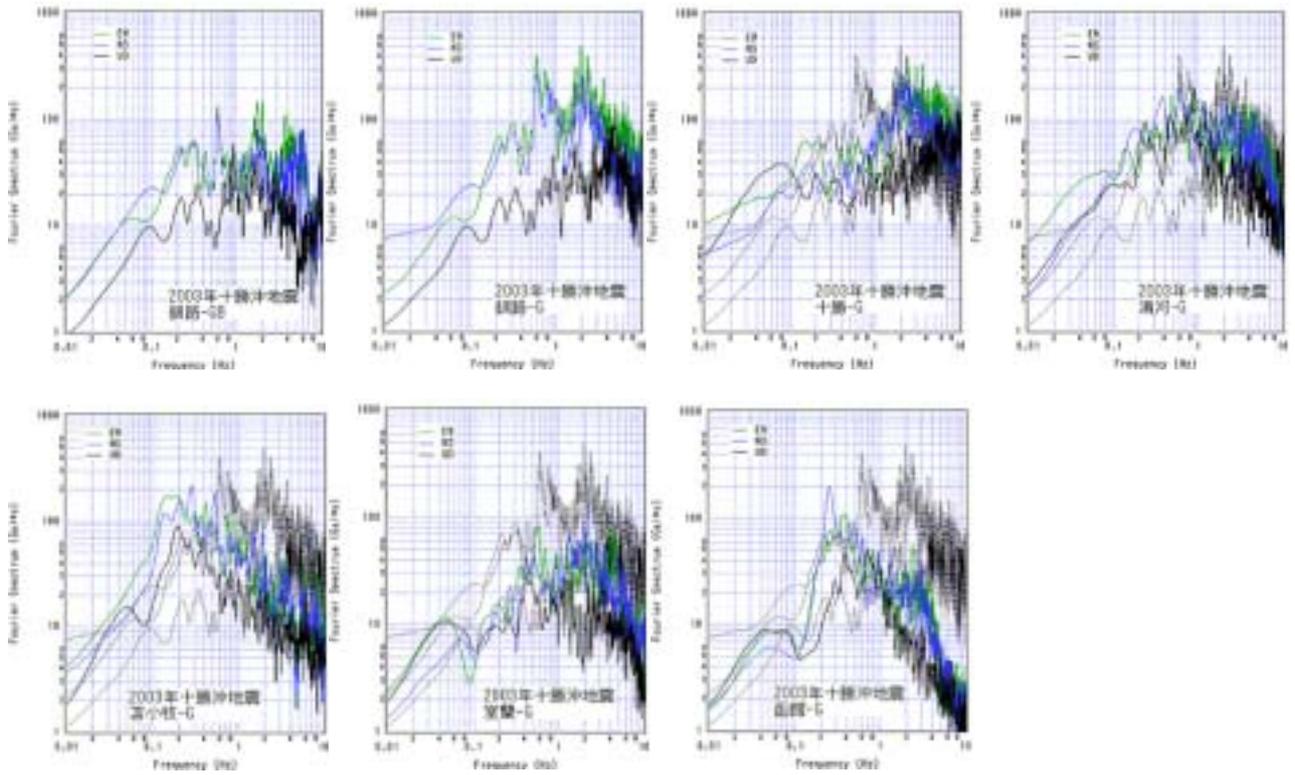


図-1 各港湾のフーリエスペクトル

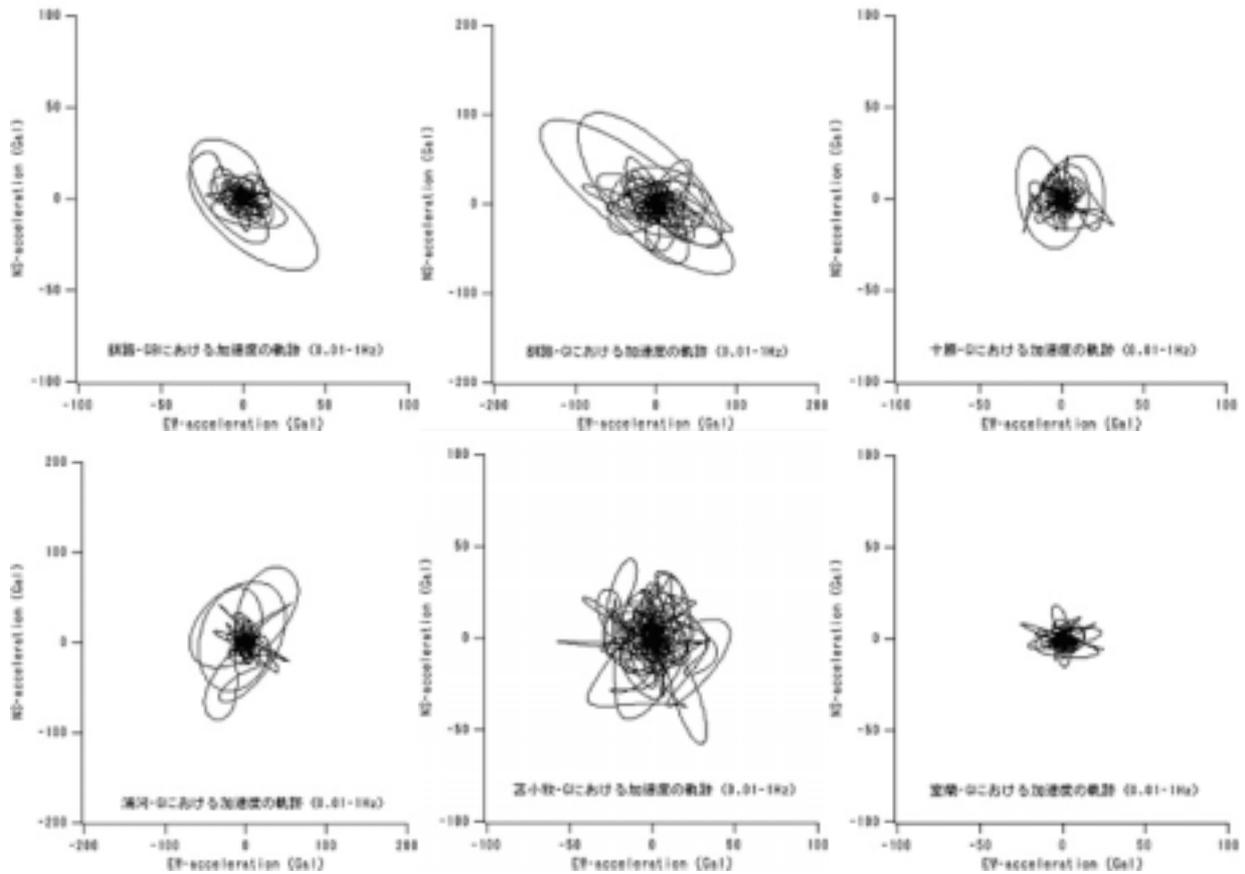


図-2 各港湾の加速度の軌跡(0.01-1Hz)

(2) 軌跡

各港で得られた記録の水平面内の加速度の軌跡を図-2に示す．これは高周波まで含めて示すと不明瞭となるので，岸壁被害に特に結びつきやすいと考えられる1Hz以下の帯域を選択して，その軌跡を示す．今回の地震の場合，震源近傍でないこともあってか，港湾における地震動の方向性はさほど明瞭でない．

(3) 1993年釧路沖地震との比較

釧路港では1993年釧路沖地震と今回の地震とともに振幅の大きな記録が得られているので，それらの比較を行う．

a) 最大加速度の比較

下記の通り，1993年釧路沖地震と比較すると，地表の東西成分は今回の方が大きかったが，それ以外の成分は1993年釧路沖地震の方が大きかった．

表-1 2003年十勝沖地震と1993年釧路沖地震の釧路港における最大加速度の比較

補正最大加速度 (Gal)		東西	南北	上下
2003年十勝沖地震	地表	576	347	149
	地中	202	154	66
1993年釧路沖地震	地表	343	450	362
	地中	268	203	121

