

高波浪実海域での防波堤上の手すり耐波安定試験

高橋重雄*・遠藤仁彦**・船越晴世***
津田修一***・斎藤辰三****

1. はじめに

防波堤は従来安全上の観点から人の立入を禁止してきたが、実際には多くの人々が釣り等のために入り込んでいる。低波浪時において防波堤は比較的安全的な絶好の釣り場となるが、高波浪時には越波によって防波堤から転落するなどの重大な事故が後を絶たず、必ずしも安全な場所ではない。したがって、最近では高質で安全な親水空間の提供をすべく、防波堤に様々な安全対策を講じて一般の市民に開放する、いわゆる親水性防波堤の整備が進められている。親水性防波堤の最も基本的な安全施設は転落防止用の手すりであり、著者ら(1993)は手すりによる人の転落防止効果が高いことを定量的に明らかにした。しかしながら、防波堤上に設置される手すりは、高波浪時の越波によって被災を受ける例が多く、施設の安全管理上からも重大な問題となっている。

そこで、本研究は、実際に高波浪海域の防波堤上に手すりを設けた現地実験を実施し、手すりの耐波設計法を検討したものである。

2. 越波水の運動モデルと手すりの耐波設計法

著者ら(1992)は、越波時の防波堤上の最大水位と最大流速をモデル化している。図-1は、そのモデル(以下、OWMと呼ぶ)の概要を示すものであり、越波現象を打ち込み時と越流時に分けて考えている。打ち込み時の最大水位と最大流速は直接越波水が打ち込む範囲で生じ、その範囲で一定としている。越流時の最大水位は、港外側端で最大(η_1)となり、港外側端から l_3 の区間で直線的に減少し、それより港内側で一定($0.4\eta_1$)としている。越流時の最大流速は、最大水位に反比例し、港外側端より l_1 以上の距離で最も大きくなる。

菅原ら(1992)は、OWMから算定される水位と流速を用いて抗力の式で手すりに作用する波力を表し、それを模型実験で検証している。ただし、実験縮尺が小さい

がために現地にそのまま適用するには問題があり、特に越波水が打ち込むときの衝撃的波力が十分検討されていない。また、断面的な検討しかされておらず、波力算定法に波向きの影響が入っていないのも問題である。

したがって、本報告では、①衝撃的波力を含むスケールの波力特性を検討し、②新たに波向きのパラメータを導入した波力算定法を検証している。なお、波向きの影響は、港外側端での最大水位 η_1 の算定において、次のように $(1 + \cos \beta)/2$ の項を導入することにした。

$$\eta_1 = \frac{(1 + \cos \beta)}{2} K \cdot H - h_c \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 β は波の方向分散性の影響も若干考慮して、主波向きに対して、15°危険側に振った角度とする。また、 K は波頂高比、 h_c は天端高さである。

3. 現地実験の概要

(1) 実験位置

実験は、山形県酒田市に位置する酒田港第二北防波堤上において、1991年11月から1992年3月まで行った。図-2(1)(2)は、実験実施箇所の平面図と断面図を示すものである。この防波堤は、設置水深が16mを越える

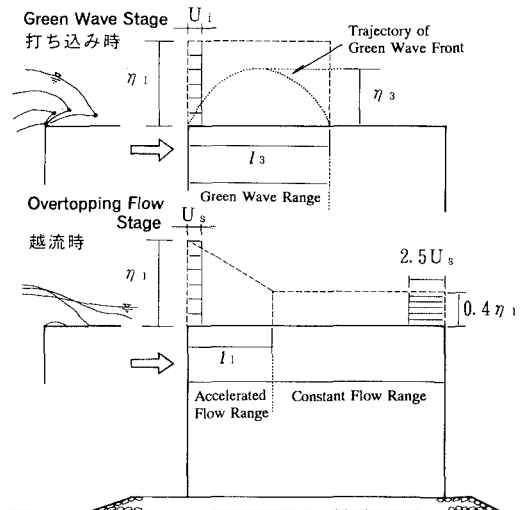


図-1 越波水の運動モデル (OWM)

