

高天端防波堤の波力特性に関する研究

水野雄三*・杉本義昭**・木村克俊***
山中浩次****・菊地聡一****

1. ま え が き

近年、外郭施設である防波堤に対しても魚釣りや散歩などのレクリエーションの場として利用要請がある。こうした親水性防波堤は、整備を進める上で利用者に対する快適性、利便性及び人に対する安全性が求められる。

防波堤上での利用者の安全性については、一般的に利用時の越波や波の打ち上げが重要な要素で、安全性の向上と利用率の確保から、人命を守るための越波に対する安全基準の作成と越波のしにくい防波堤構造諸元の採用が要請されている。前者については、高橋ら（1992）が実験により越波水の流れと人の転倒との関係を求め、人の転倒限界条件を提案している。後者については、設置箇所の気象・海象条件とも関係するが、北海道管内の港湾のように高波浪が襲来する外海に面した第一線防波堤を対象とする場合には、一つの対応策として防波堤の天端高が設計有義波高との比で1以上となるような高天端防波堤にすることが考えられる。混成堤直立部に作用する波力については、合田・福森（1972）、合田（1973）、谷本ら（1981, 1984）により研究され、合田式として港湾構造物等の設計に用いられている。しかし、天端高と波圧との関係について、高天端のときに静水面強度を中心に波圧強度が増大する傾向があることなどが示唆されており、さらに高天端化に伴い岩田・清野（1983）が示した重複波型砕波現象の顕在化など波力特性の変化が予想される。以上より、高天端防波堤を設計するに当たり、波力に対する天端の影響を調べ現設計法の適応性を検討する必要がある。

本研究は、低マウンド混成堤を対象に高天端防波堤の波力特性について、不規則波による2次元及び3次元の水理模型実験により波力増大条件を明らかにし、あわせて設計法を検討するものである。

2. 実験条件及び実験方法

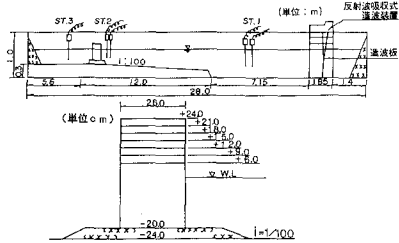
（1）2次元実験

実験に使用した造波水路は、図一1に示したとおり長さ28 m×幅0.8 m×高さ1 mの吸収式不規則波発生装置付き2次元水路で、勾配1/100の水路床に模型堤体を設置して滑動実験を主体に波圧実験もあわせて行った。模型堤体は、天端高及び堤体重量を調整できるようにした幅26 cm×長さ79 cmの亚克力製ケーソンで、底版には現地と摩擦係数を合わせるため厚さ3 cmのモルタル板を取り付け、粒径2 cm以下の碎石を用いて敷き均した厚さ4 cmのマウンド上に設置して実験を行った。実験で作用させた波は、ブレッダシュナイダー・光易型の不規則波で、フルード則によった。

波高は容量式波高計により沖側及び堤体前面の2箇所

で、堤体変位量はインダクタンス式防水型変位計によりマウンド上6 cm及び天端から1.5 cmの位置の2箇所

で、波圧は堤体天端高さにより4～5箇所で測定した。



図一1 実験水路と模型堤体

表一1 実験ケース

分類	水深 (cm)	周期 (s)	天 端 高 (cm)	有 義 波 高 (cm)
滑動 実験	18	1.27	3～24 cm の うち数種類	6.97～11.22
	24	1.56		5.06～13.35
	30	1.84		7.19～14.24
波圧 実験	18	1.27	7, 10, 12, 18, 24	8.10, 11.18
	24	1.56	6, 12, 15, 18, 24	7.08, 12.3
	30	1.84	6, 10, 12, 18	8.07, 13.36

* 正会員 工博 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室長
** 正会員 北海道開発局留萌港湾建設事務所第1工事課長
*** 正会員 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室主任研究員
**** 正会員 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室

