

湾曲護岸の耐波特性に関する研究

高橋 研也¹・小林 誠²・小林 拓磨³・西畑 剛⁴・柳澤 創⁵・大月 一真⁶

¹ 正会員 五洋建設（株）東京土木支店横浜営業支店営業部
（〒231-0023 神奈川県横浜市中区山下町 23 日土地山下町ビル 4F）
E-mail: kenya.takahashi@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

² 正会員 五洋建設（株）九州支店南九州建設事業所（〒891-0132 鹿児島県鹿児島市七ツ島 1-70）
E-mail: makoto.kobayashi@mail.penta-ocean.co.jp

³ 正会員 五洋建設（株）東京土木支店土木部
（〒112-0004 東京都文京区後楽 2-6-1 住友不動産飯田橋ファーストタワー33F）
E-mail: takuma.kobayashi@mail.penta-ocean.co.jp

⁴ 正会員 五洋建設（株）技術研究所土木技術開発部（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
E-mail: takeshi.nishihata@mail.penta-ocean.co.jp

⁵ 正会員 五洋建設（株）技術研究所土木技術開発部（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
E-mail: hajime.yanagisawa@mail.penta-ocean.co.jp

⁶ 正会員 五洋建設（株）大阪支店土木部
（〒530-0014 大阪府大阪市北区鶴野町 1-9 梅田ゲートタワー14F）
E-mail: kazuma.ootsuki@mail.penta-ocean.co.jp

近年の海岸施設には景観や環境に配慮することも強く求められるようになってきており、海岸沿いに意匠性の高い建築物が建設されることも多くなってきている。本研究においては、このような建築物と景観が調和する意匠性の高い新たな護岸形式として湾曲護岸を提案し、今後の設計に資することを目的としてこれに作用する波圧・波力・越波流量などに対する耐波特性を把握する水理模型実験および CADMAS-SURF/3D, OpenFOAM による数値解析を実施した。

その結果、高波浪時には最大水平波力および最大揚圧力ともに合田波力を上回るが、各波力成分の同時性を考慮することで合理的な設計が可能になること、湾曲壁面の波返し効果により越波流量が抑制されることが分かった。また、両解析手法の湾曲護岸の耐波設計への適用可能性が示された。

Key Words : curved seawall, landscape, structural resistiveness against wave action, hydraulic model test, numerical wave tank

1. はじめに

近年の海岸施設には景観や環境に配慮することも強く求められるようになってきており、海岸沿いに意匠性の高い建築物が建設されることも多くなってきている。本研究においては、このような建築物と景観が調和する意匠性の高い新たな護岸形式として湾曲護岸を提案し、それに作用する波圧・波力・越波流量に対する耐波特性を把握する水理模型実験および数値波動水槽CADMAS-SURF/3D¹⁾, OpenFOAM²⁾による数値流体解析を実施して、湾曲護岸の今後の設計に資することを目的とする。

図-1に湾曲護岸鳥瞰図を示す。湾曲護岸は壁体が3次元の曲面形状を有しており、前面が捨石マウンドで構成されている。この複雑な形状の護岸が波浪時に受ける状態を把握した上で設計する必要があるが、現行の基準類においては体系化された設計手法として確立されていない。壁体に作用する波圧および波力は合田式³⁾を用いて算

定することが考えられるが、本来、合田式³⁾は直立壁に作用する最大波力を算定するための一般式であるため、3次元の曲面形状を有する本護岸への適用性について検証する必要がある。そこで、実験波力と合田式³⁾より算出した設計波力の比較・検証を行うとともに、数値流体解析を実施して3次元的な波圧分布形を確認する。また、高山ほか⁴⁾による直立護岸の越波流量との比較・検証も行う。

