

津波による円柱周辺地盤の動的挙動に関する大型実験

加藤 史訓*・佐藤 慎司**・Harry Yeh***

1. はじめに

津波が海岸に襲来すると、海岸域に設置された構造物周辺で洗掘等の地盤変動が生じ、構造物の倒壊等の被害を引き起こすことがある。海岸域には、護岸のような直線状の平面形を持つ構造物のほか、燃料タンクのような円柱構造物など多様な構造物が設置されており、それぞれについて津波遡上時の安全性を確保する必要がある。しかし、通常の波浪や流れによる地盤変動に比べて、津波による構造物周囲の地盤変動に関する研究は非常に少ない。

津波による護岸周辺の洗掘は堤内の地形により強く支配されることが宇多ら (1987) により明らかにされている。また、津波による護岸前面地盤の洗掘については、戻り流れによる洗掘と護岸前面の水層厚などとの関係が西村・堀川 (1979) や野口ら (1997) により明らかにされている。しかし、津波による円柱構造物周囲の地形変化に関しては検討した例が少ない。

そこで、津波による円柱構造物周辺地盤の動的挙動を明らかにするため大型室内実験を行った。

2. 実験条件

長さ 135 m, 幅 2 m, 深さ 5 m の大型水路において、直径 $B=50$ cm の透明な円柱を 1/20 勾配の海浜上に設置し津波を遡上させた。海浜模型は中央粒径 0.35 mm のほぼ均一な砂で形成した。円柱周辺の波高、流速、間隙水圧を測定するため、それぞれの測定器を図-1 のように設置した。また、円柱周囲の地盤の挙動を円柱の内部に設置した超小型 CCD カメラで撮影して画像解析するとともに、造波前後に円柱周辺の長さ 4 m, 幅 1 m の領域で地形測量を行った。

実験は全部で 11 ケース行った。このうち、9 ケースでは円柱模型を海浜に設置し、2 ケースでは円柱を設置していない。

* 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室研究員
** 正会員 工博 東京大学助教授 大学院工学系研究科 (前建設省土木研究所海岸研究室長)
*** 正会員 Ph.D. Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Washington

表-1 は各ケースの水深 h , 波高 a , 波高水深比 a/h , 遡上高を示している。波高水深比は、ケース 1~3 で 0.13, ケース 4~6 で 0.09, ケース 7~9 で 0.05 とした。水深は、ケース 1, 4, 7 で 2.25 m, ケース 2, 5, 8 で 2.45 m, ケース 3, 6, 9 で 2.65 m とした。水深が 2.25 m, 2.45 m, 2.65 m のとき、円柱はそれぞれ汀線より 4 m 陸側, 汀線上, 汀線より 4 m 海側となる。

円柱の有無が遡上高に影響するかどうか調べるため、円柱のあるケースとないケースについて同一の水位及び波浪条件で遡上高を測定した。水深 2.65 m, 波高 0.24 m

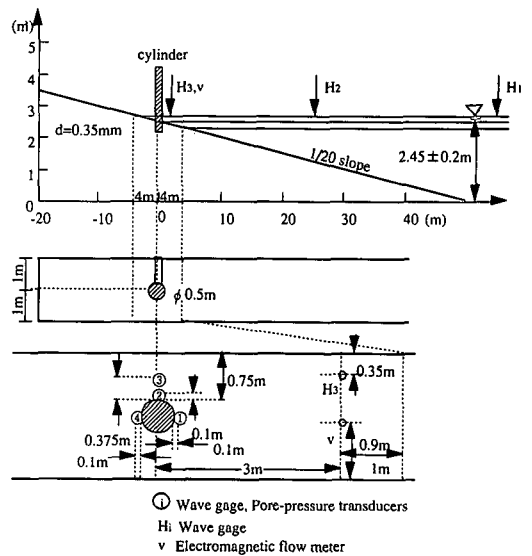


図-1 実験模型

表-1 波浪条件

Case	Water Depth (m)	Wave Height (m)	a/h	Runup Height (m)	
1	2.25	0.29	0.13	0.695	
2	2.45	0.32	0.13	0.755	
3	2.65	0.34	0.13	0.765	
4	2.25	0.20	0.09	0.580	
5	2.45	0.22	0.09	0.610	
6	2.65	0.24	0.09	0.650	
7	2.25	0.11	0.05	0.420	
8	2.45	0.12	0.05	0.435	
9	2.65	0.13	0.05	0.465	
10	2.65	0.24	0.09	0.670	no cylinder
11	2.45	0.22	0.09	0.660	no cylinder

