

護岸の水平移動による液状化地盤の流動量に関する新しい知見

張 至鎬
(技術研究所)

A Study on Ground Displacement of Liquefied Soil Caused by Quay wall Collapse

by Jiho Jang

Abstract

This study investigated the mechanism of liquefaction-induced ground displacement caused by the collapse of a quay wall. The investigation was based on case studies of past earthquakes, 1G tests, and centrifuge tests using a ground model. The ground displacement in the area of the collapsed quay wall was five to ten times greater than the thickness of the liquefied soil layer. The displacement ultimately extended 200~300 meters from the quay wall, which centrifuge tests showed was due to the inclination of the ground surface. This was verified through re-analyses of the ground slope measurements and case studies of the 1995 Kobe earthquake. The results of these tests and case study analyses were used to quantitatively measure the attenuation characteristics of the horizontal displacement of the liquefied soil behind the quay wall.

概 要

既往の流動事例分析による研究成果によれば、流動量が液状化地盤の層厚の5~10倍の距離の領域で急激に変化し、その後の領域ではほぼ一定の流動量に漸近して流動変位が護岸より200~300m以上の広範囲に及んでいることが示されている。そこで本研究では、流動変位が護岸より遠方に及ぶ原因を解明するため、兵庫県南部地震における液状化地盤の流動事例の再分析、重力場の流動模型実験、および遠心載荷場の流動模型実験を実施した。その結果、地盤変位が広い領域までおよぼ原因が地表面の傾斜によることを定量的に示し、護岸移動による液状化地盤の流動量と、護岸からの離間距離による地盤変位の減衰特性を明らかにした。

§ 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^{1),2),3)}。特に液状化地盤の流動によって建物と橋梁の基礎およびライフラインの埋設管路が被害を受けた。液状化地盤の流動による被害は、1964年新潟地震および1983年日本海中部地震などの既往地震でも発生していた^{4),5),6),7)}。

液状化地盤の流動には、地表面の傾斜により液状化地盤が傾斜の上方から下方に変位するタイプ、および護岸の移動・崩壊に起因して、護岸背後の液状化地盤が海や河川などの方向に移動するタイプがある⁸⁾。また、両者の影響を複合的に受け、地盤が変位・移動することも考えられる。

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、液状化地盤の流動が耐震設計法に反映される

ようになり、これらの基準の改訂では、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ことになった。

護岸の移動に起因する背後地盤の流動に関しても、いくつかの耐震設計基準の中に地盤変位の予測手法が定められている^{9),10)}。これらの方法では、まず護岸の移動量を護岸の構造形式や液状化の程度より予測した後、護岸からの離れによる地盤変位の減衰曲線により地盤の水平変位を予測している。護岸の離れによる減衰曲線は、兵庫県南部地震における埋立地等の地割れの幅を計測し、これを累計することによって算定した変位分布に基づいている。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するとされており、耐震設計基準でもこのことが規定されている。

しかしながら、既往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によれば、護岸から200~300

mも離れた地点においても流動変位が計測された例もある³⁾。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、埋立地における地震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、神戸市の埋立て地盤の水平変位の測定結果の分析、重力場の流動模型実験、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。

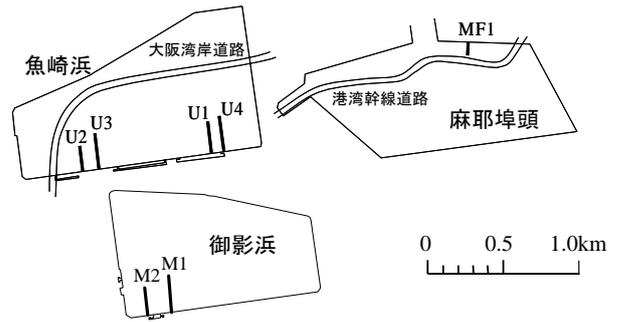


図-1 流動事例分析対象の本土側の測線位置図 (魚崎浜、麻耶埠頭、御影浜)

§ 2. 流動事例分析による研究の成果

液状化地盤の流動分析に用いたデータは、1995年兵庫県南部地震後に、濱田らによって測定された神戸市の埋立て地の流動変位航空写真測量である³⁾。これらの変位のデータから、以下の条件を全て満たしている流動事例を選定し、護岸からの離間距離による地盤変位の減衰特性を分析している。①噴砂などの液状化の発生が確認されており、安定した地盤変位の観測が3点以上存在する。②側線から100m以内に地盤ボーリングデータが存在する。③建物の地下室や構造物の基礎杭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。④護岸天端の水平変位量が測定されている⁸⁾。

上記の条件により図-1、2に示すような総計17本の測線を新たに選定し、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。事例分析に用いた水平変位量、液状化層厚などの情報を表-1にまとめて示すが、測線長さの最大は300mで、推定された液状化層厚は概ね10~15m程度となっていることが分かる。なお、液状化判定手法は道路橋示方書の規定に準じており、判定に用いた設計水平震度は0.6である。

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を示す。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、0.5~1.0m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-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。破線で示した図-1の本土側の埋立地である魚崎浜の対象測線のU1、U4を除くと、地盤変位は概ね液状化層厚の5~10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、最大で推定された液状化層厚の20~30倍の領域まで0.5m以上の地表面変位が観測されている。

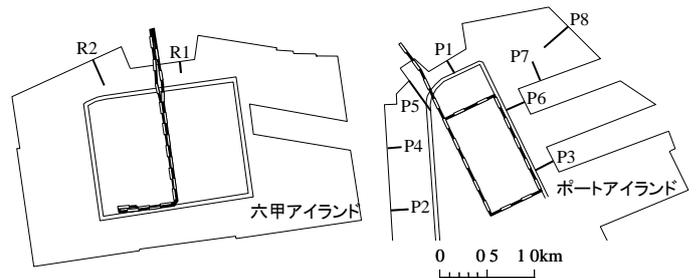


図-2 事例分析対象の人工島の測線位置図 (六甲アイランド、ポートアイランド)

表-1 事例分析対象測線のまとめ (単位: m)