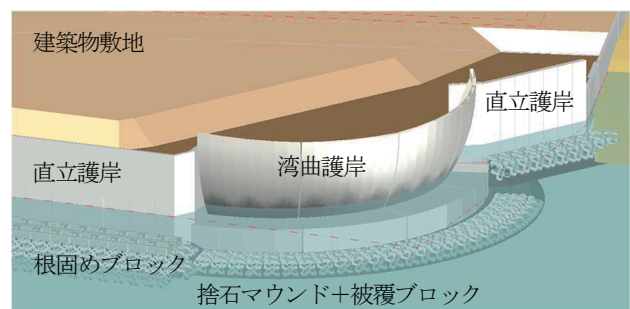


図-1 湾曲護岸鳥瞰図

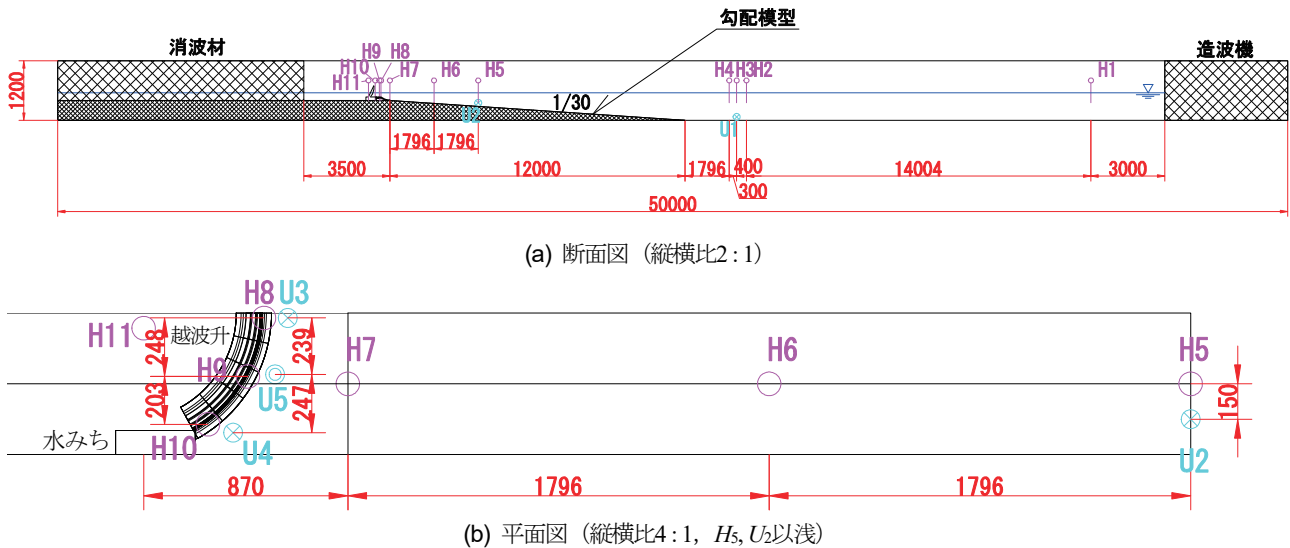


図-2 実験概要図 (単位: mm, 実験縮尺: 1/50, H : 容量式波高計, U : 電磁流速計)

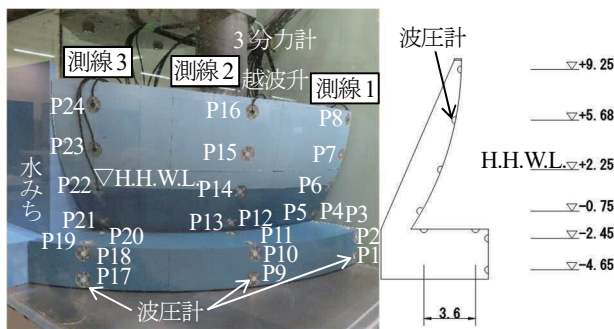


図-3 湾曲護岸模型および計測機器の配置
(単位: m, T.P., 現地スケール)

表-1 進行波実験結果 (現地スケール)

再現期間	最高波高 $H_{\max}$ (m)	有義波高 $H_{1/3}$ (m)	有義波周期 $T_{1/3}$ (s)
2 年確率波	4.67	2.61	7.7
10 年確率波	5.90	3.80	9.3
30 年確率波	6.38	4.31	9.9
50 年確率波	7.27	4.73	11.2

とともに, 3 分力計を湾曲護岸模型内壁に固定して, 波圧および波力の水平 2 成分 F_x, F_y , 鉛直 1 成分 F_z を計測した. その際, 衝撃砕波成分を捉えるためにサンプリング周波数を 1,000 Hz とした. 波力の作用方向については, 水路幅方向を x 軸, 水路長方向を y 軸とし, 湾曲護岸模型曲率中心方向を x, y 軸の正, 鉛直下向きを z 軸の正と定義した. また, 湾曲護岸模型が水路床および側壁と接して計測値にノイズが混入しないように, 湾曲護岸模型と水路床および側壁の間に 2 mm の離隔を設けた. 本実験を実施するに当たっては, 湾曲護岸模型前面に捨石模型として代表径 10 mm の単粒度碎石を, 被覆ブロック模型として基本長 47 mm のモルタル製模型を敷設した.

(2) 実験条件

本実験に先立ち, 捨石マウンド模型や湾曲護岸模型を設置しない状態で造波し, 模型設置位置における 2 台の波高計 H_7, H_8 の水位データを用いて合田ほか⁵⁾による入反射波分離を行うことで進行波条件を計測した. 表-1 に進行波実験の結果を示す. 波浪条件は設計波である 50 年確率波に加え, 30 年確率波, 10 年確率波, 2 年確率波とした. 実験結果のばらつきを考慮して, 波形の異なる不規則波 3 波群をそれぞれ 200 波以上用意した. なお, 潮位条件は設計高潮位 $H.H.W.L.=T.P.+2.25$ m とした.

