特集≫ 防災,安全·安心を確保する社会基盤整備

港湾構造物における巨大地震対策

野津 厚·小濱英司·大矢陽介

地震動の大小はサイト増幅特性の大小に大きく左右される。東北地方太平洋沖地震の場合にもこのことは明確に表れている。港湾に限らず、巨大地震対策においては、地震観測や常時微動観測を十分に活用し、重要施設の立地する場所でのサイト増幅特性を把握した上で、サイト増幅特性の大きい場所に立地する施設に対して特に入念に対策を行うことが必要であろう。一方、東北地方太平洋沖地震では、液状化が生じていないと判断される岩ズリを用いた岸壁において、背後地盤が大きく沈下する現象が見られた。これは、岩ズリの密度が小さい場合、地震動作用中に体積収縮を起こすことが原因であり、再発防止のためには施工中の密度管理も今後の課題である。

キーワード:港湾、地震、サイト特性、岩ズリ、沈下、模型振動実験、有効応力解析、密度管理

1. はじめに

阪神淡路大震災による神戸港の甚大な被害はいまだに記憶に新しいところである。神戸港ではすべてのコンテナバースが利用できなくなり(写真—1),わが国の経済活動にも大きな影響を及ぼすことになってしまった。近い将来の発生が懸念される巨大地震においても、地震後の早い段階から、必要最小限の幹線貨物



写真-1 阪神淡路大震災による神戸港の被害



写直― 2 ・地震直後の神戸港における緊急物資の荷揚げ

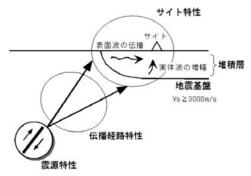
輸送機能の確保を図ることが必要である。一方,地震後の神戸港は、大きな損傷を受けながらも、緊急物資や避難民の輸送に活用されたことも忘れてはならない(写真—2)。道路や鉄道のような線状のインフラは、地震時に1箇所でも寸断されれば、全体の機能に大きく影響する場合があり、地震直後の緊急物資等の輸送においては、港湾のような点的なインフラを活用することが有利となる場合がある。今後の巨大地震においても、必要最小限の緊急物資輸送機能の確保を図ることが必要である。

その実現のためには、サイト特性を考慮して地震動を精度良く見積もる技術、想定される地震動に対する構造物の被災程度を予測し対策の必要性を判断するための技術、構造物の弱点を見いだし効果的に対策を行うための技術、さらには、巨大地震発生時に迅速に施設の供用可否判断を行い、供用可能な施設を早期に供用するための技術、などが求められている。港湾空港技術研究所ではこれらの技術の開発を行っている。

本稿では、これらのうち、東北地方太平洋沖地震の 経験を踏まえ特に研究の進展した二つの項目、すなわ ち、サイト特性を考慮した入力地震動の評価と、岩ズ リを用いた岸壁の地震時挙動に関する研究を紹介す る。

2. サイト特性を考慮した入力地震動の評価

一般に、地震による地盤の揺れ(地震動)は震源断



図─1 震源特性・伝播経路特性・サイト特性

層の破壊過程の影響(震源特性)と震源から地震基盤に至る伝播経路の影響(伝播経路特性)、それに地震基盤から地表に至る堆積層の影響(サイト特性)の三者によって決まる(図一1)。ここに地震基盤とはS波速度が3000 m/s を超えるような非常に堅い岩盤のことである。地震基盤上面から地表にかけてはS波速度コントラストが大きく、それにより地震波は大きく増幅される。

地点毎のサイト増幅特性の大小は地震動の大小を大きく左右する。東北地方太平洋沖地震の場合にもこのことは明確に表れている。図―2は東北地方太平洋沖地震における沿岸での PSI 値¹゚の分布を示したものである。PSI 値とは地震動の速度波形の自乗積分値の平方根をとったもので、港湾構造物の被害程度と良い対応を示すとされている。図―2右の実線は各地点における観測記録の PSI 値を示す。釜石・G から仙台・G までは PSI 値はあまり大きくない。しかし、その南において PSI 値は急増し、MYG015 において 1 m/s^{0.5} を超える。その後、PSI 値は徐々に減少し IBR007 に至る。図―2右の点線は、港湾空港技術研究所で開発された震源モデルである SPGA モデル²⁾を用い(この震源モデルのサブイベントは図―2左に示されている)、各地点での経験的なサイト増幅特