波圧データは、100 Hz でサンプリングし、オフラインで電算処理し、同時最大波圧分布を求めた。実験ケースは、表-1 に示すとおり水深3 ケース×周期3 ケース毎に、波高、天端高を数種類変化させて行った。

(2) 3次元実験

実験は、図-2 に示すような不規則波発生装置を有する大型平面水槽(28.0 m×23.0 m×1.0 m)に平らな海底模型を製作して行った。水槽内には、反射波を吸収するため二辺に碎石で消波斜面を設けている。防波堤模型は粒径2 cm 以下の碎石を用いたマウンド上にアクリル製のケーソン模型を設置した混成堤で、延長8.6 m の島防波堤の状態とした。堤体底面は21×33 cm で、内部を中空とし、この中に重錘を入れて所定の重量を確保できるようにした。また、模型の天端高さ h_c は6.0 cm, 10.0 cm, 16.0 cm, 20.0 cm の4段階に変えることが可能で、底部はマウンドとの摩擦係数が現地とほぼ同じになるようにモルタル製にした。

模型堤体は図中の実線と点線の二重線で示すように、堤体法線直角方向に対し波の入射角 β が0°, 30°, 60°の3状態になるように設置して、ブレードシュナイダー・光易型のスペクトル型の不規則波を作用させて滑動実験及び波圧実験を行った。なお、堤体前面波高は島防波堤における端部の回折効果や入反射波相互の干渉により場所的に変動するため、各波向きごとに島防波堤の測定対象位置を定める必要がある。このため、島防波堤の堤体前面波高分布測定を行い、各波向きごとに堤体前面の波高比が一致している場所を波圧測定位置として定めた。

滑動実験での滑動量は、実験開始前後の堤体の移動量を全堤体で測定し、さらに波圧測定位置では模型堤体の底部2箇所(堤体の両端)で変位計を用いて測定を行った。滑動量の代表値は波力測定位置を中心とした2~3箇のケーソンの滑動量を平均して用い、滑動量と滑動限界波高との関係を調べた。

波圧実験での波圧測定は、堤体天端高さにより4~6箇所で行った。

実験ケースは、水深19 cm, 周期1.86 s, 有義波高は6.0 cm~10.0 cm の1 cm おきに5波高、入射角は3種類の計15 ケース実験し、斜め入射波が作用するときの波圧

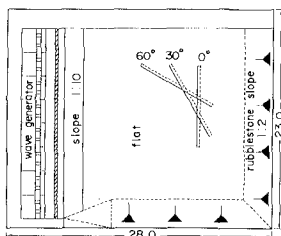


図-2 平面水槽図 (Unit: m)

特性を検討した。

3. 2次元実験結果

(1) 反射波特性

水深(h)24 cmの実験結果を例に、相対天端高($h_c/H_{1/3}$)と反射率(K_r)との関係を波形勾配をパラメータにして図-3 に示した。 K_r は、0.6~0.85の範囲で変化しており、波形勾配の大きい方が K_r が小さい。波形勾配が約0.045以上では K_r は相対天端高に比例して増加しピークをもつ傾向にあるが、0.035以下ではほぼ一定値となっており、天端高の違いによる水理特性を検討する上で波形勾配が一つの指標と考えられる。

(2) 越波特性

同じく $h=24$ cmの実験結果を例に、防波堤天端高の違いによる堤体への波の作用状況を検討するため、越波状況を越流型と打込型越波に分けてそれぞれの越波回数と $h_c/H_{1/3}$ との関係を図-4 に示した。

越流型越波は $h_c/H_{1/3}$ の増加に伴い減少する。打込型越波は $0.9 < h_c/H_{1/3} < 2.0$ でピークをもつ山形分布を示す。越流型と打込型との回数が逆転する $h_c/H_{1/3}$ は概ね1.3~1.6の範囲であり、越波がほとんど生じないのは2.4以上の範囲である。

