

鋼板セルの地震時挙動に関する研究

Study on the Behavior of Steel Plate Cellular Bulkheads during Earthquake

菅野 高弘¹⁾, 北村 卓也²⁾, 森田 年一³⁾, 由井 洋三⁴⁾
 Takahiro SUGANO¹⁾, Takuya KITAMURA²⁾, Toshikazu MORITA³⁾ and Yozo YUI⁴⁾

- 1) 運輸省港湾技術研究所構造部構造振動研究室, 室長 博士(工学)
Chief, Structural Dynamics Lab. Port and Harbour Research Institute, Dr.Eng.
- 2) 住友金属工業(株)土木・橋梁技術部, 担当課長
Manager, Civil Eng. Steel Bridge Tech. Dept. Sumitomo Metal Industries, LTD.
- 3) 運輸省港湾技術研究所構造部構造振動研究室, 研究員
Research Engineer, Structural Dynamics Lab. Port and Harbour Research Institute
- 4) 住友金属工業(株)土木・橋梁技術部, 担当課長
Manager, Civil Eng. Steel Bridge Tech. Dept. Sumitomo Metal Industries, LTD.

要約

平成7年兵庫県南部地震において被災した「置き鋼板セル式岸壁」の被災調査を基に、大型水中振動台を用いた1/22縮尺模型振動実験・2次元有効応力地震応答解析(FLIP)による解析結果から被災原因が、背後地盤の液状化及び構造物直下の床掘置換土層の片振りせん断変形の蓄積による水平残留ひずみの発生、設計震度を越える過大な入力加速度によることが明らかになった。また、本研究を基に、鋼板セル式岸壁の耐震性評価手法を検討した。

SUMMARY

A series of 1/22 scale under water shake table experiments and 2-D effective stress seismic response analyses(FLIP) were conducted to investigate the behavior of Steel Plate Cellular Bulkhead in Kobe during 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake. The results show that the movement of bulkhead was caused by the lateral force increase due to liquefaction in backfill and the horizontal displacement caused by shear strain accumulation of soil under the bulkhead during the earthquake. From this study, we discussed the evaluation method for seismic performance of Steel Plate Cellular Bulkhead.

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震においては、わが国の外貿コンテナ貨物の約3割を取り扱う神戸港において壊滅的な被害が生じた。神戸港における被災岸壁の約90%は重力式¹⁾であったが、鋼板セル式岸壁も摩耶埠頭²⁾において被災した。本研究では鋼板セル式岸壁の地震時挙動を神戸港における被災調査、大型水中振動台を用いた模型振動実験及び数値シミュレーション結果から明らかにし、鋼板セルの耐震性評価手法を検討した。

2. 被災概要

セル式岸壁には主に鋼板を用いて製作される「鋼板セル」、鋼矢板を用いて製作される「鋼矢板セル」の2形式がある。本研究では、神戸港摩耶埠頭第1突堤～第3突堤において被災した鋼板セル式岸壁を対象とする。鋼板セル式岸壁には海底地盤に打ち込まれた根入れを有する「根入れ鋼板セル」及び有効な根入れを有しない「置き鋼板セル」があり、被災した岸壁は置き鋼板セル式岸壁である。例えば、図-1に示す摩耶埠頭第一突堤の岸壁

は、まさ土によって原地盤を床掘置換し、その上に鋼板セルを設置、背後をまさ土で埋立てた-12m水深の構造となっている。典型的な被災形態(図-1)は、鋼板セルが置換土層に沈下しながら全面に倒れるようにせり出しており、上部天端法線は1.3m~2.9m海側へ移動している。

