

一様勾配海底上の円柱橋脚への不規則波の打上げ高に関する実験的研究

間瀬 肇¹・幸正一伯²・永橋俊二³・高山知司⁴・井上雅夫⁵

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正会員 工修 東亜建設工業(株) (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

³学生員 関西大学 工学部土木工学科 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

⁴正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

⁵正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564-8680 吹田市山手町3-3-35)

本研究は、緩勾配から急勾配の海底地形を対象にして、うねり性の波から風波まで広範囲の波浪条件のもとで、円柱橋脚の設置水深を変えて波の打上げ高の水理実験を行い、実用的な打上げ高算定式を提案することを目的としている。また、規則波実験による波の打上げ高から不規則波の代表打上げ高を推定できるように、規則波の打上げ高と不規則波の代表打上げ高との関係を調べる。

Key Words: wave runup on pier, wave runup formula, random waves, random wave experiments

1. はじめに

海に囲まれたわが国は、本土と呼ばれる本州、四国、九州、北海道の4島と、大小7,000近くの島々から構成されている。そのうち、住民が居住している有人島は400以上ある。島間のアクセス確保は、住民の生活基盤を支える上で重要な要素である。交通アクセスを可能にするのは、船運や橋梁および海底トンネルなどの建設である。近年では、しまなみ海道に代表されるライフルラインとしての役割をも担った大規模橋梁が地域の発展を促している。小さな島々が混在する地域においては、離島間を結ぶ中小規模の橋梁建設が期待されている。

中小規模橋梁の建設に際しては、橋脚に来襲した波が打ち上がり、水塊や飛沫が橋面へ降り注ぐといった新たな問題が生じる。実際に某橋梁で橋脚完成後にこうした問題が生じ、その軽減対策が必要となった。このため、橋脚設置位置および橋脚高の設計に当たっては、通行車両や歩行者への安全に配慮し、波の打上げ高を設計要因として考慮する必要がある。円柱に作用する波力の研究は数多くなされてきたが、円柱への波の打上げはこれまで注目されておらず、研究成果はほとんどない。

間瀬ら¹⁾は、某橋梁の円柱橋脚への波の打上げに関する水理模型実験を行い、打上げ高が大きくなる条件

を明らかにし、潜堤を用いた軽減対策法の検討を行った。この研究では、特定の海底地形や波浪条件下での波の打上げを調べたものであり、波浪条件、海底地形、橋脚設置水深の影響が詳細に検討されていない。

本研究では、1/10および1/20, 1/40の一様勾配海底地形を対象として、うねり性の波から風波まで波浪条件を種々変化させ、また円柱の設置水深を変えた水理模型実験を行った。そして、波の打上げ高を整理するために有効なパラメータの検討を通して、実用に供することができる円柱橋脚への波の打上げ高算定式を提案している。また、規則波実験による波の打上げ高から不規則波の打上げ高を算定するため、規則波の打上げ高と不規則波の代表打上げ高との関係を調べている。

2. 円柱橋脚への波の打上げ実験

(1) 実験装置

実験は、長さ40m、幅70cm、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油圧式不規則波発生装置が設置されている。Fig.1は実験水路の概略図を示したものである。

模型海浜は、造波板から19.7m離れた地点に、法先部がくるように設置した。法先部から水平距離で

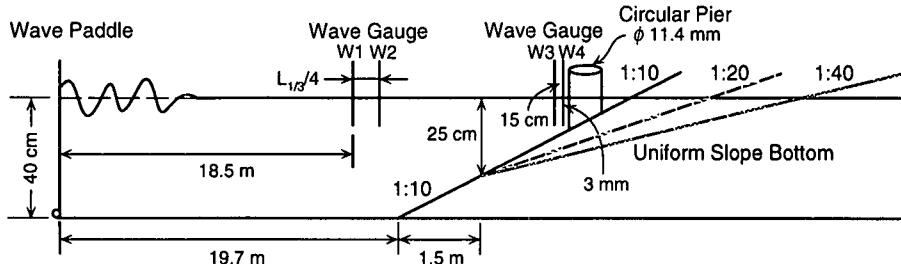


Fig.1 Experimental setup

Table 1 Experimental condition of random waves

$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (cm)			Record (s)
1.01	6.09	4.04	2.83	720
1.19	6.11	3.77	2.51	720
1.38	6.12	3.75	2.50	720
1.62	6.02	3.66	2.44	840
1.80	6.03	3.68	2.43	940
1.98	6.13	3.66	2.35	1040
2.13	6.08	3.62	2.35	1160
2.35	6.35	3.76	2.49	1320

Table 2 Experimental condition of monochromatic waves

T (s)	H (cm)			
1.01	10.45	8.52	6.62	4.50
1.20	10.43	8.41	6.37	4.16
1.39	9.92	7.97	5.99	3.99
1.58	9.87	7.97	6.01	3.98
1.76	9.48	7.85	5.95	3.95
1.94	8.91	7.33	5.55	3.67
2.11	10.12	7.94	5.93	3.91
2.29	11.56	8.98	6.39	4.07

1.5 mまでの区間は勾配を1/10とし、そこから勾配が1/10および1/20, 1/40となる3種類の一様勾配海底地形を設置した。勾配が変化する地点の水深は25 cmであり、これより深いところでは碎波は生じない。なお、一様水深部の水深は40 cmとした。

橋脚モデルとしての円柱模型は、外径Dが11.4 cmの塩ビのパイプを所定の長さに切断して作製した。円柱が鉛直に立つようにするために、底面を削って海底勾配に一致するようにし、円柱上部を水槽の上から押さえつけて固定した。円柱模型は、水深が20および15, 10, 5, 2 cmとなる位置に設置した。

水位変動および打上げ変動は、容量式波高計を用いて計測した。波高計W1は造波板から18.5 m離れた地点、波高計W2は波高計W1から有義波の1/4波長離れた模型海浜よりの地点、打上げ高計測用の波高計W4は円柱前面から3 mm離れた地点、波高計W3は波高計W4から15 cm造波板よりの地点に設置した。円柱設置点における通過波高は、円柱を取り除いて水位変動を計測することにより求めた。水位変動および打上げ変動データは、A-D変換器を介してパソコンに取り込んだ。

