杭周辺の局所洗掘に関する 現地観測およびその再現実験

山野 貴司¹・藤原 隆一²・野村 浩二³・白木 孝一⁴

¹正会員 東洋建設株式会社 総合技術研究所 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

E-mail:yamano-takashi@toyo-const.co.jp

²正会員 東洋建設株式会社 総合技術研究所 鳴尾研究所 (〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜1-25-1)

E-mail:fujiwara-ryuichi@toyo-const.co.jp

³東洋建設株式会社 名古屋支店 (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦1-17-13)

E-mail:nomura-kouji@toyo-const.co.jp

⁴東洋建設株式会社 北陸支店 (〒920-0344 石川県金沢市畛田東3-87)

E-mail:shiraki-kouichi@toyo-const.co.jp

柱状構造物における問題の一つである局所洗掘は、構造物の安定性に影響を及ぼすため、その機構を把握することが重要である。水理模型実験で局所洗掘を取り扱う場合、縮尺効果による相似則に注意が必要である。本研究では、杭直下の地盤高の経時変化を捉えることを目的に現地観測を実施した。その結果、洗掘深が波浪の増大に応じて進行し、減衰期間で小さくなる杭直下の局所洗掘の経時変化を計測できた。また、底質の移動形態の相似則に着目し、移動床水理模型実験によって現地の局所洗掘の経過の再現を試みた結果、局所洗掘の時間的な変化や最大洗掘深をかなり精度よく再現できた。また、現地観測およびその再現実験で発生した局所洗掘について、最高波高を用いることで従来行われた小口径円柱に対する実験結果と比較的よく一致することがわかった。

Key Words : local scour, field observation, movable bed model experiment, pile-supported wave absorbing breakwater

1. はじめに

海岸・海洋に設置される柱状構造物における問題の一つとして、構造物周辺の局所洗掘がある。局所洗掘の発生は構造物の安定性に大きな影響を及ぼす。そのため、その機構を正確に把握することが重要であるが、水理模型実験では縮尺効果によって対象とする現象に応じた相似則を適用せざるを得ず、実験結果を現地に適用する場合十分な注意が必要である。一方、現地観測では洗掘深が最大となる高波浪作用時に測定を実施することは困難な場合が多い。一般に行われる深浅測量では、高波浪来襲後に波浪が静穏となった後実施されるため、洗掘深は埋め戻し等の影響を受け過小評価される可能性が大きい。そこで本研究では、高波浪来襲時における杭直下の地盤高の経時変化を捉えることを目的に現地での観測を実施し、その特性を把握することを目的とした。また、底質の移動形態の相似則に着目し、移動床水理模型実験によって現地の局所洗掘の経過の再現を試みた。

2. 現地観測方法

現地観測は、図-1に示す静岡県駿河湾内の蒲原海岸での有脚式離岸堤の施工現場において、写真-1に示すように計36本の鋼管杭（杭径 $D=1.2\text{m}$ ）が打設され、上部工が据え付けられるまでの期間を対象に実施した。計測は、図-2に示す位置の鋼管杭に自記式の超音波式砂面計（USR-10：沿岸海洋調査(株)製）を取り付け、鋼管杭の壁面から岸側に50cm離れた場所の海底面を30分間隔で

図-1 現地観測位置図

写真-1 鋼管杭据付状況

図-2 鋼管杭配置図

計測した。また、観測期間の前後の空間的な地形変化を把握することを目的に、ナローマルチビーム測深器 (SEABAT900IS : (株)東陽テクニカ製) を用いた深浅測量も実施した。観測期間は施工の進捗に合わせ、平成24年1月8日から2月15日までのおよそ2ヶ月間実施し、深浅測量は平成24年1月13日および2月12日の2回実施した。