SMAC-B2相当最大加速度 (Gal)		東西	南北	上下
2003年十勝沖地震	地表	467	286	87
	地中	154	120	38
1993年釧路沖地震	地表	245	309	91
	地中	186	155	50

b) スペクトル特性の比較

最大加速度の大きな地震動が岸壁被害に結びつくとは限らない．そこで，ここではフーリエスペクトルを計算し，1993年釧路沖地震の記録と比較してみた．その結果が図-3である（卓越成分を表示）．どちらの記録も周期1-2sのところに顕著なピークがある．つまり地震の震源の性質は異なる（プレートそのものが割れた地震とプレート境界地震）が釧路港でのスペクトルの形状は似ていたということになる．さて，周期1-2sのスペクトルのピークに着目すると，今回の記録の方が前回よりもピークが低かったと言える．つまり，最大加速度で見ると今回の記録の方が大きかったが，岸壁被害に結びつく帯域での地震動の強さは今回の方が少し小さかったのではないかと考えられる．

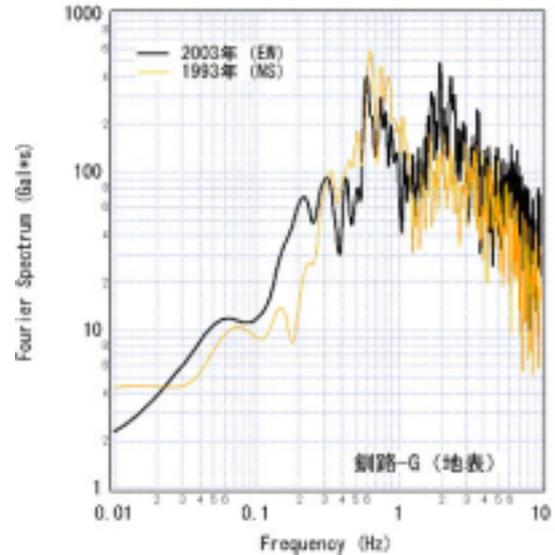


図-3 2003年十勝沖地震と1993年釧路沖地震の釧路港におけるスペクトル

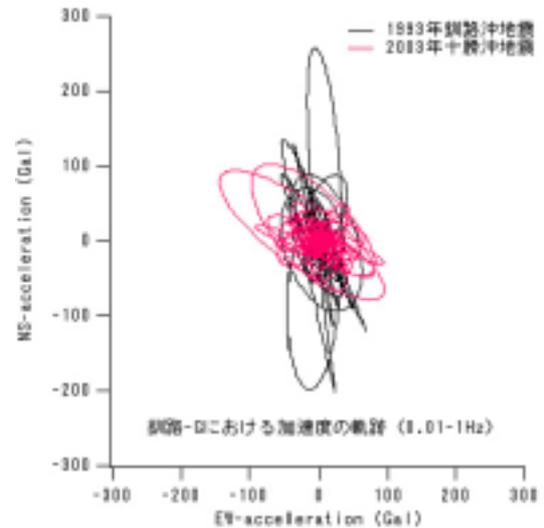


図-4 加速度の軌跡(0.01-1Hz)

