

# 親水性施設の越波に対する安全性の評価方法に関する事例研究

遠 藤 仁 彦\*・高 橋 重 雄\*\*

## 1. はじめに

親水性の防波堤や護岸は、快適な海環境を楽しむことのできる施設として、近年各地で整備されつつある。しかしながら、このような施設は本来荒波から背後を守るためのものであり、そこを訪れる人々にとって必ずしも安全な場所とはいえない。ただし、施設をできるだけ安全に設計し、適切な安全管理を行うことによって、快適でしかも安全な親水空間を提供することができるが、その方法が十分に確立していないのが現状である。

本研究は、親水性施設の安全設計をするために必要な波浪に対する安全性の評価方法について検討するものである。ここでは、施設の安全性を波高の頻度や変化時間で表す方法を示すとともに、この方法を用いて神戸市垂水の親水性護岸の安全性について評価を試みる。また、施設の安全にとって重要な要因である施設の天端高さや利用限界波高の設定と施設の安全性との関係について検討する。

## 2. 越波に対する人の安全性の検討方法

### (1) 波浪と人の危険

波浪に対する防波堤上の人の危険は、感覚的なものから実質的なものまで様々なものが考えられ、ここではその危険状況を危険度の異なる4つの段階に分けて考えている。図-1は、それらの状況を概念的に示したものである。

#### ① 波しぶきが発生する状況

(有義波高  $H_{ss}$ , 最高波高  $H_{ms}$ )

波高が大きくなると越波が生じていなくても、防波堤上の人には周辺の波浪状況や堤体前面での波の打ち上げ高さなどから危険を感じる。特に、波しぶきが天端面に打ち上がる状況では、危険を感じる人が多いと考えられる。この状況はそれほど危険でないが、さらに波高が大きくなると、実質的な危険が生じる可能性もあり、事故の予防という観点からも重要な指標となる。例えば、神戸垂水親水護岸では、堤体前面での実質的な打ち上げ高さが

天端高さの約7割に達したときに波しぶきが発生し始め、施設の利用を停止している。

#### ② 越波が生じる状況

(有義波高  $H_{so}$ , 最高波高  $H_{mo}$ )

越波水の実質部分が天端を越え始めると、天端上にいる人の危険は感覚的なものから実質的なものへと変わり、その越波する限界は危険状況を示す目安となる。

#### ③ 越波によって、人が転倒する状況

(有義波高  $H_{st}$ , 最高波高  $H_{mt}$ )

さらに波高が大きくなると、堤体前面での波の打ち上げが高くなるとともに越波量も増加し、当然人の危険もかなり大きくなる。このように実質的な波の峰が天端を越えて高くなると、越波時の水位や流速も増加し、ある打ち上げ高さ以上で人は越波水によって転倒してしまう。転倒限界時の天端上の打ち上げ高さの目安は0.5m(著者ら, 1992b)である。

#### ④ 越波によって、人が海中へ転落する状況

(有義波高  $H_{sd}$ , 最高波高  $H_{md}$ )

打ち上げ高さがさらに大きくなると、人は転倒するばかりでなく、越波水によって流されて海中へ転落してしまう。通常の防波堤で手すりが無い場合には、人が転落する限界の打ち上げ高さが0.65mであるのに対して、通常の手すりを設置するとその値が2.1mとなり、手すりによる転落防止効果が大い。 (著者ら, 1993a)

それぞれの危険状況となる限界波高は、防波堤前面で

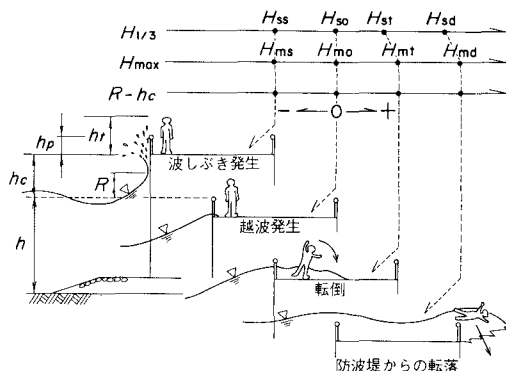


図-1 越波による防波堤上の人の危険

\* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室  
 \*\* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部耐波研究室

の打ち上げ高さから越波水の運動モデル(著者ら1991, 1992a, c, 1993a, b)を用いて求めることができる。これらの波高は、不規則波中の最高波高に対応するものである。碎波の影響を受けない場合、波しぶき発生時と越波発生時は  $H_{\max}/H_{1/3}=1.8$  を用い、転倒と転落限界時には  $H_{\max}/H_{1/3}=2.0$  を用いて、有義波高が求められる。