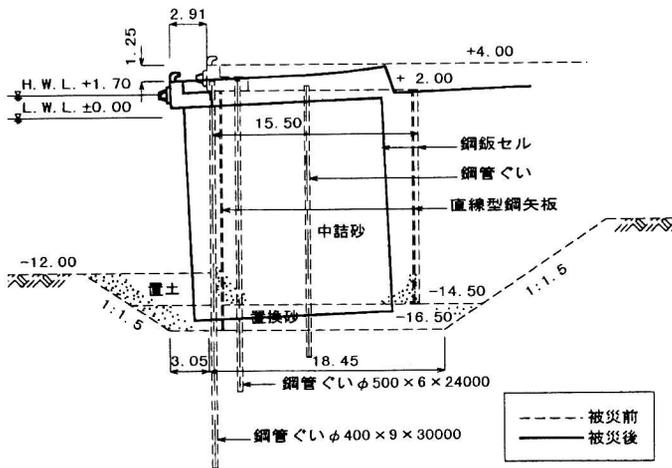


図-1 摩耶埠頭第一突堤被災断面図
Fig.1 Cross section of Maya wharf No.1

3. 現象再現模型振動実験

3.1 実験概要： 実験には、3次元大型水中振動台を用いており、15m×15mの大型水槽の底面中央部に直径4mの振動台が設置されている。振動台上に直径15.5m、高さ16.5mの鋼板セルを躯体とする構造物の1/22模型を作成した。本実験では神戸港における実物被災の再現を目的としているため、置換部及び前面置土は、神戸ポートアイランドから掘削したまさ土(30mmフルイ通過分)を用いて水中落下法によって作成した。在来粘土層は圧密等長期間の養生を要することから液状化の発生が無い密詰め砂で作成し、非排水境界をベントナイト薄層で形成した。セル中詰め砂は相馬珪砂を用い密詰めに締め固めた。鋼板セルは厚さ0.3mmのステンレス製であり、扇角100度のアークをビス結合し3連のセル式岸壁を作成している。

3.2 計器配置： 図-2に示すように加速度計、間隙水圧計を地盤内及びセル本体に設置した。セル本体には変位計を設置し、ひずみゲージを貼付けている。全部で96チャンネル、サンプリング周波数256Hzで400秒計測している。

3.3 入力波形： 神戸ポートアイランドにおいて神戸市開発局が観測している鉛直アレーのKp-28mにおける観測波形(平成7年兵庫県南部地震)を地震波の方向と構造物の方向を現地と同様に合わせて3次元入力している。

3.4 相似則： 表-1に示すように1G場の相似則³⁾を1/22として適用している。但し、間隙水等の水の粘性については粘性調整を行っておらず、相似則を満足していない。

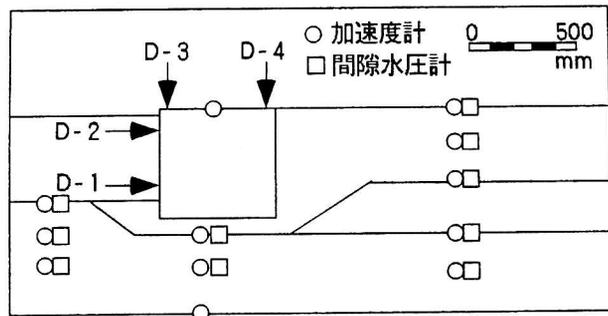


図-2 模型計器配置図
Fig.2 Measurement devices installation

表-1 相似則 TABLE-1 SIMILITUDE LAW

パラメータ	実物/模型	縮尺比
長さ	λ	22
密度	1	1
時間	$\lambda^{0.75}$	10.16
応力	λ	22
間隙水圧	λ	22
変位	$\lambda^{1.50}$	103.19
速度	$\lambda^{0.75}$	10.16
加速度	1	1

3.5 実験結果： 本実験では、実物の構造物を現地と同様の手順で1/22模型として振動台上に再現したのに対して、実際の地震記録を入力している。このため実験の妥当性を評価するためには、地震後に現場で計測された被災形態との比較が重要となる。

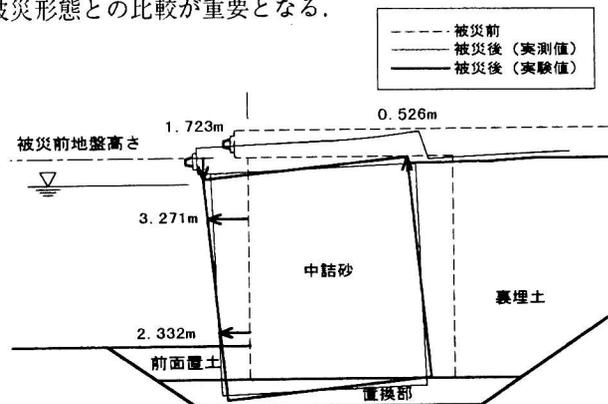


図-3 模型変状断面図
Fig.3 Deformation of the model (Cross section)

