

護岸の水平移動に起因する 液状化地盤の流動変位に関する研究

高橋 祐治¹・濱田 政則²・張 至鎬³

¹正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

E-mail : takahashi-yuji@kajima.com

²フェロー会員 工博 早稲田大学 理工学部 社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

E-mail : hamada@waseda.jp

³学生会員 工修 早稲田大学 理工学研究科 建設工学専攻 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

E-mail : jangjiho@fuji.waseda.jp

兵庫県南部地震における液状化地盤の流動事例分析および遠心載荷場における流動模型実験により、護岸移動に起因した地表面変位について検討した。流動事例分析から、液状化地盤の流動は護岸より 200m から 300m 以上の広範囲に及んでいること、および流動量が液状化層厚の 4 から 6 倍の距離の領域で急激に減少するが、それより背後では広範囲に亘ってほぼ一定の変位が発生していることが示された。遠心載荷場の模型実験からも事例分析結果と同様、護岸からの距離と液状化層厚の比が約 3 倍の区間で流動量が急激に減少する傾向を示した。

Key Words : Case study , Quay wall , Liquefaction , Liquefaction-induced ground displacement

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、阪神地区の埋立地を中心に広範囲な地域で液状化を引き起こし、多くの構造物に甚大な被害を与えた。

兵庫県南部地震後、土木構造物の耐震設計基準が改訂され、流動による地盤変位の予測手法および流動に対する構造物基礎および埋設管路など地中構造物の耐震設計法が規定されるようになった。

これらの指針および基準において護岸の移動に起因する地盤流動量の予測手法は、兵庫県南部地震における埋立地等の地割れ幅の計測結果に基づいた変位分布によっている。これらの結果によれば、一般に護岸から約100m程度の離間距離で地表面変位は収束し、それよりも離れた位置では地盤変位は発生しないとされている。

しかしながら、著者らの研究グループによる地震前後の航空写真を用いた測量¹⁾によれば、護岸から 200 ~ 300m離れた地点においても流動変位が計測さ

れた例がある。流動変位が護岸から内陸部に向ってどの程度の位置まで発生するかは、埋立地における防災対策や橋梁基礎などの耐震設計にとって極めて重大な課題である。

本研究は、兵庫県南部地震後の地盤変位の測定結果を用いた流動事例の分析、および遠心載荷場の流動模型実験より、護岸からの離れによる地盤変位の減衰特性を解明することを目的としている。

2. 兵庫県南部地震による流動事例の分析

(1) 事例分析の方法

著者らの研究グループは兵庫県南部地震後、神戸市の埋立地を中心に航空写真測量によって液状化地盤の流動変位を測定した。地震前後に撮影された航空写真の縮尺はそれぞれ1/25000, 1/8500で、水平変位と鉛直変位の測定精度はそれぞれ約33cm, 53cmと見積もられている。

これらの変位のデータの中から下記の条件を満足

する地点を選定し、護岸からの離間距離による地盤変位の減衰特性を検討した。

噴砂により液状化の発生が確認される。

測線より100m以内にボーリング資料が存在する。橋梁や建物のなどの地盤変位を妨げるような構造物が近くに存在しない。

護岸天端の水平移動量が測定されている^{1),2)}。

この結果図-1に示すような総計17の測線を選定した。測線の長さ、護岸天端移動量および後述する推定液状化層厚等を表-1に示す。表中の液状化層の厚さの算定は後述する方法によった。