(3) 滑動安定性

滑動実験では、水中重量が既知な模型堤体に実験波を200波作用させた後のケーソン下端の滑動量と作用させた有義波高との関係を調べ、各実験断面毎(各水深・周

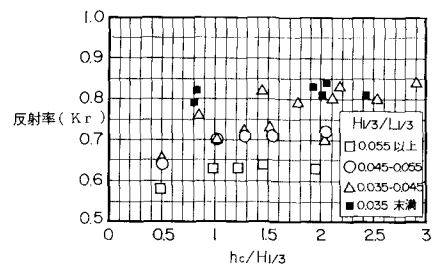


図-3 反射率と相対天端 ($h=24$ cm)

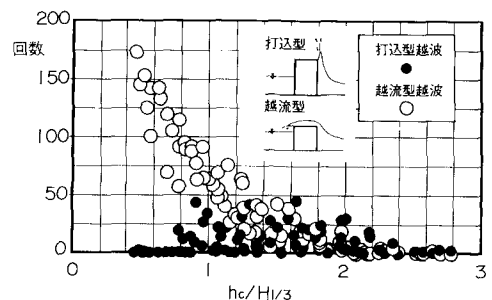


図-4 越波回数と相対天端高 ($h=24$ cm)

期・天端高毎)に滑動量が2 mmに相当する時の有義波高を滑動限界有義波高($H_{d1/3}$)として求めた。実験では各実験断面毎に4種類以上の有義波高を作用させた。堤体重量は各実験断面毎に作用させる最大有義波高に対して、合田式から求めた滑動安全率が約0.9となる重量を採用し、この時の水中重量を滑動限界重量(W_E)とした。模型堤体の摩擦係数は実験により 0.57 ± 0.05 であり、以下の検討では0.6として用いた。

滑動安定性を検討するため、各実験断面毎に合田式から求めた滑動安全率が1.0となる時の堤体重量を合田の滑動限界重量(W_G)と定義し計算により求めた。なお、 $H_{d1/3}$ に対応する滑動限界波高(H_{dmax})は通過波検定時の結果から推定した。図-5は、滑動限界重量比(W_E/W_G)と $h_c/H_{d1/3}$ との関係を示したもので、図中の点線は、平均的な傾向を表している。低天端状態では合田波圧よりも小さく、傾向は中田ら(1984)の結果とほぼ一致している。さらに天端が高くなるに伴い作用波圧が大きくなり、平均的に $h_c/H_{d1/3}=0.8$ 程度で合田波圧と一致しており、滑動限界有義波高の定義もほぼ妥当なものと考えられる。 $h_c/H_{d1/3}=1.0 \sim 2.0$ の領域はばらつきも大きく、 W_E/W_G が1.3以上のケースもあり、何らかの条件で合田波圧より大きな波圧が作用することが予測される。しかし平均的には $W_E/W_G \approx 1.1$ と一定しており、さらに天端が高くなると W_E/W_G の値も小さくなっていく傾向が読み取れる。これらの原因として、岩田ら(1983)の研究による不規則重複波の碎波現象が考えられる。天端が高くなり越流型越波が少なくなると、入射進行波型碎波が生じやすく、かつ堤体が波頂の衝突を受けとめるだけの高さがあるため波力が大きくなる。さらに天端が高くなると重複波型碎波が多くなり波頂の堤体への衝突が少なくなるためと推測できる。

(4) 波圧特性

天端のみが違うときの波圧分布の一例として、水深24 cm, 周期1.84 s, 有義波高11.8 cmの時の最大同時波力作用時の波圧分布を図-6に示した。最大同時波力は各点の波圧に分担比率を乗じて求めた波力合力の時系列データを作成し、ゼロクロス解析して最大波圧(P_{max})、1/

