

橋脚への波の打上げと潜堤による 軽減効果に関する研究

間瀬 肇¹・幸正一伯²・高山知司³・重村良一⁴・中平順一⁴

¹正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

²学生員 京都大学大学院 工学研究科 (〒606-8317 京都市左京区吉田本町)

³正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

⁴八千代エンジニアリング(株) 臨海開発部 (〒153-8639 東京都目黒区中目黒1-10-23)

海域をまたぐ中小規模の橋梁では、橋脚に波が打上がり橋面へ飛沫が降り注ぐという問題が生じることがある。本研究は、橋脚への波の打上げ特性を明らかにし、潜堤による軽減対策を検討したものである。まず、円柱に対する波の打上げ実験から、波の打上げが橋脚設置地点の通過波高にほぼ比例して増加することを明らかにした。次に、橋脚前方に潜堤を設置して通過波高を減少させることによってある程度打上げ高を低減できることを示した。また、数値計算によってある特定の現地を対象として、潜堤設置の効果を検討した。

Key Words: runup on pier, reduction of runup, random waves, wave transformation, submerged breakwater

1. はじめに

海洋構造物を設計する場合、作用波力を精度よく評価することが重要である。円柱に作用する波力の研究は Morison ら¹⁾ に始まり、抗力係数や慣性係数を算定する研究や回折理論、数値解析法の研究が国内外で盛んに行われている^{2)~4)}。これらの成果により、円柱に作用する波力の算定精度は向上したが、円柱前面の打上げ高についてはほとんど研究がなされていない。

回折理論から求められる打上げ高と実測値との差異を考慮した Kriebel⁴⁾ による打上げ高の研究はあるが、砕波帯に置かれた円柱構造物への打上げ高に関する研究はほとんどないようである。ほとんどの研究は、砕波による波力を対象としている^{5), 6)}。

本州四国連絡橋のように、その下を船舶が航行するといった大規模橋梁の場合は橋脚高が非常に高く、橋面への波の打上げや飛沫の問題は生じないが、中・小規模の橋梁の場合には橋脚への波の打上げによる水塊と飛沫が橋面にまで達し、通行車両や歩行者の妨げになるといった問題が生じる。そのため、橋脚高の設計に際して予め波の打上げ高が算定できることが望まれる。

実際、ある橋梁では橋脚完成後特定の橋脚に波が

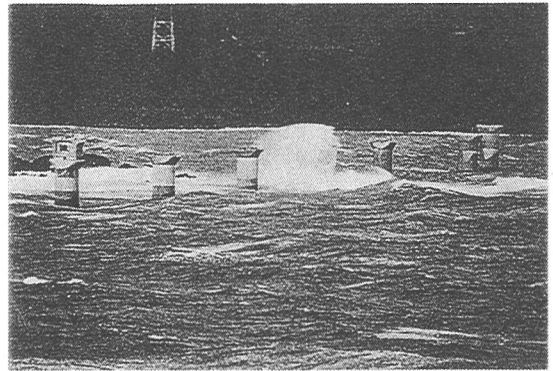


Photo.1 Runup and bubble in field

打上がり、橋面へ飛沫が降り注ぐという問題が生じ (Photo.1 のように矢印で示した橋脚が白く見えなくなっている)、その軽減対策が必要となっている。この橋梁の縦断高は、100年確率波より各橋脚位置での波頂高を求め、桁下を通過する船舶のクリアランスと波頂高の両者を満足するように決定されたが、砕波が橋脚に衝突し、想定以上の打上げ高になった。波の実質部分の打上げが大きな時には飛沫の発生量も大きい⁷⁾が、両者の定量的な関係は明らかではない。石田ら⁷⁾

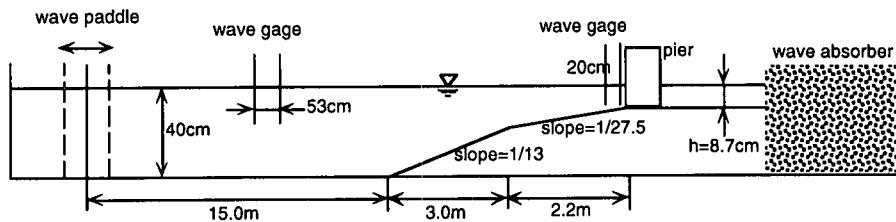


Fig.1 Experimental setup

は、水塊が構造物に衝突して発生する飛沫の模型実験は不可能であることを示している。

本研究は、砕波帯内に設置された円柱橋脚への波の打上げ高、また潜堤による波の打上げ軽減効果を検討するものであり、関連する基礎研究と設計基準の構築に寄与することを目的とする。潜堤の波高低減効果に関する研究は従来からなされている^{8)・9)}が、本研究では非線形波動理論を援用して、断面2次元および平面2次元の場合の波高低減効果を予測し、現地における潜堤配置案を検討する。

Table 1 Experimental condition of random waves

Case	Field Scale		Exp. Scale	
	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (cm)
Run 1	7.0	1.39	1.28	4.63
Run 2	7.0	2.12	1.28	7.05
Run 3	7.0	2.80	1.28	9.33
Run 4	7.0	3.42	1.28	11.40
Run 5	5.5	0.90	1.00	3.00
Run 6	5.5	1.40	1.00	4.67
Run 7	5.5	1.93	1.00	6.42
Run 8	5.5	2.40	1.00	8.00

2. 円柱橋脚への波の打上げの実験的検討

(1) 実験装置

実験は長さ27m、幅50cm、深さ75cmの両面ガラス張り水槽で行った。この水槽の一端には、電気油圧式不規則波造波機が設置されている。

模型海浜は、橋脚完成後波の打上げと飛沫の発生が問題となっている現地の橋脚周辺地形（後述のFig.13参照）のNNW, N, NNE方向に沿った水深を平均化したものを用いた。模型縮尺は1/30とし、フルード則に従って海浜模型、円柱橋脚模型、波の条件を決定した。現地の円柱橋脚の直径は4mであり、模型では13.3cmとした。

Fig.1に実験装置の概要を示す。海浜模型は、造波板から15m離れた地点から設置した。一様水深部の水深は40cmとした。円柱が設置されている地点の水深は8.7cmである。水位変動の計測には4台の容量式波高計を用いた。1台は造波板から10m離れた地点、そこから53cm離して1台、円柱橋脚模型前面に1台、そこから沖側に20cm離して1台設置した。