地域	測線名	測線の長さ	護岸の水平変位量	護岸の鉛直変位量	推定液状化層厚
御影浜	M1	204	3.26	1.33	16.5
	M2	132	3.62	0.50	14.5
麻耶埠頭	MF1	76	4.00	0.87	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	4.50	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

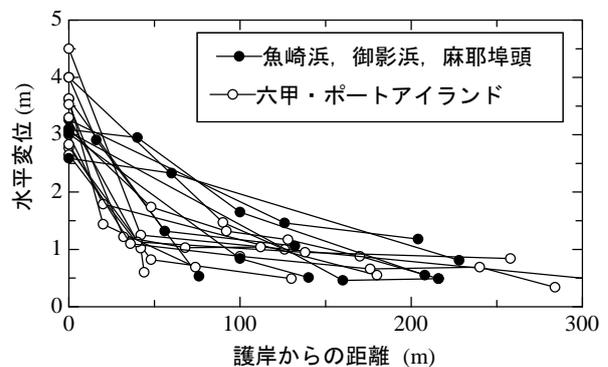


図-3 地表面水平変位と護岸からの離間距離の関係

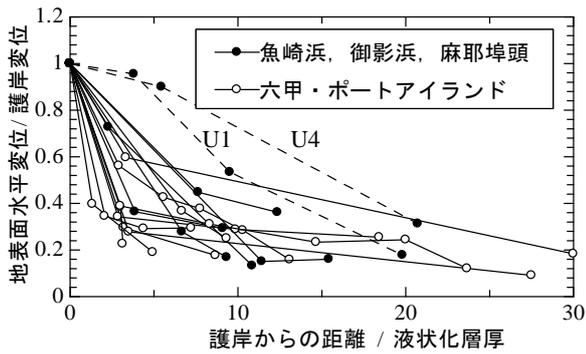


図-4 地表面の水平変位/護岸の水平変位と護岸からの距離/液状化層厚の関係

§ 3. 地表面が水平な模型地盤の流動実験

3.1 実験の方法と条件

護岸背後地盤の地表面が水平な場合について重力場の模型実験を実施した。模型実験に用いた土槽および模型地盤を図-5に示す。土槽は流動方向の長さ5.0m、流動直角方向の水平幅1.2m、高さ0.9mで、土槽側壁の片面は地盤の変状が側面から観察できるようにアクリル板で製作されている。

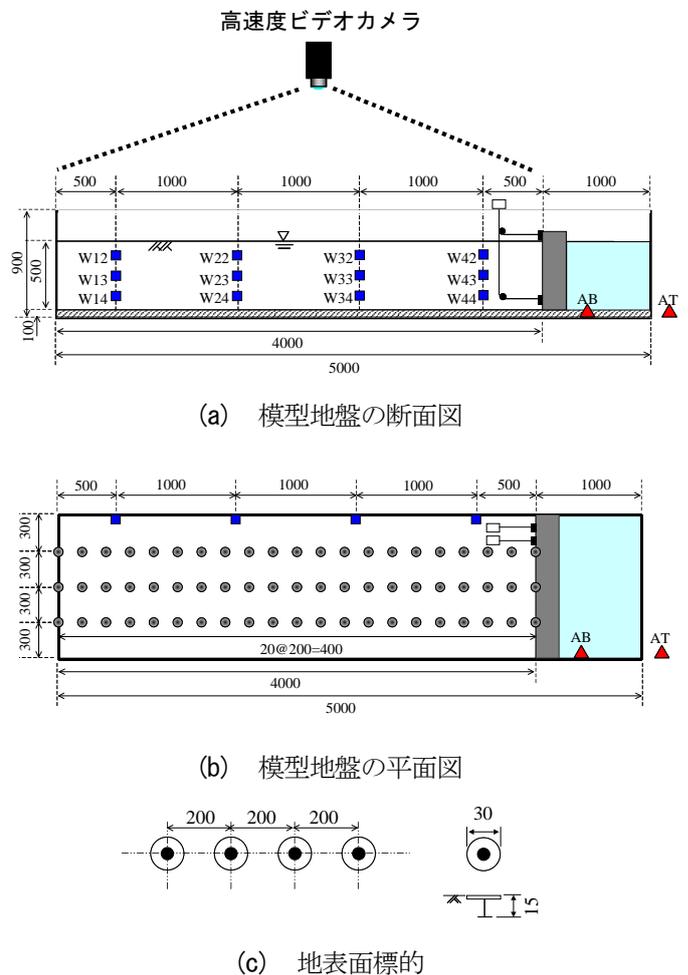
模型地盤は砂と間隙液の混合体が均等になるように、土槽内の間隙液を循環させながら地盤材料をかき混ぜる方法とボイリングによる方法で作成した。本実験の間隙液は水を、地盤材料は平均粒径および均等係数がそれぞれ0.16mm、1.46の珪砂7号を用いた。地表面が水平になるように模型地盤を作成した後の相対密度が目標値に達しない場合は、模型地盤に微小振幅の振動を与えて、所定の相対密度になるように地盤層厚を調整した。模型地盤の相対密度の平均値は表-2に示すように、54%である。また、本実験では水位を地表面とし、模型地盤の全層を液状化させることとした。

護岸模型はモルタル製のブロックであり、重力式護岸を想定した。モルタルブロックの厚さは、転倒に対する安全率が常時では1.2、および加振時では0.5以下になるように設定した。加振による慣性力および液状化による土圧の増分により、模型護岸が水平に移動し、背後地盤には側方流動が発生する。

図-5(b)に示すように地表面には変位測定用の標的が設置されている。高速度ビデオカメラ(100コマ/sec)により標的の動きを撮影した画像を解析し、地表面変位の時刻歴を求めた。地表面の標的は図-5(c)に示すように直径3.0cm、厚さ1mmのプレートであり、長さ1.5cmのピンを模型地盤に差し込むことにより地表面に固定されている。地表面標的は、流動方向に20cm間隔で地表面に3列設置した。護岸天端の変位の時刻

歴も、地盤変位測定と同様に高速度カメラにより測定した。図-5(a)に示すように地盤中には間隙水圧計を4断面に設置し、土槽底版と振動台には加速度計を2箇所を設置した。さらに、模型護岸の天端と底部にはワイヤー変位計を設置し、護岸の回転モードを推定した。

