

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

高橋 重雄*・遠藤 仁彦**・室 善 一 朗***

1. ま え が き

防波堤は、従来より安全上の観点から、人の立ち入りを禁止してきている。しかしながら、実際には、警告を無視し、侵入防止柵を乗り越えて入ってくる人が多いのが現状である。こうした人達の中には、高波浪時の越波水により転倒し、海中へ転落してしまう人もあり、死亡事故となったことも少なくない。

ただし、年間の大部分は越波することなく、適切な安全管理を行えば、防波堤を安全で快適な親水空間とすることも可能である。親水性防波堤は、人に対する安全対策を積極的に施し、その天端上を魚釣りや散策のために開放するものである。その最も基本的な安全対策としては、転落防止を目的とした手すりの設置がある。手すりは、通常の利用時において、市民が海へ転落するのを防いでいるが、越波時には、越波によって転倒した人が海中へ転落することを防ぐこともできる。また、手すりが比較的不透過で小さなパラベットを兼ねた構造であれば、越波そのものをある程度低減することも期待できる。

本研究は、水理模型実験によって、手すりを設置したことによる越波水の運動の変化を把握するとともに、手すりによる人の転落防止効果を明らかにするものである。なお、通常の防波堤の場合、手すりは港外側だけでなく港内側にも設置される。ここでは、これら二つの手すりの効果について検討を行っている。ただし、護岸の場合のように、天端上に大きなパラベットがある場合（パラベット後退型）も検討の対象としており、この場合は港外側のみの手すりを考えている。

2. 実験の概要

(1) 実験水路と模型

実験は、長さ 163 m、幅 1.0 m、深さ 1.5 m の長水路で行った。堤体模型は直立堤（天端高さ 8 cm、堤体幅 82 cm）であり、造波板から 100 m の水平床上に設置し、堤体位置での実験水深は 70 cm とした。また、実験波は規

則波とし、周期は 1.92 s のみとした。このとき、水深波長比 h/L は 0.16 となり、現地水深を 14 m と仮定すると、現地周期は 8.6 s に相当する。波高は、水深波高比 H/h で 0.1~0.37 とした。

一般に、転落防止を目的とした手すりの高さは 110 cm であり、手すり模型は実験縮尺 1/20 として、柵高 h_p を 5.5 cm とした。図-1 は、手すり模型の一例であり、アクリル合成樹脂で製作している。手すり模型は、4 種類の開口率 (0.61, 0.44, 0.24, 0) のものを用いており、堤体模型上の港外側端と港内側端の 2 箇所に設置することができる。なお、開口率とは、手すりの開口部の投影面積を全投影面積で除したものであり、港外側および港内側に設置したものをそれぞれ ε_1 , ε_2 として表している。

また、堤体上には大型のパラベットも設置することができ、パラベット後退型の護岸を想定した実験も行った。設置位置は、港外側端より 20 cm と 41 cm の 2 カ所であり、その高さは越波しないように 50 cm とした。

(2) 実験内容

実験は、大きく分けて、以下の 2 種類を実施している。

① 越波水の運動測定実験 ② 転落実験

越波水の運動測定実験では、防波堤前面の打ち上げ高さと防波堤上の水位、流速を測定するとともに、高速ビデオで水面形状を測定した。転落実験では、円柱状の人体模型を用いて、越波時の人体模型の運動を高速ビデオ（毎秒 200 コマ測定）で測定した。なお、測定は 1 ケースにつき 7 回繰り返して行い、転落率を求めている。

人体模型は、越波による転倒限界の基準（著者ら、1992）を考える際に対象とした身長 152 cm の人を想定しており、その高さを 76 mm とし、その直径は転倒限界が一致するように予備実験より 20 mm と定めた。また一般に、人体比重は肺の中の空気を除いたときに 1.05 程度（小

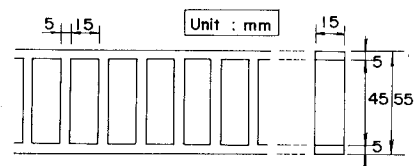


図-1 手すり模型

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室長
 ** 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室
 *** 運輸省港湾技術研究所水工部海洋エネルギー利用研究室