のケース6とケース10を比較すると、円柱がない方が2 cm 遡上高が大きいことがわかる。また、水深2.45 m、波高0.22 mのケース5とケース11を比較すると、円柱が

ない方が5 cm 遡上高が大きいことがわかる。以上のように円柱の存在による遡上高の低下はわずかなので、実験水路の幅は実験波の遡上に及ぼす水路壁面の影響を無視できるほど十分に広いと考えられる。

3. 造波前後の地形測量結果

造波前後の地形変化を把握するため、円柱の中心からガラス壁までの幅1 m、円柱の前後2 mの範囲で測量を行った。測量ピッチは、造波前が20 cm、造波後が円柱の中心から50 cmまでの範囲では5 cm、その外側では10 cmとした。

図-2は、各ケースにおける円柱沖側での造波前後の地形変化量を示している。地形変化量、円柱からの距離とも円柱の直径Bで除して無次元化している。円柱が汀線にあるケース2および5でのみ円柱面ごく近傍での局所洗掘が認められた。

図-3は、各ケースにおける円柱側面での造波前後の地形変化量を示している。多くのケースで顕著な局所洗掘が認められ、円柱から10 cm離れた点で最大10 cmの洗掘があった。波高が大きいほど、また円柱が海側にあるほど洗掘量が大きくなる傾向であった。また、円柱が汀線にあるケースでは、全体的に侵食されていた。

図-4は、各ケースにおける円柱陸側での造波前後の地形変化量を示している。多くのケースで局所洗掘が認められ、円柱から5 cm離れた点で最大7.7 cmの洗掘があった。波高が大きいほど洗掘量が大きくなる傾向が認められた。また、円柱が汀線にあるケース2およびケース5では、同じ波高水深比で円柱の位置が異なるケースより洗掘が激しいとともに、円柱から1 m以上離れたも侵食されている。

図-5は各ケースにおける2 cm以上洗掘された領域の面積Aと入射波高との関係を示している。面積は円柱の面積A_cで、入射波高は初期水深で除して無次元化している。洗掘面積は、円柱が陸上にあるケースに比べ、