(2) 実験条件

実験にあたっては模型縮尺を1/30と考え、フル-

ドの相似則に従って実験条件を設定した。

用いた不規則波は、ピーク周期が1.0と1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4 sを目標値として、Breitsneider-光易型スペクトルを有するものとした。それぞれのピーク周期を有する波に対して、有義波高が6.0 cmとなるように造波信号を作成した。この造波信号を用い、造波装置のゲインを調節して、あるピーク周期の不規則波に対して波高を3通りに変化させ、24ケースの入射波を実験で用いた。目標有義波高は6.0および4.0, 2.5 cmである。波高計W2により実際に測定した有義波周期 $T_{1/3}$ および有義波高 $H_{1/3}$ は、Table 1に示すとおりである。

規則波実験においては、波の条件はTable 2のように設定した。同一周期の波に対して波高を4通りに変化させ、32ケースの入射波を用いて実験を行った。円柱模型は、水深が15 cm, 10 cm, 5 cmとなる位置に設置した。

(3) 実験方法

勾配が1/10, 1/20および1/40の海底地形ごとに、円柱の中心位置での通過波高を計測する実験および円柱前面での波の打上げ高を計測する実験を行った。データ収録時間は、個々波が500波程度収録できることを目安に、Table 1のように設定した。実験の手順は以

下のとおりである。

- 1) 模型海底地形を設置する。
- 2) 模型円柱を所定の水深位置に設置する。
- 3) 24 ケースの不規則波に対して、水位変動および打上げ変動を計測する。
- 4) 模型円柱の設置位置を変える。
- 5) 24 ケースの不規則波に対して、水位変動および打上げ変動を計測する。
- 6) 模型円柱の設置が 5 地点終了したら 1) に戻り、次の模型海底地形に対して実験を繰り返す。

データ収録時のサンプリング間隔は 0.02 s とした。データの整理に当たっては、ゼロアップクロス法によって個々の波を定義し、代表波高、代表周期、代表打上げ高を求めた。

規則波実験においては、勾配が 1/40 の海底地形のみを対象とした。これは、緩勾配の地形の方が碎波点や碎波後の波高の変動が小さいので、打上げ高にそうした変動の影響が少なくなると考えたためである。水位変動と打上げ変動をサンプリング間隔 0.02 s で、120 s 間計測した。収録データからゼロアップクロス法によって個々波を定義し、最初の 5 波から 10 波（周期によって変える）を除外し、引き続く 10 波を平均して、波高、周期および打上げ高を定義した。

3. 円柱への波の打上げ高の解析

(1) 解析に用いる無次元量

不規則波の打上げ高の代表量として何を使うべきかは定かでない。1/3 最大打上げ高では、約 15% の波はそれより大きな打上げを生じている。1 波でも大きな打上げがあると危険であると考えると、最大値に近い代表量を用いるのがよい。諸外国では、捨石防波堤への打上げ高の代表量として、2% 超過打上げ高を用いる^{2), 3)}。本研究においても、最大値に近い代表値を用いるという観点から、2% 超過打上げ高 $R_{2\%}$ で代表させる。

波の打上げ高を無次元化するための代表量としては、沖波有義波高 H_0 、通過有義波高 $H_{1/3}$ 、浅海波長 L 、沖波波長 L_0 、あるいは円柱設置水深 h などがあるが、本研究では H_0 あるいは h を用いる。無次元打上げ高を整理するためのパラメータとしては、以下のものを取り上げる。

1) パラメータ (h/H_0)

水深を冲波有義波高で無次元化した水深波高比で、水深を表すのに用いる。

2) パラメータ ($H_{1/3}/h$) (H_0/L_0)

Hallermeier⁴⁾ は、小口径円柱への打上げ高を速度水頭と結びつけて考察した。すなわち、

$$R \approx u^2 / 2g \quad (1)$$

である。また、Kriebel⁵⁾ の研究では、式(1)の関係式に加え、回折パラメータを用いて実験結果を整理している。

$u = gkH / \omega$ の関係式を利用し、式(1)を変形すると

$$R/h \approx (H/h)(H/L) \quad (2)$$

の関係式が得られる。波形勾配として沖波の H_0/L_0 、局所波高として $H_{1/3}$ を用いたパラメータが $(H_{1/3}/h)(H_0/L_0)$ である。

3) パラメータ (H_0/L_0) / (h/L_0)³

非線形性の程度を表すアーセル数は、波形勾配を相対水深の 3乗で除したものとして表される。ここでは波形勾配として沖波の H_0/L_0 、相対水深として h/L_0 を用い、 $(H_0/L_0) / (h/L_0)^3$ で表した。

(2) 無次元打上げ高の無次元水深に対する変化

Fig.2 は、勾配が 1/20 の海底地形における h/H_0 に対する無次元打上げ高 $R_{2\%}/H_0$ (●印), $R_{1/3}/H_0$ (△印) および無次元有義波高 $H_{1/3}/H_0$ (*印) の変化を示したものである。波形勾配の影響を検討するため、(a) 図には $0.008 < H_0/L_0 < 0.012$, (b) 図には $0.018 < H_0/L_0 < 0.023$, (c) 図には $0.028 < H_0/L_0 < 0.032$, (d) 図には $0.038 < H_0/L_0 < 0.042$ の実験結果を整理した。なお、図中には $R_{2\%}/H_0$ および $R_{1/3}/H_0$ の変化傾向を示す曲線、 $H_{1/3}/H_0$ に対しては間瀬・Kirby⁶⁾ の理論結果を示した。