3. 移動床水理模型実験方法

(1) 模型配置

現地観測の再現実験は、東洋建設(株)鳴尾研究所の長さ30m、幅19m、深さ1.5mの平面水槽を用い、実験縮尺は

図-3 模型実験配置図

1/50とした。水槽内には、図-3に示すよう仮設床を設け、一部を移動床とした。海底勾配は模型沖側で1/70、岸側で1/7とし、模型付近の移動床の厚さは20cmとした。模型の配置は図-2に示す現地と同条件で配置した。底質は中央粒径 $d_{50}=0.19\text{mm}$ のフラタリー砂を用いた。造波は不規則波を対象に行い、修正Bretschneider-光易型の周波数スペクトルを目標に造波し、入・反射波分離推定法¹⁾を用い、実験時の入射波高を算出した。波浪条件については次項で述べる。

地盤高の計測は、模型周辺において岸沖方向は2~10mm間隔、沿岸方向は2mm間隔の測点として、岸沖方向は沖側杭模型の中心を基準として沖側が正となるようにした。計測は造波時間内に4回レーザー変位計 (LB-300, LK-500, LK-G500, IL-600 : (株)キーエンス製) にて地盤高を計測し、地形の経時変化および空間変化を把握できるようにした。

(2) 実験条件

表-1に、現地条件の一覧を示す。現地におけるシールズ数の算定に際し、蒲原海岸の底質粒径は滝沢ら²⁾の調査結果を参照した。現地におけるシールズ数は $\Psi=0.112\sim0.384$ であったことから、現地の底質の移動形態は浮遊移動であったと考えられる。なお、シールズ数 Ψ は式(1a)³⁾、(1b)⁴⁾を用いて算出した。

$$\Psi = 1/2 f_w u_b^2 / (s-1)gd \quad (1a)$$

$$\frac{1}{4\sqrt{f_w}} + \log \frac{1}{4\sqrt{f_w}} = -0.08 + \log \left(\frac{u_b}{k_s} \right) \quad (1b)$$

ここに、 f_w : 摩擦係数、 u_b : 底面流速、 s : 底質粒子の比重 ($s = \rho_s / \rho$; ここに、 ρ_s : 底質粒子の密度、 ρ : 水の密度)、 g : 重力加速度、 d : 底質粒径、 k_s : ニクラゼの相当粗度 ($\approx 30z_0$; ここに、 z_0 : 粗度長さ) である。

局所洗掘は底質の移動を伴う複雑な現象であるため、力学的相似の条件が多すぎて、すべてを包括した相似則を見出すことは困難である。移動床水理模型実験において相似させるべき要因は種々あるが⁵⁾、底質の移動形態が浮遊移動の場合は、式(2)のように底質の沈降速度 w_b を

表-1 現地条件

有義波高 $H_{1/3}(\text{m})$	有義波周期 $T_{1/3}(\text{s})$	水深 $h(\text{m})$	シールズ数 Ψ
1.74	8.51	7.78	0.112~0.384
底質粒径 $d_p(\text{cm})$	底質の沈降速度 $w_0(\text{cm/s})$		
0.044~0.25 ²⁾	9.12~21.75		

表-2 模型実験条件

有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	有義波周期 $T_{1/3}$ (s)	水深 h (cm)	シーلز数 Ψ
7.00	1.20	15.6	0.141
底質粒径 d_p (cm)	底質の沈降速度 w_0 (cm/s)		
0.019	2.39	16.91(現地換算)	

図-4 移動形態の遷移条件

相似させることが一般的である⁶⁾.

$$w_{0m}/w_{0p} = (l_m/l_p)^{1/2} \quad (2)$$

現地における底質の沈降速度は $w_0=9.12\sim21.75\text{cm/s}$ であったことから、移動床水理模型実験に用いる底質の粒径を、この沈降速度を相似できる範囲とすることで現地の再現が可能と考えられる。模型実験における諸条件を表-2に示すが、本実験で用いた底質の沈降速度は $w_0=2.39\text{cm/s}$ (現地換算値: 16.91cm/s)であり、沈降速度の相似則を満足していることから、模型実験結果の現地での再現性が高いと期待できる。なお、底質の沈降速度 w_0 は式(3a)、(3b)⁷⁾を用いて算出した。

$$w_0 = \sqrt{sgd_N} \left(0.954 + \frac{5.12}{S_*} \right)^{-1} \quad (3a)$$

$$S_* = \frac{d_N}{4\nu} \sqrt{sgd_N} \quad (3b)$$

ここに、 s : 底質の水中比重、 g : 重力加速度、 d_N : 名目の粒径 ($=d/0.9$; ここに、 d : 底質粒径)、 ν : 海水の動粘性係数である。