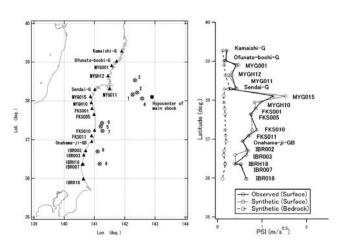


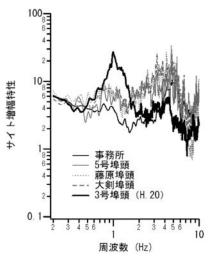
図-2 東北地方太平洋沖地震における沿岸での PSI 値の分布

性³⁾ を考慮して地震動を計算した結果である。計算結果の PSI 値は観測結果と非常によく整合している。次に,同じ震源モデルを用いて,地震基盤上面での PSI 値を計算した結果を図—2 右に破線で示す。地震基盤上面での PSI 値の分布は,地表での PSI 値の分布とは全く異なっており,北から南までの変化が少ない。よって,地表における PSI 値の分布は主にサイト特性によって支配されていると言える。来るべき巨大地震に対しても,個別の地点におけるサイト特性を考慮して地震動を精度良く見積もらなければ,被害想定はミスリーディングなものとなってしまうであろう。

注意すべきなのは、このようなサイト特性の変化がより狭い範囲でも生じているということである。福島県の小名浜港では、震災後に実施された余震観測等のデータをもとに、各埠頭(図一3)における経験的なサイト増幅特性が図—4のように求められている。港湾構造物の不安定化に影響の大きい0.3-1 Hz 程度の周波数帯域では、3号埠頭のサイト増幅特性が群を抜いて大きいことがわかる。このようなサイト増幅特性の違いは被害程度にも明確に表れている。3号埠頭



図-3 小名浜港平面図と余震観測位置



図―4 小名浜港の各埠頭におけるサイト増幅特性



写真一3 小名浜港3号埠頭3-2岸壁における被災状況



写真—4 小名浜港大剣埠頭岸壁(- 7.5 m)被災状況

では岸壁背後に1 m 以上の段差が生じる深刻な被害が生じた(写真-3)のに対し、他の埠頭の被害は相対的には軽微であった(写真-4)。

このように、東北地方太平洋沖地震においては、同一港湾内においても地震動が場所毎に大きく異なる場合があり、そのことが港湾施設の被害程度に大きく影響している実態が明らかになってきたと言える。よって、今後の地震対策においては、港湾内におけるサイト増幅特性の分布を詳細に調べ、サイト増幅特性の大きい場所に立地する施設に対して特に入念に対策を行うことが必要であり、そのための地震観測や常時微動観測が各地の港湾で精力的に実施されている。

3. 岩ズリを用いた岸壁の挙動

東北地方太平洋沖地震では、液状化の発生によると 思われる岸壁の地震被害が多く見られたが、液状化が 生じていないと判断される岩ズリを用いた岸壁におい ても、背後地盤が沈下する変状が見られた。これまで、 岩ズリの地震時における過剰間隙水圧発生の有無に着 目した研究が行われてきているが、地震時における体 積変化は検討されていない。ここでは岩ズリを用いた 岸壁の地震時挙動とその評価に関する検討⁴⁾ につい て報告する。

(1) 岩ズリを用いた岸壁の被害の模型振動実験

岩ズリとは石材生成時に発生するズリ(副産物)である。岩ズリとして決められた規格は特に無いことから、母岩、粒度組成、粒子形状などにおいて様々な種類のものが存在するが、一般的には、礫以上の粗い粒径を有する。透水性の良いものが多く、地震時において過剰間隙水圧の蓄積があまりないことから、液状化対策の埋立材として埋立地造成に利用されることがある。