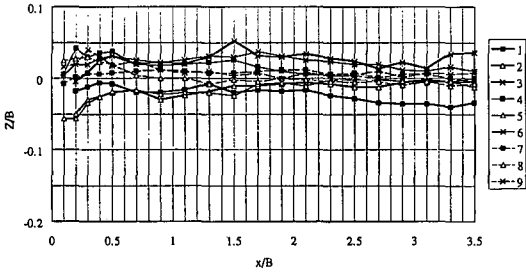


図-2 円柱沖側の地形変化

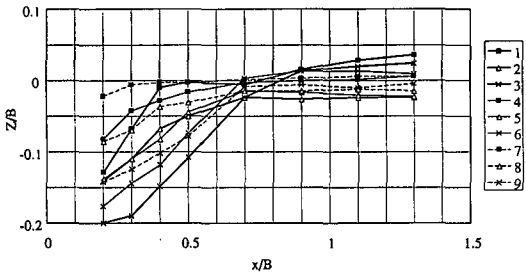


図-3 円柱側面の地形変化

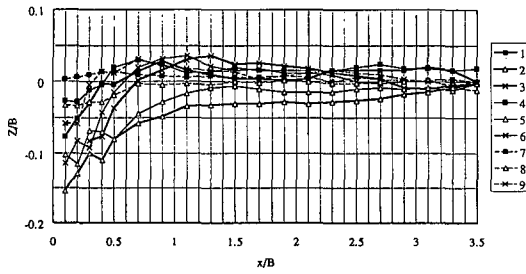


図-4 円柱陸側の地形変化

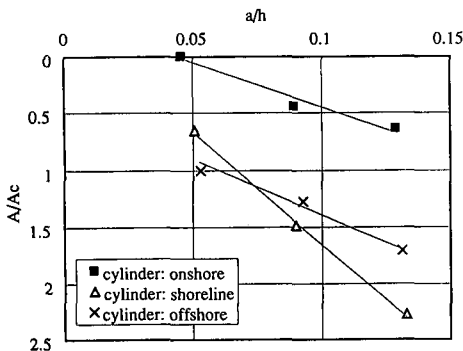


図-5 入射波高と洗掘面積の関係

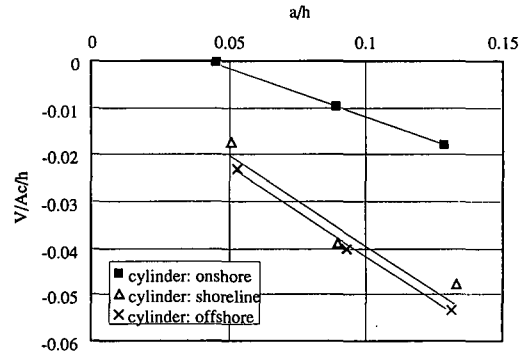


図-6 入射波高と洗掘体積の関係

円柱が汀線や海中にあるケースの方が大きかった。また、円柱が汀線にある場合、円柱が陸上や水中にある場合に比べ、入射波高の増加により洗掘面積が大きくなる傾向が認められた。

図-6は円柱周辺の長さ1m、幅0.5mの領域における洗掘体積 V と入射波高との関係を示したものである。洗掘体積は円柱の面積と初期水深で、入射波高は初期水深で除して無次元化している。洗掘面積と同様に、円柱が陸上にあるケースに比べ、円柱が汀線や海中にあるケースの方が体積変化が大きかった。また、洗掘体積と入射波高の比例関係が円柱の位置別に認められた。

4. 画像から読み取った円柱周りの洗掘状況

造波前後の地形測量は、設定した孤立波による地形変化のみならずその反射波による地形変化も含んだ地形を計測するものである。また、洗掘後の埋戻しにより、測量で得られる造波後の洗掘量が遡上時における最大洗掘量ではないことがあり得る。そこで、孤立波の遡上時および流下時における円柱の洗掘状況を調べるため、円柱の内側から円柱周りの底面を3台の超小型 CCD カメラで撮影し画像解析を行った。

図-7はケース3における円柱周りの底面の変動を撮影したものである。camera 1 (左側の列) では沖側から側面にかけて、camera 2 (中央の列) では側面を中心として、camera 3 (右側の列) では側面から陸側にかけての範囲が撮影されている。いずれも、上段が実験前、中段が遡上後、下段が流下後である。各画像の中の黒線は底面を示している。この図から、ケース3では激しい洗掘が遡上時に側面で、流下時に陸側で生じていることがわかる。このような画像から、各ケースにおける円柱周囲の3点(沖側、円柱側面、円柱陸側)での洗掘深を読み取った。なお、底面の表層が流動化している場合には、流動化していないところとの境界を読み取った。

図-8は、円柱沖側における遡上時の最大洗掘深、遡上直後の洗掘深、流下時の最大洗掘深および流下後の洗掘深を示している。いずれも円柱の直径で除して無次元化している。遡上時には多くのケースで洗掘が生じ、流下時には遡上時の洗掘が大きいケースで堆積していた。この傾向は円柱が陸上や汀線にあるケースで顕著で、特にケース4では遡上後の洗掘深が流下後の洗掘深の5倍となっていた。遡上時の洗掘深について同一波高水深比のケースを比べると、波高水深比が0.13および0.05の時には円柱が陸側にあるほど大きいのに対し、波高水深比が0.09の時には円柱が汀線にあるケース5がもっとも大きかった。ケース5では、碎波した孤立波が円柱のすぐ沖側の地盤に突っ込んでいたことがビデオ画像で確かめられていた。よって、碎波位置によっては洗掘深が著