c) 加速度の軌跡の比較

次に加速度の軌跡を示す．これは高周波まで含めて示すと不明瞭となるので，岸壁被害に特に結びつきやすいと考えられる1Hz以下の帯域を選択して，その軌跡を示すと，図-4のようになる．1993年釧路沖地震の記録は南北方向に顕著な方向性が見られたが，今回は北西-南東方向にやや弱い方向性が見られる．この図から，南に面した岸壁は前回よりも弱い地震力を受けたが，東や西に面した岸壁は前回と同程度かやや強い地震力を受けたと考えられる．

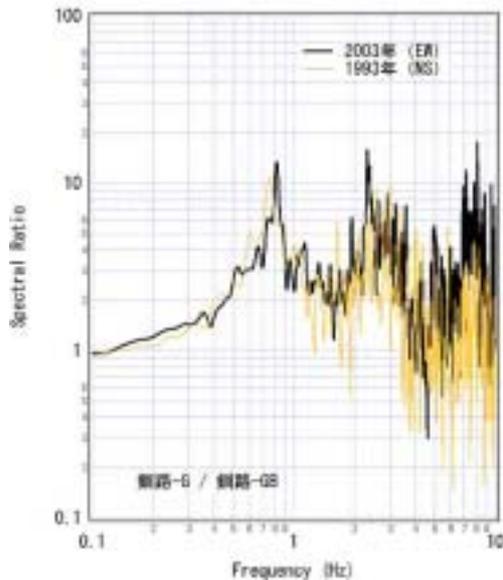


図-5 釧路港の地表と地中のスペクトル比

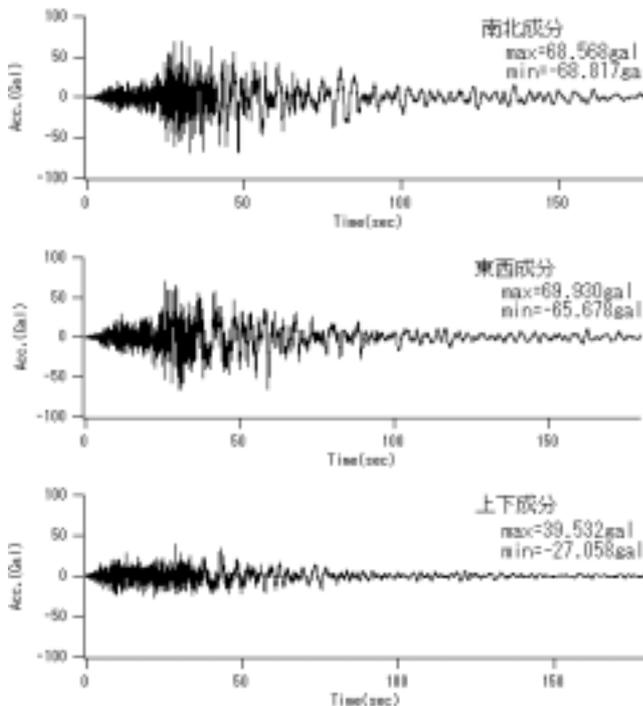


図-6 苫小牧港（地表）強震記録

d) 表層地盤の非線形挙動の比較

釧路港における地表の記録と地中の記録のスペクトル比をとることで、地盤の非線形挙動を調べてみた。その結果が図-5である（卓越成分を表示）。いずれの地震でも、スペクトル比のピークは線形時（約1Hz）より長周期側に移動しており、地盤は非線形挙動を示したと見ることができるが、詳しく見ると、今回の記録の方がピーク位置がやや高いことから、地盤の非線形挙動は、この観測点では、1993年ほど強くなかったと言える。

表-2 仮想タンクの解析条件および結果

半径 (m)	21.35	
重力加速度 (m/s^2)	9.8	
液面高さ (m)	18.15	
E08N(東西)		
側壁波高 m	時刻 s	
最高	3.02	47.87
最低	-3.13	58.64
N08W(南北)		
側壁波高 m	時刻 s	
最高	2.25	80.2
最低	-2.35	83.27
1次固有周期 $T_c(s)$		7.14
次数	周波数 Hz	周期 s
1	0.14	7.14
2	0.25	4.02
3	0.32	3.17
4	0.37	2.71
5	0.42	2.41
6	0.46	2.18
7	0.50	2.02
8	0.53	1.88
9	0.57	1.77
10	0.60	1.68

2. 苫小牧港の長周期地震動とスロッシングの関係

(1) 貯油タンクの地震時挙動の推定

港湾地域強震観測網によって得られた苫小牧港（地表）の強震記録（図-6）は、やや長周期成分が卓越するものであった。過去の地震において液体を貯蔵するタンク（石油、糖蜜等）の被災が発生しており、被災原因として長周期の地震動とスロッシング現象²⁾が挙げられている。