表-2に4ケースの模型実験の条件を示す。模型地盤の層厚は27.5cm、38.5cm、48.2cm、58.1cmの4種類である。本実験の目的は護岸からの離間距離による地盤の水平変位の減衰特性を明らかにすることにあるため、なるべく遠方まで水平変位を計測する必要があるが、case4~case1で模型地盤厚の7~15倍の長さを有している。模型地盤を振幅約450cm/s²の正弦波で加振し液状化させ、いずれの実験ケースにおいてもほぼ全層が液状化状態に達していることを確認した。



▲ : 加速度計 ■ : 水圧計 ■ : 模型護岸(モルタルブロック)
□ : 地中変位計 ● : 地表面標的

図-5 重力場における模型実験の概要
(case3 : 層厚 48.2cm)

3.2 地表面が水平な場合の変位の減衰特性

図-6に模型地盤の層厚が50cmの場合(表-2に示す case3)の実験結果を示す。図-6(b)、(c)に示した水圧計の記録によれば、加振開始より約1.0秒で、模型地盤最深部の土槽底部より5cmに設置した水圧計W14、W24、W34の過剰間隙水圧比の記録はほぼ1.0に達しており、模型地盤は完全な液状化状態に達したと考えられる。図-6(d)に示した護岸と地表面の変位によれば、模型地盤が液状化に達した1.0秒以降に、護岸の変位は急激に増加し、護岸背後にも徐々に水平変位が発生している。図-6(d)に示すように加振開始から4.0秒付近からは護岸の水平変位の増加の割合は減少する。このことは、図-6(c)に示す護岸天端と底部の相対変位の記録から分かるように、4.0秒付近からは護岸底部の変位が大きくなり、護岸天端の海側への回転が小さくなったためと推定される。

地表面変位の減衰特性の分析対象時刻は、地盤が完全に液状化に達した後の時間領域であり、かつ護岸の水平変位が安定して海側への変位が増加する時間領域とする。分析対象時刻はいずれの実験ケースでも2~4秒であり、この時間帯の1秒間隔において分析した。

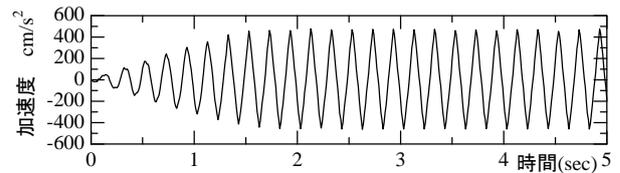
図-7は、表-2に示した全ての模型実験について、解析対象の時刻毎に護岸からの離間距離と地表面の水平変位の分布を示したものである。横軸の0cmで表示された値は護岸天端の水平変位である。これらの図によれば、護岸からの離間距離により地表面変位の減衰は、対象時間に関係なくほぼ相似形となっていることが分かる。

図-8は図-7に示した水平変位の減衰曲線の縦軸を、護岸変位によって除し正規化したもので、それぞれ対象時刻における減衰曲線の平均値である。図-8によれば、地表面変位は護岸から離れるに従い小さくなっており、液状化層厚が厚いほど、地表面変位がより遠方に発生していることが分かる。

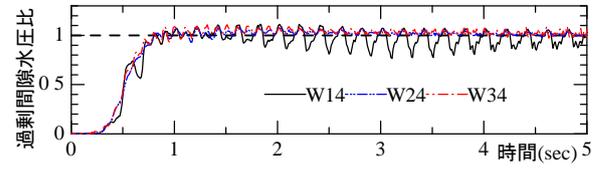
図-8の横軸を液状化層厚、すなわち本実験での模型地盤の層厚で除し正規化した結果を図-9示す。これによれば、地表面の水平変位量は護岸背後の地点で急激に減衰するが、それ以降の領域では変位が徐々に減衰し、護岸からの距離が液状化層厚の7~10倍になる地点で水平変位はほぼゼロに向かって収束している。

表-2 実験条件(重力場)

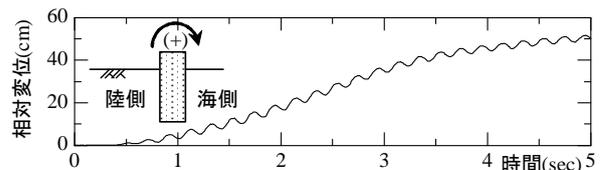
実験名	模型地盤層厚 (cm)	流動方向長 地盤層厚	相対密度 (%)	加振加速度 (gal)
case1	27.0	14.8	54.9	458
case2	38.5	10.4	54.8	476
case3	48.2	8.3	54.1	474
case4	58.1	6.9	52.6	469



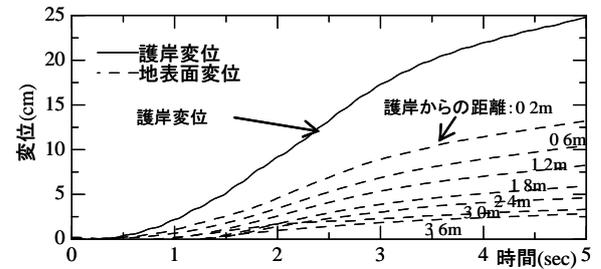
(a) 土層底面の加速度



(b) 過剰間隙水圧比 (W14、W24、W34)