波浪条件については、Shibayamaら⁸⁾による移動形態の遷移条件に基づき、現地で局所洗掘が発生した時の状況が再現できる波浪条件を設定した。このとき、有義波周期は現地の波浪に合わせ、波高を現地条件よりも大きく

することで移動形態を相似させることとした。現地では、波高や周期が時間的に変化した。再現実験の波浪条件の設定については後述する。本実験の波浪条件を、移動形態の遷移条件と比較した結果を図-4に示す。

4. 現地観測結果

(1) 観測期間の地盤高

図-5に、全観測期間における有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ および砂面計により計測された地盤高の時系列結果を示す。図中には、深浅測量を実施した日を併せて示している。図より、2月7日~8日にかけて、最大で $H_{1/3}=2.02\text{m}$ 、 $T_{1/3}=9.3\text{s}$ の波浪が発生し、その期間に地盤高が大きく変化している様子がわかる。

図-6に、地盤高が大きく変化した期間の $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ および洗掘深 Z_b の経時変化を示す。洗掘深については、洗掘深が増加をし始める2月6日21:00を基準とし、その時点での地盤高からの洗掘深の経時変化として表している。本

図-5 有義波高、有義波周期、地盤高時系列 (1/8-2/16)

図-6 有義波高、有義波周期、洗掘深の経時変化

期間に来襲した波浪によって、最大で $Z_3=43\text{cm}$ となる局所洗掘の経時変化を計測することができた。洗掘は、波浪の増大に応じて進行し、逆に波浪減衰期間では洗掘深が小さくなった。このように、高波浪による局所洗掘の最大値を把握するためには、波浪の発生期から減衰期に至る期間の地盤高を連続的に計測する必要があることがわかる。

(2) 深浅測量結果

図-7に、1月13日および2月12日に実施した深浅測量によって計測された地盤高の平面分布を示す。1月13日には鋼管杭周辺の地盤高が若干低下しているが、2月12日ではほぼ一様の地盤形状となっていることがわかる。鋼管杭の打設が完了してから1月13日の深浅測量の実施ま

(a) 実施日：1月13日

(b) 実施日：2月12日
図-7 深浅測量結果

図-8 砂面計測結果と深浅測量結果の比較

での間において、有義波高が 1m 程度の波浪が数回来襲しているが、それらの波浪に対する底質の移動形態は掃流移動 ($\Psi=0.035\sim0.079$) であったため、1月13日の地盤形状は波浪によるものではなく、施工における何らかの影響を受けたものと思われる。また、2月12日においては、2月7日~8日にかけて発生した高波浪による局所洗掘はあったものの、その後静穏な波浪が続いたことで埋戻しにより局所洗掘孔が平滑化されたと考えられる。また、1月13日での地盤形状に比べ、沖側鋼管杭の沖側の地盤高が低下している。

これらの深浅測量結果と、測量実施期間中の砂面計の計測結果を比較した時系列を図-8に示す。図に示す深浅測量結果の測定位置は砂面計の測定位置に最も近い場所を選んでいる。1月13日の観測時の砂面計計測結果と深浅測量結果の差異は 10cm 程度、また2月12日はよく一致している。いずれの計測結果もよく整合しており、計測結果は妥当と考えられる。

5. 再現実験の結果

(1) 杭周辺の地盤高

図-9に、観測対象鋼管杭周辺において、造波開始から141分(有義波周期相当で7000波)経過時の初期地形からの変化量の平面分布を示す。杭の岸側付近を除いてほぼすべての場所で局所洗掘が発生しており、特に沖側での洗掘量が多く、先述した現地での高波浪作用後の深浅測量結果(2月12日)と同じである。また、すべての杭近傍において局所洗掘が発生しているが、洗掘深にはば

図-9 初期地形からの変化量の変面分布(7000波造波後)