2. 水理模型実験

(1) 実験方法

図-2 に実験概要図を示す. 2 次元造波水路 (延長 50 m, 幅 0.6 m, 高さ 1.2 m) 内に海底勾配 1/30 の斜面を設置し, 水平床部を設けて模型縮尺を Froude の相似則に従って 1/50 とした湾曲護岸模型を設置した. 図中に示す位置に容量式波高計および電磁流速計を配置して水位および水平流速をサンプリング周波数 20 Hz にて計測した. 本研究においては湾曲護岸を鏡像と捉えて半分を模擬し, 入射波向が 0° で直入射する条件とした. また, 模型背後に越波升を設置して湾曲護岸模型天端から越波する水量を計測することで越波流量を算定するとともに, 入射波を透過させるため側方に水みちを設けた.

図-3 に湾曲護岸模型および計測機器の配置を示す. 湾曲護岸模型は 3D-CAD データを基に 3D プリントを用いて精緻に再現して製作した. 湾曲護岸模型底版側面, 上面および壁面に作用する波圧を計測するため, 湾曲部に沿って波圧計を 3 測線にそれぞれ 8 か所ずつ配置する

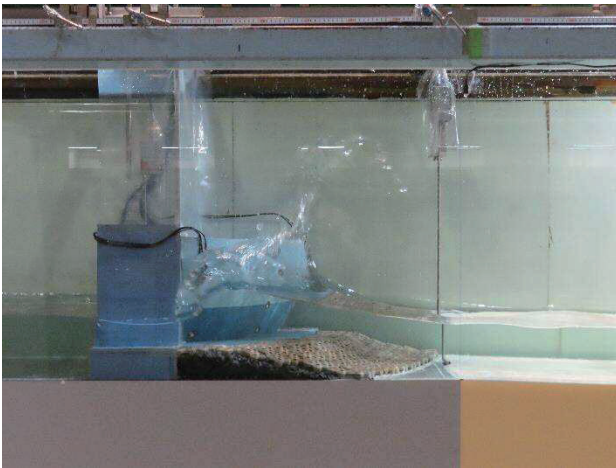
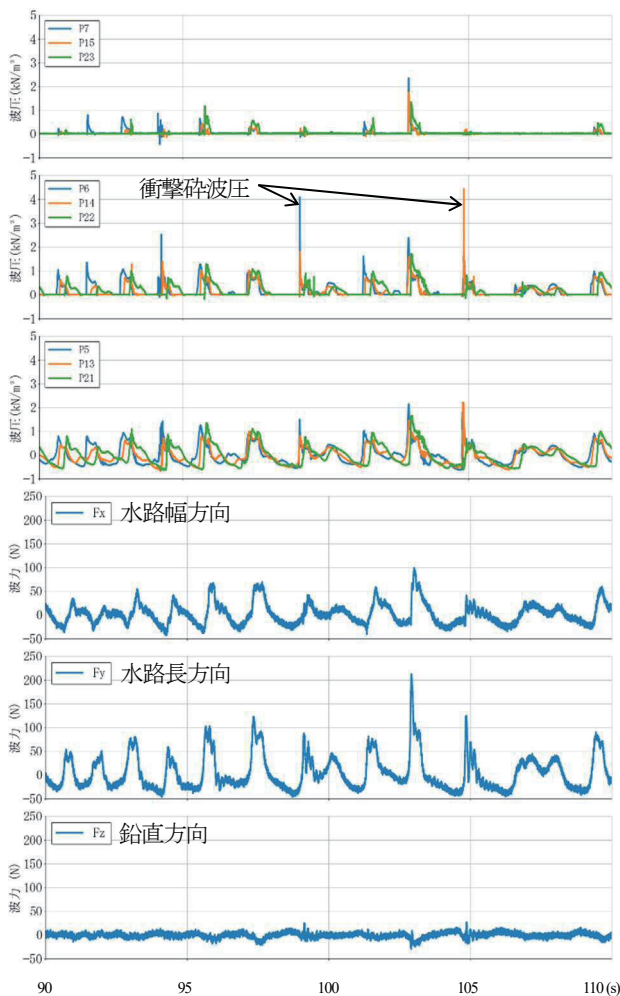


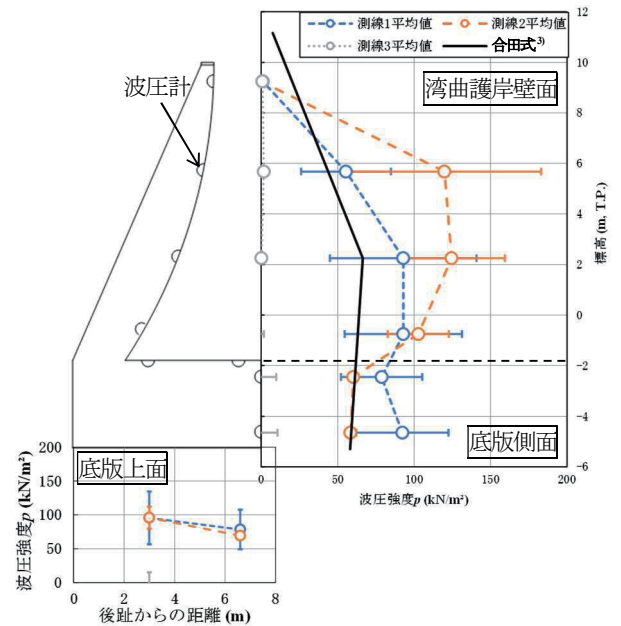
写真-1 実験状況 (50 年確率波)