(c) 護岸天端と底部の相対変位



(d) 護岸と地表面変位

図-6 case3 (層厚 48cm) の実験結果

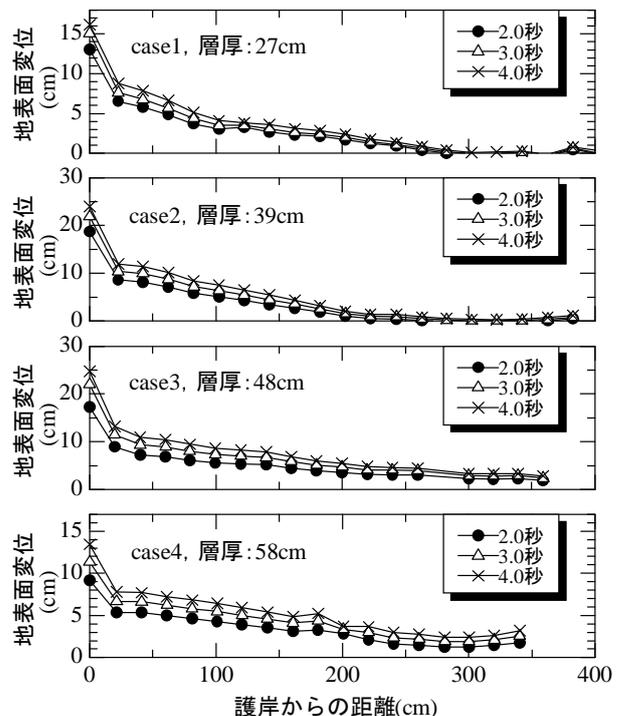


図-7 地表面の水平変位と護岸からの距離の関係

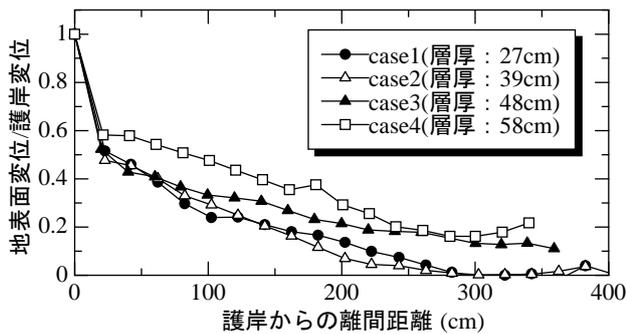


図-8 地表面変位/護岸変位と護岸からの距離の関係 (重力場の実験)

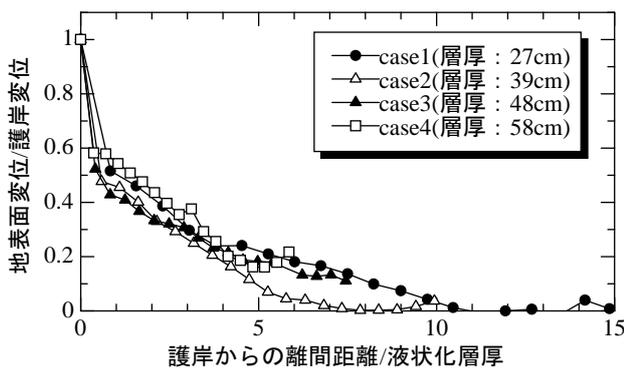


図-9 地表面変位/護岸変位と護岸からの距離/液状化層厚の関係 (重力場の実験)

3.3 地表面変位の減衰特性の考察

兵庫県南部地震による流動事例の分析結果、および重力場における地盤が水平な模型地盤の実験による護岸背後地盤の水平変位の減衰特性を図-10に併せて示す。図-10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。前述したように、兵庫県南部地震による流動事例の分析結果では、護岸からの離間距離が液状化層厚の5~10倍で地盤変位が急激に減少するが、その後液状化層厚の20~30倍の領域でも護岸変位の20~30%程度の地盤変位が発生している。

これに対し重力場の模型実験では、液状化層厚の10倍程度の離間距離で地盤変位がほぼ0に収束しており、1995年兵庫県南部地震による事例分析結果とは異なった変位の減衰特性を示している。模型実験と事例分析との減衰特性の差については、以下のように解釈することが出来る。

1964年新潟地震、1983年日本海中部地震など既往地震の傾斜地盤における航空写真測量を用いた流動事例分析によれば^{6),7)}、数mのオーダーで地表面変位が観測された地域の平均的な地表面勾配は、0.5~3%程度であり、いずれも工学的に判断して極めて緩やかな斜面で

あることが報告されている^{6),7)}。また、本研究で対象とした神戸市・西宮市の埋立て地域も、わずかながらも地表面傾斜を有しており、このことは、護岸の背後地盤の流動変位は、護岸移動および地表面傾斜の両者の影響を受けている可能性があると考えられる。すなわち、護岸の近傍領域では護岸移動による影響が大きいですが、護岸から遠方になると護岸移動が地表面変位の発生に及ぼす影響は少なくなり、地表面勾配の影響が卓越していると解釈できる。

重力場の模型実験は、地表面を水平としているため、護岸背後地盤の流動変位には護岸の水平移動のみが影響したと推定される。このため、図-10に示したように事例分析と模型実験では明らかに異なる減衰特性の結果になったと考えられる。このことを考慮し、後述する遠心載荷場の模型実験および流動事例の再分析では、護岸背後地盤の地表面傾斜の影響を定量的に考慮し、地表面の水平変位の減衰特性を検証する。

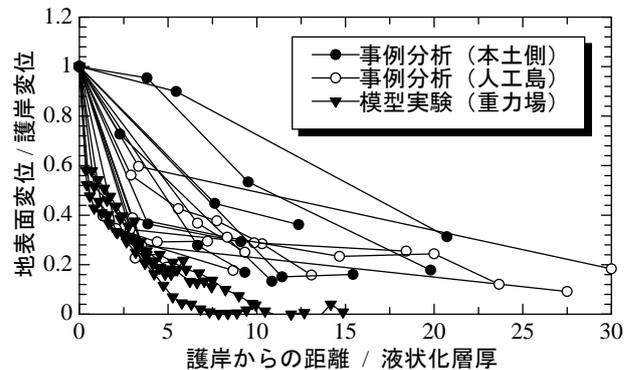


図-10 地表面変位/護岸変位と護岸からの距離/液状化層厚の関係 (事例分析、重力場の実験)

§ 4. 地表面傾斜を考慮した遠心載荷場の模型実験

4.1 実験の方法と条件

遠心載荷場の模型実験に用いた土槽および模型地盤概要の一例(case3)を図-11に示す。土槽は流動方向190cm、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ともに剛である。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。