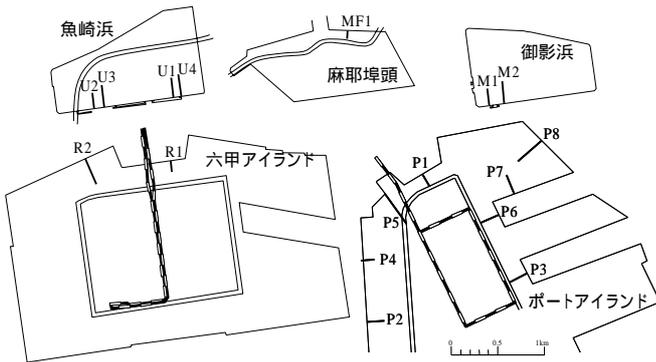
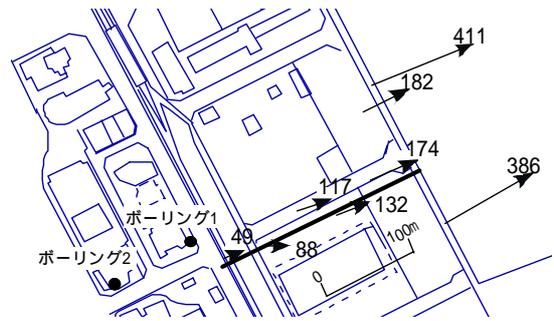


図-1 事例分析の対象とした測線位置図

表-1 事例分析対象測線のまとめ (単位: m)

地域	測線名	測定範囲	護岸の水平変位量	護岸の鉛直変位量	液状化層厚
御影浜	M1	204	3.26	1.33	16.5
	M2	132	3.62	0.50	14.5
摩耶埠頭	MF1	76	2.84	0.70	7.0
魚崎浜	U1	208	3.09	1.65	10.5
	U2	140	3.02	1.65	15.0
	U3	216	3.05	0.83	14.0
	U4	228	2.59	1.15	11.0
六甲アイランド	R1	112	3.53	1.89	15.5
	R2	284	2.83	1.00	12.0
ポートアイランド	P1	126	4.00	1.95	13.5
	P2	130	2.77	0.92	15.0
	P3	216	3.10	1.25	16.5
	P4	44	2.65	0.81	14.0
	P5	330	5.50	2.52	12.0
	P6	180	3.00	1.93	6.0
	P7	258	3.30	1.15	14.0
	P8	71	3.63	1.58	15.0

図-2にポートアイランド東部地域の測線P3に沿った地盤水平変位ベクトルおよび後述する液状化層推定に用いたボーリングの位置を示す。なお、ボーリングの資料は(財)建設工学研究所発行の神戸の地盤データベース「神戸JIBANKUN」によった。P3では護岸近傍が約4m移動し、護岸より50mで急激に変位が減少しているが、その後護岸より200mまで50cm以上の水平変位が発生している。液状化層の推定は、道路橋示方書 編・耐震設計編に示された方法を用いた。



(数値は水平変位量: cm)

図-2 P3測線における水平変位分布

(2) 事例分析による地表面変位の減衰特性

全測線における地表面水平変位と護岸からの距離の関係を図-3に示す。ここで横軸が0mの水平変位は護岸天端の水平変位である。これによれば、地盤の水平変位は護岸より50~100m程度で大きく減衰するが、その後も地盤変位が発生しており、0.5~1.5m程度の地盤変位が護岸より200m~300mの領域まで発生していることが注目される。

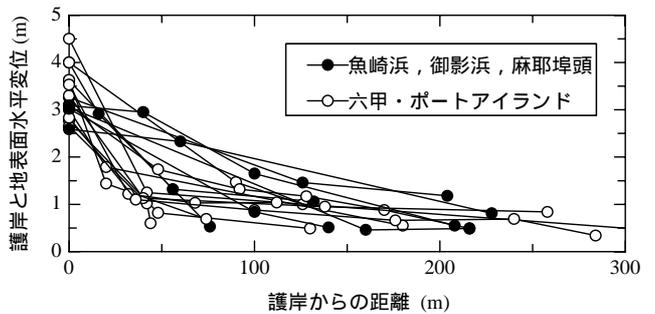


図-3 地表面水平変位と護岸からの離間距離の関係

図-4の縦軸は護岸変位に対する地盤の水平変位の比を表し、横軸は液状化層厚に対する護岸からの距離の比を示す。本土側の埋立地である魚崎浜の対象測線の内U1, U4を除くと、地盤変位は概ね液状化層厚の4~6倍程度の距離で減衰し、その後広領域に亘ってほぼ一定の変位が生じており、液状化層厚の10~20倍の領域まで地表面変位が生じている。