川, 1985) であるが, 実際の転落時を想定し, 衣服の影響などを考慮し危険側をとって, 人体模型の比重を 0.8 とした。

3. 手すりによる越波水の運動の変化

(1) 港外側の手すりによる越波低減効果

図-2 は, 港外側手すり近傍における越波水の水面形の経時変化を示したものであり, 開口率 ε_1 が 0.61, 波高 18 cm の条件である。なお, 図中の点線は, 同じ波高において手すりを設置していない条件での最大水位分布 (各点における最大水位) である。波面が天端面に達したときを①として, その後 0.1 s おきの水面形を示している。②では, 手すりを透過して越波水が打ち込んできており, ③において, それらが天端面に落下している。手すり上を越える越波水は, 手すりを透過しているものよりもやや遅れて打ち込んでおり, ③の後にそれらが合わさって, ④の状態になっている。その後, 越波水が港内側に進行 (⑤, ⑥) するとともに, 堤体前面の水位が低下していく様子がわかる。

手すりのある条件での最大水位は, 港外側よりある範囲で低下し, それより港内側においてほぼ一樣になっており, 手すりがない場合とほぼ同様の分布形状となっている。ただし手すりのある場合には, 手すり近傍でやや

打ち上がりが大きくなっているが, 手すりからある程度離れた場所において水位が逆に低下しているのが特徴である。

図-3 は, 手すり形状 (開口率 ε_1) による越波時の水位の低減効果を示すものである。横軸に, 天端面から測った堤体前面での打ち上げ高さ η_1 をとり, 縦軸には港外側端から 40 cm の位置での越波時の最大水位を示している。なお, この位置は, 越波時の最大水位が場所的にほぼ一定となる領域である。また, $\varepsilon_1=1.0$ は手すりの無い条件を示している。手すりがない場合において, 一定水位領域では最大水位 $\eta(x)$ が η_1 のほぼ 0.4 倍となる (著者ら, 1991) が, 本実験においても同様の結果が得られた。また, 手すりがある場合, 最大水位は $0.4\eta_1$ 以下となり, ε_1 が小さいほど最大水位も低下しているのがわかる。ただし, η_1 に対する $\eta(x)$ の変化率は, 手すりの有無に関わらず, ほぼ一定の傾向となっている。したがって, 手すりの効果を考慮した一定水位領域での最大水位 $\eta(x)$ は, ε_1 と h_p をパラメータとして次式で示すことにした。なお, 図中の各線は次式の計算値を示したものである。

$$\eta(x) = 0.4\{\eta_1 - h_p(1 - \varepsilon_1)^2\} \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

(2) 港内側の手すりによる流況の変化

図-4 は, 港内側手すり近傍での最大水平流速分布と最大水位分布を示した一例であり, 手すりの開口率 ε_2 が 0, 波高 20 cm の場合である。なお, この実験では, 主に港内側の手すりの影響をみるために, 港外側の手すりは設置していない。図に示す範囲は, 手すりの無い条件において一定水位となる領域であり, 同様の波浪条件ではその水位が約 6 cm であった。手すりがある場合には, 手すりからある程度離れた位置において最大水位がほぼ同じになっているが, 手すり近傍では堰上げのため水位が高くなり, この場合手すり位置で約 10 cm となった。一方, 越波水の水平流速は, 手すりがないときにほぼ一定となるのに対して, 手すり近傍で小さくなるのが特徴である。なお, 越波水の水位や流速に及ぼす影響は, 手すりの開口率 ε_2 によっても変化する。