(2) 実験方法

規則波実験においては、周期を0.8s~1.7sの範囲で11通り変化させ、それぞれの周期に対して波高を4通り変化させた入射波を用いた。最も小さい波高

は2.7cm、最大の波高は11.8cmである（現地スケールで4.2s~9.1sおよび0.8m~3.5m）。不規則波実験においては、JONSWAPスペクトルを有する不規則波を用いた。ピークの鋭さを決めるパラメータ γ は3.3とした。ピーク周波数は、0.78Hzおよび1.0Hzの2通りとした。波高は、それぞれのピーク周波数に対して4通りに変化させた。Table 1に波の条件を示す。波の条件は円柱径に比して波長が大きく、回折効果が無視できる範囲のものである。

規則波の実験は、水面が静止しているのを確認した後、造波開始と同時に計測をスタートし、サンプリング間隔0.02sで90秒間データを収録した。計測は、1つの波の条件に対して3回行った。こうした一連の実験を、円柱を設置した状態と円柱を設置しない状態について行った。不規則波の実験は、水面が静止しているのを確認し、造波と同時に計測を開始し、サンプリング間隔0.02sで12分間データを収録した。

(3) 実験結果および考察

波の打上げ高 R を無次元化するためのパラメータとしては、沖波波高 H_0 、通過波高 H 、波長 L 、あるいは橋脚設置水深 h がある。例えば、通過波高 H を用いて無次元打上げ高を R/H とした場合、砕波減衰により H が小さくなると、 R がそれほど小さくなく

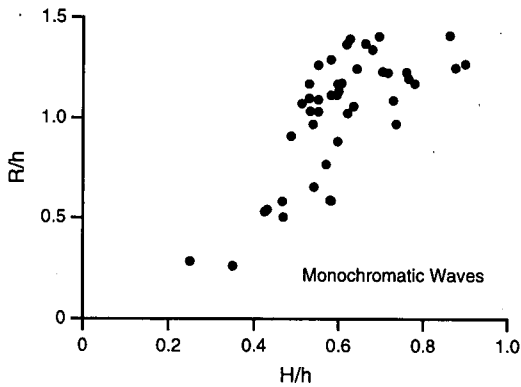


Fig.2 Relation between incident wave height and runup height

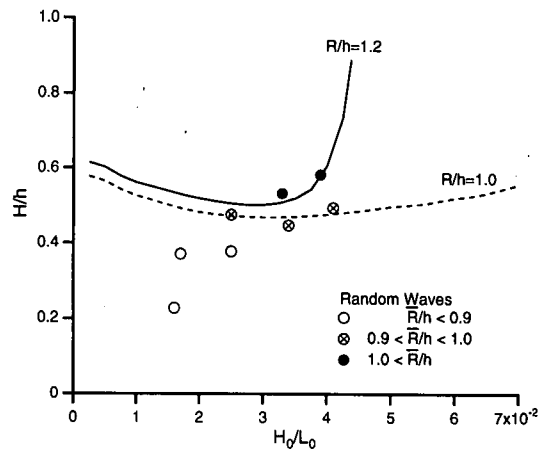


Fig.3 Occurrence region of high runup height

ても R/H が大きな値になる。沖波波高 H_0 を用いた無次元化では、浅水・碎波変形によって橋脚設置点での波高の変化の影響が考慮できない。すなわち、 H_0 が大きくて碎波減衰により小さくなった通過波高と、 H_0 が小さくて浅水変形で大きくなった通過波高が同じになり、その打上げ高が同じになっても R/H_0 は前者の場合に小さくなり、後者の場合は大きくなって異なった値になる。ここでは、打上げ高の実質的な大きさを問題とし、設置水深 h を用いて無次元打上げ高を R/h で整理する。

Kriebel⁴⁾ のように打上げ高 R を円柱設置点での運動エネルギー $u^2/2g$ に関係づけ、その式を変形すると、以下の関係式が得られる。

$$R/h \propto (H/h)(H^*/L^*) \quad (1)$$

波高 H^* と波長 L^* として、深海あるいは円柱設置点における値を用いる。その他、以下の無次元打上げ高とアーセル数との関係式を取り上げた。

$$R/h \propto (H/h)/(h/L^*)^2 \quad (2)$$

まず、式(1)および式(2)を用いて無次元打上げ高を表すことができるかどうか、深海や浅海での諸量を用いて調べたが、きれいに整理することができなかった。

そこで、円柱設置点における無次元通過波高 H/h を横軸にとって R/h をプロットしたところ、Fig.2 が得られた。なお、打上げ高の整理に当たっては、打上げ波形の変動が大きいので、1回の計測に対して10波分の打上げ高を平均し、それをさらに3回の実験で平均したものをを用いている。Fig.2によると H/h の増加に伴って R/h が増加し、 $H/h < 0.5$ では R/h が 0.7以下、 $H/h > 0.7$ では R/h が 1.5が最大となって、打上げ高は頭打ちになっているようである。

打上げ高が大きくなる条件を詳細に検討するた

め、横軸に H_0/L_0 、縦軸に H/h をとって、 R/h が 1.0 および 1.2 より大きくなる領域を調べた。その下限の境界線を Fig.3 に示す。 $R/h = 1.0$ の曲線は、 $H/h \approx 0.5$ で表される。この結果は、潜堤の効果を評価する場合に対象地点の H/h が 0.5 以下になるかという判定に用いる。 $R/h > 1.2$ となるのは、 H_0/L_0 が 0.45 より小さい領域である。 H_0/L_0 が大きい波は円柱設置点より十分沖で碎波し、円柱設置点ではエネルギーが減衰するためである。

不規則波の打上げ高の整理に当たり、微小な水位変動による打上げ高を含まないように閾値を設定し(ここでは 4.0 cm とした)、それを越えたものを1つの打上げ波と定義した。