記録された長周期成分とスロッシング現象の関係を、神谷ら³⁾の用いた軸対称線形ポテンシャル理論により地震時応答を求めてみた。記録された地震波の速度応答スペクトル ($h=0.5\%$) を図-7a に示す。図-7a において東西方向の応答スペクトルが 5 秒から 8 秒の範囲で卓越していることがわかる。参考のために 2001 年芸予地震の際に広島港で記録された速度応答スペクトルも示しているが、これは 1~2 秒の範囲が卓越している。苫小牧港では地下の地盤構造の影響で長周期成分が卓越するものと考えられる。

本解析においては、被災したタンクの詳細なデータが手元に無いことから、報道情報を元に直径 43m 程度のタンクに 18m 程度の深さの油が貯留されていた場合を想定した。1 次固有周期は 7 秒程度、2 次

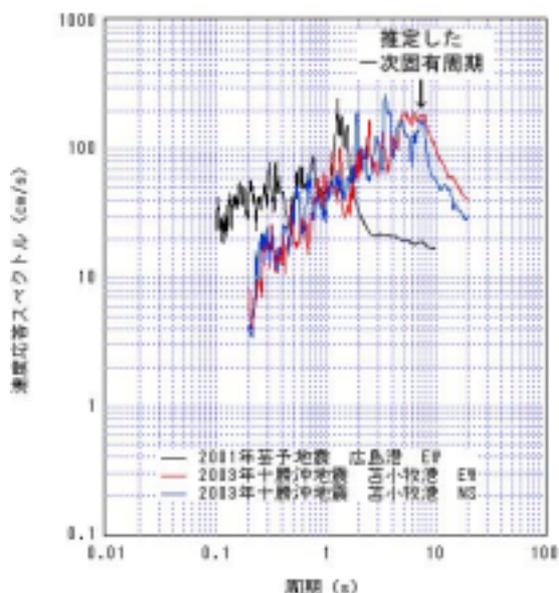


図-7a 苫小牧港速度応答スペクトル(h=0.5%)

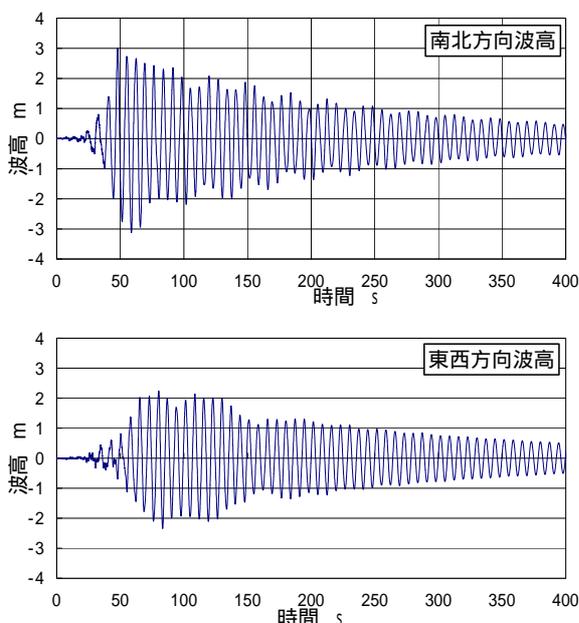


図-7b 仮想タンクのスロッシング波高時刻歴

が 4 秒程度，3 次が 3 秒程度となっており，図-7a と比較すると 1 次の固有周期が地震波の卓越周期と一致することがわかる．表-2 には最大波高も示しており，図-7b に示すように東西方向で 3m 程度（地震到達から 50～60 秒）となっている．南北方向の最大波高は 2m 強（80 秒付近）となる．地震動の卓越周期とスロッシングの固有周期が近かったことに加え，継続時間が 2 分以上と長かったために，スロッシングにより 3m 程度の波高となった可能性がある．

長周期の固有周期を有する構造物については，構造物基礎部分の地盤条件（表層から数 10 メートル程度）に加えて，深い地盤構造に起因する地震動の長周期成分も考慮に入れた検討が必要と考える．

ただし，本解析は，あくまでも苫小牧港で取得された継続時間が長く，長周期成分の卓越した記録を基に，仮想的なタンクの条件で解析をしてみたものであり，実際に被災したタンクの地震時挙動とは異なる可能性がある．詳細な検討が必要である．特に大型タンクの場合には，浮き屋根を剛体としてモデル化出来ない場合も想定され 1 次のスロッシング固有周期に加えて，2 次以上の周期における構造物の挙動にも注目する必要があると思われる．

(2) 苫小牧港における港湾活動への影響

苫小牧港は北海道を代表する流通港湾であり，工業港である．苫小牧港に立地する精油所のタンク火災により，本州とのフェリー航路や国際コンテナ港路が利用している苫小牧港西港地区で地震発生直後に入港禁止措置がとられ，フェリー等の遅延や他港へシフトするなどの影響があった．

9 月 26 日の火災では，RORO 船など最大 27 隻が沖合で待機し，フェリーが最長約 10 時間の入港遅れを生じた．その後，一旦鎮火した後，別のタンクから再出火した 28 日の火災では港長支持による全船退避，港長許可船舶以外入港禁止措置がとられ，30 日に解除された．この間タンカー，一般貨物船，フェリー，RORO 船等最大 47 隻が沖待ちを余儀なくされ，フェリー，RORO 船が苫小牧港東港区および室蘭港にそれぞれ 9 隻，8 隻シフトした．また苫小牧港西港区のフェリーを利用していた貨物トラックの大部分が苫小牧東港区および室蘭港の利用で，また，一部の貨物トラックは函館港および小樽港の利用で補われたと考えられる．