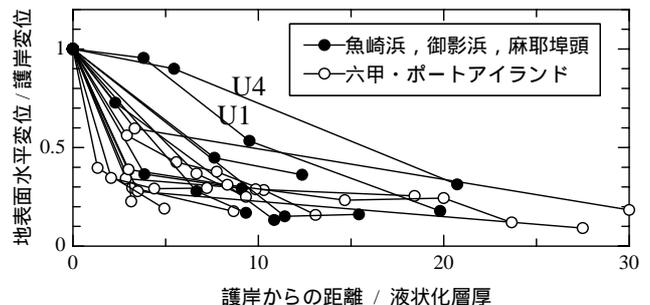


図-4 地表面水平変位 / 護岸変位と護岸からの距離 / 液状化層厚

3. 遠心載荷場における模型地盤の流動実験

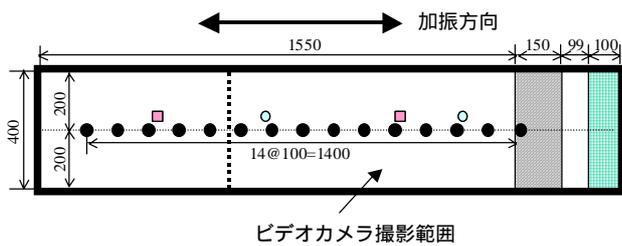
(1) 実験の方法

遠心載荷場の模型実験に用いた土槽および地盤の概要を図-5に示す。遠心加速度は30Gである。土槽は流動方向155cm、流動直角方向の水平幅40cm、高さ60cmで、上下流端の壁および側壁は剛境界である。地盤材料は珪砂8号で平均粒径および均等係数はそれぞれ0.062mm、4.27である。

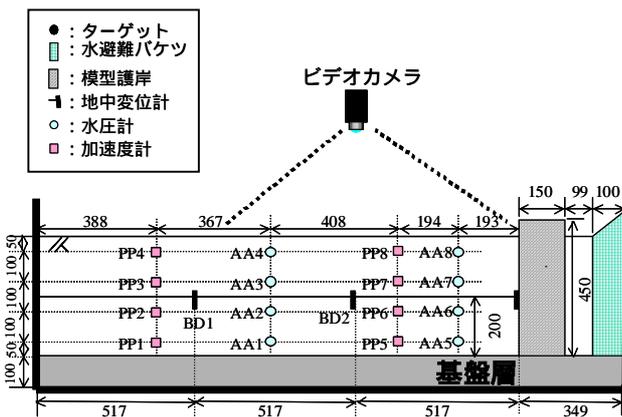
乾燥砂を空中落下し地表面を平に整形した後、土槽底部より水を注入して地盤を飽和状態とした。本実験では間隙液として水を用いており、間隙液に透水性に関する相似性は考慮されていない。

護岸模型はコンクリート製のブロックであり、重力式護岸を想定している。加振および液状化による土圧の増大により、護岸模型は水平移動や回転変位を生じ、背後地盤が流動を生じる。

図-5(a)に示すように地表面に変位測定用の標的を設置して、高速度カメラ(500枚/s)により標的の動きを撮影し画像を数値化することにより変位の時刻歴を求めた。



(a) 模型地盤の平面図



(b) 模型地盤の断面図

図-5 実験に用いた土槽と模型地盤 (case1, 層厚40cm)

表-2に示す4ケースの実験を行った。模型地盤の相対密度は35~39%で地盤模型の厚さは約15cm, 20cm, 30cm, 40cmの4種類である。実物に換算し

た地盤厚は4.5~12mである。加振入力は正弦波で、遠心載荷場での振幅、振動数および波数は表-2に示すとおりである。

表-2 模型実験の条件

実験名	模型地盤層厚 (cm)	相対密度 (%)	加振加速度	
			振幅 (m/s ²)	周波数と波数
case1	40	39.1	192	60Hz60波
case2	30	36	197	60Hz30波
case3	20	36.1	192	60Hz60波
case4	15	35.1	197	60Hz30波