(a) 図から (d) 図を比較すると、 $h/H_0 < 4$ では、沖波波形勾配が小さいほど、 $R_{2\%}/H_0$ および $R_{1/3}/H_0$ が大きくなることがわかる。一般に、波高は沖から浅海に伝播すると、浅水変形により波高が増加し、さらに浅海になると碎波によって波高が減少する。 $R_{2\%}/H_0$ がピーク値をとる地点は、沖波波形勾配が大きい(d) 図のケースを除いて、 $H_{1/3}/H_0$ がピークになる地点に対応している。

h/H_0 に対する $R_{2\%}/H_0$ および $R_{1/3}/H_0$ の変化率は、 $H_{1/3}/H_0$ のそれに比べて大きい。波高の変化がわずかであっても、碎波前、碎波時、碎波後といった波の状況によって打上げ高が顕著に変化する。

Fig.3 に沖波波形勾配が $0.018 < H_0/L_0 < 0.023$ で、海底勾配が 1/10 と 1/40 の実験結果をそれぞれ (a) 図および (b) 図に示す。Fig.2 の (b) 図および Fig.3 から、打上げ高に及ぼす海底勾配の影響をみることができ。海底勾配が緩やかになるにつれて、浅海域での無

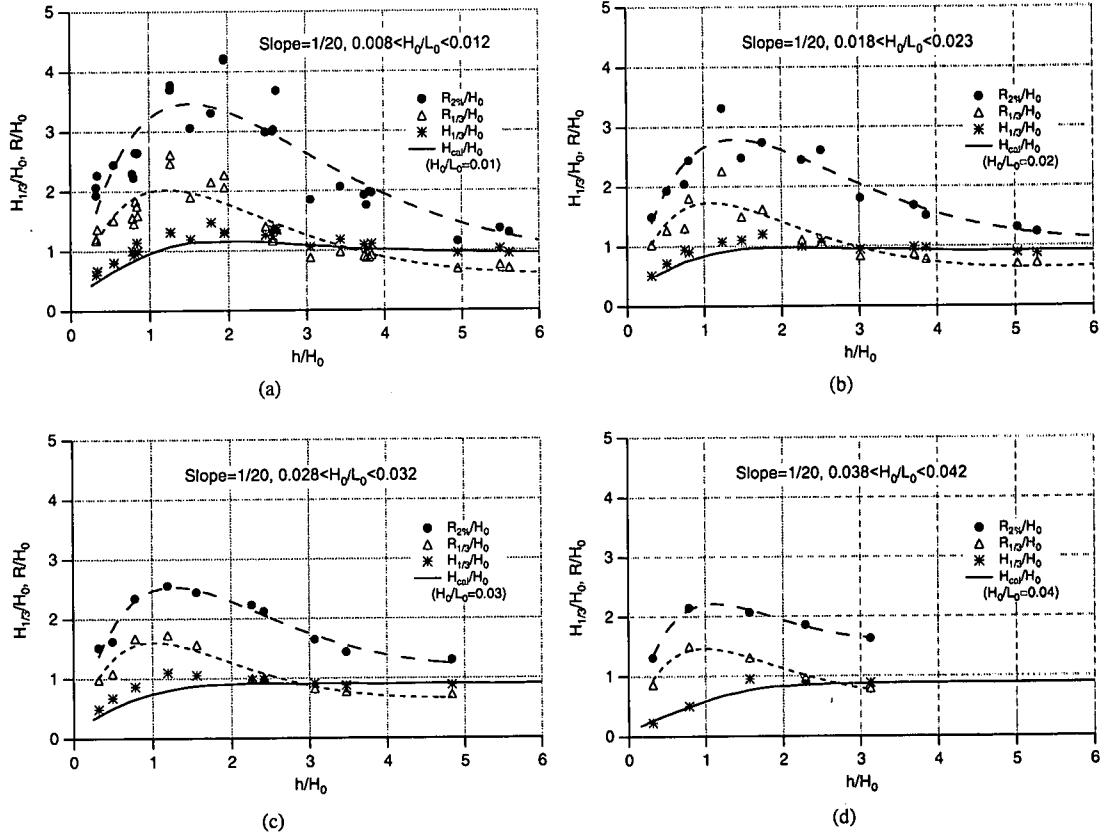


Fig.2 Spatial changes of normalized wave runup and significant wave height over 1:20 slope bottom for different deep-water wave steepness

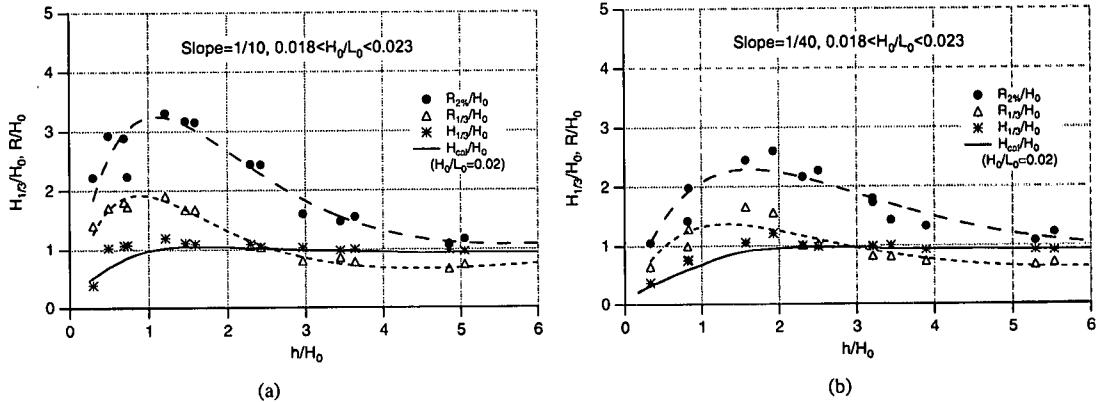


Fig.3 Spatial changes of normalized wave runup and significant wave height for $0.018 < H_0/L_0 < 0.023$ over 1:10 and 1:40 slope bottom

次元打上げ高が小さくなること、そのピークが現れる無次元水深は大きくなることがわかる。これらの変化傾向は基本的に波高の変化傾向に対応するものであるが、変化率が異なる。