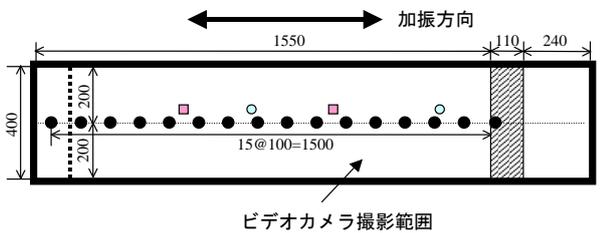
本実験では、護岸背後地盤の傾斜の有無による地表面変位の減衰特性を把握することを目的としているため、表-3に示すように地表面勾配のみを変化させ、液状化層厚、相対密度、加振加速度などの実験条件はほぼ同一とした。模型地盤の相対密度は50%であり、地盤の厚さはいずれの実験も30cmとした。遠心加速度30gを考慮すると、模型地盤厚は実物に換算して9mと

なり、液状化層厚に対する護岸からの離間距離は約 5 倍程度となる。模型地盤の加振には正弦波加速度を用いており、最大加速度は約 150m/s^2 で、実物に換算すれば 500gal に相当する。

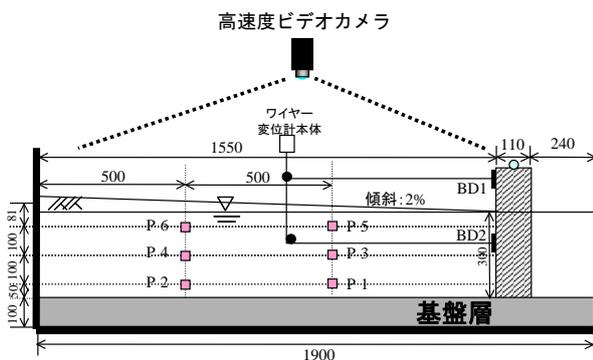
模型地盤は、乾燥砂を空中落下させる方法で作成した。所定の高さまで乾燥砂を空中から撒きだし、余分な砂は掃除機を用いて吸い取ることで地表面に 1~3% の傾斜を設定した。本実験の間隙液は水で、土槽底部より注入して模型地盤を飽和状態とした。遠心加速度作用による間隙水の透水性に関する相似性は考慮されていないが、これは、砂と水の混合体が液状化をおこし流動するとき、護岸からの離間距離により地盤変位の減衰性の解明に重点を置いているためである。

図-11(b)に示す位置に加速度計、過剰間隙水圧計が設置されている。図-11(a)に示すように、地表面には変位測定用の標的が設置されており、高速度カメラ (500 コマ/sec) により標的の動きを撮影し、地盤変位の時刻歴を求めた。護岸変位の時刻歴も同様にして求めた。また、模型護岸の天端と中間部にはワイヤー変位計設置し、回転モードを把握した。

護岸を含む模型地盤を 30g の遠心載荷場で加振して模型地盤を液状化させ、慣性力と液状化による土圧の増加による護岸の水平移動を発生させ、背後地盤に流動を生じさせた。



(a) 模型地盤の平面図



(b) 模型地盤の断面図

- : 地表面標的 ▨ : 模型護岸
- ┃ : 地中変位計 ○ : 加速度計 □ : 過剰間隙水圧計

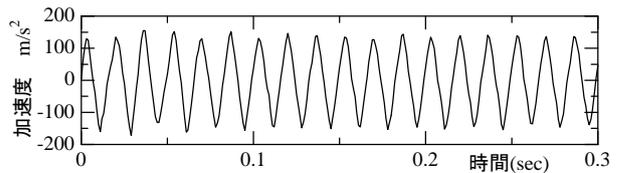
図-11 遠心載荷場における模型実験の概要 (case3、地表面傾斜 2%)

表-3 実験条件 (遠心載荷場)

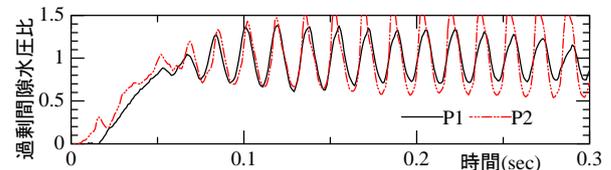
実験名	模型地盤層厚 (cm)	地表面傾斜 (%)	相対密度 (%)	加振加速度 (m/s^2)
case1	30	0	51	157
case2	30	1	49	138
case3	30	2	51	157
case4	30	3	49	138

4.2 地表面が傾斜している場合の変位の減衰特性

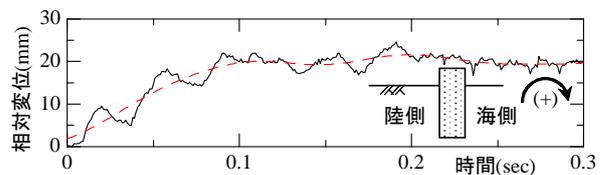
図-12 に実験結果の一例 (case3 : 地表面傾斜 2%) を示す。図-12 (b) によれば、加振開始より約 0.05 秒で土槽底部より 5cm の位置に設置された過剰間隙水圧比の P1、P2 はほぼ 1.0 に達しており、模型地盤全体が完全な液状化状態に達したと考えられる。図-12 (d) からは、加振開始とともに護岸と地表面には水平変位が発生していることが分かる。図-12 (c) に示した護岸天端と中間部の相対変位の時刻歴を見ると、加振開始より 0.15 秒以降では相対変位の増加は小さく、この時間帯から護岸の海側への回転が小さくなったと考えられる。



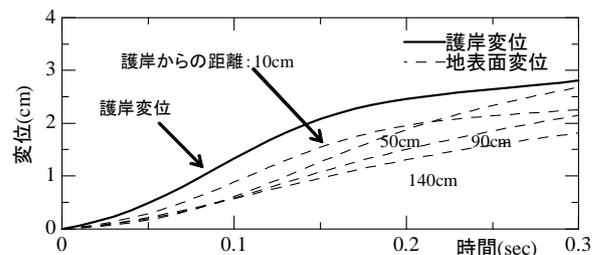
(a) 土槽底面加速度の時刻歴



(b) 過剰間隙水圧比 (P1・P2)



