

3. われわれは何を生み出したのか

(4) 新たな港湾構造物の耐震設計法

菅野高弘

Takahiro SUGANO

正会員 博士（工博） 運輸省港湾技術研究所
構造部 構造振動研究室長神戸港が全滅だって ケーソンが5mも動いた？
エプロンが3mも沈下？

1995年1月17日午前5時46分に発生した兵庫県南部地震において、確かに港湾施設は過去に例のないほどの被災を受けた。さて、壊滅的な被災（図-1¹⁾）を受けて2年後に完全復旧した神戸港であるが、この間どのような状況にあったかを時系列的に見てみると（地震発生からの日数で表示）²⁾、

(1) 緊急対応段階 1日～3日目：1月17日当日に航空機の臨時便が設定されるなど被災が軽微だった関西空港を活用したものと、ヘリコプターによる被災地への輸送モードが顕著であった。陸上輸送も被災地外で活発化した。残念ながら港湾施設の使用状況は確認できていない。電気・電話は3日目までに90%程度回復。

(2) 応急対応段階 4日～14日目：緊急物資搬入のための船舶（自衛艦、海上保安庁艦艇、一般船舶など）が被災した岸壁に接岸している。また、旅客船・フェリーによる人員の輸送（買い出し、慰問等）が陸路の復旧の遅れや交通渋滞を回避する上で重要な役割を果たした。例えば、外航旅客船オリエントビイナスは1月20日から2月1日まで神戸港に接岸し、救護・救援関係者の宿泊施設として1日最大1000人が利用した。

(3) 復旧対応段階 15日～50日目：ヘリコプターによる輸送が減り、道路の復旧に応じて陸上輸送が増えてくる。海上輸送は、旅客船・フェリーによる人員の輸送が陸上へ移行する時期である。応急対応段階から復旧対応段階までの間に、被災者への食事・給水・風呂・トイレ・宿泊施設の提供・復旧支援要員の宿泊所・医療活動拠点として船舶が利用された。被災原因の究明のためまさ土の凍結サンプリングなどの地盤調査、被災調査・数値解析・水中振動台模型振動実験を精力的に実施。

(4) 復興対応段階 51日目～：各輸送モードが救援活動から復興活動へ移行。復旧工事計画を岸壁の供用と工事のバランスを考慮し策定し、暫定使用岸壁に船舶が接岸し荷役を行っている隣で復旧工事を行い、工事完了後に供用岸壁をシフトさせ、新設工事とは異なった海域状況・陸上状況において復旧工事が実施された。

被災直後の混乱した時期（～3日目まで）の正式な記録は残っていないが、「壊滅的な被災を受けた」神戸港において、緊急物資の輸送・海上支援船・人員の輸送・被災者宿泊・支援要員の基地として船舶および係留施設が活用されている。このような被災経験から重力式の岸壁の場合には、（被災変形率）＝（岸壁水平移動量÷岸壁高さ）を指標として、どの程度の被災岸壁に船舶が接岸したのか実績を調査したところ、最大被災変形率＝20～30%の岸壁にも接岸していることが判明した。接岸岸壁の選択には、陸上とのアクセスの難易なども検討事項となっており、被災変形率のみで決まったわけではないが、例えば10mの岸壁では2～3mの水平変位の発生した岸壁でも接岸したことになる。

21世紀へー港湾施設の新しい耐震設計の考え方

耐震強化岸壁：1983年日本海中部地震による秋田港の被災を教訓として、設計震度0.25の高い耐震性を有する岸壁を各港に配置し、当該地域で想定される地震動レベルをはるかに超えた地震が発生しても、緊急物資の荷役・救援活動などに地震直後から機能を果たせるようにとの思想で整備されてきている。しかし、1995年兵庫県南部地震の教訓から、岸壁のみが耐震強化されていても、荷役施設・エプロン・臨港道路などが破壊された場合には港湾としての機能を保持しきれないことから、これらの施設も含めた「耐震強化施設」として全体的に耐