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所耐波研究室
 ** 正会員 北海道開発局開発土木研究所港湾研究室
 (前)運輸省港湾技術研究所耐波研究室
 *** 正会員 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所
 **** 運輸省第一港湾建設局酒田港工事事務所

表-1 試験柱の形状

試験柱	形状	直径 (mm)	厚さ (mm)	設計波圧 (kgf/cm ²)	設計流速 (m/s)	設計波高 (m)
A1	丸形鋼管	216.3	8.2	5.96	34.2	—
B1~4		101.6	4.2	1.42	16.7	—
E1		48.0	3.2	0.42	9.1	10.0
C1~4	角形鋼管	100.0	4.5	2.51	15.7	—
D1		75.0	4.5	1.80	13.3	—
a	丸形鋼管	27.7	2.3	0.16	5.7	4.6
b		76.3	3.2	0.71	11.8	14.8
c		139.8	4.5	2.15	20.5	—
d	丸形鋼棒	13.0	—	0.08	4.0	4.0
e		25.0	—	0.29	7.6	7.7
f		38.0	—	0.68	11.5	12.3
g		48.0	—	1.09	14.6	—
F1		柵型手すり	60.5	3.2	0.09	3.9
F2	チェーン型手すり	114.3	6.0	—	—	—

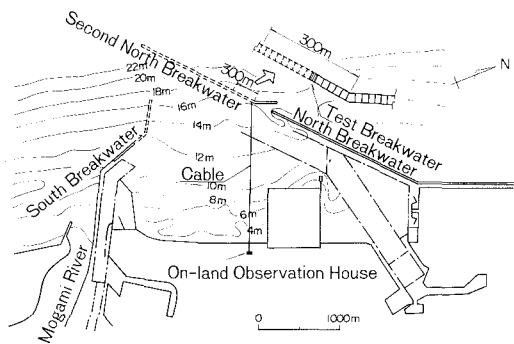


図-2 (1) 酒田港の平面図

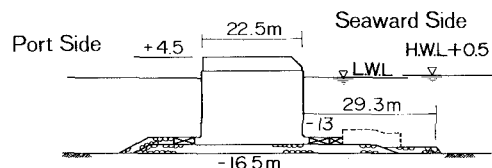


図-2 (2) 実験堤の断面図

大水深の第一線防波堤であるが、暫定天端高(4.5m)であるため、比較的天端が低い防波堤となっている。また、港外側のケーソン上端は、45°の斜面(上部斜面構造)である。実験堤から約2km離れた位置に観測所を設け、光ファイバーケーブルを介してデータを収録した。

(2) 実験内容と施設

実験は、大きく分けて以下の2種類である。

- ①波力測定実験
- ②破壊実験

波力測定実験では、防波堤天端上に表-1に示す5種類の試験柱(高さ1mの丸形および角形鋼管)を設置し、それぞれの下端に発生する歪を測定した。図-3は、それらの設置位置を示すものであり、港外側端から4mの位置には全ての試験柱A1~E1を設置し、試験柱BとCは港外側端より9, 14, 19mの位置にも設置している。

破壊実験では、前掲表-1および図-3に示すように、

実際用いられている柵型とチェーン型の手すりF1, F2と丸形鋼管a~cと丸形鋼棒d~gを設置しており、大きな時化後に傾斜角などの破壊状況を観察した。また、表-1には各試験柱の下端が許容応力に達する時の波圧、流速、波高(表中には設計波圧・設計流速・設計波高としている)を示している。なお、設計流速は菅原ら(1992)の耐波設計法から、また設計波高は周期7sと仮定してOWMから試算したものである。柵型の手すりF1は設計波高が4mであり、道路の横断防止柵などで用いられているような外径6cm程度の支柱では比較的小さな波高で破壊してしまうことが分かる。

また、天端上における越波水の運動特性を検討するため、天端上の4箇所鉛直上向きに圧力計(P1~P4)を設置している。越波時の水位は、鉛直圧力から衝撃的な成分を除き、静圧成分のみを取り出して、水位に換算した。越波時の流速は、圧力波形の位相差から求めている。