打上げ高を円柱の設置水深で無次元化した場合の、

無次元打上げ高の空間変化を Fig.4 に示す。海底勾配は 1/20 であり、冲波波形勾配は 4 種類である。この図の特徴は、沖から汀線に向かって無次元打上げ高が指數関数的な増加傾向を示すこと、および H_0/L_0 の影響はあまりみられないことである。これは、波高変化に

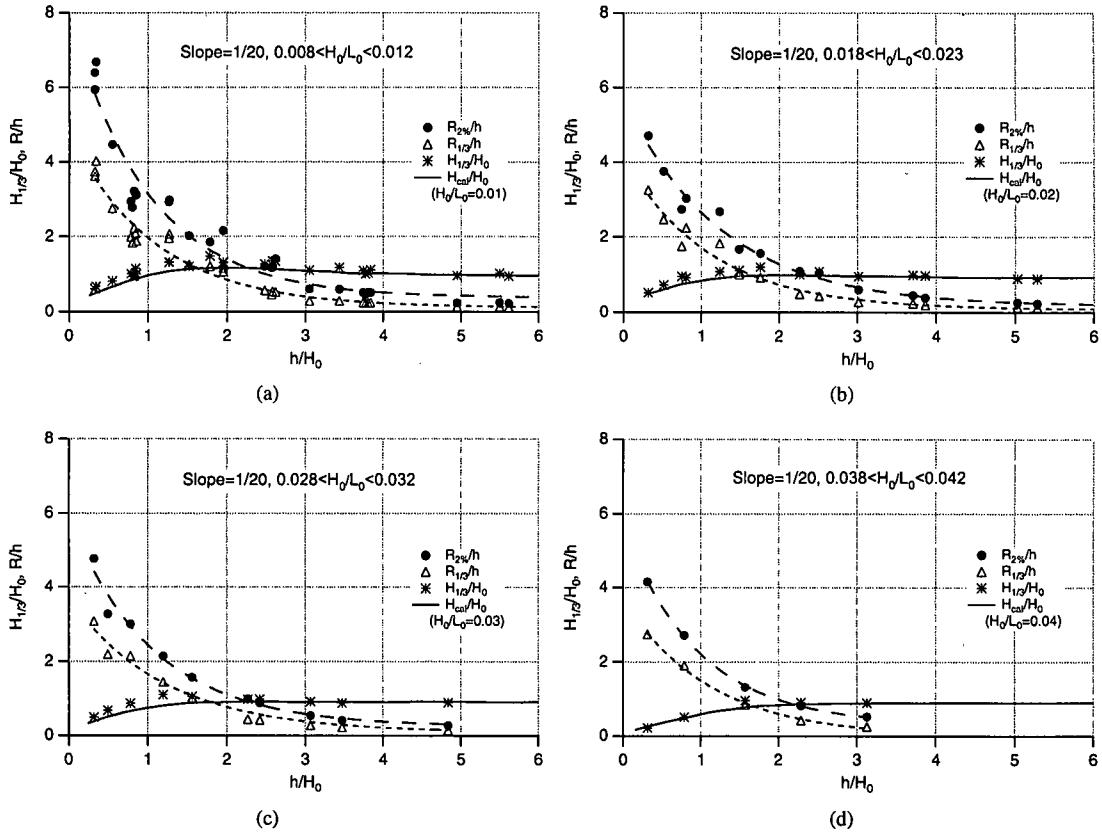


Fig.4 Spatial changes of normalized wave runup over 1:20 slope bottom for different deep-water wave steepness

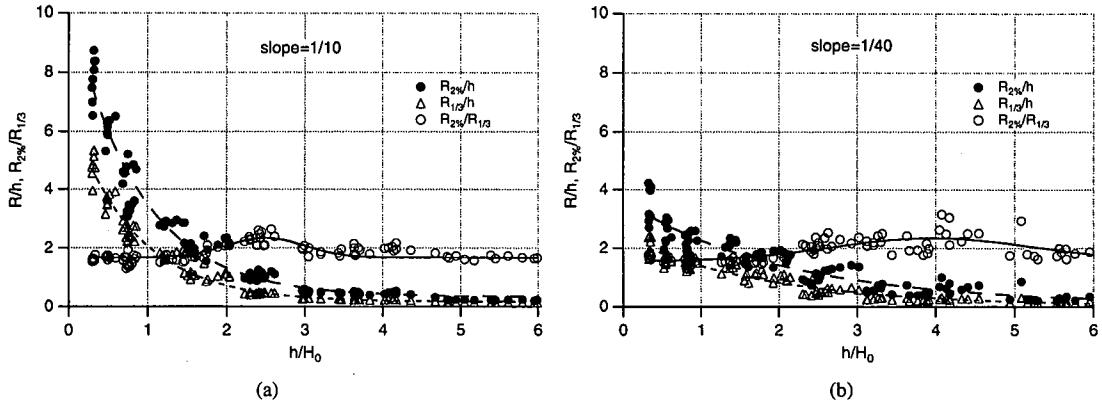


Fig.5 Spatial changes of normalized wave runup over 1:10 and 1:40 slope bottom

H_0/L_0 の影響が現れる比較的深い水深領域では大きな値の h で無次元化され R/h の値が小さくなり、また、波高が水深で規定されるようになる浅海域では H_0/L_0 の影響が少ないとことによると考えられる。

波形勾配ごとに分類せず、海底勾配ごとに R_{2w}/h および R_{13}/h をプロットすると、Fig.5 のようになる。

(a) 図は海底勾配が 1/10、(b) 図は海底勾配が 1/40 の実験結果をまとめたものである。なお、図中の○印は代表打上げ高の比 R_{2w}/R_{13} をプロットしたものであり、この比が大きいほど打上げ高の分布幅が広いことを意味する。これらの図を見ると、多少のばらつきはあるものの、 R_{2w}/h および R_{13}/h は h/H_0 に対して指数