## (2) 施設の安全性に対する考え方とその評価方法

波浪に対して人の安全を確保する手段としては、以下の二つの方法がある。

①入園禁止基準を設けて施設の入園管理を行う。

②天端高さをほとんど越波しないような高さにする。既往の親水性施設では、利用上や経済的な理由から①の方法が多く、本論文においてもこの方法に対する安全性の評価方法の考え方を示している。ただし、天端高さとは越波限界の波高との関係がわかるので、②についても必要な天端高さを求めることは可能である。

図-2は、波浪に対する人の危険状況と施設の安全性を評価する方法を概念的に示したものである。施設の安全性を評価する指標としては、以下の二つが考えられる。

### I. 頻度的な評価

### II. 時間的な評価

利用限界とする波高を定めると、その有義波高(ここでは  $H_{su}$  とする)以下の出現頻度(未超過確率)が施設の稼働率となり、一つの安全性を示す指標である。また、各危険の限界有義波高以上の出現頻度(超過確率)がその施設の潜在する危険を示す指標となる。

また、利用限界となってから実際に様々な危険状況となるまでの余裕時間も、施設の安全性を示す重要な指標である。実際の施設管理を考えると、利用限界となってから人々が退避するまでにはある程度時間が必要であり、施設のもつ危険に対する余裕時間は施設の延長や危険情報の伝達システムにも密接に関わってくる。

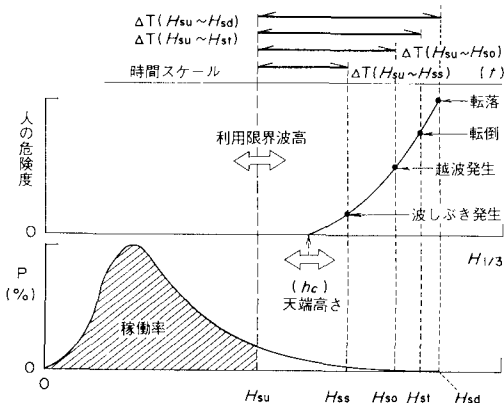


図-2 人の危険の評価の概念

これらの頻度的または時間的な安全指標は、施設周辺の地形的条件や海象条件などによって異なるばかりでなく、利用限界条件の設定や天端高さの設定によって変化する相対的なものであり、これらの指標をもとに利用限界や天端高さを適切に設定することが重要である。

## 3. 神戸垂水魚釣り護岸を対象にした事例解析

### (1) 施設の概要

神戸垂水魚釣り護岸は、神戸市新垂水下水処理場の防波護岸の天端上(総延長1400m)を海釣り公園として1984年9月より市民に開放したものである。年間約12万人の人が訪れ、ピーク時には約2000人が魚釣りを楽しんでいる。図-3は、護岸の断面図を示すものであり、構造形式はパラペット後退型のスリットケーソン式護岸である。設計有義波高  $H_{1/3D}$  は4.6mであり、パラペットの前面が釣り場(天端高さD.L.+3.5m)となっている。市民の安全を確保するための施設は、最も基本的なものとして港外側端に設置している転落防止用の手すり(柵高80cm)があり、その他に救命施設(浮き輪・梯子・ロープ・救命ボート)や放送施設がある。

この施設では、以下に示す利用限界基準を設けて施設の入園管理を行っており、入園禁止基準に達すると直ちに放送と管理者の誘導により退去させている。

①風速20m/s以上(風速計設置)

②雷が20km以内で発生した場合(感知器設置)

③釣り場に波しぶきがかかる状況(目視)

なお、上記の他に、気象台から出される波浪注意報などの気象情報も参考にしている。実際に入園禁止となった事例では波しぶきによるものが多かったが、その数は少なく、1985~1990年を対象にすると施設の稼働率が99.6%とかなり高くなっている。

当護岸では、護岸より20mと200m前面に超音波式波高計を設置して波浪観測を実施している。次節以降の検討では、主に1985年から1990年までの200m沖の波浪データを用いている。

### (2) 現施設での安全性の検討

図-4は、有義波高の頻度分布を示すものである。当護岸は比較的静穏な海域に位置し、有義波高0.5m未満が約90%であり、平均有義波高  $\bar{H}_{1/3}$  が0.363mとなつて