図-3に示すように模型セルは海側へ移動し前傾する破壊形態を示した。実物換算後のセル天端の水平変位が3.3m、沈下は1.7mとなっている。現地調査結果から摩耶第一突堤では水平変位が1.3m~2.9m、沈下が0.6m~1.3mであり、模型実験結果がやや大きめの変状を示しているが、変形モードはほぼ一致している。破壊形態の一致から本実験が現地の被災をほぼ再現しているものと考えられる。セル式岸壁の場合、ケーソン式岸壁のように剛体ではなく、中詰め土によるセル殻のフープテンションによって構造物の安定性を確保しているが、図-4に示すセル天端

部の平面的変状図から、やや楕円形に変化しているがほぼ形状を保ったまま海側へ移動しており、現地調査結果との整合性が見られる。

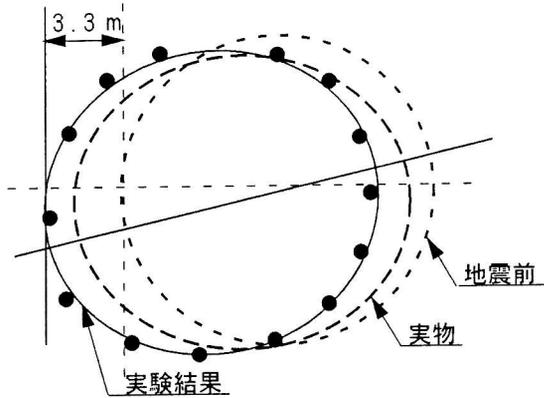


図-4 模型変状平面図

Fig.4 Deformation of the model (Plan view)

このことからセル殻は、ほぼ剛体的に移動したと考えられる。またセルの海側への移動及び沈下は主要動部分(図-5)で徐々に進行している。

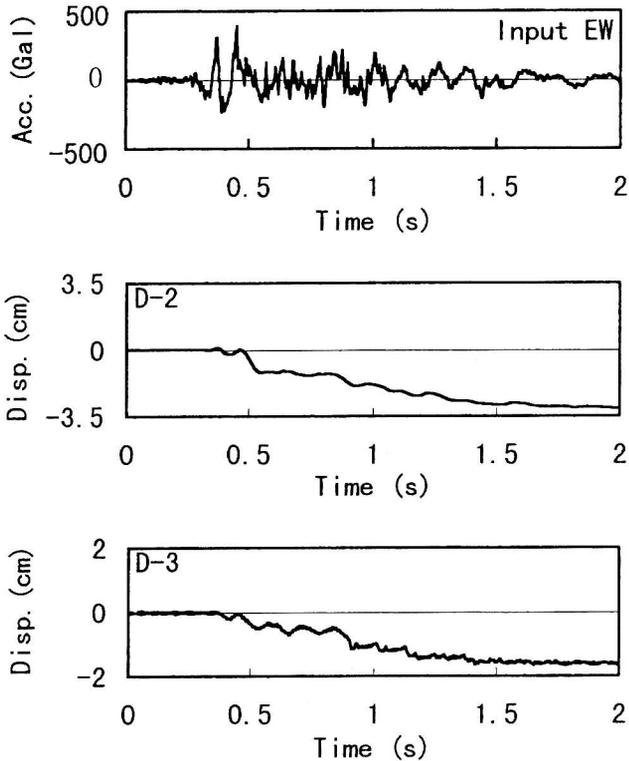


図5 変位時刻歴(模型)

Fig.5 Displacement time history (Model)

4. 2次元有効応力地震応答解析

本研究では平成7年兵庫県南部地震におけるケーソン式岸壁の被災原因調査等に実績のあるFLIP⁴⁾を用い対象岸壁の数値シミュレーションを行った。鋼板セルは円筒を

アークで結合した3次元的な構造を有するため図-6に示すような2次元のモデルを作成した。モデル化に当たっては、セルの構造特性に留意し下記のように設定した。

梁①：「セル殻+アーク鋼板の堤体中心軸回りの単位奥行きあたり剛性」の1/2の剛性を有し、断面積が十分に小さい仮想梁

梁②：「セル殻+アーク鋼板の単位奥行きあたり断面積」と等しい断面積を有し、剛性が十分に小さい仮想梁

梁③：梁①～梁②～梁①を水平方向に接続する剛性が十分大きく断面積が十分に小さい仮想梁

このモデル化では、梁①で剛性を、梁②で断面積を再現するとともに梁③を用いて結合させ、構造全体のEIとEAが再現できるように工夫している。セル殻やアークと背後地盤・中詰め土の鉛直方向の滑りを再現するためにジョイント要素を入れている。