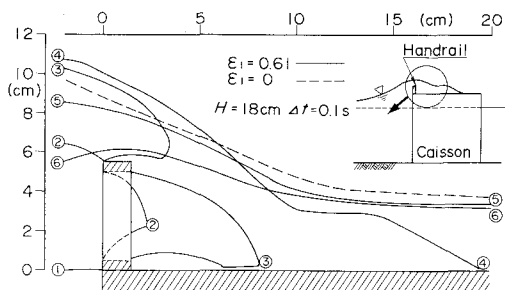


図-2 港外側手すり近傍での越波水の運動状況

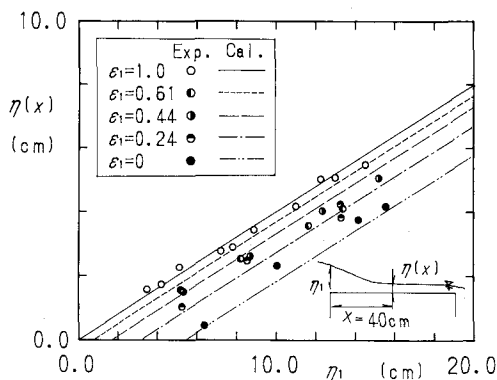


図-3 手すり設置時の越波水の水位

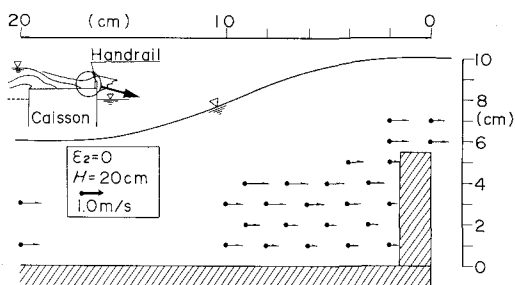


図-4 港内側手すり近傍での流況と水位

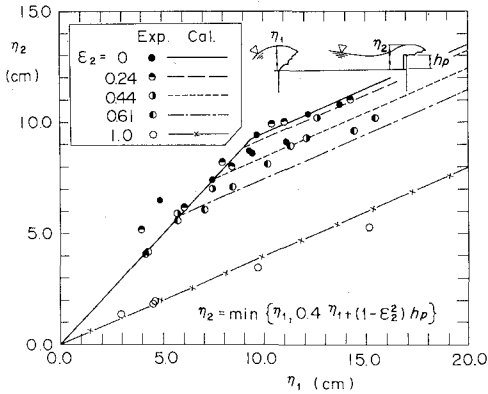
図-5 港内側端での最大水位 η_2

図-5は、手すりの開口率 ε_2 による港内側端の最大水位 η_2 の違いを表したものであり、横軸に堤体前面の打ち上げ高さ η_1 をとっている。なお、港外側には、手すりを設置していない。港内側に手すりがない条件 ($\varepsilon_2 = 1.0$) では、 η_2 が η_1 のほぼ 0.4 倍となっている。手すりがある場合 ($\varepsilon_2 < 1.0$) には、 $\varepsilon_2 = 1.0$ に比べて、 η_2 が大きくなり、 ε_2 が小さいほど堰上げが大きくなっている。また、 η_1 がある程度小さな条件では、 η_2 は前面の打ち上げ高さ η_1 にほぼ等しいが、 η_1 が大きくなると η_1 に対する η_2 の変化率がほぼ 0.4 となっている。したがって、それらの特徴を以下の実験式に表した。

$$\eta_2 = \min\{\eta_1, 0.4\eta_1 + (1 - \varepsilon_2^2)h_p\} \quad \cdots \cdots (2)$$

なお、港外側端に手すりがない条件では、 $\eta(x) = 0.4\eta_1$ で与えられるので、式(2)中の η_1 のかわりに $\eta(x)$ で表すと次式のようになり、前掲式(1)で示す港外側手すりの影響も考慮することができる。

$$\eta_2 = \min\{2.5\eta(x), \eta(x) + (1 - \varepsilon_2^2)h_p\} \quad \cdots \cdots (2)'$$

(3) パラペット後退型での越波水の運動特性

図-6は、パラペット後退型での越波水の運動の一例であり、手すりの開口率 ε_1 が 0.61、波高 20 cm の場合である。上段の図は、越波水が打ち込んでからパラペットの位置で水位が最大となるまで（押し波時）を示しており、下段はその後パラペットの位置で打ち上がった越波水が港外側へ戻っていく（引き波時）様子を示している。図中①から④までは、越波水がパラペットに到達してではなく、通常の防波堤での状況（前掲図-2の①～④）とほぼ同じになる。その後、パラペットに衝突するとともに、越波水が上方に打ち上がり、⑥においてパラペット位置での水位が最大となる。打ち上がった越波水は、⑦に示すようにその先端を巻き込みながら落下していき、手すり位置で堰上げられている様子（⑧、⑨）がわかる。