(3) 解析方法

試験柱に作用した波圧は、等分布と仮定して歪から換算し、主に測定中の最大ピーク値について、最高波と対応づけて検討を加えている。なお、最高波高は、実験堤と比較的近い位置(防波堤法線上250m離れた場所)での観測値を用いているが、やはり場所的な違いがあるために、後述の波圧特性などを検討する上でも若干の誤差を含んでいるものと考えられる。また、波向きは、実験堤での波向きと比較的相関の高いマフコタワー(実験堤から沖合約7km離れた位置)のデータを用いている。

(4) データ取得時の波浪

波力の計測は、有義波高1.8~5.2m、最高波高で2.8~9.1mまでの合計93ケース実施しており、このとき相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ が0.8~2.4であった。なお、測定時の最大波高は、11月25日4時に計測したもので、 $H_{max}=9.1m$ である。また、比較的大きな擾乱が発生しているときの冬季の実験堤周辺の主波向きはNW~Wが多く、防波堤

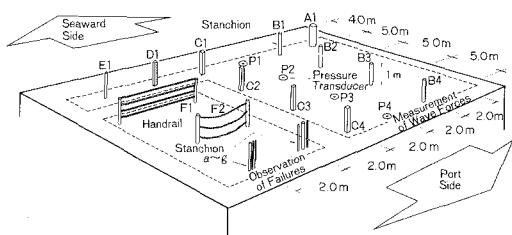


図-3 試験柱の配置

法線の直角方向に対してほぼ30°以内となっている。

4. 越波水の運動と波力特性

(1) 歪および水圧波形の一例

図-4は、試験柱に発生した同時歪波形の一例であり、1992年1月24日8時14~34分の間の最高波高7.4m ($hc/H_{max}=0.50$)に対応したものである。なお、図中には、欠測したデータを除いて試験柱A1, B1~4, C1~2, D1の歪波形のほかに、P1~P4の水圧波形も載せている。水圧波形から換算した最大水位は、最も港外側のP1の位置で3.2m、港内側のP4の位置で1.2mとなり、天端上の全ての領域で試験柱の高さ以上の水位となっている。また、それらの位相差から読み取った平均流速は、P1~P2間で9.1m/s、P2~P3間で11.1m/s、P3~P4間で12.5m/sと港内側の方がやや速くなっている。

一方、手すりに発生している歪には、C1の波形で顕著にみられるように、以下の二つの成分がある。

① 衝撃的成分

② 抗力的成分

衝撃的成分は、越波した水塊の衝突によって生じると考えられ、その波形は作用時間が比較的短く、しかも鋭く尖ったものとなっている。また抗力的成分は、流速に依存して生じるものであり、衝撃的成分に比べて比較的緩やかな変化で作用時間も長い。衝撃的成分の発生は、C1の他に、C2やA1, B4でもややみられるものの、その程度は抗力的成分に比べてそれほど大きくない。

次に、歪の抗力的成分に着目し、その位置による相違についてみると、流速と同様に港内側ほど歪が大きくなっている。例えば、B1~B4での無次元波圧強度 p/w_0H は、それぞれ0.28, 0.47, 0.46, 0.57となっている。

手すり形状によっても、波力の違いがみられる。最も港外側の試験柱における無次元波圧強度 p/w_0H を抗力的成分について比較すると、円柱(A1, B1)の場合0.2,

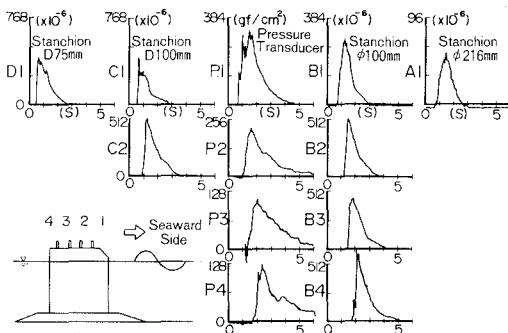


図-4 歪み波形と水圧波形

0.28となり、角柱(C1, D1)の場合0.42, 0.45と円柱のほぼ2倍近くの値となっている。これは、主に抗力係数の違いが現れているものと考えられる。

(2) 越波時における天端上の水位と流速

図-5は、防波堤上における越波時の水位分布を示すものであり、天端上での鉛直圧力において衝撃的成分が比較的小さい20ケースを対象とした。横軸は港外側端からの距離 x をとり、縦軸は防波堤上の各位置での最大水位をとっている。これによると、当然ではあるが波高が大きいほど、防波堤上の水位も高くなる傾向がある。例えば、 x が4mの位置において、 H_{max} が5.1m ($hc/H_{max}=0.78$) のとき水位が約1mに対して、 H_{max} が8.3m ($hc/H_{max}=0.47$) では約3mになっている。