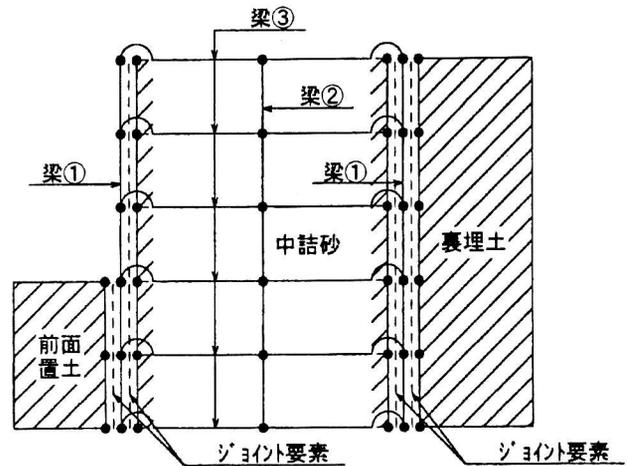


図-6 鋼板セル堤体の有限要素モデル

Fig.6 FEM modeling of cellular bulkhead

入力地震動は模型振動実験と同じポートアイランドKP-28mの主要部分の20秒間であり、岸壁の方向と合わせてEW及びUDの水平・上下同時入力としている。地盤定数は神戸港における埋立地盤及び置換土部分の凍結サンプルの非排水繰返し三軸試験結果⁹⁾、PS検層による弾性波速度等を基に設定しており、表-2に示す。

表-2 解析に用いたパラメータ
Table 2 FEM parameters

土層	γ tf/m ³	σ_m kPa	ϕ_f' deg	ϕ_p' deg	ダйлイタソソ-パラメータ				
					S1	W1	P1	P2	C1
まさ土	2.10	74.2	36	28	0.005,35.0,0.5,1.0,1.0				
置換土	2.20	195.0	36	28	0.005,37.0,0.5,1.0,1.0				
中詰め土	2.20	79.4	36	28	0.005,35.0,0.5,1.0,1.0				
砂質土	2.00	251.3	36	-	-----				

図-7に残留変形と過剰間隙水圧比のコンターを示す。セル本体は海側天端が2.3mの水平変位、0.9mの沈下とな

り前傾している。これは現地調査結果及び模型振動実験結果と概ね一致している。背後地盤は過剰間隙水圧比が0.9程度とほぼ液状化状態となっており現地で観測された噴砂痕と整合性を有する。一方セル直下の置換土層では過剰間隙水圧比が0.4以下と液状化には達していない。図-8にはセルの海側天端部の水平変位及び鉛直変位の時刻歴を示しており、模型振動実験結果と概ね一致している。

図-9に背後地盤と置換土層における有効応力経路及びせん断応力-せん断ひずみ曲線を示す。背後地盤では過剰間隙水圧の上昇に伴ってせん断剛性が低下し液状化へ至っている。一方置換土層では片振せん断挙動を示しておりせん断ひずみが海側方向へ蓄積している。