Fig.4 は不規則波の実験結果を整理し、無次元通過平均波高と無次元代表打上げ高(1/10最大値、有義値、平均値)の関係を調べたものである。この結果は、Fig.2の規則波の結果と同様、打上げ高は通過波高によってほぼ決まることを示している。なお、図中の直線は各代表値に対して最小2乗法で求めた回帰線である。Fig.3に不規則波の結果をプロットする場合、縦軸の波高として平均波高 \bar{H} を用いると、図中の境界線 $R/h = 1.0$ により $\bar{R}/h < 0.9$ と $\bar{R}/h > 1.0$ の出現領域を区別することができる(規則波実験との対応がつけられる)。これは、打上げ高を算定するために用いる波の条件としては有義波、対象地点では平均波高を用いることによって、Fig.3により高打上げ条件を推定できることを意味する。Fig.3のような算定図があれば、設計波に対して対象地点での平均波高を算定し、打上げの大きさを推定できる。こうした算定図における境界線は海底地形の条件によって異なるので、実験的に求める必要がある。

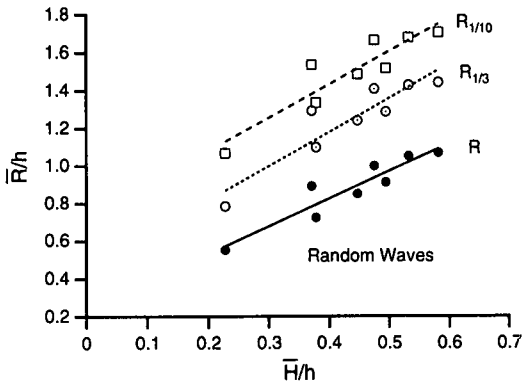


Fig.4 Relation between incident mean wave height and representative runoff height

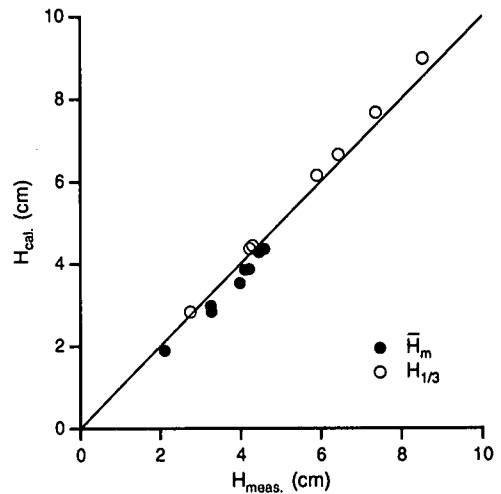


Fig.5 Comparison of measured random wave heights with calculated ones

3. 波の打上げの低減法に関する検討

(1) 2次元変形理論を用いた検討

橋脚への波の打上げ高を減少させるためには、橋脚に入射する波を小さくすればよいことがわかった。そのためには橋脚の前方に構造物を築造し、入射する波を減少させる必要がある。海面に突き出た構造物は、波を十分に減少させることができる。しかし、海岸景観を考慮しなければならない場合（例えば、国定公園）には海中に設置する潜堤が有効な構造物となる。その場合、設置位置、天端幅、天端水深等、潜堤の位置と規模を決定しなければならない。種々の潜堤模型を製作し、実験によって効果的な位置・規模を決定するのがよいが、時間および費用の点から制限を受ける。そのため、いくつかの潜堤に対し、理論・数値モデルを用いて数値計算によって波高減衰効果を予測するのがよい。

潜堤の波高低減効果は、従来の主として実験的な研究である程度明らかになっている。ここでは、適用範囲を拡張した周波数領域での修正 KdV 方程式に散逸項を導入し、その散逸係数を確率分布法による碎波のエネルギー減衰率でモデル化した、以下に示すハイブリッド型の不規則波の断面 2 次元変形理論¹⁰⁾を用いて潜堤の波高低減効果を推定する。

$$\frac{dA_n}{dx} + \frac{(C_{gn})_x}{2C_{gn}} A_n - ink_1 \left[\sqrt{\frac{k_n h}{\tanh k_n h}} - 1 \right] A_n + \frac{3ink_1}{8h} \left[\sum_{l=1}^{n-1} A_l A_{n-l} + 2 \sum_{l=1}^{N-n} A_l^* A_{n+l} \right] + \alpha_n A_n = 0$$

(n = 1, ..., N) (3)

ここで、 A_n は成分波の複素フーリエ振幅、 C_{gn} は群速度、 k_1 は基本波数、 h は水深、 α_n はエネルギー減衰係数、 N は成分波の個数、 n は成分波の番号、 i は虚数単位、 $*$ は共役複素数、下付添字の x は x 微分を表す。

数値予測モデルの適用性を検討するため、Table 1 の 8 ケースの不規則波を対象として、円柱設置点における波高を算定し実験結果と比較した。Fig.5 は有義波高と平均波高に関する計算値と実験値の比較結果であり、横軸が実験値、縦軸が計算値である。この図から、計算値と実験値はよく一致することが確かめられる。

Fig.6 は潜堤の設置案を示したものである。記号は以下の条件を示す。

- Case 0: 潜堤を設置しない海底地形
- Case 1: 沖の浅瀬を利用した天端水深 1.5 m、天端幅 5.0 m の潜堤を設置した海底地形
- Case 2: 沖の浅瀬を利用した天端水深 1.5 m、天端幅 10.0 m の潜堤を設置した海底地形
- Case 3: 沖の浅瀬を利用した天端水深 2.0 m、天端幅 5.0 m の潜堤を設置した海底地形
- Case 4: 沖の浅瀬を利用した天端水深 2.0 m、天端幅 10.0 m の潜堤を設置した海底地形
- Case 5: 天端水深 1.5 m、天端幅 5.0 m の潜堤を設置した海底地形
- Case 6: 天端水深 2.0 m、天端幅 5.0 m の潜堤を設置した海底地形
- Case 7: 天端水深 1.5 m、天端幅 10.0 m の潜堤を設置した海底地形