また、図中の小さな図は、同様の測定データを対象として、越波時の水位の実測値をOWMによる計算値で除した値 η_m/η_c を示している。ただし計算値は、実験堤のケーソンが上部斜面である影響を考慮して、港外側につい

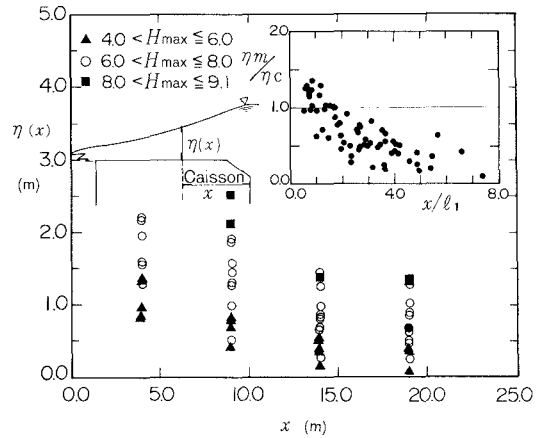


図-5 天端上の水位

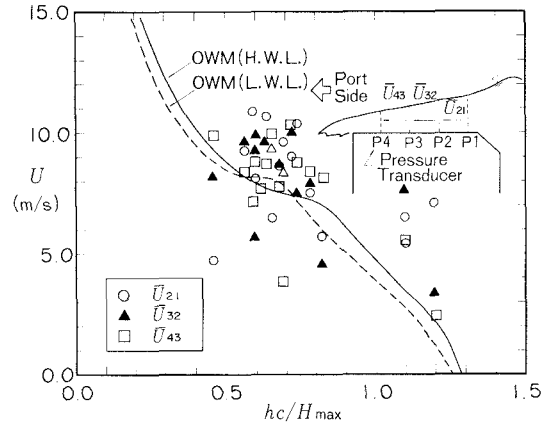


図-6 天端上の流速

ても $0.4\eta_1$ の一定とした。また横軸には、 x を最大水位が変化する距離 h で除したものをとっている。 x/h_1 が 1.0 以下の領域では、測定水位が $0.4\eta_1$ より大きくなるものもあるが、やはり上部斜面の影響でそれほど大きくない。また、 x/h_1 が 2.0 以内の比較的港外側では、 η_m/η_c が 1.0 に近づいているが、 x/h_1 が 2.0 以上の領域で天端上の水位が一定とならず、港内側ほどやや減少する傾向がある。これは、波の方向分散性から越波が有限区間で生じるため、越波水は断面方向ばかりでなく法線方向にも広がり、港外側端から離れるほどその影響が大きくなっていると考えられる。

図-6 は、越波時の天端上の流速 U を横軸に相対天端高 h_c/H_{max} をとって示したものである。図中の○は圧力計 P1~P2 (\bar{U}_{12})、▲は P2~P3 (\bar{U}_{23})、□は P3~P4 (\bar{U}_{34}) 間での平均流速を示したものであり、実線及び点線は、H. W. L. と L. W. L. での OWM による計算値を示している。実測値は、 h_c/H_{max} が 0.55~0.8 の領域において、平均で波速と同程度となっている。また計算値、実測値とも波高が大きいくほど、つまり相対天端高が小さくなるほど、流速が大きくなる傾向があるが、実測値のほうがやや大きくなっている。これは、流速の推定方法の問題も考えられるが、ケーソン構造が上部斜面であるために、通常の矩形ケーソンを対象とした計算値よりもやや大きくなっているものとも考えられる。