しく大きくなる可能性があると考えられる。

図-9は、円柱側面での洗掘深を図-8と同様に示したものである。遡上時には全てのケースで洗掘が生じ、流下時には遡上時の洗掘深が大きいケースで堆積、小さい

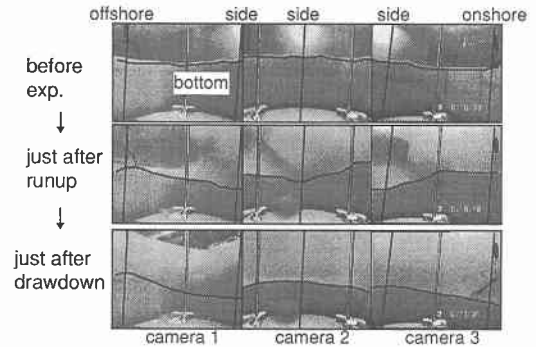


図-7 円柱周りの洗掘

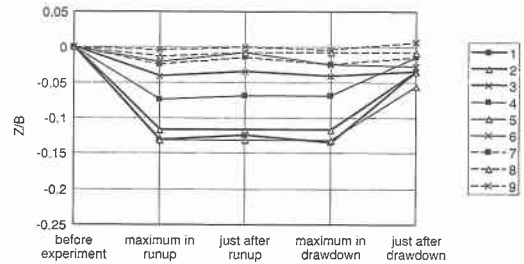


図-8 円柱沖側の洗掘量

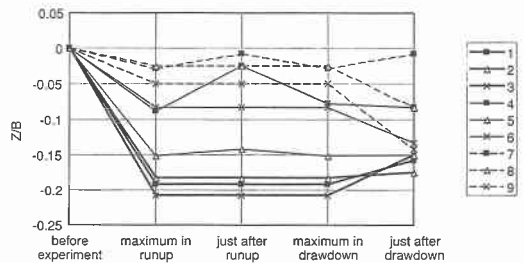


図-9 円柱側面の洗掘量

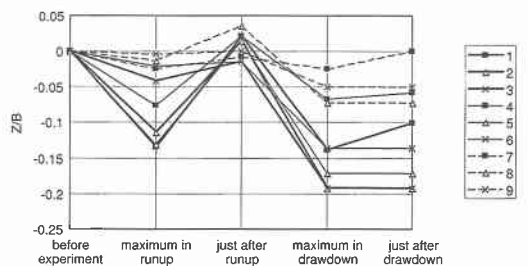


図-10 円柱陸側の洗掘量

ケースでさらなる洗掘が生じていた。遡上後の最大洗掘深は円柱沖側に比べ大きかった。遡上時の洗掘深について同一波高水深比のケースを比べると、波高水深比が0.13および0.05の時には円柱前面とは逆に円柱が海側にある時がもっとも大きいのに対し、波高水深比が0.09の時には円柱が汀線にあるケース5が円柱沖側と同様にもっとも大きかった。円柱沖側と同様に、砕波位置の影響と考えられる。

図-10は、円柱陸側での洗掘深を図-8と同様に示したものである。遡上時は、底面の表層がいったん流動化するものの、遡上直後にはほとんど洗掘されていなかった。一方、流下時にはほとんどのケースで洗掘されていた。流下後の最大洗掘深は、円柱側面における遡上後の最大洗掘深と同程度であった。流下後の洗掘深について同一波高水深比のケースを比べると、円柱が汀線にあるケースがもっとも洗掘量が大きく、次いで円柱が汀線から4m海側にあるケース、汀線から4m陸側にあるケースの順であった。

5. 液状化現象と洗掘との関係

海底地盤では、地盤内の間隙水圧の変動が波浪に応じた海底地盤表面での水圧変動に遅れることより有効応力が低下して液状化が生じることが知られている。洗掘は砂の移動量が大きくなる流速が大きい位相、場所で大きくなると考えられるが、急激な水位変化により有効応力

が低下すると表層が液状化して洗掘されやすくなる可能性がある。そこで、鉛直有効応力を善ら(1987)の方法と同様に以下の式で求め、液状化現象と洗掘との関係を考察する。

$$\sigma_v = \sigma_{v0} + (p_0 - p_m) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 σ_v は鉛直有効応力、 σ_{v0} は初期鉛直有効応力、 p_0 は地盤表面の変動水圧、 p_m は変動間隙水圧である。今回の計算では、地盤表面の変動水圧を波高計で得られた水位を用いて静水圧近似した。なお、円柱が陸上にあるケースについては、間隙水圧をうまく測定できなかったため、ここでは考察しない。