東北地方太平洋沖地震においては、埋立材に岩ズリ を用いていたケーソン式岸壁において、液状化現象に よる噴砂は確認されていないものの、ケーソンの海側 への迫出しと背後地盤の1m以上の沈下が見られた (**写真**-5)⁵⁾。そこで、このような被災の要因解明の ため、ケーソン式岸壁の1/20模型を作製して、振動 実験によりその地震時挙動を検討した(図-5)。実 験においては、被災した岸壁に用いられているものを 産出した同じ採石場の岩ズリを用いた(写真一6,図 -6)。粒径加積曲線に見られるように、礫分以上が 粒径のほとんどを占めており、透水性は良い。実験に おいては、岩ズリの密度が小さい場合(相対密度 42%) と大きい場合(相対密度93%) について検討 した。入力波には、当該岸壁の位置する港湾における 東北地方太平洋沖地震の事後推定波を工学基盤におけ る E+F 波に変換したもの (図-7) を用い、相似則 を考慮して時間縮尺200.75を考慮したものを用いた。

加振実験の結果、ケーソン残留水平変位は岩ズリが



写真-5 岩ズリを用いた岸壁における背後地盤の沈下

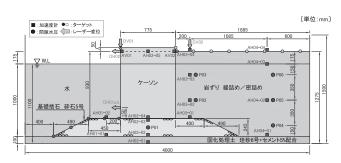
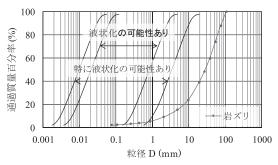


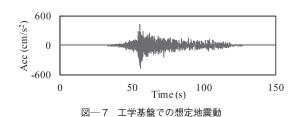
図-5 実験模型

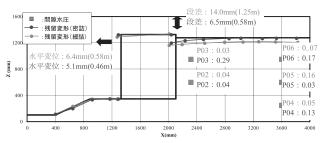


写真一6 実験に用いた岩ズリ



図―6 岩ズリの粒径加積曲線





図一8 残留変形図(上段:緩詰め地盤、下段:密詰め地盤) 水平変位および段差の括弧内数値は相似率を適用して 実物スケールに換算したもの 四角(■) は間隙水圧計位置を示し、付記した数値は

最大過剰間隙水圧比

緩い場合と密な場合で大きな差は見られなかった(図 -8)。どちらの場合も原位置で見られた変位量によく整合しており、ケーソン水平変位への岩ズリ密度の影響は大きくないことが確認された。一方、背後地盤の沈下量には差が見られ、岩ズリが緩い場合において原位置での沈下量に近い1mを超える値となり、岩

ズリ密度の影響が見られた。密な場合における沈下は ケーソンの側方移動によるものと考えられるため、緩い場合との差は、緩い岩ズリが振動中に体積収縮した ことによるものと考えられる。また、どちらの場合に おいても過剰間隙水圧比はわずかであり、液状化は生 じていないことが確認できる。

(2) 有効応力解析による再現解析

模型振動実験の緩い岩ズリのケースにおいて現場での変形を再現できたことから、この結果について数値解析で表現することを試みた。解析にはFLIP (ver.7.2.2)を用い、岩ズリ材のモデル化には繰返しせん断時の体積変化を考慮できるカクテルグラスモデル のを用いた。この解析パラメータの決定においては、別途実施したせん断土槽による同密度の岩ズリの地震時体積変化についての振動台実験結果を用いた。動的変形特性については、実験における岩ズリ密度や測定されたせん断波速度等をもとに求め、透水係数は20%粒径を参考として算出した(表一1)。繰返しせん断時の体積変化に関するパラメータについては、せん断土槽実験模型を一次元モデルでモデル化し、過剰間隙水圧や加速度、表面沈下等の実験結果と整合するように値を設定した(表一2)。

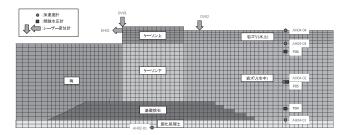
これらのパラメータを用いて前述の岸壁模型振動実験の再現解析を行った(図一9)。岸壁変形において、ケーソン水平変位だけでなく、ケーソン背後の岩ズリの沈下についても、その増加傾向はよく一致しており、過剰間隙水圧の発生が無いことも表現できている(図一10)。残留変形においても、ケーソン変位だけ