図-7は、手すり位置での押し波時の最大水位 η_{1IN} と引き波時の最大水位 η_{1OUT} の関係を示すものである。 η_{1IN}

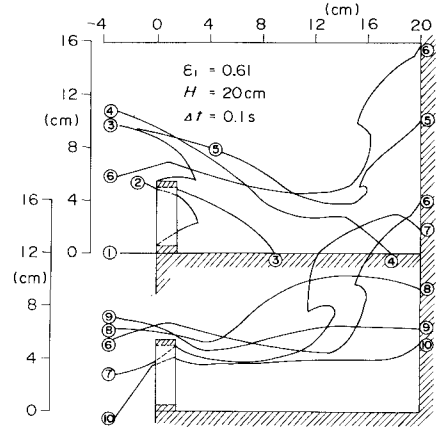
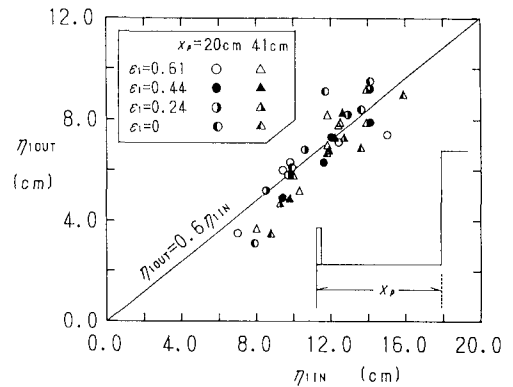


図-6 パラペット後退型での越波水の運動状況

図-7 η_{1OUT} と η_{1IN} の関係

と η_{1OUT} との関係は、ややばらつきがあるものの、手すりの開口率 ε_1 やパラペット位置 x_p によらず、下式のような関係がほぼ成立しているのが特徴である。

$$\eta_{1OUT} = 0.6\eta_{1IN} \quad \cdots \cdots (3)$$

パラペット後退型の手すりは、押し波時に通常の防波堤で港外側に設置した手すりと同様の効果があり、引き波時に港内側の手すりと同じ効果がある。つまり、開口率が小さいほど、押し波時には越波低減効果があり、引き波時には、逆に、手すりで堰上げられて水位が高くなるために、それらの効果が相殺されていると考えられる。

4. 越波時における人の転落

(1) 越波時の人の運動状況

通常の防波堤において人が転落する場合には、港外側から港内側への越波水の流れによって、港内側へ落ちるのが特徴である。図-8は、通常の防波堤での人体模型の転落状況を示した例であり、波高 20 cm で手すりの開口率 ε_2 が 0～0.61 の条件である。なお図中には、各 ε_2 での

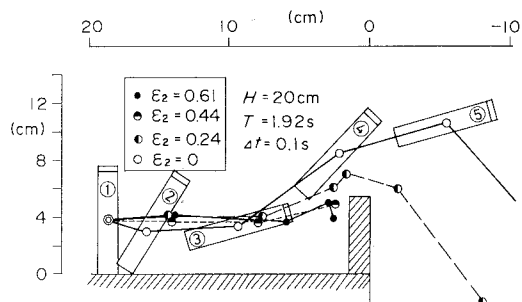


図-8 人体模型の転落状況 (通常の防波堤)

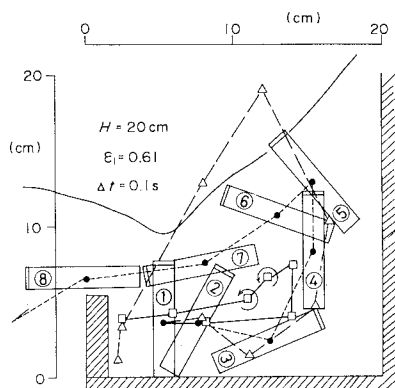


図-9 人体模型の転落状況 (パラベット後退型)

人体模型の0.1sおきの重心位置と $\varepsilon_2=0$ での人体模型の状況を示している。手すりが無い場合には、同じ波高での転落率が100%であり、図に示していないが、人体模型は倒れ込み型転倒(著者ら, 1992)をしながら水平方向に移動して、港内へ容易に転落する。これに対して比較的透過性の高い手すり($\varepsilon_2=0.61, 0.44$)の場合、手すりが無い状況とほぼ同じく、人体模型が水平方向に移動するが、手すりに衝突して転落が防止されている。やや透過性が低い手すり($\varepsilon_2=0.24$)の場合、手すりからある程度離れた場所では、透過性の高いものと同様に、人体模型は水平移動するが、手すりに近づくとき上方に押し上げられて転落している。不透過な場合($\varepsilon_2=0$)には、上方に押し上げられる領域が広くなり、その高さも高くなっている。人体模型の運動の違いは、3(2)で示した手すり近傍の流況から説明でき、透過性が低いほど手すり近傍での堰上げが大きくなるとともに、人体模型の打ち上がりも大きくなり、転落しやすくなっている。