図-4 波圧および波力の変動時系列
(50 年確率波, 実験スケール)

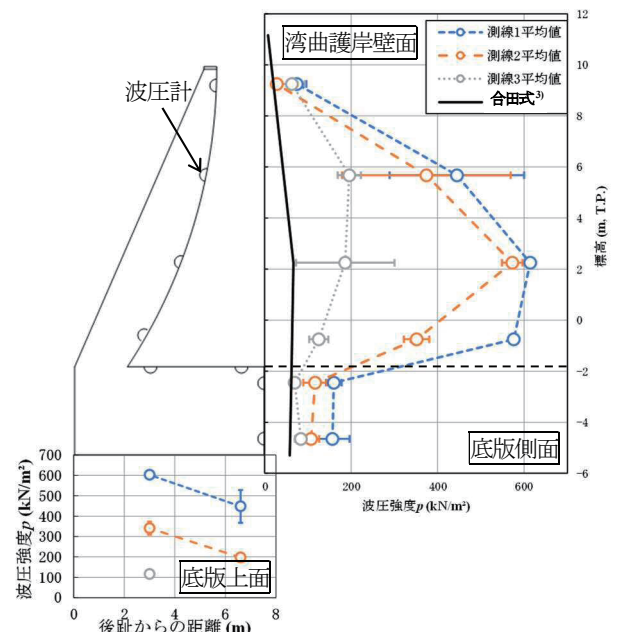
(3) 実験結果

写真-1に50年確率波における実験状況を示す。湾曲護岸壁面前で砕波して空気塊を巻き込みながら湾曲壁面に激しく衝突し、天端高より高く打ち上がった。その際、作用波力に比して非常に大きな衝撃音が発生した。

図-4に50年確率波における波圧および波力の変動時

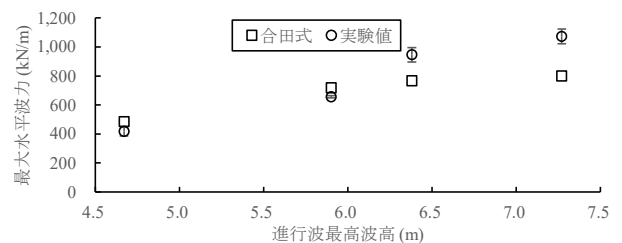


(a) 最大同時波圧分布



(b) 最大波圧分布

図-5 実験波圧分布 (50 年確率波, 現地スケール)


図-6 最大水平波力の実験結果と合田波力³⁾の比較
(現地スケール)

系列を示す。波が湾曲部に沿って測線1, 2, 3という順に位相差を持って作用していることが分かる。また、正面から波面が衝突する測線1, 2においては、特に静水面付

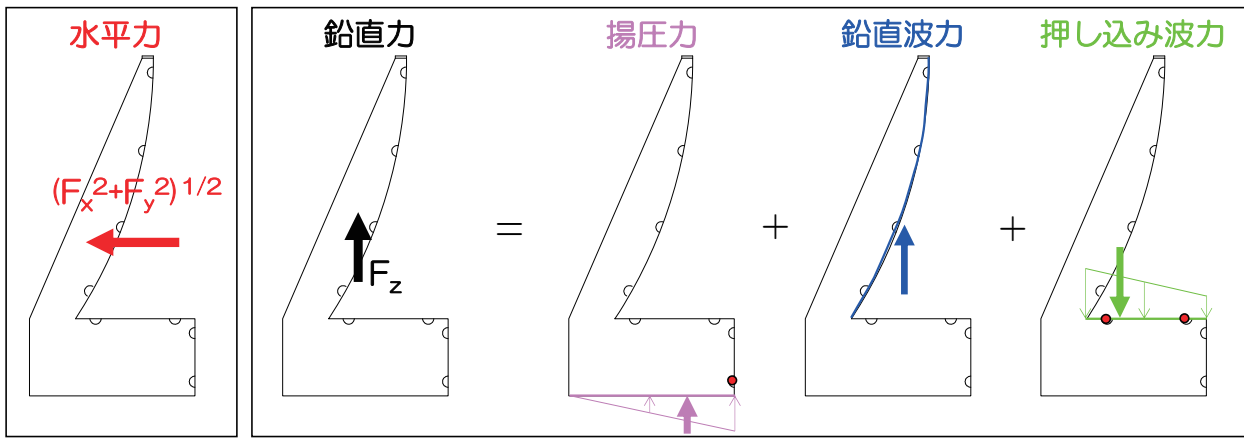


図-7 湾曲護岸へ作用する波力の成分

表-2 転倒モーメント最大時における実験波力と合田波力³⁾の比較 (50 年確率波, 現地スケール)