らつきが見られる。これは、離岸流や沿岸流の影響を受けたものと考えられる。

(2) 洗掘深の経時変化

図-10に、再現実験による杭近傍の洗掘深と現地観測における砂面計で計測された洗掘深を杭径 D で無次元化し、その経時変化を比較した結果を示す。現地における波浪は時間的に変化し、それに伴って地盤高が変化したが、本研究での模型実験では1つの有義波高と有義波周期で造波せざるを得ないため、模型実験における波浪条件の設定にあたり、対象とする現地の波浪条件を設定する必要がある。ここでは、現地で洗掘深が最大となる時間帯を対象とするが、その後の埋戻しが発生する前までの時間帯に着目した。具体的には $tT_{1/3}=4800\sim 6700$ の範囲である。この時間帯の有義波周期は $T_{1/3}=7.8\text{s}$ から 9.3s に増加しているが、有義波高は $H_{1/3}=1.74\text{m}$ （平均値）で比較的安定しているため、これらの時間帯の平均値を対象とした。その範囲を図中に示している。前述したように杭によって洗掘深にばらつきがあるため、再現実験による洗掘深は、観測対象鋼管杭に沿岸方向に隣接する2本の杭と、観測対象鋼管杭の計3本の杭において、現地観測における砂面計設置位置と同じ場所（杭壁面から岸側に 50cm 離れた場所）を中心とした半径 1cm （現地で 50cm ）の範囲内の洗掘深の平均値とした。波浪条件の対象とした時間帯の現地の洗掘深の平均値と、再現実験の $tT_{1/3}=7000$ における洗掘深の大きさは一致しているが、その時間帯に至るまでの洗掘深は再現実験結果が若干大きい。現地における洗掘深は波高や周期の変化に応じて変化しており、特に $tT_{1/3}=1000\sim 4800$ 付近の範囲においては波高や周期が安定していない（図-6参照、 $t=150\text{min}\sim 690\text{min}$ ）。さらにこれらの範囲の現地の有義波周期 $T_{1/3}=7.75\text{s}$ （ $tT_{1/3}=1000\sim 4800$ の範囲の平均値）に比べて、再現実験で対象とした有義波周期は $T_{1/3}=8.51\text{s}$ と大きいためにシールス数が大きくなり、その影響で再現実験の洗掘深が大きくなったと考えられる。

次に、それぞれの洗掘深の経時変化の傾向を比較した結果を図-11に示す。再現実験では7000波造波までの計4回計測した洗掘深の最大値で洗掘深を無次元化し、現地観測においては、再現実験の波浪条件設定の対象とした現地波浪条件の範囲における洗掘深の平均値で無次元化

図-10 無次元洗掘深 Z_s/D の経時変化

図-11 無次元洗掘深 Z_s/Z_{smax} の経時変化

図-12 地形断面分布の経時変化 ($x=-18.5\text{cm}$)

した。再現実験の局所洗掘の時間的な変化の傾向はかなり精度よく現地の傾向を再現できている。

(3) 地形分布の経時変化

図-12に、現地観測での砂面計設置位置を通る沿岸方向の測線（岸沖距離 $x=-18.5\text{cm}$ ）における地形断面分布の経時変化を示す。観測対象鋼管杭においては局所洗掘が杭の近傍で発生し、作用する波数の増加と共に洗掘深が増加しているが、杭間での地形変化傾向も含め場所によって傾向が異なっている。

(4) 考察

Sumerら⁹⁾によると、波浪条件によるが、 $GD=2\sim 3$ （ G ：杭間距離）より大きい場合は、個々の杭による洗掘孔の相互作用は受けないとしており、本研究における現地およびその再現実験では沿岸方向で $GD=4.6$ 、岸沖方向で $GD=7.5$ であったため、杭近傍で発生した局所洗掘は単杭によるものと考えられる。そこで、Sumerら¹⁰⁾による小口径直立円柱に対する実験結果と、本研究の結果を比較した。