タンク火災の影響による損失額は公式には試算されていないが，相当額に登ると想定される．地震による直接被害以外にも臨港部に立地する石油類や化学物質等のタンクが被災し，タンク火災や流出事故を引き起こした場合，救援活動や災害復旧活動に支障を生じるだけでなく，地域経済への影響も大きい．ため，物流等のネットワークを確保するための広域的な対策計画の策定手法についての調査研究を進めることが必要であると考えられる．

3. 港湾施設の被害状況

(1) 釧路港での被害の概要

今回の地震では、北海道太平洋沿岸の港湾・漁港において被害が見られ、特に、釧路港において港湾施設の大きな被害が見られた。釧路港の被害調査は、地震発生翌日の9月27日に行った。このときにはすでに、測量調査・潜水土による岸壁の水中からの目視調査が開始されており、災害時協力協定に基づいて調査が行われていたようである。釧路港では東港区、西港区ともに液状化発生箇所があり、岸壁法線の孕出しも各所で見られたが、そのなかで被害が顕著で液状化の規模が大きかったのは西港区第四埠頭であった。したがってここでは、第四埠頭の被害を中心にその状況や構造等についてまとめる。

釧路港では、特に西港区を主として、これまでに岸壁背後の液状化対策を行ってきた箇所が多く存在する。これらは1993年釧路沖地震や1994年北海道東方沖地震による被災を契機に行われたものもあり、施工時期や工法は各岸壁によって異なる。しかしながら、液状化対策が行われた箇所では地震後における噴砂痕跡は見られておらず、液状化対策の効果が表れていたと考えられる。一方、一般に液状化対策のための地盤改良があまり行われない岸壁後方の港湾関連用地では、噴砂が見られた箇所が多くあった。古くに建設された埠頭では、既に釧路沖地震と北海道東方沖地震の二つの大きな地震を経験しており、その際にも液状化が発生したことが確認されているが、今回の三度目の地震においても再度液状化したことは非常に興味深い。過去の二回の地震による液状化においても、埋立地盤が十分に密な状態になっていなかったことが伺える結果である。

釧路港西港区の平面図を図-8に示す。西港区第四

埠頭は平成14年に完成した最も新しい埠頭であり、この埠頭だけが1993年釧路沖地震・1994年北海道東方沖地震を経験していない。図中における番号は各被災部の位置を示しており、その詳細は後述する。第四埠頭地域における、埠頭建設以前の海底現地盤についての土質柱状図を図-9に示す。釧路西港第四埠頭付近の現地盤は、表層付近がN値10~20程度の細砂層であり、その下にN値50程度の中砂~粗砂層が分布する。またさらにその下の-20m以深では、N値10~50程度の細砂層やN値5~10程度のシルト層が存在する。

(2) 釧路西港第四埠頭-14m岸壁

釧路西港第四埠頭-14m岸壁(図-8中の)の断面図、被害写真を図-10および写真-1に示す。ケーソン直背後地盤は沈下し、施設全長にわたって段差(最大60cm程度)が発生した。またこのケーソン直背後の段差発生箇所では噴砂が残っていた箇所がいくつかあり、粒径が数センチメートルの石も含まれていたが、これらは水道管敷設時の埋戻砂であることが明らかとなっている。ケーソン背後の埋土はセメント系の固化処理土(母材は砂質系)であり、岸壁法線は最大で20cmほど海側に迫り出したが、法線の大きな乱れは見られなかった。この岸壁は将来クレーンを設置予定でありケーソン上にレール基礎が敷設されているが、クレーン設置予定のない箇所では高さ数十センチメートルの空洞がエプロン下部に発生していた。ケーソン背後地盤のアスファルト舗装ではクラックが生じ、岸壁法線から約40mの範囲にまで及んでいた。大きなクラックからはアスファルト舗装・路盤・路床・処理土が色の違いが明瞭に見て取られ、触診により強度差が明らかに区別できた。