(2) 実験結果

図-6に地盤層厚40cm (表-2のcase1) で得られた護岸変位と地表面変位の代表点の時刻歴を示す。加振開始直後から模型護岸の変位が増加しており、若干の時間差を持って地表面の水平変位が発生している。水平変位量は、護岸近傍が大きくなっている。加振開始から0.125秒付近から護岸天端における変位の増加の割合が減少することが分かるが、この時間帯からは模型護岸に回転変位が生じたことが原因であると考えられる。後述する地表面変位の減衰特性の検討では、護岸に回転変位が生じていないと考えられる加振開始から0.13秒以下の時間帯を分析対象とする。

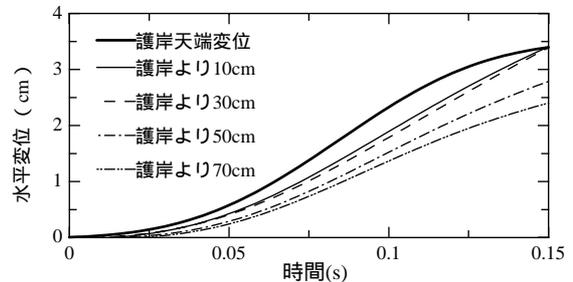
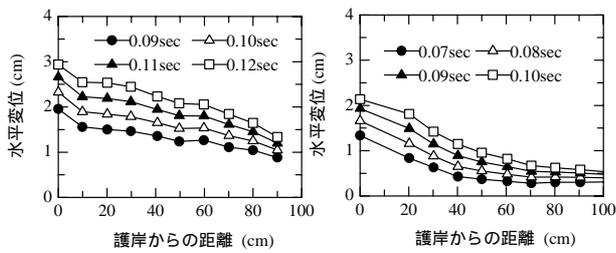


図-6 護岸と地表面変位の時刻歴 (case1, 層厚40cm)

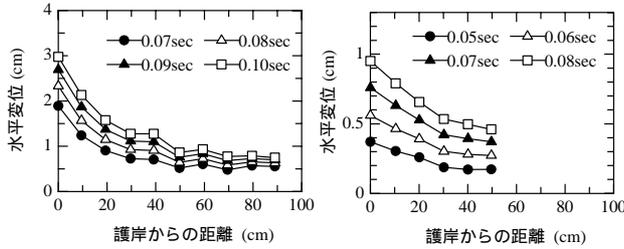
(3) 地表面変位の減衰特性

各模型実験による時刻毎の護岸からの離間距離と地表面の水平変位の関係を図-7に示す。横軸の0cmで表示されたのは護岸天端の水平変位である。これらの図に示した結果によれば、護岸からの離間距離により地表面変位の減衰曲線は分析対象時間に関係なくほぼ相似形となっている。これは、護岸移動に伴って地表面が時間に関係なく一様に変位していることを示している。

図-8は、図-7に示した縦軸の水平変位を護岸変位で除したものである。模型地盤層厚30cm (表-2のcase2) を除いてほぼ1本の曲線によって減衰特性が表される。

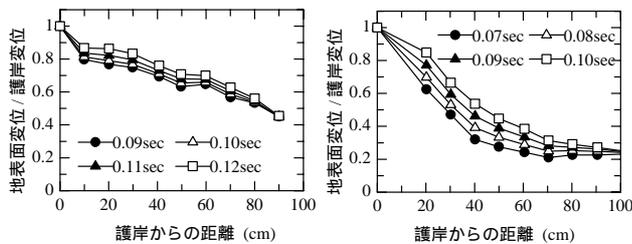


(a) 地盤厚40cm (case1) (b) 地盤厚30cm (case2)