(c) 護岸天端と中間部の相対変位



(d) 護岸と地表面変位の時刻歴

図-12 遠心載荷場の実験結果 (case3 : 地表面傾斜 2%)

地表面変位の減衰特性の検討は、地盤が液状化に達した後の時刻から、護岸の水平移動に伴い地表面変位が安定して増加し続けている時間帯を対象とした。それぞれの実験によって若干の時間差はあるが、概ね0.05～0.10秒の時間帯を対象とした。

図-13に遠心載荷場の実験で得られた減衰特性を示す。同図の縦軸は、地表面変位を護岸変位で除したもので、横軸は護岸からの離間距離である。分析対象時刻によらず、地表面はほぼ一定の減衰特性を示していることが分かる。また、地表面傾斜を考慮していないcase1実験を除いた他の実験では、遠方まで地表面変位が発生している。

図-13に示した各々実験における地表面変位の平均値を縦軸に、護岸からの離間距離を液状化層厚（本実験では30cm）で除した値を横軸にしたものを図-14に示す。なお、図-13に示した変位の減衰特性の整理方法は前述した重力場の実験と同様で、検討対象時刻の平均値である。これによれば、傾斜0%のcase1での地表面変位は、液状化層厚の4～5倍の領域においてほぼ0に収束している。一方、地表面に傾斜を設定した実験での地表面変位は、液状化層厚の2倍の領域からほぼ一定の変位量を示しており、土槽端部においても護岸変位の30%～50%の地表面変位が発生している。また、傾斜が大きいほど、概ね地表面変位量大きい傾向を示している。このような減衰特性の相違は、地表面傾斜以外の諸条件を同一したことから、地表面傾斜の有無にあると考えられる。後述する流動事例の再分析では、実地盤において地表面勾配が流動地盤変位に与える影響について定量的に検討する。

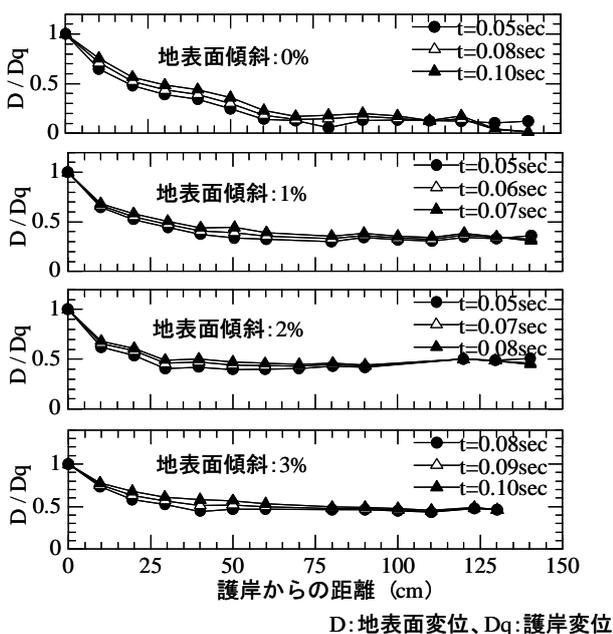


図-13 地表面変位の減衰特性（遠心載荷場の実験）

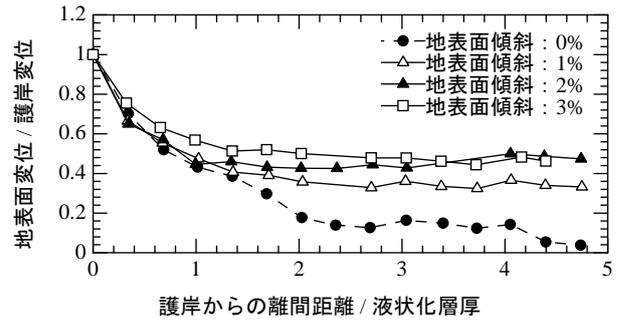


図-14 地表面変位の減衰特性（遠心載荷場の実験）

§ 5. 流動事例の再分析と考察

5.1 事例分析の方法

前述した1995年兵庫県南部地震での流動事例について地表面傾斜の影響の検討を含めた再分析を行った。再分析対象は、内陸から水際部に向かって連続的な勾配であり、かつ護岸からの離間距離が50m以降の領域においても一様な地盤変位が観測された測線とした。これらの地点は、図-1、2に示した測線のうち、ポートアイランドのP1とP7、六甲アイランドのR1とR2、および御影浜のM1、M2である。上記の6地点の測線について水際部から内陸に向かっての地表面標高を、地震前の航空写真を用いて連続的に求め、これをもとに護岸から測線終点までの地表面の平均勾配を最小2乗法より求めた。

図-15に再分析対象とした測線の地震前の地表面標高と地表面変位分布を示す。図-15によれば、分析対象の地表面標高は、護岸から陸側に向かって高くなっており、平均的な地表面勾配は0.4～0.7%であることが分かる。いずれの測線も1%以下の緩やかな勾配ではあるが、既往地震における流動事例の調査結果を考慮すれば、十分に流動変位が発生し得る地表面勾配であると考えられる^{6),7)}。図中に示した地表面変位の平均は、護岸の変位量を除いた護岸背後地盤の変位量で、全測線において1m前後となっている。

図-15に示した測線での地盤変位は、護岸から50mの離間距離で大きく減衰するものの、最大で300mにも及ぶ領域でも観測されている。護岸から50mないし100m以降の離間距離での地盤変位が、護岸崩壊の影響によって発生したとすれば、前述の地表面傾斜を考慮した遠心載荷場の実験結果とは矛盾することになる。本論文の前半に述べたように、液状化地盤の流動変位の発生は、護岸崩壊および地表面勾配の影響を同時に受けることも考えられる。このため、護岸背後の遠方で観測された地盤変位が、地表面勾配の影響を受けて発生した可能性について、定量的に検討することとす