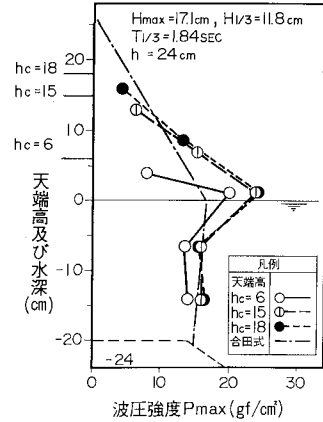


図-6 天端高と波圧分布

10 最大波圧($P_{1/10}$)などを求めた。同図には P_{max} の波圧分布及び合田式から求めた波圧を示した。なお、 h_c が6, 15, 18 cmの時 $h_c/H_{1/3}$ はそれぞれ0.51, 1.27, 1.53となり、波力は $h_c/H_{1/3}=1.27, 1.53$ で合田波圧よりもかなり大きく、特に静水面付近及びその上方で波圧が増大していることが分かる。このように不規則波による防波堤直立壁に作用する波力が大きくなるのは、今回の実験のように低マウンド条件であっても天端が高くなると、不規則重複波の碎波現象により切り立った波面のまま堤体に衝突する波が多くなることにより、静水面上で波力増大がみられると推定できる。

4. 3 次元実験結果

(1) 滑動安定性

各実験断面毎(各天端高・入射角(β)毎)に5種類の有義波高を作用させ、それぞれの滑動量を求め、前述と同様の方法で滑動限界波高($H_{d1/3}$, H_{dmax})を求めた。また、その堤体重量で合田式による滑動安全率が1.0となる波高を合田の滑動限界波高(H_{Gmax})と定義した。実験結果から H_{dmax}/H_{Gmax} と $h_c/H_{d1/3}$ との関係を β をパラメータにして図-7に示した。縦軸の値が1.0より小さいほど合田波圧よりも大きな波圧が作用していることで、 $\beta=0^\circ$ で $h_c/H_{d1/3}=1.4$ のときに最も小さく(波圧は最大)なっている。しかし、 β が $30^\circ, 60^\circ$ と大きくなるに伴い、 H_{dmax}/H_{Gmax} が大きくなり、かつ、天端高の違いによる差は小さくなっており、入射波が斜めになるに伴い衝撃的な波圧の発生が抑制されていると考えられる。

(2) 波圧特性

天端高をパラメータにして、各入射角毎の最大同時波圧分布を図-8に示す。横軸は各波圧強度(P_{max})を波高(H_{max})×水の単位体積重量(W_0)で割った無次元波圧強度(P_*)で、縦軸は堤体の位置を座標で示し、図中の点線は、合田式による波圧分布を表している。

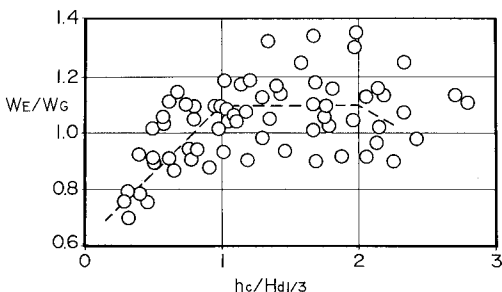


図-5 相対天端高と W_E/W_G

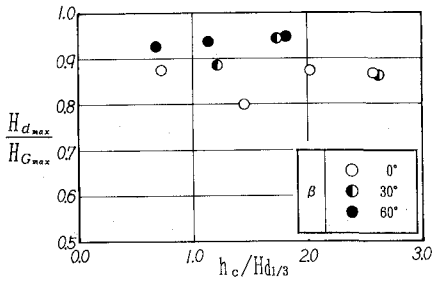


図-7 入射角による相対天端高と滑動限界波高比

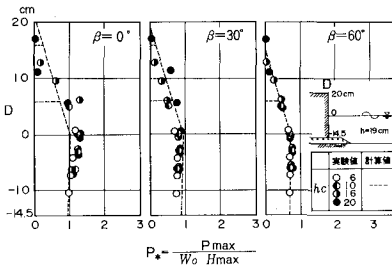


図-8 入射角と波圧分布

$\beta=0^\circ$ の場合、天端が高くなることに起因する波力の増大が静水面よりも高い位置において測定されたが、 $\beta=30^\circ, 60^\circ$ と入射角が大きくなるに従い、合田式との差は小さくなっている。