kN/m	水平波力	鉛直力	揚圧力	鉛直波力	押し込み波力
合田式 ³⁾	800.3	未考慮	210.1	未考慮	未考慮
実験最大値	1072.6	402.3	312.6	1145.7	1042.3
転倒モーメント最大時における実験値	1045.3	244.9	202.2	402.7	359.9

近において衝撃碎波圧が発生していることも分かる。

図-5 に 50 年確率波における最大同時波圧分布 (水平波力 $(F_x^2 + F_y^2)^{1/2}$ 最大時) および最大波圧分布を示す。波圧は 3 波群の平均値および標準偏差の範囲を示しているが、静水面付近で衝撃碎波圧が生じている一方で、波群ごとのばらつきが大きいことが分かる。まず、最大同時波圧分布を見ると、測線 3 の波圧が 0 であることから、湾曲部側方に位置する測線 3 に波が到達する前に護岸曲率中心方向に最大水平波力が作用しているものと考えられ、湾曲部に沿って波圧が位相差を持って作用していると言える。また、天端付近の波圧が 0 であることから、湾曲壁面には波返し効果を期待できることも分かる。次に、最大波圧分布を見ると、最大波圧が湾曲部に沿って測線 1, 2, 3 という順に減少しており、入射波向に応じた波圧低減効果を期待できるものの、合田式³⁾を大きく超える衝撃碎波圧がいずれの測線においても発生していることが分かる。

図-6に最大水平波力の実験結果と合田波力³⁾の比較を示す。実験値は波の進行方向に対する護岸の投影幅で除して単位幅当たりの波力としたが、50 年確率波においては合田波力³⁾の約1.34 倍となった。

図-7に湾曲護岸へ作用する波力の成分を示す。3 分力計により計測された鉛直力 F_z は揚圧力、鉛直波力および押し込み波力の合力と考えられる。そこで、揚圧力を底版側面底面側の波圧から三角形分布と、押し込み波力を底版上面の波圧から台形分布と仮定して算出し、これらの値から鉛直波力を評価した。

表-2に50 年確率波における各波力成分の実験最大値、

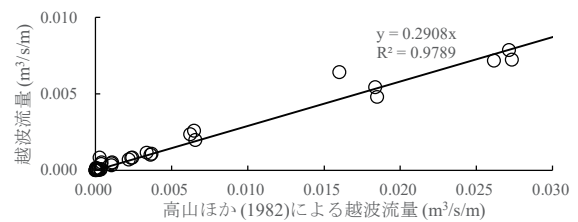


図-8 越波流量の実験結果 (現地スケール)

転倒モーメント最大時における実験値と合田波力³⁾の比較を示す。最大鉛直波力および最大押し込み波力は最大水平波力と同程度であるが、作用方向が逆のため正味の鉛直力はそれほど大きくならない。設計照査の対象になると考えられる転倒モーメント最大時には、各波力成分の最大値の出現時刻に位相差があるため、水平波力および鉛直力ともに最大値よりやや減少する。高波浪時には最大水平波力および最大揚圧力ともに合田波力³⁾を上回るが、各波力成分の同時性を考慮することで合理的な設計が可能になると考えられる。

図-8に越波流量の実験結果を示す。越波流量は計測された越波量を波進行方向に対する護岸投影幅および波作用時間で除することにより評価した。その結果、湾曲壁面の波返し効果により、高山ほか⁴⁾の近似式による直立護岸の越波流量の約0.29 倍に抑制されることが分かった。