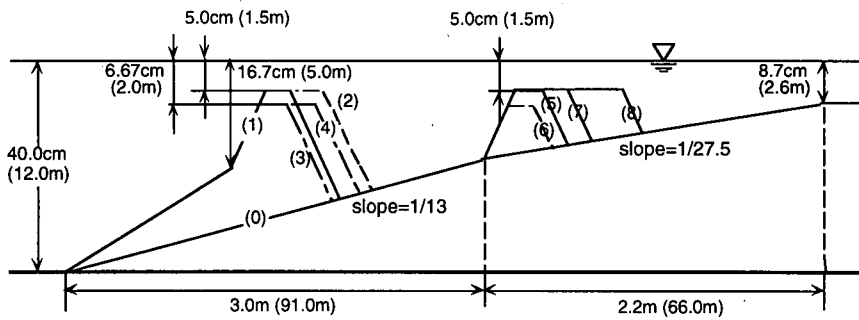


Fig.6 Several plans of submerged breakwater

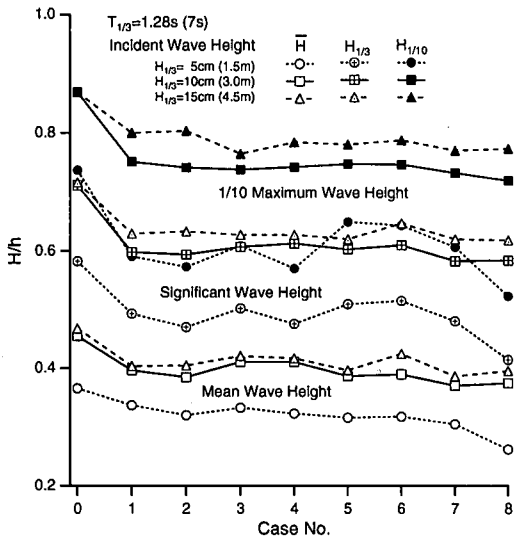


Fig.7 Representative wave heights at pier

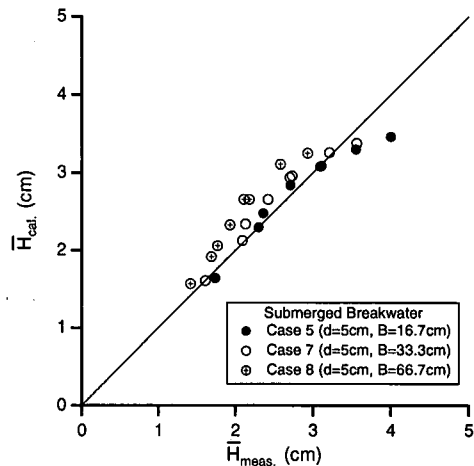


Fig.8 Comparison between measured and calculated mean wave heights at pier

Case 8: 天端水深 1.5 m, 天端幅 20.0 m の潜堤を
設置した海底地形

なお、寸法は現地スケールのものであり、実験スケールは 1/30 倍する。潜堤の法勾配は 1:2 とする。

Case 0 から Case 8 の海底地形条件のもと、不規則波浪の変形計算を行った。対象とする波の条件は、現地スケールで沖波有義波高 1.5 m, 3.0 m, 4.5 m であり、実験室スケールでは 5 cm, 10 cm および 15 cm である。有義波周期は、現地スケールで 7.0 s, 実験室スケールで 1.28 s である。

Fig.7 は、円柱橋脚設置点での通過代表波高を設置水深で無次元化して示したものであり、横軸は海底地形条件番号である。潜堤を設置しない場合、無次元通過平均波高は、沖波有義波高 10 cm および 15 cm では約 0.46 であり、打上げが大きくなる条件に近い値である。潜堤を設置すると、無次元平均波高は多くの場合 0.4 以下になる。

潜堤の天端水深が 2.0m の海底地形条件 Case 3, 4, 6 では、無次元平均波高が 0.4 より若干大きくなる。天端幅の影響を見るために海底地形条件 Case 1 と Case 2, および Case 5, 7 と 8 の計算結果を比べてみると、天端幅が大きい方が波高が小さくなる傾向にある。

橋脚への波の打上げを低減するためには、円柱設置点での通過波高を小さくしなければならない。Fig.7 によれば、潜堤を設置することにより、円柱設置点で通過平均波高を 0.4 程度にできることが予想できる。

Fig.8 は、次節で得た潜堤模型 Case 5, 7, 8 を設置したときの円柱設置点で計測した平均波高と波の実験条件を用いて理論モデルで計算した平均波高を比較したものである。潜堤天端幅が広がると計算値が実験値より大きくなる傾向にあるが、その差は小さく、実験値と計算値の一致の程度は良好である。

(2) 潜堤による打上げ低減効果の実験的検討

潜堤模型を製作し、実際に円柱への波の打上げを計測し、潜堤の効果を確認する室内実験を行った。

用いた実験装置は、2.(1)で説明したものである。

Fig.1の模型海浜に、Fig.6に示した潜堤模型 Case 5, 7, 8を設置する。その諸元を実験室スケールで再度示すと、以下のようである。

Case 5 : 天端水深 5 cm, 天端幅 16.7 cm, 法勾配 1:2の潜堤

Case 7 : 天端水深 5 cm, 天端幅 33.3 cm, 法勾配 1:2の潜堤

Case 8 : 天端水深 5 cm, 天端幅 66.6 cm, 法勾配 1:2の潜堤

潜堤は、現地の海底地形、潜堤規模、効果、工事費等を勘案して選択した。潜堤模型はステンレスのアンクルでフレームを作り、そのフレーム枠にφ5 mmの穴あきステンレス板（開孔率 23%）を張り付けて製作した。さらに、ステンレス板にアルミテープを貼り付けることによって、不透過性の潜堤にした。実験条件は、2.(2)のそれと同じである。

潜堤を設置すると、円柱設置点では平均水位が上昇する。打上げ高にはこうした平均水位の上昇分が含まれることになる。ここでは、円柱前方 20 cm 地点の波高計で得られた水位変動から平均水位の上昇量を算定して、打上げ高の値から差し引くといった補正を施すことにした。

Fig.9は横軸に円柱設置点における無次元通過平均波高をとり、縦軸に無次元平均打上げ高をプロットしたものである。●は潜堤を設置せずに計測した無次元打上げ高、○は天端幅が 16.7 cm の透過性潜堤を設置した場合、⊕は不透過性潜堤を設置した場合の無次元打上げ高である。この図によると、透過性潜堤より不透過性潜堤の方が打上げ低減効果大きい。潜堤を設置したことにより、円柱設置点での波高が減少するために○および⊕で示したデータは●に比べて \bar{H}/h が小さくなって、 \bar{R}/h も小さくなっている様子がわかる。Fig.10は、天端幅が 33.3 cm の潜堤 (Case 7) を設置した場合の実験結果である。用いた記号は前図と同じである。天端幅が広くなるにつれて波高減衰が大きくなり、打上げ高が減少している。Fig.11は、天端幅が 66.6 cm の潜堤 (Case 8) を設置した場合の実験結果を整理したものである。