(3) 試験柱に作用する波圧

図-7 は、試験柱に作用する波圧を無次元波圧強度 p/w_0H で示したものであり、試験柱 B1 の場合である。図中の○は抗力的成分のピーク値、●は衝撃的成分があるもののピーク値を示している。この図では、潮位や波向きの影響などによりばらつきが大きい、最高波高 6 m 以上を対象とすると、無次元波圧強度は抗力的成分で 0.25~0.4、衝撃的成分で 0.3~0.5 となっている。同様に、全ての試験柱を対象にすると、抗力的成分の無次元波圧強度は、位置によりばらつきが異なるが、円柱で 0.2~0.6、角柱で 0.3~1.0 となっている。

衝撃的な波圧は、前掲図-4 でも明らかのように、越波状況により、その発生する位置が異なり、しかもその大きさもばらついている。そこで図-8 では、全ての試験柱のデータを対象として、衝撃的なピーク波圧の大きさを抗力的なピーク波圧と比較して示している。横軸には抗力的波圧 P_s をとり、縦軸に衝撃的波圧 P_i と P_s を比べ、その大きな方の値 P_n をとっている。なお、 P_n/P_s が 1.0 のときピーク波圧は抗力的成分で決まっていることを示し、その傾きが 1.0 以上で衝撃的成分が卓越していることを示している。 P_n/P_s は、最大で約 2.0 程度となっているが、全体的には 1.5 以下がほとんどであり、衝撃的波圧の大きさは抗力的波圧と比べてそれほど大きくない。ま

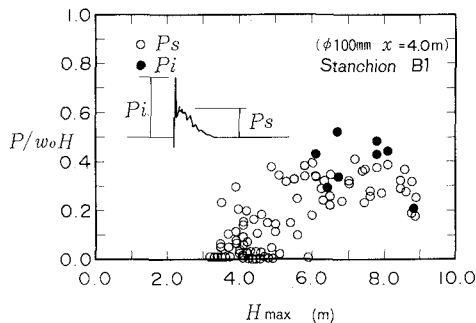


図-7 試験柱 B1 の無次元波圧強度

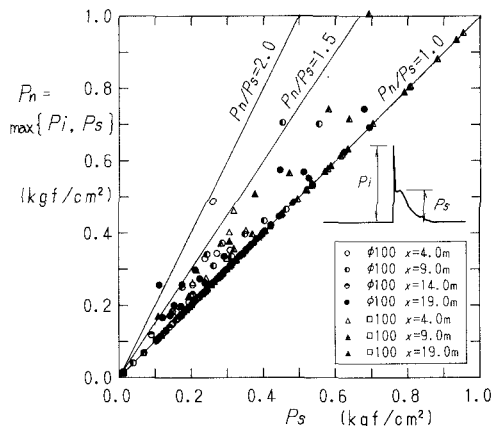


図-8 衝撃的波圧 P_i と抗力的波圧 P_s

た、試験柱で測定された衝撃的波圧は、同位置での圧力計での衝撃的成分と比べて、発生頻度が少なく、その大きさも小さくなっている。このように試験柱で発生する衝撃的波圧が比較的小さいのは、その形状が比較的小さい柱状であること、今回使用した試験柱の固有振動数が 1.5~7 Hz と動的応答が鈍いことが考えられる。実際の手すりでは、その材質が試験柱と変わらず、固有振動数が横部材の影響で試験柱よりもやや小さくなるために、今回測定された衝撃的波圧は実際の手すりに対して安全側の値になる。したがって、実際の設計時には、従来の設計法と同様に衝撃的波圧を無視しても問題ないと考えられる。

5. 手すりの耐波設計法の検証

(1) 実測波力と計算波力の比較

図-9 は、実測波力と計算波力との比較をしたものである。横軸には港外側端からの距離 x を h で無次元化したものを、縦軸には実測波力 F_m と計算波力 F_c との比 F_m/F_c を示している。なお、実測波力は衝撃的成分を除いた抗力的成分のみを対象としており、計算波力を求める