図-9は、パラベット後退型における人体模型の運動状況の一例であり、波高20cm、 ε_1 が0.61の条件である。この場合、7回の試行のうち転落は1回しか生じていない、ここでは転落したもの(●)と、転落していないものの中で代表的なもの2例(△, □)について図示してい

る。転落が生じた事例では、越波水により倒れ込み型の転倒が生じており、転倒しながらパラベットのほうに移動し、パラベット位置で上方に押し上げられている。(①~⑤)その後、引き波時において、港外側へ倒れ込みながら移動し、ついには落下している。(⑤~⑧)

転落が生じていない事例では、大きく二つのパターンがある。一つは図中の△で示され、人体模型が越波水の先端に乗って、パラベット位置での打ち上がりも大きい、引き波時に手すりに衝突して、転落しない。もう一つは図中の□で示され、パラベット付近での打ち上がりが小さく、越波水の中に潜り込んでしまうものである。これは、越波水の流れよりも人体模型がやや遅れて運動しており、引き波時の落下水が人体模型に衝突し、その渦に巻き込まれて人体模型が回転している。このような場合、引き波時における手すり位置での水位が最大となる時に、必ずしも人体模型が手すり位置に到達していないのが特徴である。

この様にパラベット後退型では、人体模型の動きが複雑であり、パラベットや手すりに衝突する際に大きな力が生じたり、潜り込み時間が長くなるなど、転落が生じていなくても危険であることに注意する必要がある。

(2) 人の転落条件

人の転落は、手すり位置での最大水位と最も相関が高く、その水位が柵高 h_p よりも低ければ当然転落しなく、ある程度水位が高いときに転落が生じる。図-10は、手すり位置での最大水位と転落率 P_f との関係を表したものであり、横軸に手すり上の水位 η_2-h_p と、それを身長 h_t で無次元化したもの $(\eta_2-h_p)/h_t$ をとっている。通常の防波堤(天端面が水平なもの)を○、またパラベット後退型を●としており、パラベット後退型において η_2 は引き波時の η_{1OUT} に相当する。なお、パラベットの後退距離によって、転落率の違いがみられなかったため、図中の●には両者($x_p=20, 41$ cm)を合わせて示している。また、実線は、二つの構造形式を合わせた実験値の上限を包絡したものである。パラベット後退型では、通常の

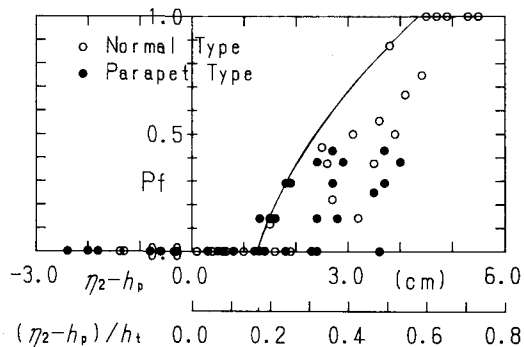


図-10 手すり位置の水位と転落率

防波堤と比べて同じ水位でも転落率がやや低くなっている。これは、パラペット後退型での越波状況が、比較的複雑であることが原因している。ただし、転落が生じ始めるときの水位 η_{2cr} はほぼ一致しており、その時の手すり上の水位 $\eta_2 - h_p$ が身長 h_t の約 17% であった。すなわち、

$$\eta_{2cr}(\text{or } \eta_{1OUTcr}) = 0.17h_t + h_p \dots\dots\dots (4)$$

なお、図に示していないが、手すりが無い場合には、天端面からの水位 η_2 で考えると、転落し始めの水位が身長 h_t の 17% となり、 $h_p = 0$ とすると式 (4) に一致した。