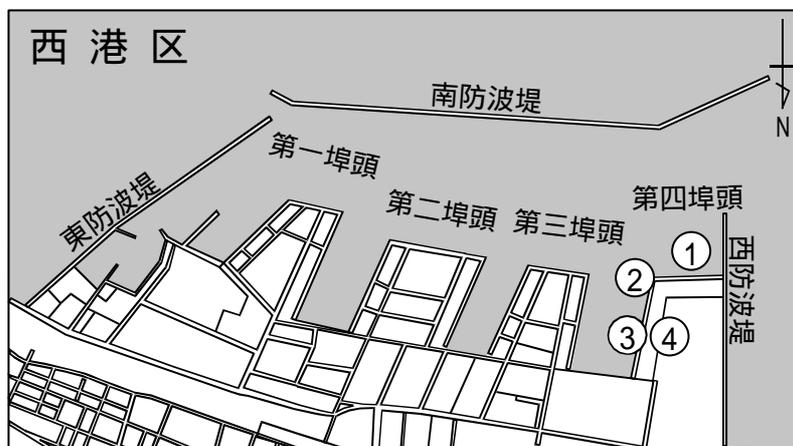


図-8 釧路港西港区平面図

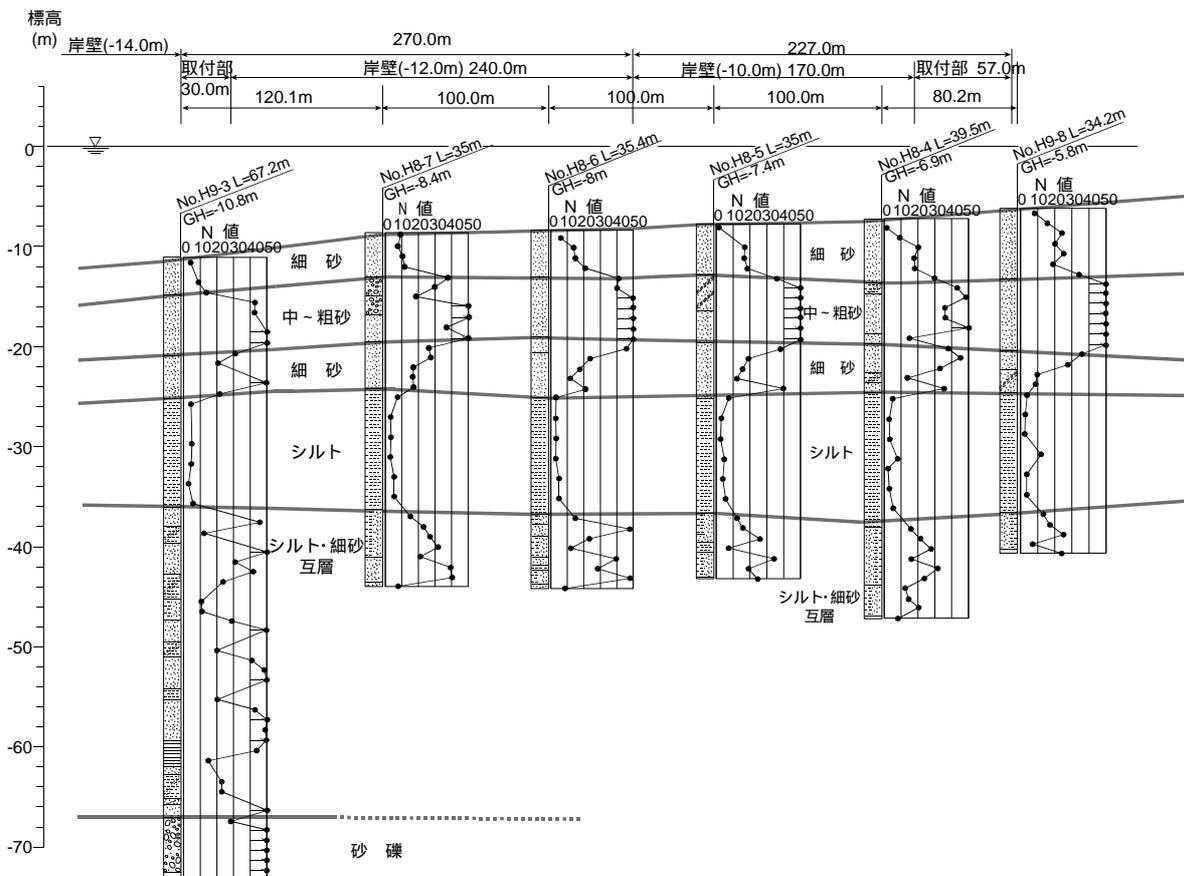
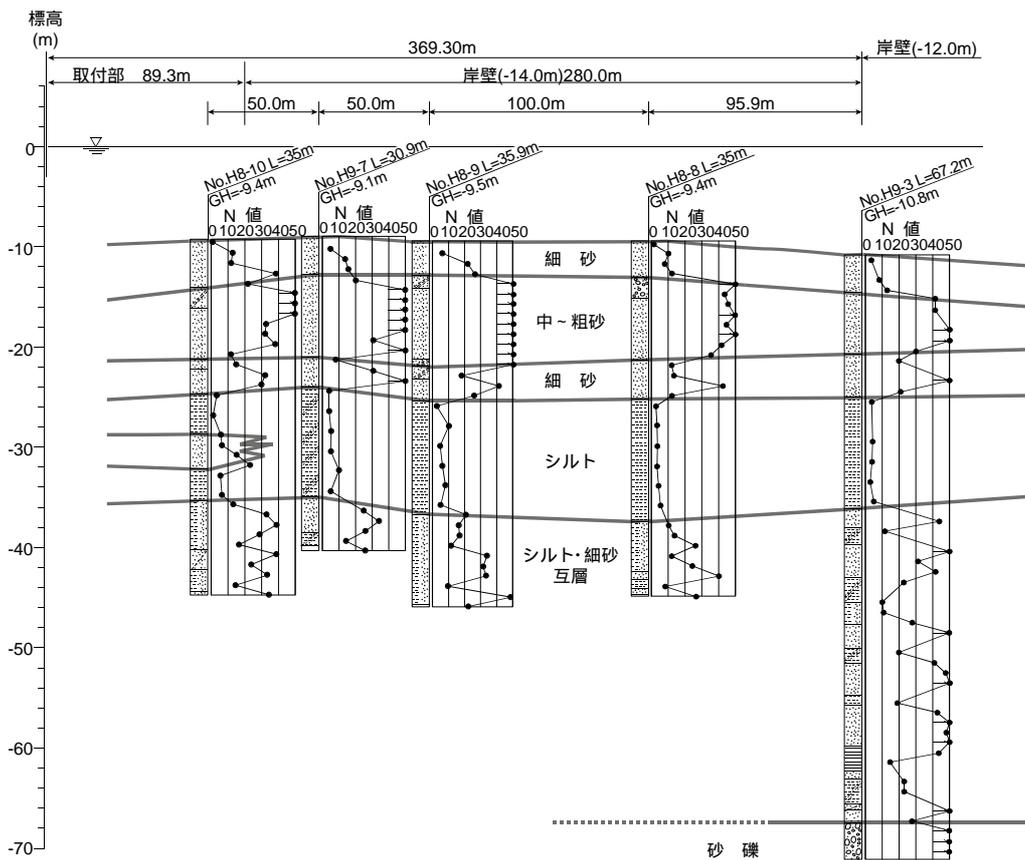