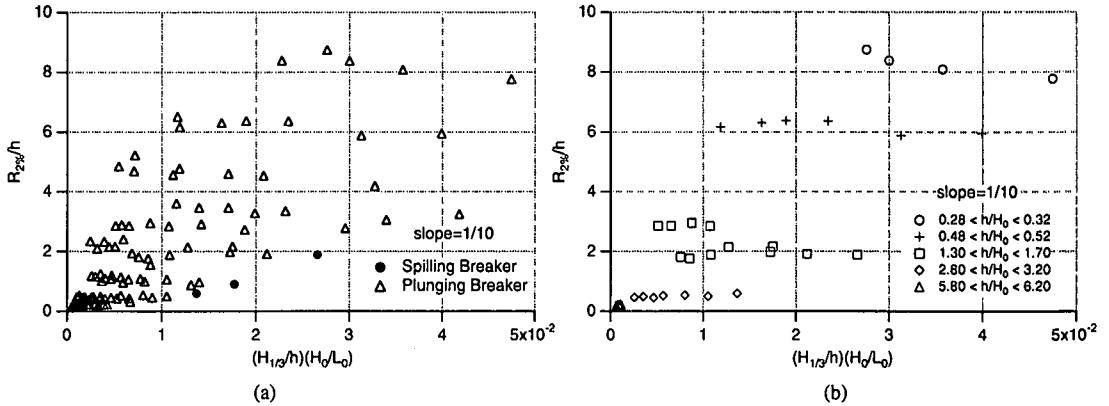


Fig.6 $R_{2\%}/h$ against $(H_{1/3}/h)(H_0/L_0)$ for the case of 1:10 slope bottom

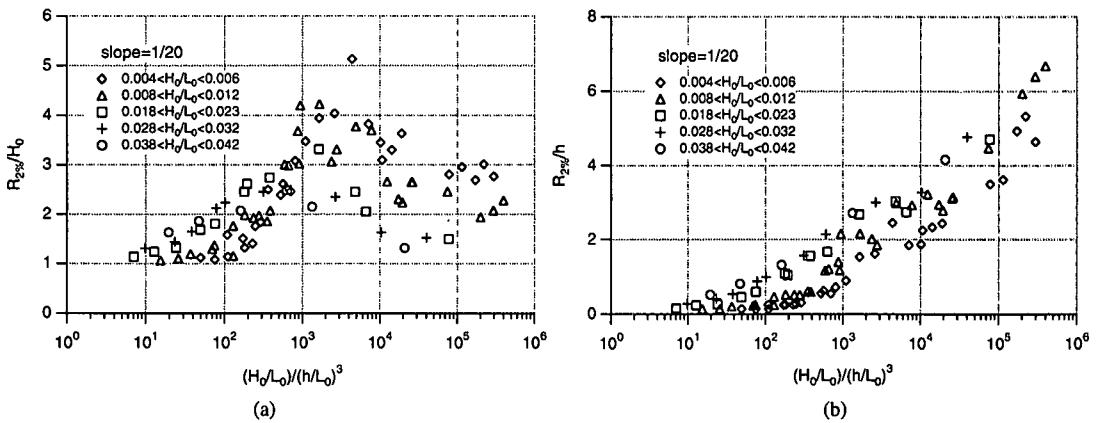


Fig.7 $R_{2\%}/H_0$ and $R_{2\%}/h$ against $(H_0/L_0)/(h/L_0)^3$ for the case of 1:20 slope bottom

関数的な変化で表されることがみてとれる。また、海底勾配が急なほど $R_{2\%}/h$ および $R_{1/3}/h$ は大きくなり、その傾向は極浅海域において顕著である。

打上げ高比 $R_{2\%}/R_{1/3}$ にはピークが現れ、そのピークは海底勾配が 1/10 の場合には $h/H_0 = 2.5$ 付近で約 2.6、海底勾配が 1/40 の場合には $h/H_0 = 4.0$ 付近で約 3.0 である。こうした地点では打上げ高の分布形が広くなっている。Rayleigh 分布であれば、 $R_{2\%}/R_{1/3}$ に対応する $H_{1/50}/H_{1/3}$ は 1.56 であり、打上げ高分布は Rayleigh 分布より一般に分布幅が広いと判断される。

(3) 無次元打上げ高と $(H_{1/3}/h)(H_0/L_0)$ の関係

Fig.6 は海底勾配が 1/10 の場合の $(H_{1/3}/h)(H_0/L_0)$ に対する $R_{2\%}/h$ の変化を調べたものである。(a) 図においては、冲波条件から spilling breaker と判定されるケースを ●印で、plunging breaker と判定されるケースを △印で示してある。

Fig.6 (a) によれば、 $R_{2\%}/h$ と $(H_{1/3}/h)(H_0/L_0)$ には、式(2)に示されるような線形関係はみられない。また、surf similarity parameter による碎波形式の分類は、spilling 碎波のケースは plunging 碎波のケースに比べて打上げ高が小さくなることは確認できても、それだけでは打上げ高の整理には有効ではない。surf similarity parameter は来襲する波の碎波形式は分類できても、来襲波の円柱前面での波の状況、すなわち、碎波前、碎波時、碎波後といった波の状況を示すものではないからである。

打上げ高を整理するに当たり、無次元パラメータ $(H_{1/3}/h)(H_0/L_0)$ に加え、他のパラメータによる分類を試みた。その中で最もうまく分類できるパラメータは、 h/H_0 であった。その結果を Fig.6 (b) に示す。この図をみると、 $R_{2\%}/h$ は h/H_0 が小さいものほど大きな打上げ高を示す。また、同程度の h/H_0 に対する打上げ高はほぼ一定である。