図-11および12は、それぞれケース5および6における、円柱の沖側3mで測定された水平流速(岸向きを正とする)と、円柱の沖側10cmの地点(図-1の①)、側面から沿岸方向に10cmの地点(図-1の②)および陸側10cmの地点(図-1の④)での水深とその地中10cmでの鉛直有効応力と、円柱壁面の沖側、側面および陸側での洗掘量を示している。孤立波の遡上および流下の期間の判断はビデオ画像をもとに行ったので、円柱沖側の流速の変化と若干ずれている。鉛直有効応力は、水深と比較しやすくするため水頭に換算した。円柱壁面での洗掘量は、円柱周りの底面を円柱内部から撮影したビデオをほぼ1秒間隔で判読して求めた。

図-11のように、ケース5では、孤立波の来襲直後に

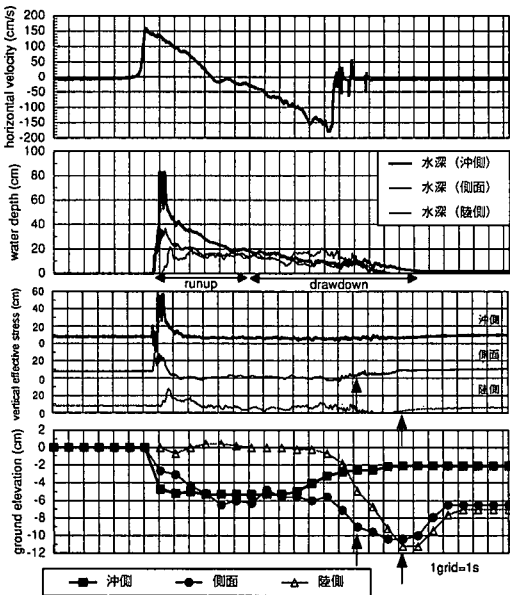


図-11 円柱沖側3mでの水平流速と円柱側面での水深、鉛直有効応力および洗掘量(ケース5)

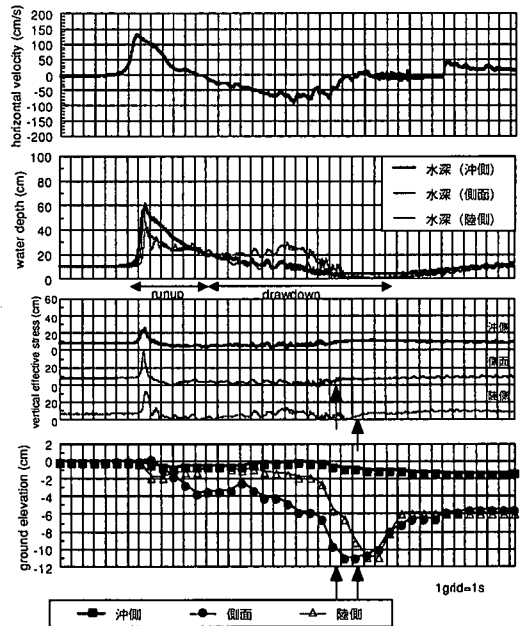


図-12 円柱沖側3mでの水平流速と円柱側面での水深、鉛直有効応力および洗掘量(ケース6)

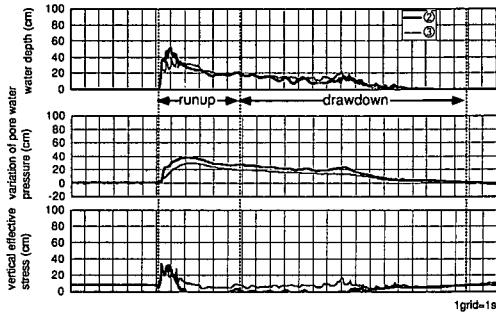


図-13 円柱側面での水深、間隙水圧変動、鉛直有効応力 (ケース2)