表―1 岩ズリの動的変形特性に関する解析パラメータ

パラメー	岩ズリ		
密度	ρ (t/m ³)	1.74	
基準拘束圧	$\sigma_{\rm ma}$ (kN/m ²)	3.53	
初期せん断剛性	$G_{ma} (kN/m^2)$	2980	
体積弾性係数	$K_{U/Lma}$ (kN/m ²)	7772	
ポアソン比	ν	0.33	
間隙率	n	0.375	
せん断抵抗角	ϕ_f (°)	39	
相対密度	Dr (%)	41.8	
透水係数	k (m/s)	1.75×10^{-1}	
最大減衰定数	h _{max}	0.24	
体積弾性係数 (間隙水)	$K_f (kN/m^2)$	2200000	

表一2 岩ズリの繰返しせん断時の体積変化の解析パラメータ

パラメータ	$ \epsilon$ d cm	q1	q2	γ ,"	$l_{ m k}$	γ _k	<i>c</i> 1	γ εα	γ _{εd} ^c
設定値	0.13	1.00	0.00	0.00	2.00	0.50	1.00	0.08	0.50



図一9 解析モデル

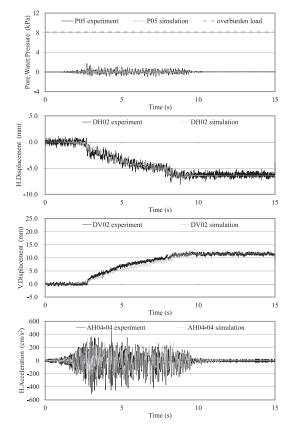


図-10 岸壁模型振動実験の解析結果

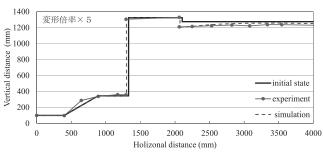


図-11 残留変形図(実験・解析比較)

でなく、岩ズリの沈下分布を表現することができた(図 — 11)。よって、せん断土槽実験結果をもとにしたパラメータ設定により、岩ズリを用いた岸壁の地震時挙動を精度良く評価できることが明らかとなった。

岩ズリは、その種類によって様々なものがあり、地 震による動的挙動も多様である。振動による過剰間隙 水圧の蓄積は見られないが、その地震時の特性が地震 時の岸壁変形に与える影響は大きい。本検討で示した ように、岩ズリの体積収縮を数値解析によって精度良く評価するには、その繰返しせん断時の体積変化特性を正確に確認することが必要である。よって、特に、設計実務において岩ズリを用いた岸壁の地震後の背後地盤沈下等を考慮する場合には、せん断土槽振動実験や大型の室内繰返しせん断試験⁷⁾ などにより岩ズリの地震時特性を確認することが重要となる。

また、背後地盤の過大な沈下を防止するためには、こうした設計上の工夫以外にも、施工時において密度管理を適切に行うことが必要と考えられる。粒径の大きい岩ズリの締固めは容易ではなく、背後に控え組杭やクレーンレール基礎等の構造が存在する岸壁において密度増加を図ることが難しい場合も多く、今後の検討課題である。

J C M A

《参考文献》

- 1) 野津・井合:岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察, 第28回関東支部技術研究発表会講演概要集,土木学会関東支部, pp.18-19, 2001.
- 2) 野津:東北地方太平洋沖地震を対象とするスーパーアスペリティモデルの提案、日本地震工学会論文集、Vol.12、pp.21-40、2012.
- 3) 野津・長尾:スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震 観測地点におけるサイト増幅特性,港湾空港技術研究所資料 No.1112,2005.
- 4) 瀬戸口ら:岩ズリを用いた重力式岸壁の地震時挙動に関する模型振動 実験と数値解析、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.4, pp.I_830-I_838, 2014.
- 5) Takahashi, H. et al: Earthquake Damage Investigation of Gravity-Type Quay Walls in Ibaraki Port, Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, pp.687-696, 2012.
- 6) 井合ら:砂の繰り返し載荷時の挙動モデルとしてのひずみ空間多重モデルにおけるストレスダイレイタンシー関係、京都大学防災研究所年報、第51号B、pp.291-302、2008.
- 7) 後藤ら:岩ずりの繰返しせん断による体積収縮特性と密度特性,港湾空港技術研究所資料, No.1278, pp.1-18, 2013.



[筆者紹介] 野津 厚 (のづ あつし) 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域長,博士 (工学)



小濱 英司 (こはま えいじ) 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 耐震構造研究チームリーダー,博士 (工学)



大矢 陽介(おおや ようすけ) 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 主任研究官, 博士(工学)