透過性潜堤を用いると潜堤上で波が碎波しにくく、かえって円柱前面で碎波が生じるために、潜堤がない場合に比べて打上げ高が大きくなることもある。不透過性潜堤の場合には潜堤上で碎波が生じ、円柱設置点では波高が減少し、打上げ高が小さくなった。なお、潜堤通過後波の背面や波谷の部分に2次波峰が生じる

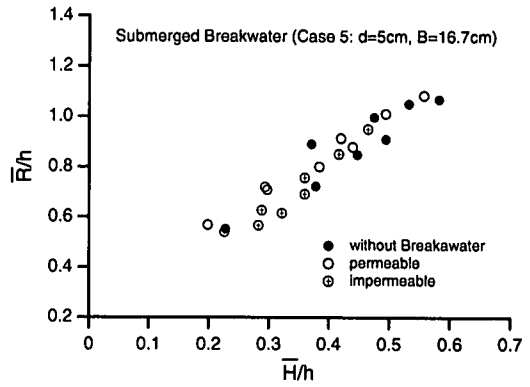


Fig.9 Relation between mean wave height and mean runup height by using submerged breakwater of Case 5

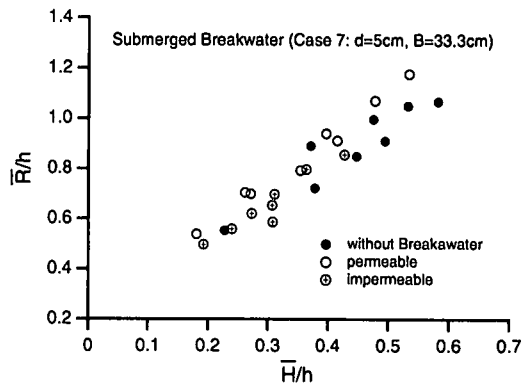


Fig.10 Relation between mean wave height and mean runup height by using submerged breakwater of Case 7

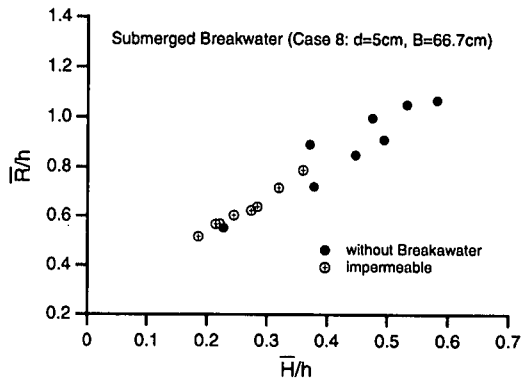


Fig.11 Relation between mean wave height and mean runup height by using submerged breakwater of Case 8

が、完全に2つの波に分裂して独立に打ち上がる状況は見られなかった。Fig.9からFig.11によれば、無次元通過平均波高が0.5より小さいと \bar{R}/h が1より小さくなる様子が確認できる。

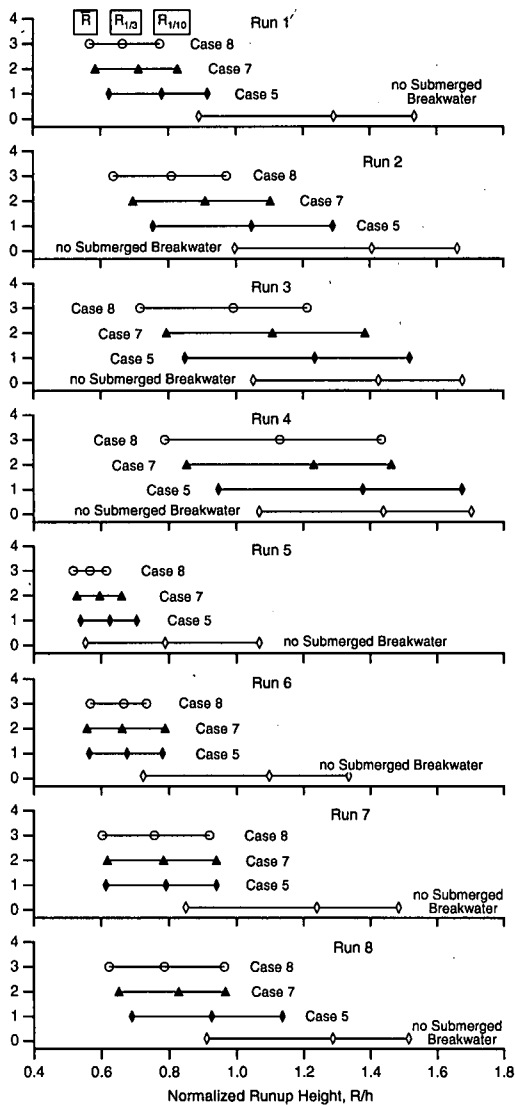


Fig.12 Representative runup height

Fig.12は円柱設置点の水深で無次元化した平均打上げ高 \bar{R}/h 、有義打上げ高 $R_{1/3}/h$ 、1/10最大打上げ高 $R_{1/10}/h$ を、8ケースの不規則波実験に対して、潜堤をしない場合と設置した場合について整理した結果である。Run 3, 4の不規則波のケースでは、潜堤の効果があまり見られないが、その他のケースでは潜堤の効果が顕著である。

4. 実海域における橋脚周辺の波浪予測と潜堤による波高低減効果

(1) 不規則波の平面変形理論を用いた波浪予測
ここでは、KP方程式をもとにしたスペクトル波浪

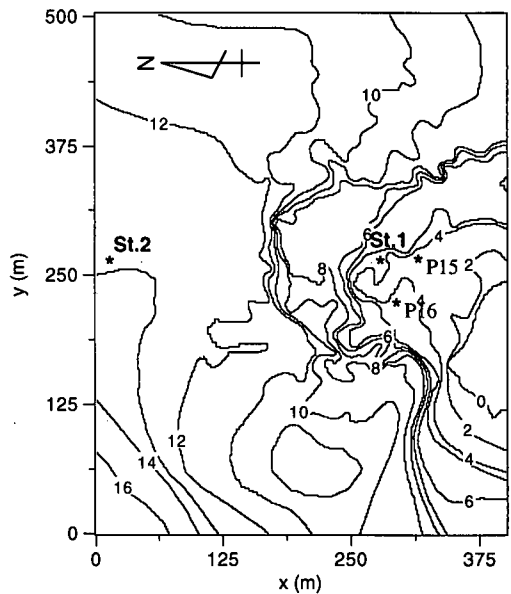


Fig.13 Bottom contour for calculation of random wave transformation

変形モデルと波別解析法を用いた確率砕波モデルを融合した不規則波浪の平面浅海変形理論を用いて、現地における波浪予測および潜堤を設置した場合の波浪低減効果を検討する。用いる波浪変形理論は以下のように表される¹¹⁾。