5. 波力特性に関する考察

(1) 波力増大条件

前出の図-5で示した波力増大条件を検討するため、横軸に $H_{d1/3}/h$ を、縦軸に $H_{d1/3}/L_{1/3}$ をとり、パラメータとして $h_c/H_{d1/3}$ 及び W_e/W_G をランクに分けて図-9に示した。同図より $h_c/H_{d1/3} \leq 1$ の時で波高増大している条件は以下のとおりである。

- $W_e/W_G \geq 1.1$ の条件 ($0.08 < h/L_{1/3} < 0.14$)
 $0.32 < H_{d1/3}/h < 0.55$
 かつ $0.033 < H_{d1/3}/L_{1/3} < 0.065$
- $W_e/W_G \geq 1.2$ の条件 ($0.09 < h/L_{1/3} < 0.11$)
 $0.36 < H_{d1/3}/h < 0.43$
 かつ $0.035 < H_{d1/3}/L_{1/3} < 0.046$

(2) 合田式による検討

高天端による波圧増大箇所は静水面付近及び水上部であるので、合田式の静水面位置での波圧強度 p_1 を以下のように補正して滑動実験結果を検討する。

$$p_1 = (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha'_2) w_0 H_{d_{max}} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 α'_2 : 天端高に関するパラメータ

$H_{d_{max}}$: 滑動限界最高波高

式(1)で補正した合田波圧と滑動限界堤体重量 (W_e) との滑動安全率が1.0となるように α'_2 を求め、横軸に $h/L_{1/3}$ を、縦軸に α'_2 を、パラメータに $h_c/H_{d1/3}$ をとて

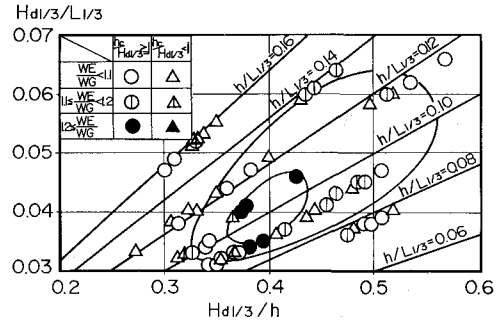


図-9 波力増大条件

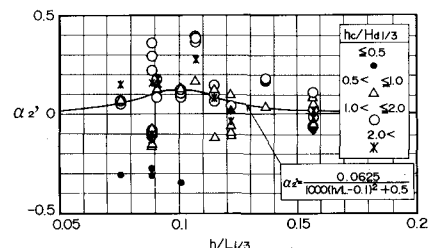
図-10に示した、○印及び*印の高天端時は、 α'_2 の値がほとんどプラス側で、かつ $h/L_{1/3} = 0.09 \sim 0.11$ の範囲で大きな値をとっている。△印の通常天端時は、プラス側、マイナス側がほぼ同じで、●印の低天端時はマイナス側に分布している。図中の実線は α'_2 のプラス側の○印及び*印のほぼ下限値を包絡したもので、式(2)で表せる。

$$\alpha'_2 = \frac{0.0625}{1000(h/L_{1/3} - 0.1)^2 + 0.5} \dots \dots \dots (2)$$

式(2)の適用条件は、 $0.32 < H_{d1/3}/h < 0.55$ で、かつ $h_c/H_{d1/3} \geq 1.05$ とし、 $1.05 > h_c/H_{d1/3} > 1.0$ の範囲は、式(2)の値を比例按分して求める。これは通常天端高と高天端高との α'_2 の値の不連続性をさけるためである。以上により補正した合田式を用いて、合田の補正滑動限界重量 (W'_e) を計算し、 W_e/W'_e を用いて図-11に再整理した。前出の図-5と比較して、高天端時でも W_e/W'_e の変動は約 $\pm 20\%$ の範囲に収まり、通常天端時の変動よりやや大きい位で、高天端防波堤の波圧式として適用できると考えられる。