5. 転落限界時の打ち上げ高さ

図-11 は、越波時の人の転落の有無を求めるフローをまとめたものである。堤体条件や波浪条件などと打ち上げ高さ η_1 との関係は、越波水の運動モデルによって求めることができる。ただし、本論文では、主に転落限界時の η_1 を検討しており、そのときの波高との関係については検討していない。通常の防波堤では、まず第一に港外側の手すりによって越波水の水位の低下が認められ、その水位 $\eta(x)$ は η_1 を用いて前掲式 (1) で求められる。また、越波水が港内側の手すりに到達すると、堰上げ効果があり、その手すり位置における最大水位 η_2 は前掲式 (2)' から計算できる。なお、パラペット後退型の時には、押し波時と引き波時において、越波低減と堰上げ効果が相殺されて、 η_{1IN} と η_{1OUT} の関係が前掲式 (3) で示される。また、人の転落の有無は、式 (4) から計算できる。

手すりの無い場合には、身長 152 cm の人を対象とすると、港外側端での水位 η_2 が 26 cm のときに転倒限界となる。通常の防波堤では転落限界の堤体前面の打ち上げ高さ η_{1cr} が 65 cm で、パラペット後退型では 43 cm となり、パラペット後退型の方が小さな打ち上げ高さで転落する。越波によって人が転倒するときの打ち上げ高さは 50 cm であり、転倒するような状況の時には、海中へ転落してしまう可能性もかなり高いことがわかる。

図-12 は、手すり (柵高 110 cm) を設置した場合の転落限界時の打ち上げ高さ η_{1cr} を示したものであり、通常の防波堤において、身長 152 cm の人を対象としたものである。横軸には港外側端での手すりの開口率 ε_1 、縦軸には港内側端の手すりの開口率 ε_2 をとっている。また、図中の数値は各条件における η_{1cr} (単位 cm) を示しており、各線はそれらの等高線である。港外側手すりの透過性が低いほど、また港内側手すりの透過性が高いほど η_{1cr} が増加し、転落防止効果が大きくなる。

一般的な柵状の手すりは、開口率が 0.65~0.85 (平均 0.78) であり、波力を考慮して設計されたものはその強

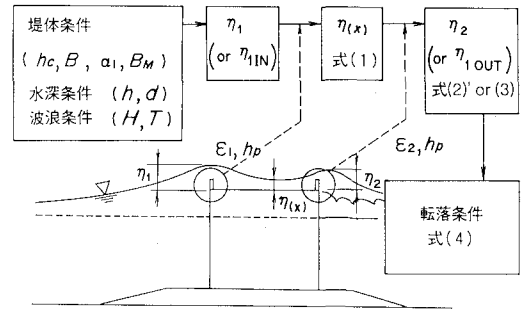


図-11 越波による人の転落モデルのフロー

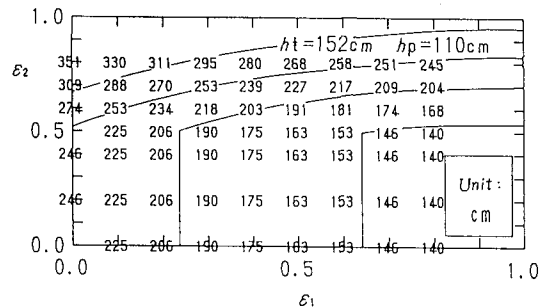


図-12 転落限界打ち上げ高さ

度を確保するために開口率がやや小さく、平均 0.69 となる。例えば、通常の防波堤に開口率 0.7 の手すりを両側に設置した場合、 η_{1cr} は 209 cm であり、手すりの無い場合 (65 cm) に比べて約 3.2 倍大きくなっている。また、最も転落防止効果が大きいのは、港外側に不透過なもの (パラペットを兼ねたもの)、港内側に柵状の手すりを設置した場合であり、港内側手すりの開口率を 0.7 とすると、 η_{1cr} は 309 cm となり、両側を柵状の手すりにするよりも η_{1cr} がさらに 1.5 倍程度大きくなる。最も転落防止効果が低い手すりの組み合わせでも、手すりが無いものに比べて、 η_{1cr} が 2 倍程度大きくなる。したがって、手すりを設置することにより、比較的波の打ち上げが大きくても転落が生じにくくなり、開口率などの手すり形状を考慮することで、さらにその効果を高めることも可能である。

参考文献

- 小川正行 (1985): 皮厚等の身体諸計測値からの Body Density 予測に関する研究 (第 2 報), 日衛誌, 第 40 巻, 第 5 号, pp. 841-848.
- 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗 (1991): 親水性防波堤上の越波水の運動に関する研究, 海岸工学論文集第 38 巻, pp. 536-540.
- 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.