$$A_{n,x} + \frac{(C_{g,n})_x}{2C_{g,n}} A_n - i(k_n - n\bar{k}_1) A_n - \frac{i\{(CC_g)_n A_{n,y}\}_y}{2k(C_{g,n})_n} + \frac{3nk_l}{8h} \left[\sum_{l=1}^{n-1} A_l A_{n-l} + 2 \sum_{l=1}^{N-n} A_l^* A_{n+l} \right] + \alpha_n A_n = 0 \quad (n=1, \dots, N) \quad (4)$$

\bar{k}_1 は方向に平均化した基本波数、その他の記号は式(3)のそれと同じである。

現地において波の打上げが顕著になって飛沫が発生する波浪条件を把握するため、現地波浪観測を実施した。Fig.13に示すように、問題となっている橋脚P15からN方向に300m離れた地点St.2、35m離れた地点St.1に計測器を設置した。波浪観測は1997年11月21日10:00から12月21日22:00の1ヶ月間実施した。毎偶数時20分間、サンプリング間隔は0.5s、データ数は2400個とした。

St.2において観測された有義波高と有義波周期の時系列を解析した結果、波高が最も大きかったのは、11月22日16:00で、有義波高2.73m、有義波周期

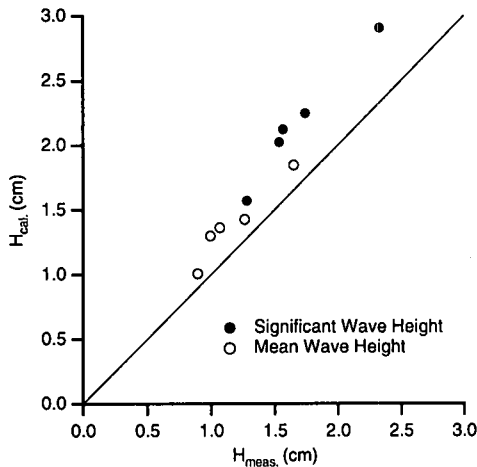


Fig.14 Comparison between measured and calculated wave heights

9.6 sであった。波向は、波高が小さい時を除き、ほぼN方向であった。St.1においても波向きはN方向であった。定時に橋脚P15を撮影したビデオにて飛沫発生を確認した日時は、12月2日 10:00, 3日 10:00, 8日 10:00, 10日 10:00である。その日時におけるSt.1での平均波高は、それぞれ1.07 m, 0.99 m, 1.26 m, 0.89 mであった。

2地点の波浪観測値が得られているので、これらの値を用いて波浪変形理論モデルの適用性を調べることができる。対象とする日時は、波が最も大きかった11月22日 16:00と、飛沫発生が確認された12月2日 10:00, 3日 10:00, 8日 10:00, 10日 10:00である。数値計算で用いた等水深図をFig.13に示している。St.2で観測された有義波高と有義波周期を用いて求めたBretschneider-光易スペクトルを波の条件として、 $x=18$ mにおける y 方向の地点全部にそのBretschneider-光易スペクトルを与えた。厳密には沖から入射する波浪は地形によって変形し、 y 方向には一様ではなくなるが、ここでは一様とした。計算メッシュ間隔は2 mとした。

St.1の地点における波高の計算値と観測値を比較したものがFig.14である。横軸は観測結果、縦軸は計算結果である。なお、図中には有義波高を●で、平均波高を○で示してある。この図によると、計算値は実測値より約1.2倍大きくなっている。差の原因としては、実測値は波圧計記録をそのまま使って波高値としていること（実際の波高は少し大きくなる可能性があること）、計算モデルは波の多方向性を考慮していないこと（考慮すると計算結果は小さ

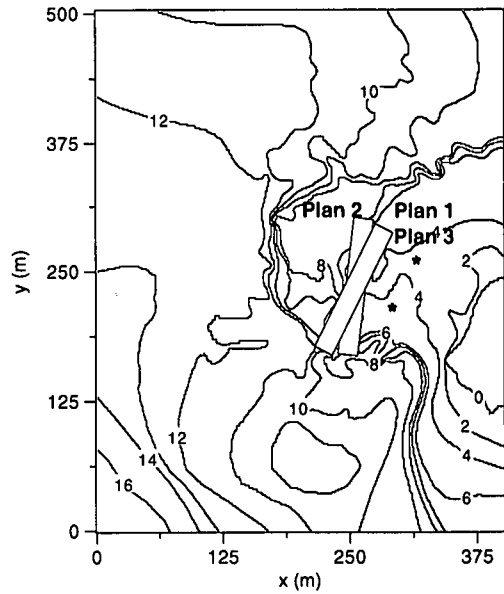


Fig.15 Bottom contour of finest mesh used in 2-D hybrid model (Region II)

くなること)によるものと思われる。なお、倍率の1.2は通常用いられる波圧から波高に換算するときの倍率と同じなので、計測器の詳細な検定を行ったならば、実測値と計算値が一致したかもしれないことを述べておく。

飛沫発生時の沖波条件を気象庁の予報による沖波波高、気象協会による波高推算値、目視による実測値から整理した。そして、対策目標とする設計条件として、設計沖波波高を4 m、周期を7.0 sと設定した。この沖波設計波に対して、エネルギー平衡方程式によって屈折計算を行い、対象とする範囲に入射する波浪条件を求めた。エネルギー平衡方程式の計算では、500 mメッシュの広領域から100 mメッシュの狭領域へと計算を進めた。すなわち、広領域における最終計算ラインの計算値を狭領域計算の初期値として用い、狭領域での計算を行った。