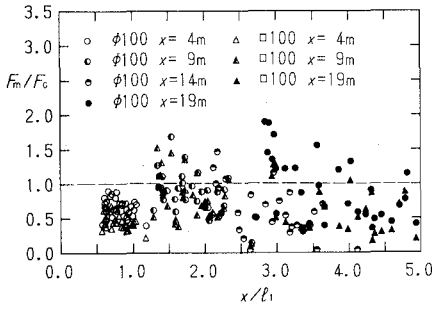


図-9 計算波力と実測波力との比較

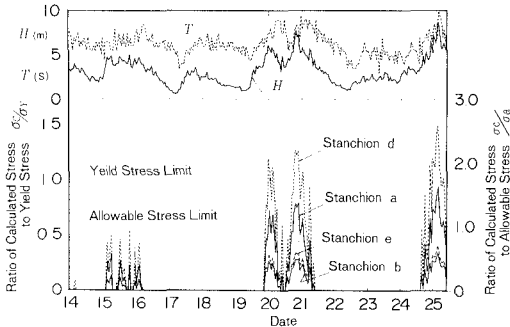


図-10 計算応力と破壊

際の抗力係数は円柱が1.0, 角柱が2.0を用いている。これによると, 比較的港外側の x/h が1.0以下の領域では, 円柱, 角柱とも実測値は計算値の0.4~0.9となり, 平均的にみると約0.6程度となっている。それに対して, 比較的港内側の領域では, 実測値は計算値の0.3~1.5とかなりばらつきが大きくなっているが, 平均的にみるとほぼ1.0に近い値であり, 計算値がほぼ妥当であることがわかる。

(2) 計算応力による破壊状況の再現

実験期間中に傾斜および転倒した試験柱は, 波力測定用の試験柱Eと破壊実験用の試験柱a, d, e, F1である。破壊した試験柱は前掲表-1に示すように許容波高が全て10m以下であり, 波浪観測からも破壊することが十分予測される。なお, 実験期間中の最大の時化は, 1991年12月28~30日に発生し, 最高波高は10.5mであり, この間試験柱aが傾斜している。また, 試験柱a・d・F1は, 11月19~21日の時化で破壊している。

図-10は, 11月14日~25日での波浪状況と試験柱下端での計算応力を示したものであり, 期間中に破壊が生

じた試験柱aとd, および破壊していない試験柱bとeについて対象としている。また, 波浪データから計算した計算応力 σ_c は, 許容応力 σ_a と降伏応力 σ_y で無次元化して表しており, 左側の縦軸には σ_c/σ_a を, また右側の縦軸には σ_c/σ_y をとっている。

一般に, 試験柱に波力が作用すると, 試験柱に発生する応力は下端で最も大きくなり, そこでの応力が許容応力以上となったとき, つまり σ_c/σ_a が1.0以上で傾斜などの破壊が生じる可能性が高くなると考えられる。この期間中には最高波高5.0m以上の大きな時化が2回あり, 11月25日の3時に最高波高8.8mの波浪が来襲している。試験柱aとdでは, 19日以前の時化ではいずれも許容応力比 σ_c/σ_a が1.0以下で破壊も生じていなかったが, 19~22日の時化で破壊が生じた。このとき, 試験柱aとdの許容応力比 σ_c/σ_a の最大値がそれぞれ1.4, 2.1となり, 降伏応力比 σ_c/σ_y の最大値も1.5, 0.75であった。一方, 破壊が生じていない試験柱bとeでは, 許容応力比, 降伏応力比とも1.0以下であった。また, 同期間に破壊した柵型手すりF1を対象に計算すると, 最大で降伏応力を1.5倍も上回る応力が生じていた。したがって, 耐波設計法から求められる計算応力が許容応力を上回るときに試験柱及び手すりの破壊が生じており, 計算によって破壊をほぼ説明することができた。

6. まとめ

手すりの現地実験によって, 室内実験では確認できなかった衝撃的波力の影響や高レイノルズ領域での実際の波力特性を把握することができた。また, 現在の手すりの耐波設計法の妥当性を波力測定実験及び破壊実験から検証することができた。

最後に, 本研究を進めるに際して港湾技術研究所高山知司水工部長の御助言を得ている。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

菅原邦彦・遠藤秀則・高橋重雄・遠藤仁彦・高野聖三 (1992): 親水性防波堤上の手すりの耐波設計法, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 501-506.
 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗 (1992): 混成防波堤上の越波水の運動と波力に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第31巻, 第1号, pp. 3-50.
 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗 (1993): 手すりによる越波時の人の転落防止効果に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 1126-1130.