る。

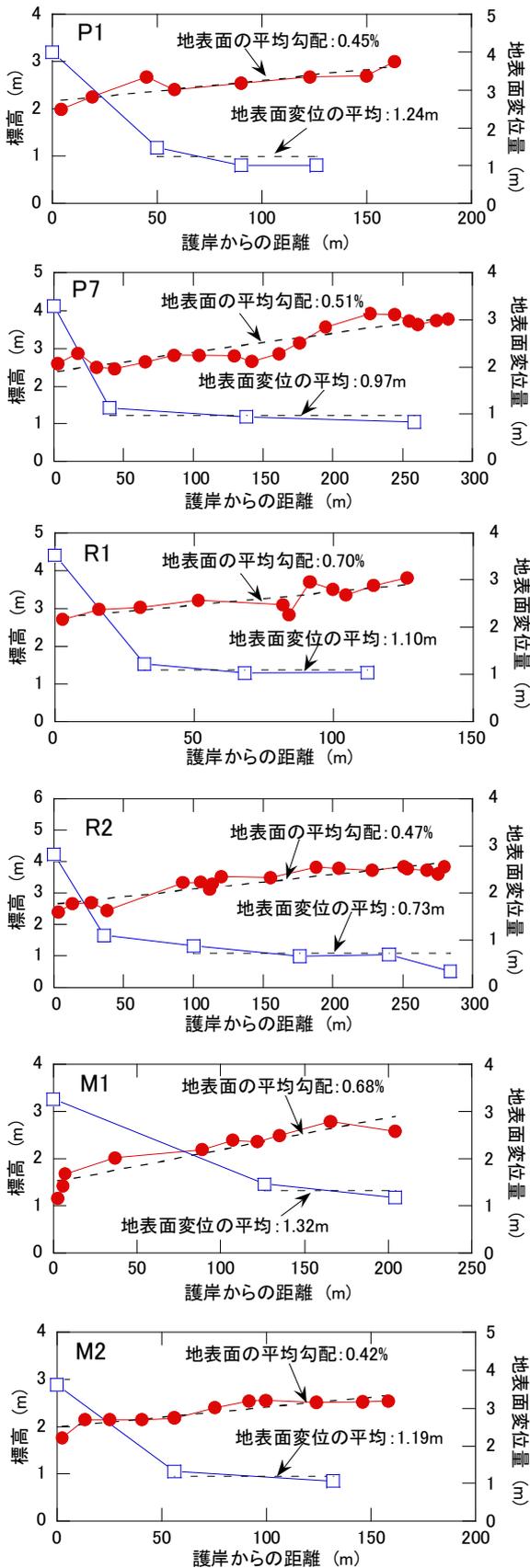


図-15 護岸からの距離と地表面標高・地表面変位の関係 (流動事例再分析、6地点)

5.2 地表面勾配が変位に及ぼす影響の検討

濱田らは、重力場、遠心载荷場における流動模型実験、および中空ねじり試験による液状化土の物性試験から液状化砂の流動特性を明らかにして来ている^{11),13)}。これによれば、液状化砂の粘性係数は液状化層厚、あるいは鉛直拘束圧の約1.5乗に比例して増大すること、相対密度の約2.0乗に比例して増大するが示されている^{11),13)}。これらの液状化砂の流動特性の知見を、実地盤への適用性を考慮して図-16に示すように液状化層が複数層で構成されている場合を想定し、傾斜地盤における水平変位量の予測式を提案している。式(1)に濱田らによる地表面変位量の予測式を示す。この式は、地表面の平均勾配(θ)、液状化層のN値、地盤の物性値により地表面の変位量を予測するものであり、既往地震の流動事例により検証されている。予測式による水平変位は、1964年新潟地震、1983年日本海中部地震、および1995年兵庫県南部地震における傾斜地盤での水平変位の実測値とほぼ2倍から0.5倍の精度で一致することを示している¹²⁾。

図-15に示した6地点の地表面変位の平均値に平均勾配が及ぼした影響を、式(1)を用いて明らかにする。

$$D_s = 36 \sum_{i=1}^n \left(\frac{\sigma_{vi} \cdot H_i + \frac{1}{2} \cdot \gamma_i \cdot H_i^2}{\left(\sigma_{vi} + \frac{1}{2} \cdot \gamma_i \cdot H_i \right)^{3/2} \cdot \bar{N}_i} \right) \cdot \theta \quad (1)$$

ここに、 \bar{N}_i : i番目の液状化層の鉛直拘束圧によって補正されたN値

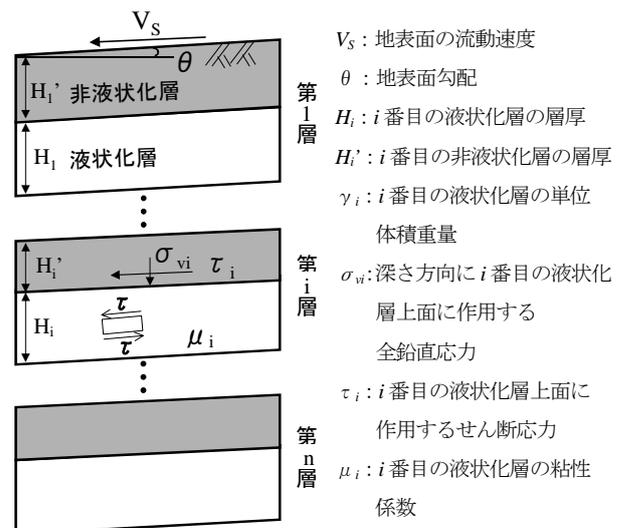


図-16 傾斜地盤における液状化層の流れ

再事例分析対象6地点の護岸から100m以上離れた位置での地表面変位の平均値と、式(1)により求めた地表面変位の予測値の比較を図-17に示す。図-17の横軸は式(1)の予測式による地表面変位量で、縦軸は実測の地表面変位である。予測値算定に必要な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」をもとにした¹⁴⁾。図中には、傾斜地盤の水平変位の予測式構築に用いた既往地震によるデータも併せて示した。これによれば、分析対象の地表面変位の予測値と実測値は概ね一致しており、実地盤において護岸より200~300mの広く分布した地盤の水平変位量は、地表面勾配によるものと推定できる。