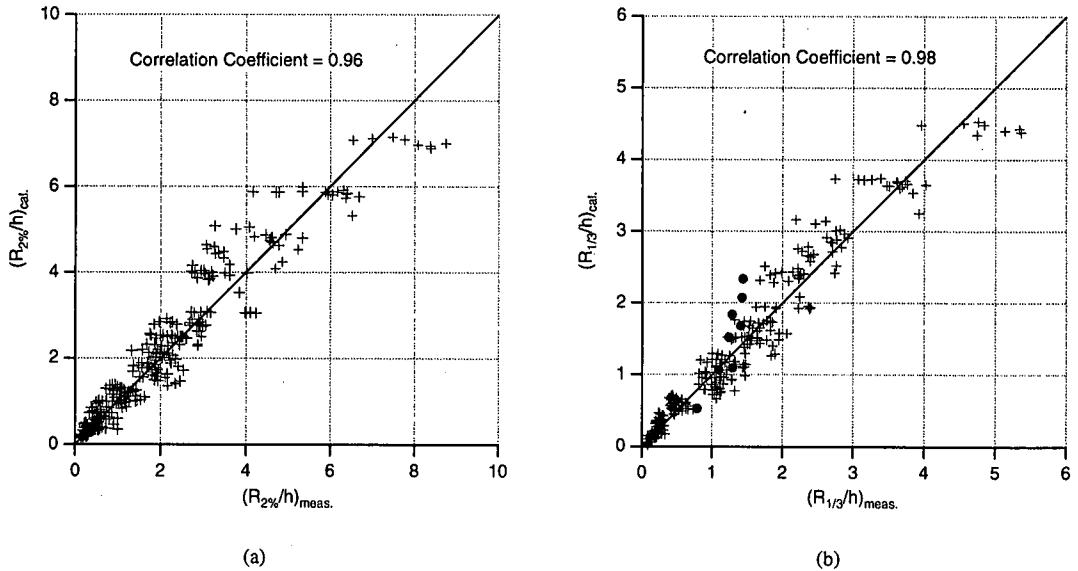


Fig.8 Comparison between measured and estimated runups

(4) 無次元打上げ高と $(H_0/L_0)/(h/L_0)^3$ の関係

Fig.7 (a) は、海底勾配が $1/20$ の場合の $R_{2\%}/H_0$ を $(H_0/L_0)/(h/L_0)^3$ に対して図示したものである。同様に、 $R_{2\%}/h$ に対しては Fig.7 (b) に示した。ばらつきの要因として surf similarity parameter では整理できなかったので、他のパラメータを調べたところ、最もうまく実験結果をまとめることができたものは沖波波形勾配であった。そこで、Fig.7においては、沖波波形勾配別に実験結果を整理してある。(a) 図によると、沖波波形勾配毎に一つのピークを有する曲線でその変化傾向を表すことができる。また、(b) 図においても、沖波波形勾配毎に実験結果を整理することができる。これらの図においても打上げ高の無次元化にあたっては、円柱の設置水深を用いると実験結果全体のばらつきが小さくなり、回帰式のあてはめが容易であることがわかる。

4. 波の打上げ高の算定式

打上げ高を円柱設置水深で無次元化した無次元打上げ高は、各海底勾配に対して H_0/L_0 の影響をそれほど受けず、また、 $R_{2\%}/h$ は h/H_0 に対してほぼ指指数関数的な変化を示すことがわかった。そこで、この特徴をもとに、以下の指指数関数を用いた打上げ高算定式を作成する。

$$R_{2\%}/h = k_0 + k_1 \exp\{-k_2(h/H_0)\} \quad (3)$$

各海底勾配毎の実験結果に式(3)をあてはめ、 k_0 , k_1 および k_2 の値を推定し、海底勾配の逆数 $\cot \theta$ に対して線形近似して以下の関係式を得た。

$$\left. \begin{array}{l} k_0 = 0.24 - 0.004 / \tan \theta \\ k_1 = 11.43 - 0.20 / \tan \theta \\ k_2 = 1.23 - 0.02 / \tan \theta \end{array} \right\} \quad (4)$$

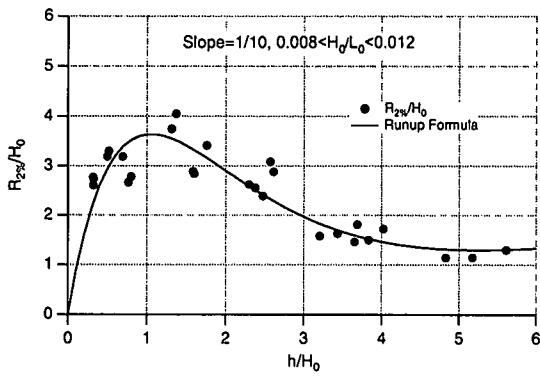
打上げ高 $R_{1/3}/h$ に対しては、

$$\left. \begin{array}{l} k'_0 = 0.20 - 0.005 / \tan \theta \\ k'_1 = 7.50 - 0.130 / \tan \theta \\ k'_2 = 1.39 - 0.022 / \tan \theta \end{array} \right\} \quad (5)$$

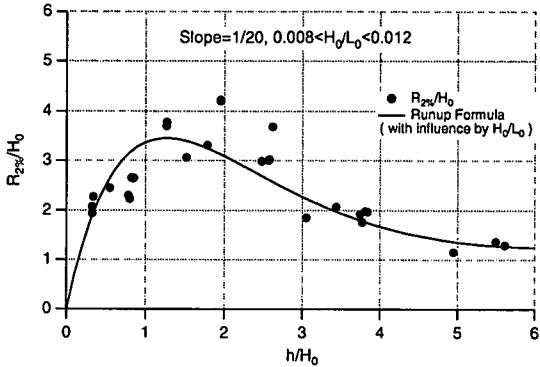
である。

Fig.8 の + 印は無次元打上げ高 $R_{2\%}/h$ および $R_{1/3}/h$ に関する、すべての実験結果と算定式による結果を比較したものである。沖波波形勾配の影響を考慮していないため多少のばらつきはあるものの、両者の相関係数は $R_{2\%}/h$ の場合 0.96, $R_{1/3}/h$ の場合 0.98 と良く一致している。なお、Fig.8 (b) の ● 印は間瀬ら¹⁾ の実験結果を示したものである。この実験は、現地地形を対象としたものであり、水平勾配上に円柱が設置されていたが、その前面の海底勾配は $1/27.5$ であったので、海底勾配を $1/27.5$ として式(3) および(5) により算定したものである。これらの実験値も算定値と概ね一致している。