3. 数値流体解析

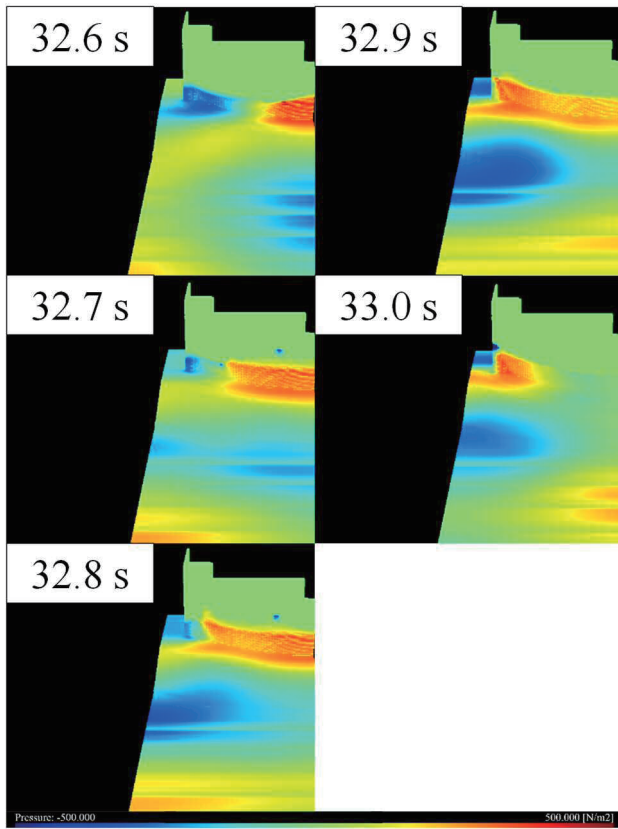
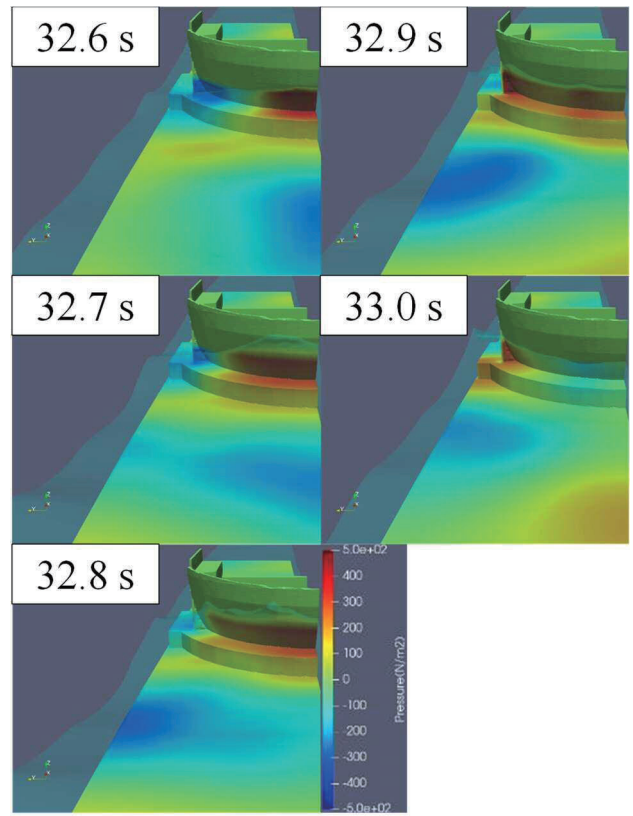
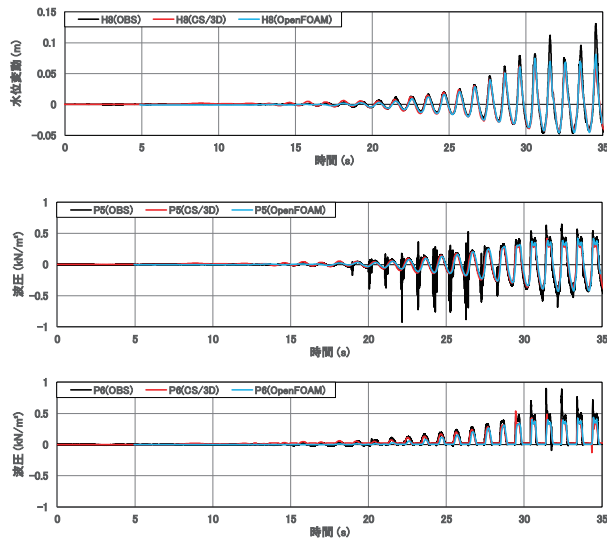
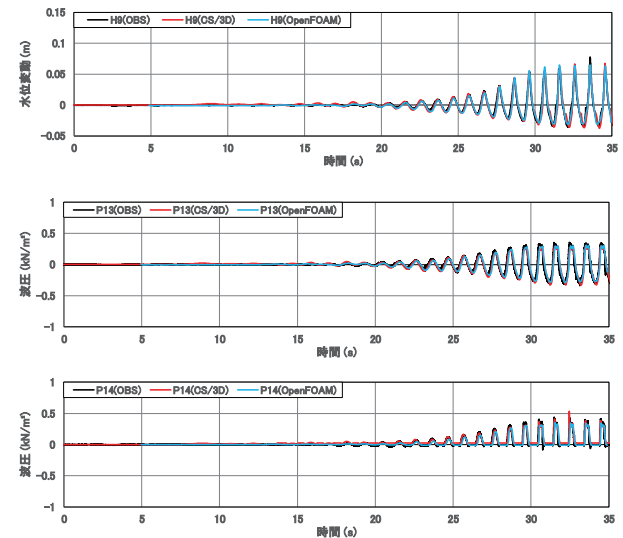

(a) CADMAS-SURF/3D¹⁾

(b) OpenFOAM²⁾

図-9 数値流体解析による波圧分布 (2 年確率波, 実験スケール)