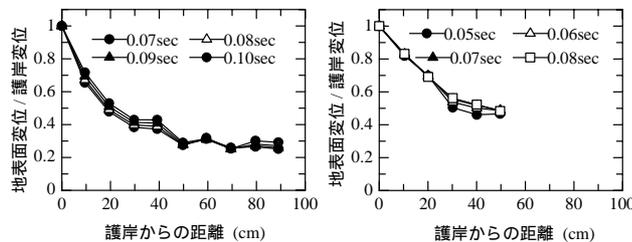


(c) 地盤厚20cm (case3) (d) 地盤厚15cm (case4)

図-7 地表面水平変位と護岸からの距離の関係



(a) 地盤厚40cm (case1) (b) 地盤厚30cm (case2)



(c) 地盤厚20cm (case3) (d) 地盤厚15cm (case4)

図-8 地表面変位 / 護岸変位
と護岸からの離間距離の関係

図-9は、図-8に示したそれぞれのケースの減衰曲線の平均値を表したものである。この場合の横軸は護岸からの距離を液状化層厚（模型地盤層厚）除した値である。これによれば、ややばらつきがあるものの、液状化層厚の約2倍の離間距離で地盤変位が約50%程度に減少していることが分かる。また、模型地盤層厚40cm（表-2のcase1）を除く実験では液状化層厚の約3倍程度の離間距離において水平変位が護岸天端変位の約30%の一定値に近づく傾向にある。

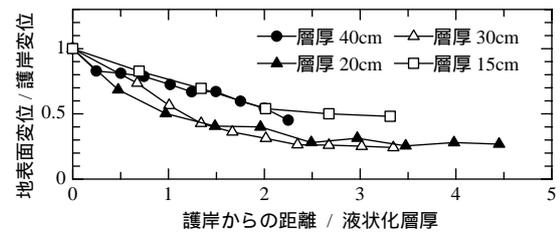


図-9 地表面変位 / 護岸変位と護岸からの距離 / 液状化層厚の関係（模型実験のみ）

図-10に遠心載荷場の模型実験による水平変位の減衰特性を前述した兵庫県南部地震における事例分析結果と併せて示す。模型実験は実験上の制約から液状化層厚の約4倍までの離間距離のデータしかないが、護岸からの水平変位の減衰性状は事例分析の結果、特にで表示したポートアイランドおよび六甲アイランドの事例分析結果とほぼ相関性がとれている。すなわち、護岸からの離間距離が液状化層厚の4~6倍の位置の地表面変位量は、護岸変位量の30~40%に低減し一定値に近づく傾向にある。

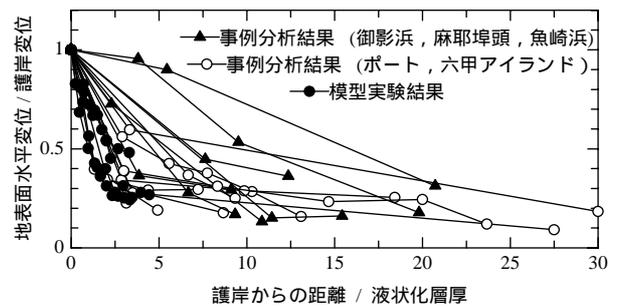


図-10 地表面変位 / 護岸変位と護岸からの距離 / 液状化層厚の関係（事例分析と模型実験）

4. まとめ

流動事例分析より、護岸からの離間距離が100mで地表面変位量は護岸変位量の3割程度まで減衰するものの、200mを越える離間距離まで地表面変位が発生することが示された。また、護岸からの離間距離が液状化層厚の4~6倍程度の位置の地表面変位量は、護岸変位量の3割程度に低減し、それより背面の離間距離では、一定値に漸近する傾向を事例分析および遠心載荷場における模型実験より示した。

参考文献

- 1) Hamada, M. Isoyama, R. and Wakamatsu, K.: *The 1995 Hyogoken-nanbu (Kobe) earthquake liquefaction ground displacement and soil condition in Hanshin Area*, 地震予知総合研究振興会, 1995.
- 2) 港湾技研資料: 1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告, 建設省港湾技術研究所, No.857, 1997.
(2003.10.10 受付)