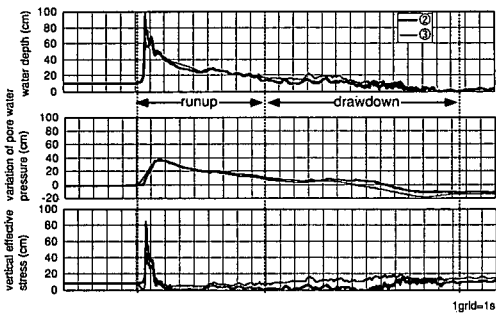


図-14 円柱側面での水深、間隙水圧変動、鉛直有効応力 (ケース3)

鉛直有効応力が低下して底質が移動しやすい状態となる
ことが、孤立波に起因する流れによる洗掘に影響してい
たと考えられる。

図-13および14は、それぞれケース2および3にお
ける、円柱の側面から沿岸方向に10cmの地点(図-1の
②)と37.5cmの地点(図-1の③)での水位とその地中
10cmでの間隙水圧変動および鉛直有効応力を示してい
る。水深は、両ケースとも②の方が津波来襲直後に高く、
その後急速に低下し、流下時に低くなっている。また、
間隙水圧変動は、ケース3の遡上時では②と③でほとん
ど違いはないが、流下時では両ケースとも②の方が高く
なっている。両ケースとも、円柱近傍の②の方が鉛直有
効応力は低くなることが多く、鉛直有効応力が0となる
期間が長い。これらのことから、円柱側面の地盤では、
遡上時は津波来襲直後の急速な水位低下により、流下時
は水位低下と間隙水圧低下の遅れにより鉛直有効応力が
低下していたと考えられる。

6. おわりに

本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- (1) 洗掘面積および洗掘体積は津波の波高と比例
し、その関係は汀線に対する円柱の相対的位置により異
なる。
- (2) 従来、洗掘は最終洗掘深のみで評価されることが
多かったが、遡上・流下過程における変動が大きく、
瞬間的には最終洗掘深の約5倍となることがある。
- (3) 円柱近傍の地盤内では、津波遡上時における有
効応力の低下が著しい。有効応力の低下は地盤の流動性
を高めることにより洗掘に影響していた。

参考文献

宇多高明・小俣 篤・横山揚久 (1987): 津波遡上に関する実験
報告書-構造物の効果を中心として-, 土木研究所資料, 第
2486号, 122 p.
善 功企・山崎浩之・渡辺 篤 (1987): 海底地盤の波浪による
液状化および高密度化, 港湾技術研究所報告, 第26巻, 4号,
pp. 125-180.
西村仁嗣・堀川清司 (1979): 遡上津波の戻り流れによる護岸法
先の洗掘, 第25回海岸工学講演会論文集, pp. 210-214.
野口賢二・佐藤慎司・田中茂信 (1997): 津波遡上による護岸越
波および前面洗掘の大規模模型実験, 海岸工学論文集, 第44
巻, pp. 296-300.

円柱壁面の沖側、側面とも洗掘が生じていたが、遡上時
に鉛直有効応力が大きく低下していたのは側面のみであ
る。また、流下時には、沖側で堆積、側面および陸側で
戻り流れが終わる頃に洗掘が生じ、鉛直有効応力は側面
および陸側で0となることがあった。円柱が汀線にある
他のケースにおいても、遡上時に側面の鉛直有効応力が
沖側に比べ大きく低下するとともに側面が洗掘されてい
た。一方、ケース6では、図-12のように遡上時には円
柱壁面の側面でのみ、流下時には側面および陸側で大き
な洗掘が生じていたが、鉛直有効応力は側面、陸側とも
遡上時、流下時を通して0となることがあった。円柱が
汀線から4m沖側にある他のケースでも、遡上時や流下
時において洗掘量が大きい時に側面の鉛直有効応力が0
となることがあった。さらに、図-11, 12において矢印
で示された時点では、鉛直有効応力の増加と戻り流れに
よる洗掘の終了が概ね一致している。以上のことから、
孤立波の遡上時および流下時に、円柱側面の地盤表層の