(a) 測線 1



(b) 測線 2

図-10 水位および波圧の変動時系列の実験結果と解析結果の比較 (2 年確率波, 実験スケール)

(1) 解析ツール

本章においては、前章において得られた実験結果を用いて数値波動水槽による再現解析を実施し、湾曲護岸に作用する 3 次元的な波圧分布形を確認した。解析ツールには、構造格子を扱う CADMAS-SURF/3D¹⁾および非構造格子を扱う OpenFOAM²⁾を用いた。両者とも Navier-Stokes 方程式と連続式を基礎方程式とし、自由表面の処

理法に VOF 法を採用した信頼性の高い解析手法である。

(2) 解析条件

格子間隔は $\Delta x = \Delta y = 0.010 \text{ m}$, $\Delta z = 0.005 \text{ m}$ を基本とし、CADMAS-SURF/3D の入力データ作成支援ツール CADMAS-MESH および OpenFOAM の標準ユーティリティ snappyHexMesh を用いて湾曲護岸模型周囲のセルを

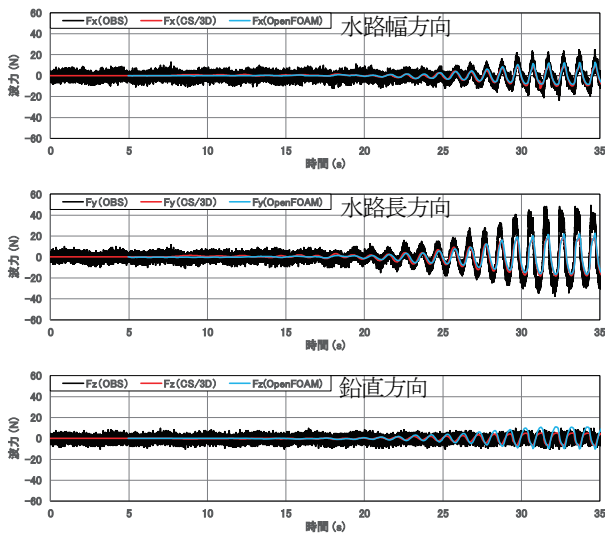


図-11 波力の変動時系列の実験結果と解析結果の比較
(2年確率波, 実験スケール)

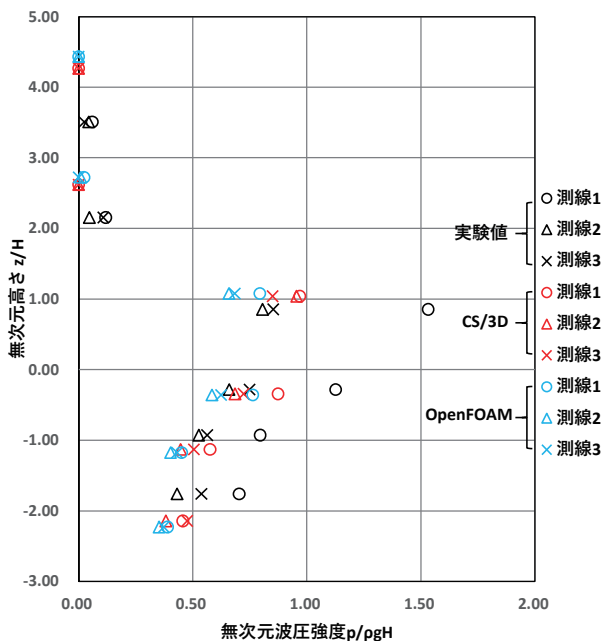


図-12 無次元最大波圧分布の実験結果と解析結果の比較
(2年確率波)

細分化して壁面の曲面形状を再現した。波高計 H_3 の位置を造波境界として実験水位・水平流速時系列データを入力し、2年確率波の有義波高相当の規則波を造波した。また、捨石マウンド模型の抵抗力算定手法が両者で等価になるように係数を定め、乱流モデルは使用しなかった。

(3) 解析結果

図-9 に 2 年確率波における数値流体解析による波圧分布を示す。CADMAS-SURF/3D¹⁾および OpenFOAM²⁾を用いた解析結果はともに同様の波圧分布傾向を示し、湾曲部に沿って波圧が位相差を持って作用することを再現

することができた。また、湾曲護岸模型と取付護岸模型との接続部において波圧が大きくなることなど、水理模型実験からは容易に得られない細部の波圧分布についても確認することができた。

図-10 に 2 年確率波における水位および波圧の変動時系列の実験結果と解析結果の比較を示す。湾曲護岸模型正面に位置する測線 1 においては瞬間的な打ち上げ高や衝撃砕波圧の再現性には課題が残ったが、側方に位置する測線 2 においては実験結果と概ね整合した。