図-9 釧路港西港区土質柱状図

岸壁 (-14.0m) 標準部 標準断面図

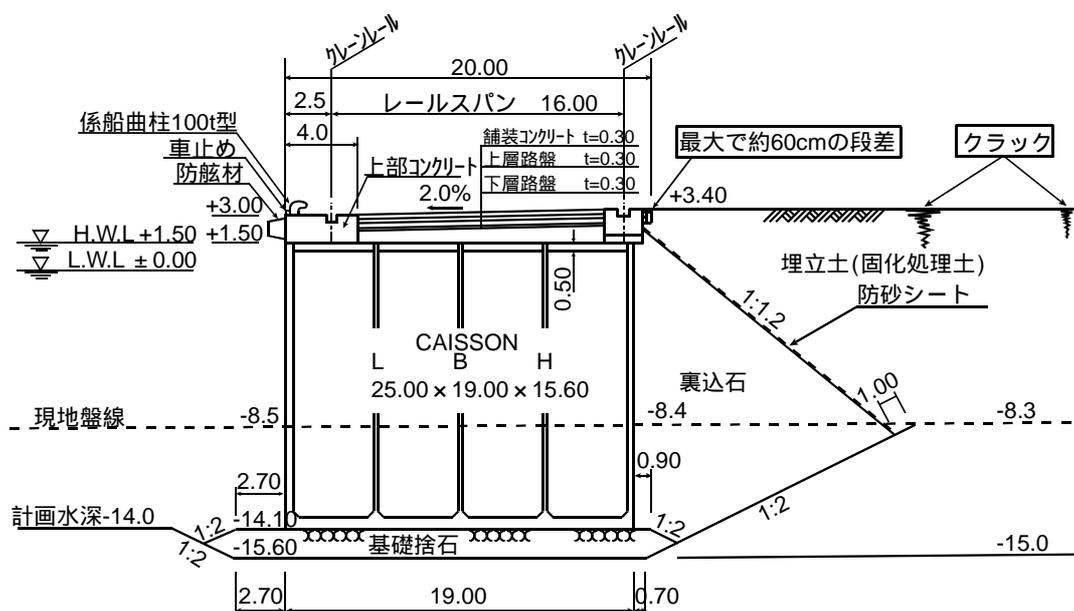


図-10 釧路西港第四埠頭-14m 岸壁断面図



写真-1 釧路西港第四埠頭-14m 被害状況

岸壁 (-12.0m) 標準部 標準断面図

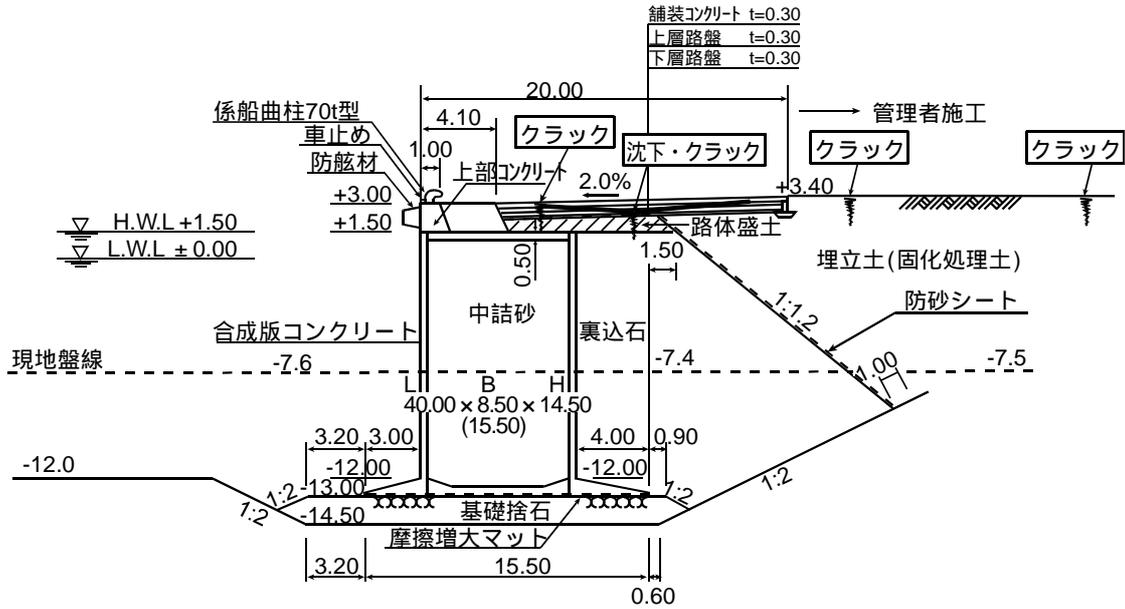


図-11 釧路西港第四埠頭-12m 岸壁断面図



写真-2 釧路西港第四埠頭-14m 岸壁被害状況

(3) 釧路西港第四埠頭-12m岸壁

釧路西港第四埠頭-12m岸壁(図-8中の)の断面図,被害状況を図-11および写真-2に示す.この岸壁は重力式であるが,壁体にはハイブリッドケーソンが用いられていた.壁体肩部に法線と平行にクラック(幅数センチ程度)が見られ,陸側フーチング付近の地表部にもクラック(数センチ)が見られた.また,岸壁法線から50mほど離れたところにまでクラックは及んでいた.この岸壁の埋土もセメント系の固化処理土(母材は砂質土,細粒分が多いものもあった)であり,法線は最大で10cmほど迫り出したが,法線の大きな乱れは見られなかった.背後のコンテナヤードではコンクリート舗装版と路盤の間に空洞が確認された箇所があった.しかし,ヤードのほとんどは健全であり,確認された空洞部をモルタ

ル等で埋めた後に,地震発生の翌々日には船が着岸してコンテナ荷役が行われていた.

(4) 釧路西港第四埠頭-10m岸壁

釧路西港第四埠頭-10m岸壁(図-8中の)の断面図,被害状況を図-12および写真-3に示す.第四埠頭では,この岸壁の被害が最も大きかった.岸壁法線の極端に大きな乱れは観察されなかったが,壁体は最大で40cm程度海側に迫り出していた.ケーソン背後のエプロン部は折損して沈下,陥没(7~80cm程度)し,コンクリート舗装のひび割れ幅は最大で30cm程度であった.この岸壁での埋土もセメント系の固化処理土である.岸壁付近に噴砂は見られず,液状化は発生していないと考えられる.