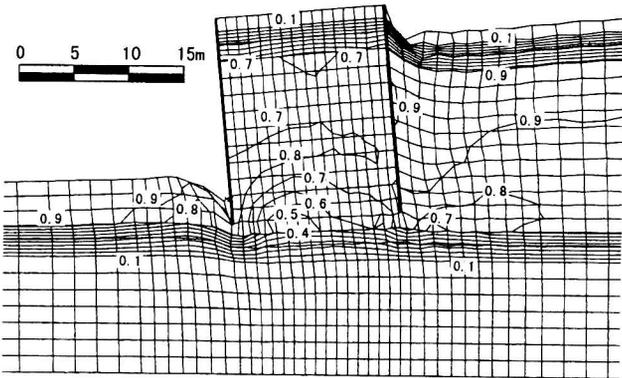


図-7 解析結果 Fig.7 FEM analysis result

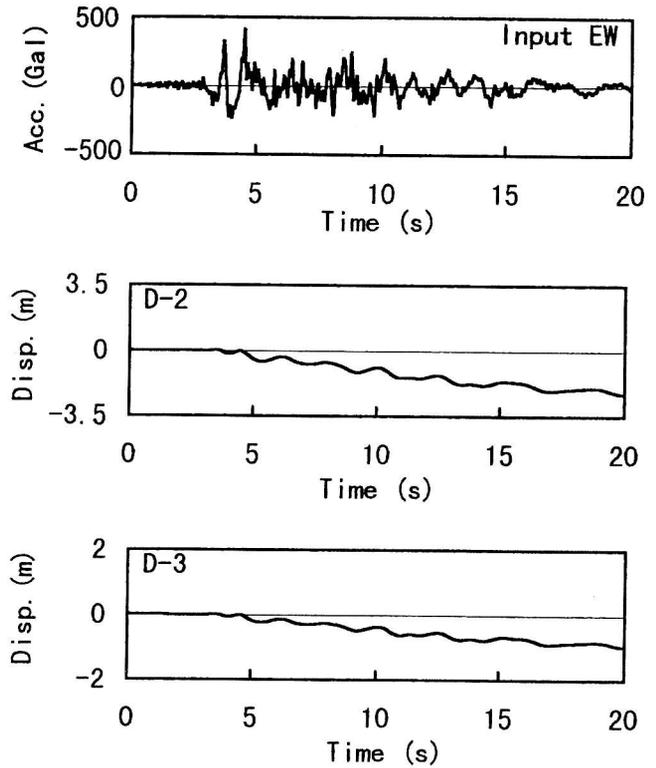


図-8 変位時刻歴 (数値解析)

Fig.8 Time history of deformation (FEM Analysis)