複雑な地形のもと、潜堤を設置したときの波浪変形を計算するに当たっては、メッシュ間隔をより細かくしなければならない。そのため狭領域をさらに細かくした領域I（メッシュ間隔10 m）と領域II（メッシュ間隔2 m）を設定した。領域Iにおける初期条件は、エネルギー平衡方程式を解いて得られる有義波高と周期を用い、Bretschneider-光易スペクトルを与えた。有義波周期は7.0 sとした。領域IIにおいては領域Iでの計算結果を初期値とし、波浪変形計算を行った。

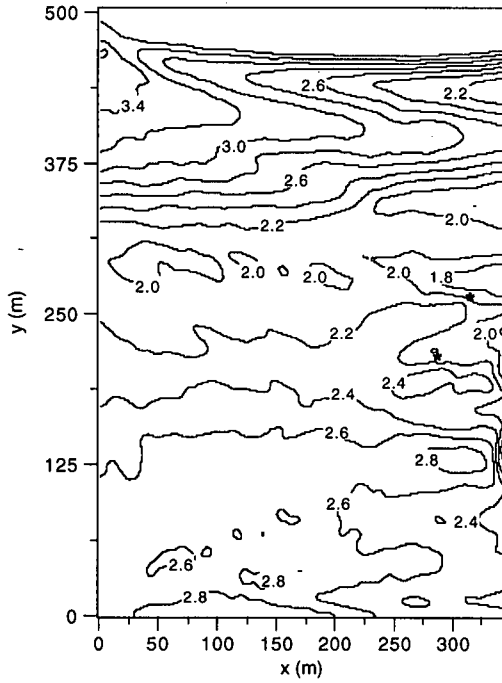


Fig.16 Calculated significant wave height without breakwater

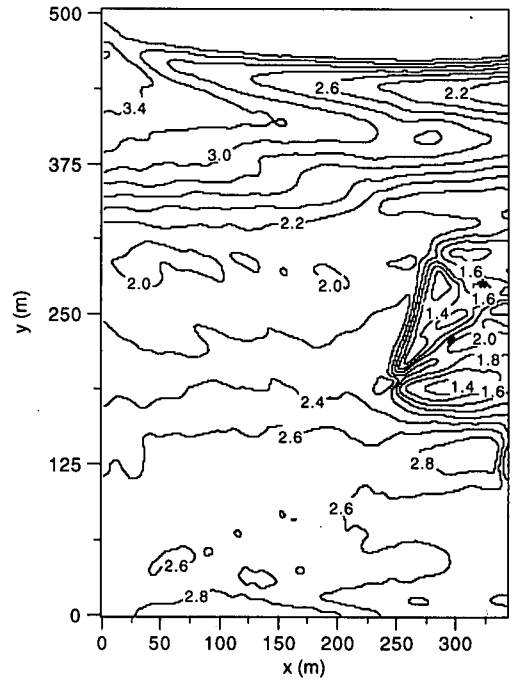


Fig.18 Contour of calculated significant wave height (Plan 2)

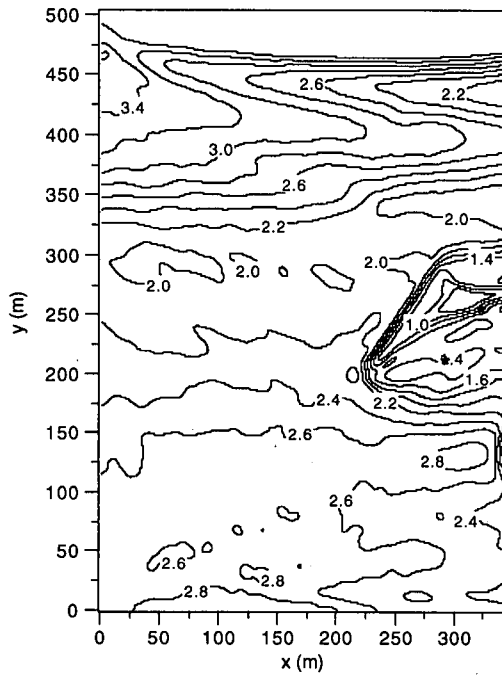


Fig.17 Contour of calculated significant wave height (Plan 1)

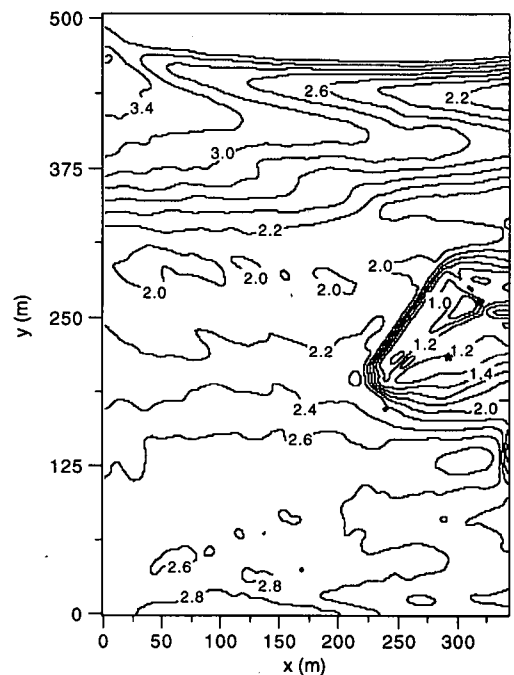


Fig.19 Contour of calculated significant wave height (Plan 3)

(2) 潜堤設置による波高低減効果予測

水理模型実験結果から、天端幅 5.0 m の潜堤は打上げ低減効果があまりないこと、天端幅が 20.0 m の

潜堤が最も減衰効果があるが、天端幅 10.0 m の潜堤に比べてそれほど優れているわけではないことがわかった (Fig.10 と Fig.11) . そこで、潜堤としては