図-13 小口径直立円柱の洗掘深

図-13に、現地観測結果および再現実験結果を、Sumerらの実験式(式(4)参照)と比較した結果を示す。Sumerらの模型実験は規則波に対して行われたものであるため、不規則波を対象とした本研究の結果を直接的に比較することはできない。ただし、不規則波の本研究結果について有義波高を用いて整理した場合に比べ、最高波高を用いると模型実験結果は比較的良好一致することがわかった。なお、周期は有義波周期を用いて整理した。また、別途実施した不規則波に対する断面水路実験において、目視ではあるが、実験時の最高波にあたる波が作用したときに、特に巻き上げられる底質の量が多くなっていた。このことが、最高波高による整理で結果が一致する理由であると考えられる。

$$Z_s/D = 1.3\{1 - \exp[-0.03(KC - 6)]\} \quad (KC > 6) \quad (4)$$

ここに、 Z_s ：最大洗掘深、 D ：円柱の直径、 KC ：クーリガン・カーペンター数である。

なお、杭間隔と波浪条件および洗掘深の関係については今後の課題である。

6. まとめ

本研究で明らかとなった点を以下にまとめて示す。

- 杭直下の地盤高の経時変化を捉えることを目的に現地観測を実施した結果、洗掘深が波浪の増大に応じて進行し、減衰期間で小さくなる杭直下の局所洗掘の経時変化を計測できた。
- 現地における底質の移動形態は浮遊移動であったため、底質の沈降速度を相似させて現地の再現実験を行った結果、杭による局所洗掘の時間的な変化や最大洗掘深を非常に精度よく再現できた。
- 本研究における現地観測およびその再現実験で計測された局所洗掘について、最高波高を用いて整理することで、従来行われた規則波に対する小口

径直立円柱の模型実験結果と比較的良好一致した。

謝辞：本研究での現地観測の実施にあたり、観測現場をご提供頂いた国土交通省中部地方整備局 静岡河川事務所の関係者の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 合田良実, 鈴木康正, 岸良安治, 菊地治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No.248, 1976.
- 2) 滝沢俊二, 宇多高明, 堤 博志, 大長良昭：蒲原海岸の海岸侵食実態, 第34回海岸工学講演会論文集, pp.347-351, 1987.
- 3) 榎木 亨 監修：環境圏の新しい海岸工学, pp.129, 株式会社フジ・テクノシステム, 1999.
- 4) Jonsson, I. G. : Wave boundary layers and friction factors, Proc. 10th Coastal Eng. Conf., pp.127-148, 1966.
- 5) 岩垣雄一, 榎木 亨：海岸工学, pp.406, 共立出版, 1979.
- 6) Dean, R. G. : Physical modelling of littoral processes, pp.119-139, Physical Modelling in Coastal Engineering ed. By Dalrymple, R.A., A.A. Balkema, 1985.
- 7) Jimenez, J. A. and O. S. Madsen: A simple formula to estimate settling velocity of natural sediments, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.129, No.2, pp.70-78, 2003.
- 8) T. Shibayama and K. Horikawa : Sediment transport and beach transformation, Proc. 18th Coastal Eng. Conf., pp.1439-1458, 1982.
- 9) Sumer B. M. and J. Fredsoe : Wave scour around group of vertical piles, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.124, No.5, pp.248-256, 1998.
- 10) Sumer B. M., J. Fredsoe and N. Christiansen : Scour around vertical piles in waves, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.118, No.1, pp.15-31, 1992.
- 11) Sumer B. M., N. Christiansen and J. Fredsoe : Influence of cross section on wave scour around piles, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.119, No.5, pp.477-495, 1993.

FIELD OBSERVATION AND REPRODUCTION EXPERIMENT OF LOCAL SCOUR AROUND THE PILE

Takashi YAMANO, Ryuichi FUJIWARA, Kouji NOMURA and Kouichi SHIRAKI

Local scour is one of the important problems in the pile-type structures will affect the stability of the structure. Because it is important to understand the mechanism. When dealing with local scour in hydraulic model tests, it is necessary to pay attention to the similarity law by scale effects. In this study, we conducted a field observation with the aim of capturing the temporal change of ground level directly under the pile. As a result, we were measured the temporal change of local scour around the pile, which proceeds scour depth in response to an increase in waves, decreases in the decay time. In addition, as a result of a reproduction experiment was conducted by focusing on the similarity law in the form of sediment movement, we were reproduced accurately the maximum scour depth and the temporal change of local scour.