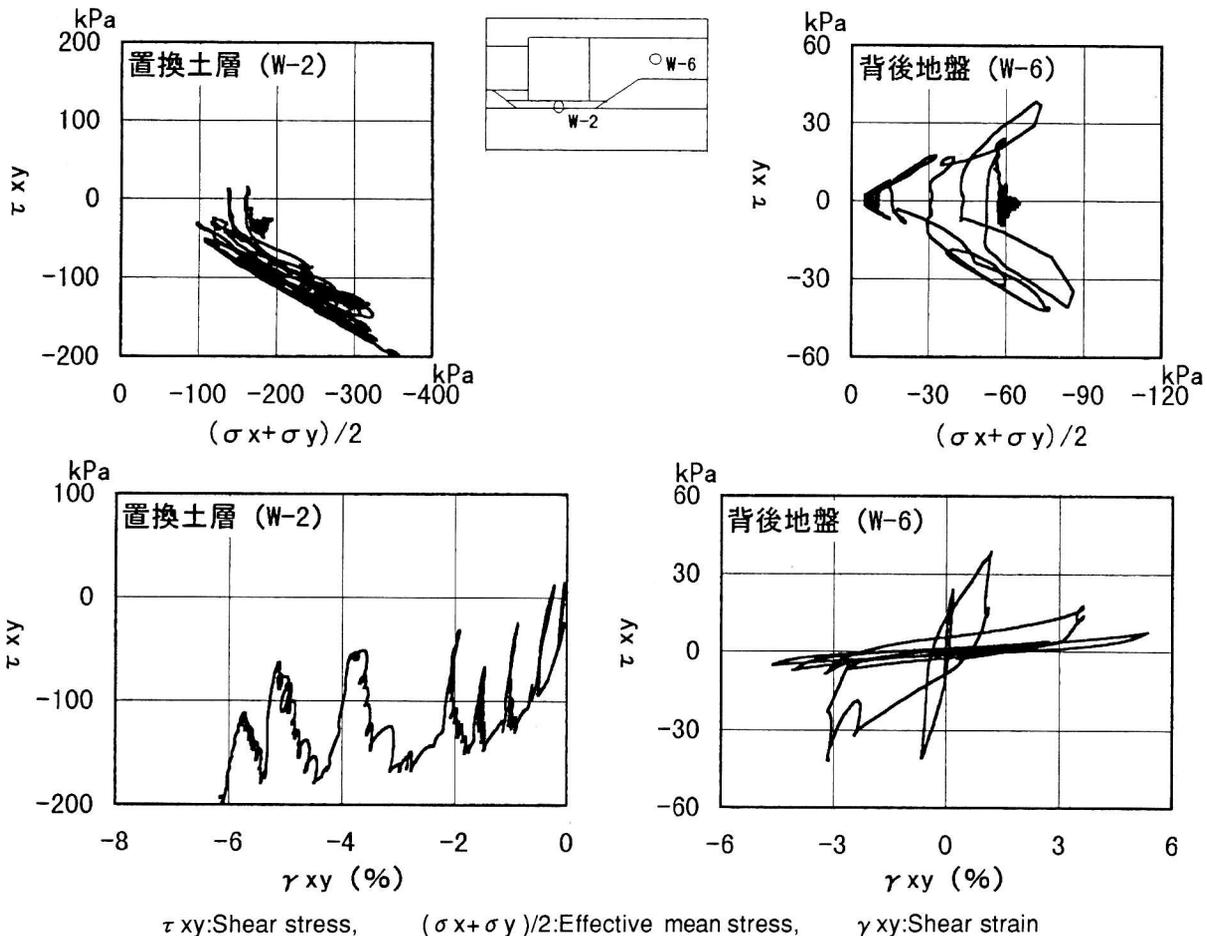


図-9 有効応力経路と応力-ひずみ関係 Fig.9 Stress path and Stress-strain relation

図-10に、同一の解析用定数を用い、設計震度相当の入力波（八戸波NS方向，大船渡波E41S方向）を用いた加振の場合の残留変位をポートアイランド波EW方向入力（原波形）と合わせて示す．この図から設計震度相当の入力の場合には変形が軽微であることが推定される．

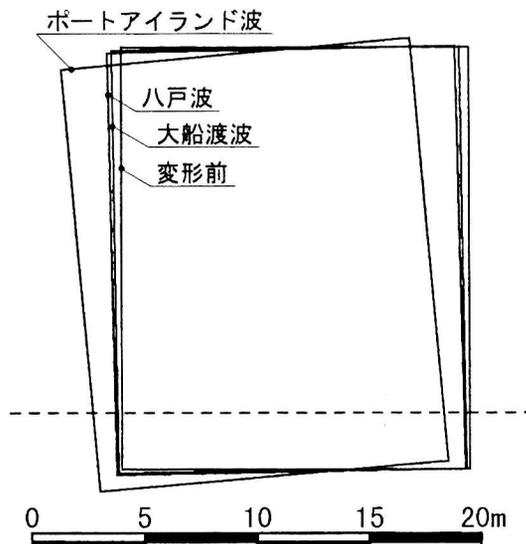


図-10 残留変形（設計震度相当入力）
Fig.10 Residual Deformations

5. 被災メカニズムの推定

現地調査結果，模型振動実験結果及び2次元有効応力地震応答解析結果を互いに補完する形で被災のメカニズムが以下のように推定できる．

セルの海側への水平移動及び前傾は，

- ①背後地盤の液状化による土圧の増加及び，
- ②置換土層の片振りせん断変形の蓄積による水平残留ひずみの発生に加えて，
- ③設計震度をはるかに越えた入力加速度によって生じた．また，
- ④セル殻及び中詰め砂の相互作用（中詰め砂の拘束効果）によりセル本体はほぼ剛体的に挙動した

6. 鋼板セルの根入効果に関する考察

4.で実施した2次元有効応力地震応答解析に用いた地盤定数等を固定したまま，解析対象セルの根入れ長を2.5m（置きセル），5.0m，8.0mと変化させた解析を行った．本解析においてはセル殻の直径を変えずに根入れ長のみを増大させており，構造体のプロポーションが縦長になることによる転倒モーメントの増大等を含んだ残留変形量となっている．図-11に示すように根入れ長が増すことによって残留水平変位が小さくなり，根入れ効果の評価が可能である．根入れ効果の相対比較に加えて，地盤改良範囲の設定等に有効な手法となりえるものと考えられる．