(3) 斜め入射波の波圧特性

滑動限界波高 ($H_{d_{max}}$) が作用したときの実験最大波圧合力 (P_e) と $H_{d_{max}}$ を用いて合田式で計算した波圧合力 (P_c) との比 (P_e/P_c) を縦軸に、入射角 (β) を横軸にとり、 $h_c/H_{d1/3}$ をパラメータにして実験結果を図-12に示した。 $\beta=0^\circ$ の場合の P_e/P_c をみると、 $h_c/H_{d1/3} = 1.14 \sim 1.45$ の時2割程度実験値の方が上回っているのを最大とし

図-10 $\alpha'_2 - h/L_{1/3}$ (相対天端別)

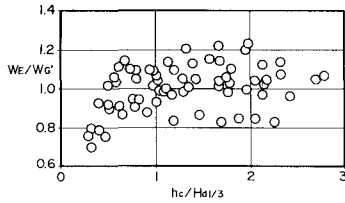
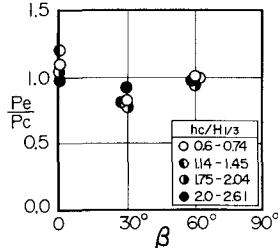
図-11 相対天端高と W_e/W'_e の補正結果

図-12 斜め入射による波力比

て、ほぼ1以上となっている。しかし、他の入射角においてはいずれも計算値よりも小さい値を示しており、今回の実験条件では高天端防波堤における波力増大は、波の入射角が30°よりも小さい場合に生じる可能性があると考えられる。

6. 結 論

相対天端高が1以上の防波堤を高天端防波堤と定義し以下のとおりその波力特性を明らかにした。

- (1) 高天端防波堤の直立壁に作用する波力は、平均的にみて合田波力よりも大きい。
- (2) 高天端防波堤で特に波力増大する場合の条件を図-9に示した。
- (3) 堤体前面の波圧分布をみると、高天端に伴い特に静水面及びその上方で波圧が増大している。

(4) 式(2)で定義したパラメータ(α_2)を合田式に導入することにより、高天端防波堤の波圧算定が可能となる。

(5) 入射角30°以上の斜め入射波の場合、高天端に伴う波力増大傾向はみられない。

7. おわりに

外海に面している親水性防波堤上の人に対する安全性を高める一方法として、防波堤の高天端化を取上げた。波力特性としては、条件によっては現行設計法による波力を上回る場合があり、設計上留意すべき点があることを明らかにできた。しかし、親水性防波堤の本来の目的から低天端の方が市民の要請に合致しており、人の安全対策に十分配慮した低天端親水性防波堤の構造についても検討していきたい。

参 考 文 献

- 岩田好一郎・清野 博 (1983): 不規則重複波の砕波に関する研究, 海岸工学講演会論文集, 第30巻, pp. 99-103.
- 合田良実・福森利夫 (1972): 直立壁および混成堤直立部に働く波圧に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第11巻, 第2号, pp. 3-45.
- 合田良実 (1973): 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第11巻, 第3号, pp. 31-69.
- 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗 (1992): 親水性防波堤上における越波時の人の安全性に関する研究, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 721-725.
- 谷本勝利・高橋重雄・北谷高雄 (1981): 混成防波堤のマウンド形状による衝撃砕波力の発生と対策について, 港湾技術研究所報告, 第20巻, 第2号, pp. 3-39.
- 谷本勝利・高橋重雄・明瀬一行 (1984): 防波堤直立部に働く不規則波力に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第23巻, 第3号, pp. 47-99.
- 中田邦夫・寺内 潔・西田仁志・梅木 功 (1984): 低天端混成堤の諸特性について, 海岸工学講演会論文集, 第31巻, pp. 532-536.