図-1 神戸港の復興工事箇所（1995年5月現在）

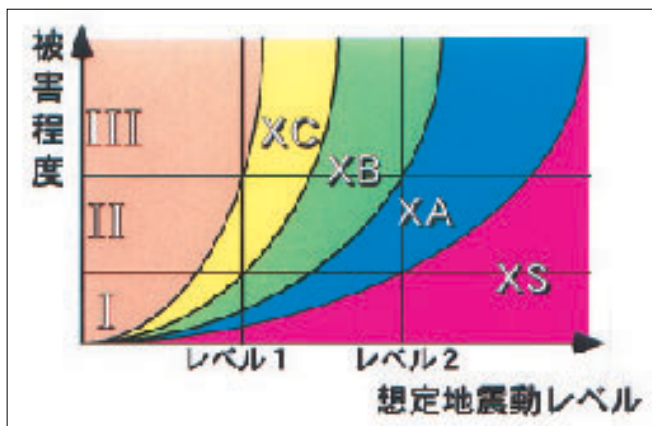


図-2 耐震性能概念図

表-1 被害程度分類

許容被害程度ランク	機能に関する被害程度 (応急復旧の難易度)	本格復旧に関する被害程度 (本格復旧の難易度)
被害程度 I	応急復旧は不必要、または、簡易な応急復旧により機能回復	無被害、または、軽微な被害
被害程度 II	短期間の応急復旧により機能回復	中程度の被害
被害程度 III	短期間の機能回復は困難	著しい被害を受けるが、崩壊はしない

表-2 耐震性能のグレード

グレード	要求される被害の程度
XS	レベル2地震動に対して被害程度 I にとどまる。
XA	レベル1地震動に対して被害程度 I、レベル2地震動に対しては被害程度 II にとどまる。
XB	レベル1地震動に対して被害程度 I、レベル2地震動に対しては被害程度 III にとどまる。
XC	レベル1地震動に対しては被害程度 II、レベル2地震動に対しては、万一施設の崩壊があった場合でも周辺に影響を与えない。

震性を評価することとした。また、構造形式の多様化（地震時の応答特性が異なるケーソン式・栈橋式・矢板式・セル式など）をはかることとした。

レベル1・レベル2地震動：レベル1地震動に対しては従来の「震度法」で対応できるものと考えられるが、レベル2地震動に対しては、「震度法」のみでは対応できないため、「耐震性能」を規定した上で評価することとした。

耐震性能設計：港湾構造物の場合、多様な構造形式・機能を有することから、対象施設の特性・機能などを勘案して許容被災程度を設定する。耐震性能は図-2に示すような概念を考えており、縦軸に示す許容被害程度は、施設の機能低下の影響・本格復旧の難易（費用・時間）から表-1のように設定される。耐震性能のグレードは図-2においてXS, XA, XB, XCの4グレードとし表-2のように分類される。「耐震強化施設」は、概ねXSグレードの耐震性能を保持することを目的として設計されることになる。

変形照査：設計対象施設のレベル2地震動に対する挙動を把握し、XSグレードに相当するかを確認する。「震度法」の安全率では、変形量を把握できない、岸壁と背後のエプロン・荷役機械などの変形を評価する必要があること、液状化対策の効果を評価する必要があること、以上の要求から、地震時の地盤の変形・強度特性を考慮

できる十分信頼性の担保された地震応答解析または模型実験を実施する。

大正13年？ 機械屋と土木屋？ 腐れ縁「液状化」と地震被害？

地震時土圧：現行設計法は、大正13年に発表された物部・岡部の地震時土圧を使っているが、構造物と地盤の相互作用という観点から重力式岸壁を対象とした1G場（写真-1）・遠心場模型振動実験・現地観測に基づき合理的な設計論³⁾の提案を行うべく共同研究中（北海道大学・北海道開発局・港湾技術研究所）であり、釧路港において模型実験とほぼ同様に計測器を配置した実物の岸壁を用いた実証実験を開始する予定である。

コンテナクレーン：従来、港湾構造物である岸壁と荷役機械であるコンテナクレーンは別個に設計されてきた。現在、栈橋とコンテナクレーンの動的相互作用に関する研究⁴⁾を行っており、1/15模型による振動実験・数値解析手法の開発（簡易モデル・詳細モデル）、動的

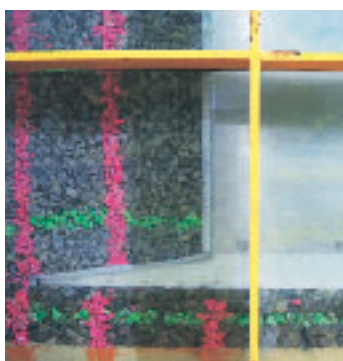


写真-1 水中振動台による1G場模型実験（ケーソンと裏込石の地震時挙動の水中撮影スナップショット）



写真-2 1/15縮尺模型振動実験（栈橋とガントリークレーンの連成解析へ）



写真-3 薬液注入試験施工の掘削検証（超微粒子シリカ、ゲルタイム8時間、浸透注入、浸透範囲200cm以上、液状化対策のため必要強度は5〜10kPaに設定）

相互作用および脚の浮き上がり（写真-2）を考慮した設計体系の構築を行っている。

液状化対策：既往の地震被害を分析すると液状化がキーワードとして第一位を占めている。新設の施設では液状化対策を行っているが、問題は供用中の施設の液状化対策である。特に利用率の高い施設に対して液状化対策のために供用を停止することが難しいため、機能停止を伴わない効果的な液状化対策⁵⁾（写真-3）が必要とされる。また、既存構造物直下など施工面での難しさを伴う。