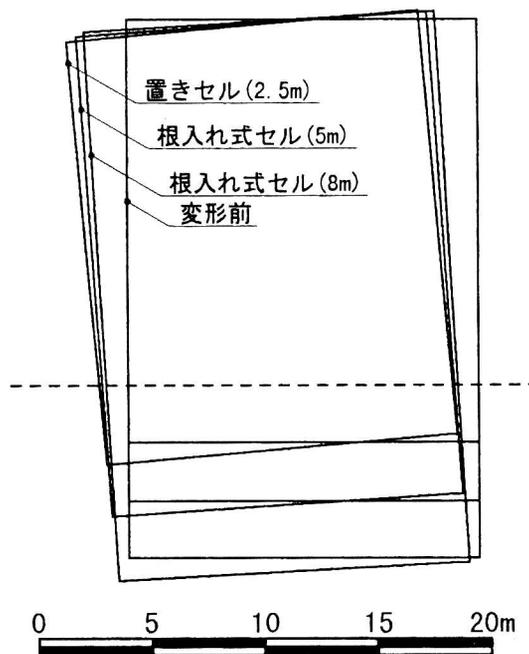


図-11 残留変形（根入れ効果）
Fig.11 Residual Deformations

7. 鋼板セル式岸壁の耐震性評価手法に関する考察

鋼板セルの耐震安定性を論ずる場合に一般的に入手可能な情報をまとめると下記のようにまとめられる．

（1）現地情報：被災前，被災後の構造物の差異，現地地盤調査結果，強震記録など．被災後の調査には精査から単なる被災写真までレベルに差がある．通常は地盤内の変状等を把握できないことが多い．また，地震中の挙動を把握できない．強震記録については各々の構造物に強震計が設置されていないため近隣の記録から構造物への入力地震動を推定する必要がある．

（2）模型振動実験：各種計測センサーを配置することによって，模型における実挙動を知ることができる．模型と実物間の相似則を完全に満足する実験は困難であり，模型製作精度により結果が左右されることが懸念される．また，地盤内の土要素の応力状態を把握することが困難である．1G場における模型の場合には，地盤内の土要素の応力状態が実物と異なる．一方，遠心場における模型の場合には地盤内の土要素の応力状態は実物を忠実に再現できるが，模型が小さくなるためセンサー等の配置の自由度が小さくなる．

（3）数値シミュレーション：模型実験を数値解析に置き換えたものであり，地震前から地震後までの挙動を知ることができる．しかし，解析結果は入力するパラメータの設定に敏感でありパラメータの設定法に客観性を持たせる必要がある．

本研究においては，

（1）* 現地情報として平成7年兵庫県南部地震によって被災した摩耶埠頭の実構造物に関する被災調査結果，凍結サンプリング等を含む地盤調査結果及び神戸市開発局の実施している鉛直アレー強震記録が得られた．

(2) * 3次元大型水中振動台を用いた1/22縮尺模型振動実験を現地の地盤材料を使って実施し、現象再現を試み現地調査結果との整合性が見いだされた。

(3) * 2次元有効応力地震応答解析 (FLIP) を用いた数値シミュレーションを、可能な限り客観性を有するパラメータ設定により実施した。模型実験では得られない地盤内の有効応力経路などの情報を得ることができた。

解析結果において、模型振動実験結果との比較から残留変形のみならず地震加中の挙動も概ね整合性を有することを確認し、解析の妥当性を評価した。また、設定したパラメータを固定したまま、根入れ効果に関するシミュレーションに適用した。

以上より、現地調査結果、現地被災を再現する模型実験及び数値シミュレーションを組み合わせることによって客観的に数値シミュレーションに用いるパラメータを設定することができ、より高精度な耐震性評価を行うことができるものと考えられる。

8. おわりに

本研究では鋼板セルの地震時挙動に関して、現地調査結果・模型振動実験・数値シミュレーションを互いに補完しあう形で用い、被災メカニズムの解明を試みた。

現地被災構造物の1/22縮尺模型には、現地地盤材料を使用し、水中振動台を用いた模型振動実験を行った。実験結果は現地被災調査結果を概ね再現しており模型振動実験の妥当性を評価できた。

2次元有効応力地震応答解析(FLIP)による数値シミュレーション結果が現地調査結果及び模型振動実験と整合性があることから、鋼板セルの構造特性に基づいた2次元モデル化の妥当性が確認され、被災メカニズムの推定が可能となった。鋼板セル式岸壁の根入れ効果の評価に適用し、この様な相対的比較への適用性が確認された。

参考文献

- (1) 港湾施設被害検討委員会編：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察，港湾技研資料，No.813,1995.
- (2) 稲富隆昌ほか：1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告，港湾技研資料，No.857,1997
- (3) Susumu Iai : "Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1G Gravitational Field", Report of the PHRI, Vol.27, No.3, 1988.
- (4) Susumu Iai et.al. : "Analysis of Undrained Cyclic Behavior of Sand under Anisotropic Consolidation", Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.16-20, 1992.
- (5) Hirofumi Inagaki et.al. : "Performance of caisson type quay walls at Kobe port, Soils and Foundations, Special Issue. pp.119-136, 1996.