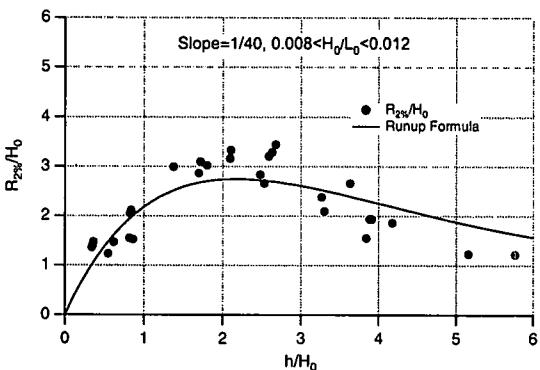
上記の算定式の係数は、沖波波形勾配の影響を考慮



(a)



(b)



(c)

Fig.9 $R_{2\%}/H_0$ against h/H_0

して求めたものではないので、算定値と実験値には若干のばらつきがみられた。式(3)を変形すると、

$$R_{2\%} / H_0 = k_0(h / H_0) + k_1(h / H_0) \exp\{-k_2(h / H_0)\} \quad (6)$$

のようになる。式(6)によると、 $R_{2\%}/H_0$ は h/H_0 の関数になり、Fig.2 によれば $R_{2\%}/H_0$ は H_0/L_0 に影響を受けるが、式(6)ではその影響が考慮されない。そこで、 H_0/L_0 を考慮した算定式に修正する。 $R_{2\%}/H_0$ の h/H_0 に

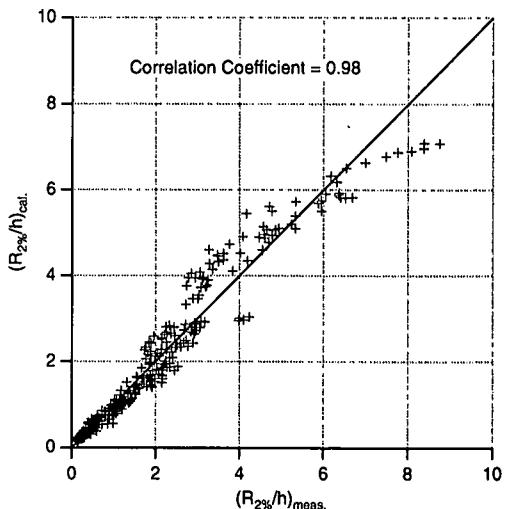


Fig.10 Comparison between measured and estimated runups

対する変化を表すためには、式(3)の k_2 を H_0/L_0 と海底勾配 $\tan \theta$ の関数として以下のように表せばよいことがわかった。

$$k_2 = [1.55 - 0.77 \exp\{-69.46(H_0 / L_0)\}] \times (1.02 - 0.015 / \tan \theta) \quad (7)$$

このように H_0/L_0 を考慮して求めた k_2 を用いて $R_{2\%}/H_0$ を推定した結果を Fig.9 に示す。図中の実線は算定式による結果であり、プロット点は実験結果である。これらの図から、実線は実験結果の変化傾向を十分表現できていることがわかる。ただし、図では示していないが、海底勾配が 1/10 の冲波波形勾配が大きい場合に、推定した $R_{2\%}/H_0$ のピークが現れる水深が多少ずれる。これに関しては、 k_0 および k_1 を海底勾配のみの関数として取り扱っているためと思われる。

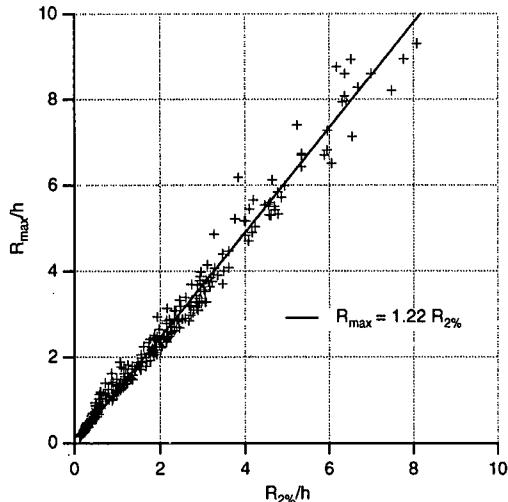
H_0/L_0 の影響を考慮した打上げ高算定式による算定値と実験値を比較したものが Fig.10 であり、横軸が実験値、縦軸が算定値である。両者の相関係数は 0.98 であり、Fig.8(a) に比べ一致の程度が向上している。

次に、各代表打上げ高の関係を整理する。Fig.11 は、 R_{max}/h と $R_{1/3}/h$ の $R_{2\%}/h$ に対する関係を示したものである。これらの図から相互の関係式を示すと、以下のようである。

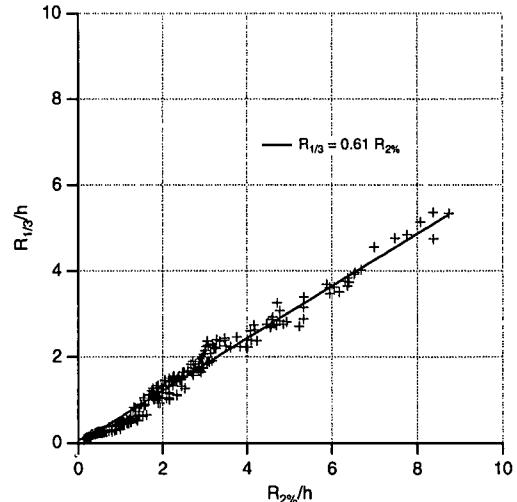
$$R_{max} = 1.22 R_{2\%} \quad (8)$$

$$R_{1/3} = 0.61 R_{2\%} \quad (9)$$

R_{max} と $R_{2\%}$ の関係は、多少のばらつきはあるものの式(8)でうまく表され、 R_{max} を用いれば安全側の設計



(a)



(b)