図-11 に 2 年確率波における波力の変動時系列の実験結果と解析結果の比較を示す。この図からも、湾曲護岸模型側方から作用する波力は概ね整合する一方で、正面から作用する波力の再現性に課題が残ることが分かる。

図-12 に 2 年確率波における無次元最大波圧分布の実験結果と解析結果の比較を示す。ここで、最大波圧は安定した 5 波のピーク波圧の平均値 p とし、入射波高 H 、水の密度 ρ 、重力加速度 g で無次元化した。湾曲護岸模型正面に位置する測線 1 において発生する衝撃砕波圧を除けば、波圧分布形は実験結果と概ね整合しており、両解析手法の湾曲護岸の耐波設計への適用可能性が示された。

4. 結論

本研究においては、意匠性の高い建築物と景観が調和する新たな護岸形式として湾曲護岸を提案し、今後の設計に資することを目的としてこれに作用する波圧・波力・越波流量などに対する耐波特性を把握する水理模型実験および CADMAS-SURF/3D¹⁾、OpenFOAM²⁾による数値流体解析を実施した。

その結果、高波浪時には最大水平波力および最大揚圧力ともに合田波力³⁾を上回るが、各波力成分の同時性を考慮することで合理的な設計が可能になること、湾曲壁面の波返し効果により越波流量が抑制されることが分かった。また、両解析手法の湾曲護岸の耐波設計への適用可能性が示された。なお、両解析手法の格子間隔などの解析条件を可能な限り一致させて解析を実施したため、30 秒当たりの再現計算に要した時間が CADMAS-SURF/3D は約 428 時間、OpenFOAM は約 430 時間となり、両解析手法の計算時間はほぼ同じ結果となった。

謝辞：本稿の執筆にあたり、事業主体である株式会社パソナグループおよび護岸形状の意匠設計を行った株式会社坂茂建築設計に多大な協力をいただいた。また、株式会社不動産テトラより被覆ブロック模型を貸与いただいた。ここに付記して御礼申し上げる。

REFERENCES

- 1) 財団法人沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発－数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会報告書－，沿岸技術ライブラリー，No. 39, 235p., 2010. [Coastal Development Institute of Technology: CADMAS-SURF/3D suuchi-hadou-suisou no kenkyuu-kaihatsu, Suuchi-hadou-suisou no taiha-sekkei heno tekiyou nikansuru kenkyuukai houkokusyo, *Coastal Technology Library*, No. 39, 235p., 2010.]
- 2) OpenCFD Ltd: OpenFOAM, <https://www.openfoam.com/>, 参照 2024-04-02. [OpenCFD Ltd: OpenFOAM, <https://www.openfoam.com/>, Reference 2024-04-02.]
- 3) 谷本勝利，本浩司，石塚修次，合田良実：防波堤の設計波力算定式についての検討，第 23 回海岸工学講演会論文集，pp. 11-16, 1976. [Tanimoto, K., Moto, K., Ishizuka, S. and Goda, Y.: Bouhatei no sekkei-haryoku-san-teishiki nitsuiteno kentou, *Proceedings of the Japanese Conference on Coastal Engineering*, Vol. 23, pp. 11-16, 1976.]
- 4) 高山知司，永井紀彦，西田一彦：各種消波工による越波流量の減少効果，港湾技術研究所報告，第 21 巻，第 2 号，pp. 151-205, 1982. [Takayama, T., Nagai, T. and Nishida, K.: Decrease of wave overtopping amount due to seawalls of low crest types, *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol. 21, No. 2, pp. 151-205, 1982.]
- 5) 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, 24p., 1976. [Goda, Y., Suzuki, Y., Kishira, Y. and Kikuchi, O.: Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments, *Technical Note of the Port and Harbour Research Institute*, No. 248, 24p., 1976.]

(Received February 6, 2024)

(Accepted May 13, 2024)

STUDY ON STRUCTURAL RESISTIVENESS AGAINST WAVE ACTION OF CURVED SEAWALL

Kenya TAKAHASHI, Makoto KOBAYASHI, Takuma KOBAYASHI,
Takeshi NISHIHATA, Hajime YANAGISAWA and Kazuma OTSUKI

In recent years, coastal facilities have also been required to consider the landscape and the environment, and buildings with high design quality are increasingly being constructed along the coast. In this study, we proposed a curved seawall as a new type of seawall with a high level of design that harmonizes with such buildings and the landscape. Hydraulic model tests and numerical analyses using CADMAS-SURF/3D and OpenFOAM were conducted to understand the wave resistance characteristics against wave pressure, wave force, wave overtopping flow rate, etc., acting on the structure for the purpose of contributing to its future design.

The results showed that although both the maximum horizontal wave force and the maximum uplift pressure exceeded the Goda's wave force in high waves, rational design was possible by considering the simultaneity of each wave force component, and that the overtopping flow rate was suppressed by the wave return effect of the curved seawall. The applicability of both analysis methods to wave resistant design of curved seawalls was also demonstrated.