参考文献

- 1) 運輸省第三港湾建設局震災復興建設部：阪神・淡路大震災 復興にむけて、No.3, 1995
- 2) 高橋宏直・中本 隆・吉村藤謙：兵庫県南部地震時の震災直後における海上輸送モードの対応状況に関する分析，港湾技研資料，No.861, 1997
- 3) 三浦均也・大塚夏彦・笹島隆彦・小濱英司：ケーソンと背後地盤の震動特性を考慮した重力式岸壁の耐震設計，土と基礎，No.47-6, pp.25-28, 1999
- 4) 山本俊介・江頭隆喜・菅野高弘・田辺俊郎・宮田正史：地震時における栈橋式岸壁とコンテナクレーンの動的相互作用，第25回地震工学研究発表会講演論文集，第2分冊，pp.989-992, 1999
- 5) 山崎浩之・前田健一・高橋邦夫・善功企・林健太郎：溶液型注入固化材による液状化対策工法の開発，港湾技研資料，No.905, 1998

3. われわれは何を生み出したのか (5) 液状化地盤の側方流動と対策

濱田政則

Masanori HAMADA

フェロー会員 工博 早稲田大学教授 工学部土木工学科

側方流動の教訓

兵庫県南部地震は、阪神地区の埋立地を中心に広範囲な地盤で液状化と側方流動を引き起こし、建物、橋梁および各種産業施設に極めて甚大な被害を発生させた。さらに、上下水道、ガスなどのライフラインシステムの埋設管路に膨大な数の被害が生じて、長期間にわたって都市機能が麻痺状態に陥った。

液状化地盤の側方流動が研究者の間ではじめて注目されるようになったのは、1983年の日本海中部地震を契機としている。能代市の緩やかな傾斜地盤において5mもの水平変位が生じていたことが地震後の航空写真測量によって明らかにされた。その後、1964年新潟地震など既往地震による側方流動事例の分析が進められるとともに、日米両国の研究者によって側方流動のメカニズムの解明と地盤変位の予想手法の開発および対策工法の開発が共同で進められてきた。しかしながら残念なことに、十分な研究成果が挙がる前に兵庫県南部地震が発生し、再び同様な被害が発生した。

兵庫県南部地震後、側方流動による被害の深刻さが強く認識され、この5年間の間に精力的な研究が進められてきた。研究者間の全面的なコンセンサスは得られていないものの、側方流動のメカニズムや側方流動の基礎構造に及ぼす外力特性などについて議論が深められてきた。これらの研究成果はこの5年間に改訂された各種土木構造物の耐震規準の中に取り入れられている。

研究の現状

側方流動に関する研究課題は、i) 側方流動のメカニズムを解明し、合理的な地盤変位の予測手法を開発する。ii) 側方流動が基礎など地中構造物に与える外力特性を解明し、設計法と対策法を確立することである。側方流動のメカニズムに関しては、液状化土の流動を著しく剛性の低下した固体として取り扱う考え方と、流体として取り扱う考え方があり、研究者間で意見が分かれているのが現状である。2番目の研究課題の側方流動が及ぼす外力特性についても研究が進められている。液状化地盤が流動した場合、構造物基礎に2種類の外力が作用することが、既往地震による杭被害の分析および模型実験などにより明らかにされている。液状化層の上部に非液状化層が存在する場合には非液状化層より変位が入力されることになる。これは、従来から地中構造物の耐震設計で用いられてきた応答変位法と同じ考え方である。流動する液状化層から基礎に作用する外力の評価については二つの考え方があって、まだ研究者の合意が得られていない。一つは、液状化層から構造物に作用する外力を流体による抗力によって評価しようとするもので、この場合は液状化土の流動速度が外力評価の重要な要素となる。他の考え方は液状化層からの外力も非液状化層と同様、変位によって評価しようとするもので、この場合は地盤ばねの低下の度合を推定することが課題となっている。

以上述べたように、側方流動に関する研究は兵庫県南