Fig.11 Relation between R_{\max} , $R_{2\%}$ and $R_{1/3}$

基準としての目安になる。

本研究で提案する小口径円柱 ($D/L_0 \ll 0.1$) に対する打上げ高算定式は、以下のとおりである。

$$\begin{aligned} R_{2\%}/h &= (0.24 - 0.004/\tan\theta) + (11.43 - 0.20/\tan\theta) \\ &\times \exp\left\{-[1.55 - 0.77 \exp\{-69.46(H_0/L_0)\}]\right\} \\ &\times (1.02 - 0.015/\tan\theta)(h/H_0) \end{aligned} \quad (10)$$

ただし、適用範囲の目安は以下のようである。

$$\left. \begin{array}{l} 1/40 \leq \tan\theta \leq 1/10 \\ 0.004 < H_0/L_0 < 0.05 \\ 0.3 < h/H_0 < 6 \end{array} \right\} \quad (11)$$

海底勾配が $1/40$ より緩やかな場合は $1/40$ を用いることにすれば、安全側の算定値となる。また、非一様勾配の場合には平均海底勾配を代用して打上げ高を算定することになるが、詳細な検討は今後の課題である。

5. 規則波と不規則波の打上げ高の関係

規則波の波高を不規則波の有義波高に対応させる。そして、規則波の打上げ高 R と不規則波の代表打上げ高との対応関係を調べたところ、 R は $R_{1/3}$ と一致

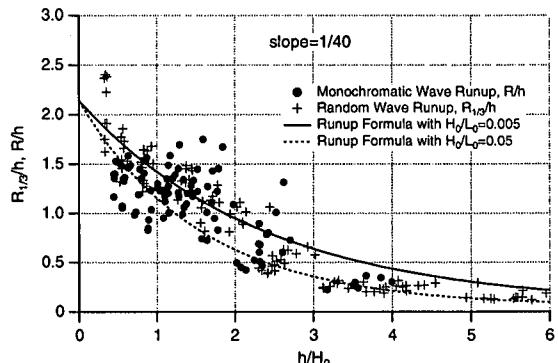


Fig.12 Comparison between monochromatic and random wave runups

の程度が良いことがわかった。規則波については R/h 、不規則波については $R_{1/3}/h$ を h/H_0 に対してプロットしたものが Fig.12 である。図中には算定式 (10) と式(9)を用いた算定結果も示してある。この図によれば、規則波の方がばらつきが大きいことがわかる。規則波の打上げ波は、実際には一波ごとかなり変動している。実験結果は 10 波を平均して示したものであるが、不規則波の場合よりも大きなばらつきが生じる。海底勾配が $1/20$ および $1/10$ と急になると、碎波点や碎波後の波高の変動が大きくなり、打上げ高の変動も Fig.12 の実験結果より大きくなると思われる。海底勾配が $1/40$ の実験結果によれば、 R は $R_{1/3}$ との一致が概ね良いので、規則波の実験結果を用い

て不規則波の $R_{1/3}$ を推定し、式(8)および式(9)を用いてその他の代表打上げ高を算定することができる。

6. まとめ

本研究は、1/10, 1/20 および 1/40 の一様勾配海底地形を対象として、波浪条件および円柱の設置水深を変えた水理模型実験を行い、円柱橋脚への波の打上げ高算定式を作成することを目的としたものである。また、規則波の打上げ高と不規則波の代表打上げ高との関係を調べた。ここで、主要な結果をまとめて結論とする。

1) 沖波有義波高で無次元化した打上げ高は、沖波波形勾配が小さいほど大きくなる。無次元打上げ高の増加率および減衰率は、対応する無次元有義波高のそれに比べて非常に大きい。これは、波高の変化がわずかであっても、非碎波、碎波直後、および碎波後の波といった波形態によって打上げ高が顕著に変化するためである。また、無次元打上げ高は、海底勾配が緩やかになるにつれて小さくなり、ピーク値が現れる水深波高比は大きくなる。

2) 円柱の設置水深で無次元化した打上げ高は、沖から汀線に向かって指數関数的に増加する変化を示し、沖波波形勾配の影響は少なくなる。

3) 無次元打上げ高算定式については、海底勾配

および沖波波形勾配の影響を取り込んだ算定式である式(10)が実験結果をうまく表現できる。また、代表打上げ高間の関係式として式(8)および式(9)を得た。

4) 規則波の打上げ高は、不規則波の1/3 最大打上げ高に対応する。ただし、規則波の打上げ高は一波ごとの変動が大きく、打上げ高算定式との一致の程度も不規則波のそれより悪くなる。

参考文献

- 1) 間瀬 整、幸正一伯、高山知司、重村良一、中平順一：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、土木学会論文集、第621/II-47, pp.129-139, 1999.
- 2) Kamphuis, J.W. and N. Mohamed : Runup of irregular waves on plane smooth slope, Jour. Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, Vol.104, No. WW1, pp.135-146, 1978.
- 3) Holman, R.A. : Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach, Jour. Coastal Eng., Vol.9, pp.527-544, 1986.
- 4) Hallermeier, R.J. : Nonlinear flow of wave crest past a thin pile, Jour. Waterways, Harbors, and Coastal Eng., Vol.102, No. WW4, pp.365-377, 1976.
- 5) Kriebel, D.L. : Nonlinear wave runup on large circular cylinders, Proc. Civil Eng. in the Oceans V, pp.173-187, 1992.
- 6) 間瀬 整、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.

(2000.3.2 受付)

WAVE RUNUP ON CIRCULAR PIER AND RUNUP FORMULA ON UNIFORM SLOPING SEA BOTTOM

Hajime MASE, Kazuani KOSHIO, Shunji NAGAHASHI,
Tomotsuka TAKAYAMA and Masao INOUE

This paper examined the characteristics of wave runup on a circular pier of a bridge experimentally, and proposed the runup height formula. The experiments were carried out under a wide range of test conditions; the bottom slope ranging from 1:10 to 1:40, the deep-water wave steepness ranging from 0.004 to 0.05, the installed water depth at the pier from very shallow water to relatively deep water. After examining what parameters were effective to arrange the runup heights, we proposed the prediction formula of runup height under consideration of the bottom slope and deep-water wave steepness. The agreement between the experimental and estimated runups is very good and the correlation coefficient was 0.98.