以上のことを総合すると、護岸の水平移動による背後地盤の変位は、図-18に示すように2つの領域に分けられる。すなわち、図-18のZoneAは護岸移動の影響が卓越する領域であり、ZoneBは護岸移動による影響は減少し地表面傾斜の影響が卓越する領域である。本研究の重力場の模型実験、および流動事例の再分析結果によれば、ZoneAの範囲は液状化層厚の概ね5~10倍で、ZoneBでは1%以下の小さい地表面勾配でも約1.0mの地表面変位が発生しその範囲は液状化層厚の30倍まで及んでいる場合もある。護岸背後地盤の地表面変位は複合的な要因によって発生していると考えられる。

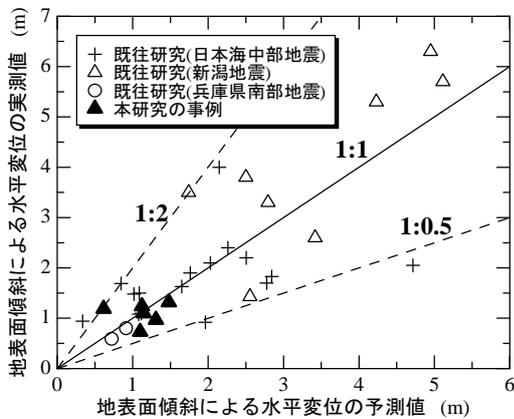


図-17 地表面変位の予測値と実測値の比較

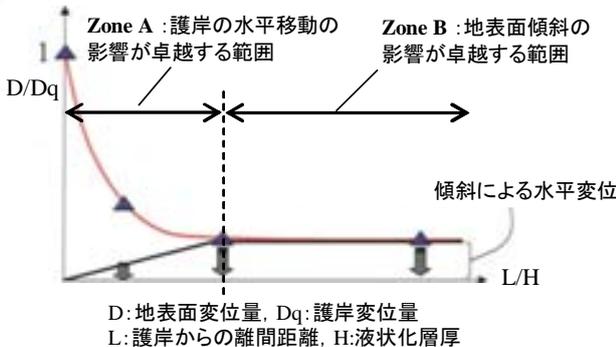


図-18 護岸背後地盤の地表面変位の減衰特性

§ 6. 結論

本研究は、流動事例分析、重力場の模型実験、および遠心載荷場の模型実験により護岸背後地盤の水平変位の減衰特性を明らかにしたもので、以下のことが得られた。

- (1) 1995年兵庫県南部地震の流動事例の分析から、液状化層厚の5~10倍の領域で急激に減少するが、その後の200~300mも離れた地点においても、1.0m程度の地盤変位が発生している。
- (2) 重力場の模型実験から、護岸背後地盤の地表面が水平な場合は、液状化層厚の約10倍の離間距離で地盤変位がほぼ0に収束するが、これは、地盤を水平としたことから、地盤の変位量には護岸水平移動の影響のみが作用したためであることが示された。
- (3) 護岸背後地盤の地表面が傾斜した場合の遠心載荷場の模型実験から、地表面傾斜による流動変位の減衰特性を明らかにした。地盤が水平な地盤と傾斜地盤では明らかに異なる減衰特性であることを示し、地盤傾斜の影響により地表面変位は護岸から遠方にまで発生することが示された。
- (4) 1995年兵庫県南部地震の流動事例の再分析を行い、地表面傾斜が流動変位量に及ぼす影響を明確にした。護岸から50~100m以降の領域で発生した一定の地盤変位は、地表面傾斜の存在により発生したことを、液状化地盤の傾斜地の予測式との比較を行うことで検証した。

本研究により、護岸の水平移動による液状化地盤の流動変位の減衰特性が明らかにされた。埋め立て地盤において、液状化地盤の流動を考慮し基礎構造物などの耐震設計、ならびに人工島に対する液状化による地盤流動の耐震性を評価するとき、地盤変位の考慮すべき範囲および地盤変位量の設定に基礎的な知見を与えることができたと考えている。

謝辞

本研究論文の作成にあたり、早稲田大学創造理工学部の濱田政則教授には、多大なご協力と有意義な意見を頂きました。末筆ながら大変感謝申し上げます。

<参考文献>

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：“阪神・淡路大震災調査報告” 土木構造物の被害 第5章 港湾・海岸構造物、第6章 河川・砂防関係施設、地盤工学会、土木学会、1997.
- 2) 土木学会関西支部：“大震災に学ぶ—阪神・淡路大震災調査研究委員会報告書”、1998年6月.
- 3) 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.
- 4) 濱田政則、安田進、磯山龍二、恵本克利：“液状化による地盤の永久変位の測定と考察”、土木学会論文集、第376号/Ⅲ-6、pp. 211-220、1986.
- 5) 濱田政則、安田進、磯山龍二、恵本克利：“液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究”、土木学会論文集、第376号/Ⅲ-6、pp. 221-229、1986.
- 6) 浜田正則、安田進、若松加寿江：“液状化による地盤の大変位とその被害”、土と基礎、38-6 (389)、pp. 9-14、1990.
- 7) Hamada, M. and O'Rourke, T.D. (Eds): “Case study of Liquefaction and lifeline performance during past earthquake”、Vol. 1 Japanese case studies、Technical Report NCEER-92-001、1992.
- 8) 濱田政則、若松加寿江：“液状化による地盤の水平変位の研究”、土木学会論文集、No. 596/Ⅲ-43、pp. 189-208、1998.
- 9) 鉄道総合技術研究所：“鉄道構造物等耐震設計標準・同解説”、1998.
- 10) 日本ガス協会：“高圧ガス導管液状化耐震設計指針”、2001.
- 11) 濱田政則、島村一訓、柳瀬和俊、中村正樹、田中淳寛：“液状化土の流動特性に関する考察”、第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集、pp. 261-266、2001.
- 12) 濱田政則、若松加寿江、島村一訓、田島幸治、楡達郎：“液状化地盤の水平変位量の予測法に関する研究”、第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集、pp. 267-272、2001.
- 13) 濱田政則：“液状化砂の流動特性に関する実験的研究”、土木学会論文集、No. 792/Ⅲ-71、pp. 13-225、2005.
- 14) (財)建設工学研究所発行：“神戸の地盤データベース「神戸 JIBANKUN」”