岸壁 (-10.0m) 標準部 標準断面図

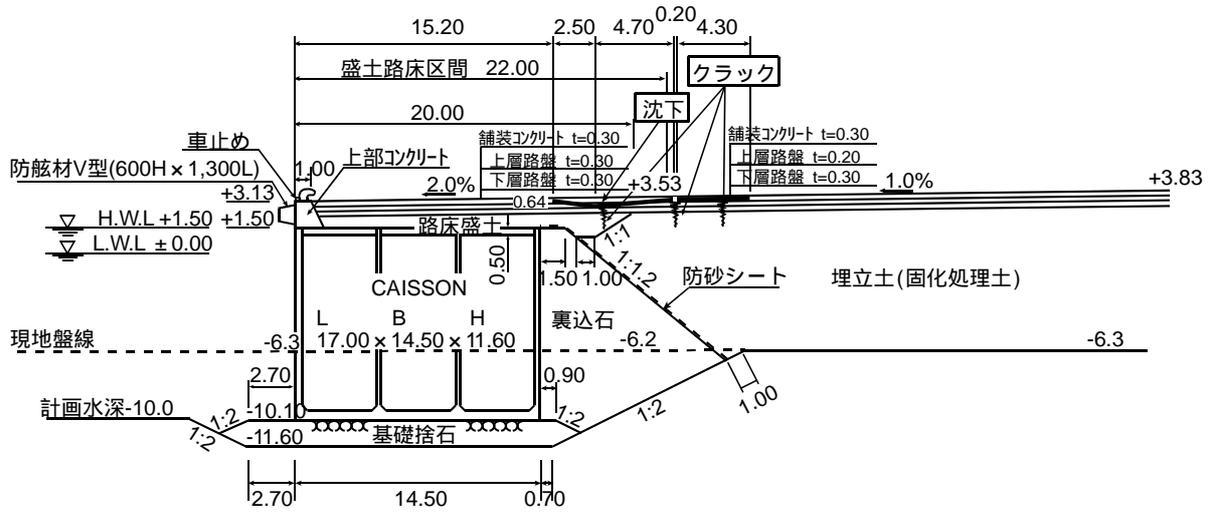


図-12 釧路西港第四埠頭-10m 岸壁



写真-3 釧路西港第四埠頭-10m 岸壁被害状況



写真-4 釧路西港第四埠頭 港湾埠頭用地（道路）における液状化の様子

(5) 釧路西港第四埠頭 港湾用地

第四埠頭では、写真-4に示されるように、埠頭中央部の港湾関連用地や道路（図-8中の ）のいたる所で大規模な噴砂痕跡が生じた。道路は鉛直・水平に波打った状態で残っており、液状化の程度が激しかったことがうかがえた。歩道部のマンホールのいくつかは数十センチ隆起しており、これに繋がる管路は多くの箇所では圧壊、断絶しており、砂が充満していたようである。

謝辞

本報告の執筆に当たっては、(独)北海道開発土木研究所 環境水工部 港湾研究室 窪内篤室長・山本泰司副室長、国土技術政策総合研究所 沿岸海洋研究部沿岸防災研究室 小田勝也室長、国土技術政

策総合研究所 沿岸海洋研究部 小澤敬二主任研究官、(独)港湾空港技術研究所 地盤・構造部 野津厚主任研究官・小濱英司主任研究官にお世話になりました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 菅野ら：平成15年（2003年）十勝沖地震による港湾施設等の被害報告，港空研資料，2004。
- 2) 座間：やや長周期の地震動，地震 第2輯，第46巻，pp.329-342，1993。
- 3) 神谷ら：東京湾岸地域におけるLNG地下式貯槽のスロッシング検討用地震動の評価，土木学会論文集，No.619 / I-47，pp.75-90，1999