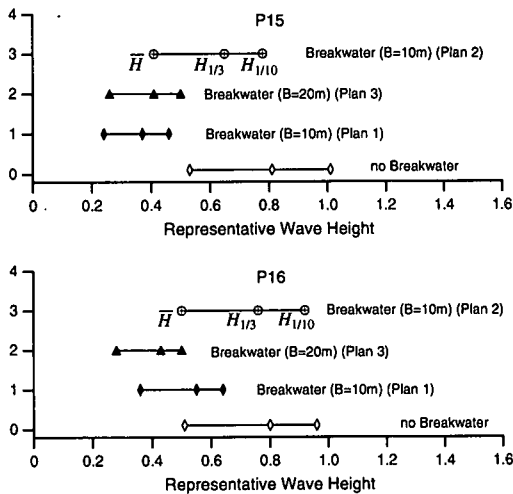


Fig.20 Summary of calculated wave heights at pier

天端幅が 10.0m と 20.0 m のものについて、平面的な波浪低減効果を検討する。潜堤設置案は、Fig.15 に示すように、以下の通りである。

案 1：天端幅＝10.0 m，法線を橋梁と平行とする

案 2：天端幅＝10.0 m，法線は水深の浅いところを通るようにする

案 3：案 1 において，天端幅＝20.0 m とする

橋脚設置点は Fig.15 の * で示してある。

$x = 0$ m の測線に沿って複素振幅を与えるが，これは領域 I において計算された値を用いる。Fig.16 は潜堤を設置しない現地形に対する有義波高の計算結果を示したものである。Fig.17 から Fig.19 は，潜堤を設置した場合の計算された有義波高の空間分布を示したものである。計算条件は，飛沫発生条件である設計沖波波高が 4 m，周期が 7.0 s である。

これらの計算結果を橋脚 P15 および P16 地点を対象として整理すると，Fig.20 のようになる。ただし，波高は橋脚設置点における水深で無次元化されている。また，各条件に対して，横一列に左から順に平均波高 \bar{H} ，有義波高 $H_{1/3}$ ，1/10 最大波高 $H_{1/10}$ がプロットされている。この図によると，橋脚 P15 に対しては，案 1 が効果がある。P16 に対しては案 3 が最もよいが，案 1 とそれほど変わらない。また，案 1 では無次元平均通過波高 \bar{H}/h を十分 0.5 以下にすることができ，大きな打上げを生じないようにすることができると考えられる。また，打上げ高の不規則性を考え，より大きな打上げにも考慮し $H_{1/10}/h$ を 0.5 以下にする場合，案 3 がこの条件を満たす。

こうした波浪予測計算により橋脚通過波高が算定

できれば，打上げ高と波高の関係をを用いて，潜堤の打上げ高低減効果を推定することができる。

5. まとめ

本研究は，海中橋脚への波の打上げ特性と，潜堤による軽減対策を検討したものである。以下，主要な研究結果をまとめ，結びとする。

(1) 円柱橋脚への波の打上げ

規則波実験から，無次元通過波高 H/h の増加に伴って R/h が増加することが明らかになった。また，不規則波の打上げ高に対しても，無次元通過平均波高と平均打上げ高にほぼ線形の関係があることがわかった。

(2) 潜堤による打上げ低減効果

透過性潜堤より不透過潜堤を設置の方が打上げ高の軽減には効果があること，潜堤の天端が広い方が打上げの軽減に効果があるのがわかった。また，無次元通過平均波高と無次元打上げ高の関係を調べた結果，潜堤を設置したことにより，円柱設置点での波高が減少するために \bar{H}/h が小さくなって R/h も小さくなり，両者にはほぼ線形の関係があることが改めて確かめられた。

(3) 平面的な潜堤設置による波高低減効果

以上の (1) および (2) の結果をうけ，潜堤設置案の検討の手順として，i) 水理実験により求めた打上げが大きくなる条件と，代表量として用いる不規則波の値（本研究では橋脚設置点での通過平均波高）を決めたのち，ii) 非線形不規則波浪変形理論を援用して，いくつかの平面的な潜堤配置案に対して所定の設計波（有義波）の変形計算を行い，橋脚設置点での平均波高が i) の高打上げ領域に入らない案を決定する，といった方法を示した。

参考文献

- 1) Morison, J.R., Johnson, J.W., O'Brien, M.P. and Schaaf, S.A.: The force exerted by surface waves on piles, Petroleum Trans., AIME, Vol.189, pp.149-154, 1950.
- 2) 橋本宏, 山口修: 円柱に作用する波力の現地観測: 第26回海岸工学講演会論文集, 海研: 1979, vol.26, pp.416-420, 1979.
- 3) 喜岡渉, 石田昭: 円柱に作用する第2次近似回折波力, 海岸工論文集, 第39巻, pp.620-624, 1992.
- 4) Kriebel, D.L.: Nonlinear wave runup on large circular cylinders, Proc. Civil Eng. in the Oceans V, pp.173-187, 1992.
- 5) 樫木亨, 後野正雄, 岩橋哲哉: 浅海域における円柱構造物の碎波局部衝撃波力特性と全体波力について, 第30回海岸工学講演会論文集, pp.376-380, 1983.

- 6) 谷本勝利, 高橋重雄, 金子忠男, 塩田啓介: 傾斜円柱に働く衝撃碎波力の実験的研究: 第31回海岸工学講演会論文集, pp.610-614, 1984.
- 7) 石田 昭, 花田昌彦, 細井正延: 飛沫の発生に関する実験的検討, 第29回海岸工学講演会論文集, pp.385-388, 1982.
- 8) 高山知司, 永井紀彦, 関口忠志: 広天端幅潜堤の波浪低減効果に関する不規則波実験, 第32回海岸工学講演会論文集, pp.545-549, 1985.
- 9) 井上雅夫, 島田広昭, 田中幸雄: 不規則波による潜堤の波高伝達率, 第34回海岸工学講演会論文集, pp.507-511, 1987.
- 10) 間瀬 登, J.T. Kirby: 不規則波のハイブリッド型断面2次元非線形変形理論, 土木学会論文集, 第479号/II-25, pp.91-100, 1993.
- 11) 間瀬 登, 北野利一, 吉岡 洋: 不規則波のハイブリッド非線形平面変形モデル, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.36-40, 1997.
- (1998.6.8 受付)

WAVE RUNUP ON CIRCULAR PIER AND COUNTERMEASURE OF ITS REDUCTION BY SUBMERGED BREAKWATER

Hajime MASE, Kazuani KOSHO, Tomotsuka TAKAYAMA,
Ryoichi SHIGEMURA and Jun-ichi NAKAHIRA

This paper examines the characteristics of wave runup on a circular pier of a bridge constructed in a shallow sea, and investigates the countermeasure for the reduction of wave runup. The experimental results showed that the wave runup of regular and random waves increase in proportion to the incident wave height at the pier. Therefore, the wave runup height can be reduced by damping incident waves. From this point of view, a submerged breakwater is employed as a countermeasure for the reduction of wave runup and the effect on reduction of wave heights and runups is investigated by hydraulic experiments and numerical simulations.