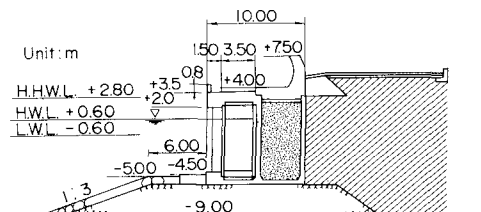


図-3 神戸垂水親水性護岸の断面

いる。図中には、H. W. L. (D. L.+0.6 m) と L. W. L. (D. L.-0.6 m) を対象にした各危険に対する限界波高を示しており、当然潮位が高いほうが相対的に天端高さが低くなるために、同じ危険状況となるとき波高が小さくなる。当施設の利用限界有義波高  $H_{su}$  は、波しぶきが発生する限界有義波高  $H_{ss}$  であり、H. W. L. のとき  $H_{ss}$  が 1.03 m、L. W. L. のとき 1.39 m となっている。また、その他の危険の限界有義波高は、H. W. L. のとき越波限界波高  $H_{so}$  が 1.42 m、転倒限界波高  $H_{st}$  が 1.54 m、転落限界波高  $H_{sd}$  が 2.13 m となり、越波してから転倒するまでの波高の差が比較的小さいのがわかる。なお、転落防止用の手すりが無いとして計算すると、転落限界波高  $H_{sd}$  は転倒限界波高  $H_{st}$  と等しくなり、人が転倒するような越波状況ではすぐに海中へ転落してしまうことがわかる。一方、施設の稼働率は H. W. L. で 99.5%，L. W. L. で 99.95% となり、かなり稼働率が高いことがわかる。また、実質的に危険と考えられる越波や転倒状況以上の有義波高となる超過確率は、H. W. L. で考えてもそれぞれ 0.04、0.02% とかなり低く、最も危険度の高い転落限界以上の危険超過確率は 0.01% とほとんど発生しないことがわかり、このことから安全な施設であることがわかる。以降の検討では潮位を危険側と考え、全て H. W. L. として計算している。

図-5 は、有義波高の時間変化の一例を示すものである。1987 年 8 月 30 日 18:00 より 31 日 22:00 までのものである。8 月 30 日 17:45 に台風 12 号の影響で波浪注意報が発令されており、発令より 16 時間後の 8 月 31 日 10 時に有義波高はピークに達している。利用限界波高  $H_{su}(=H_{ss})$  から各危険波高となる余裕時間は、越波限界波高  $H_{so}$  までで 1.9 hr、転倒限界波高  $H_{st}$  までで 3.3 hr、転落限界波高  $H_{sd}$  までで 5.1 hr となった。ピーク時にはかなり大きな波高になっているが、利用限界となってから実質的な危険が生じるまでの余裕時間が 2 時間程度あり、この場合適切に退避すれば安全上問題はないと考えられる。実際には入園開始時間が 6:00 であり、そのとき既に波しぶきが打ち上がっていたために、8 月 31 日は

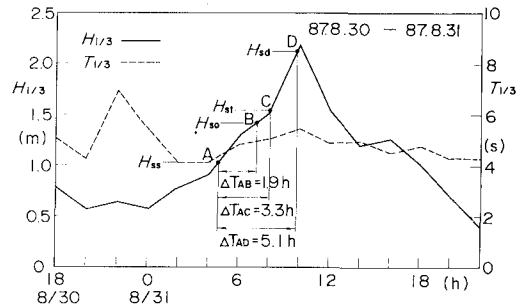


図-5 有義波高の時間変化の一例

表-1 危険余裕時間

|                           | min  | mean | max       |
|---------------------------|------|------|-----------|
| $\Delta T(H_{so}-H_{su})$ | 0.26 | 3.96 | 8.56 (hr) |
| $\Delta T(H_{st}-H_{su})$ | 0.34 | 4.24 | 8.92      |
| $\Delta T(H_{sd}-H_{su})$ | 0.73 | 2.93 | 5.14      |

終日入園禁止となっていた。

1985～1990 年までの波浪データを対象にして考えると、各危険に対する余裕時間は表-1 に示すとおりである。頻度的にはかなり安全性の高い施設であっても、余裕時間がかなり小さくなる場合があり、利用限界後の早急な情報伝達が必要であることがわかる。

#### 4. 天端高さが安全性に及ぼす影響

天端高さは、施設の安全性に関する重要なパラメータの一つである。本章では、神戸垂水の事例において天端高さのみを変化させ、頻度的または時間的な施設の安全性の違いを検討することにした。図-6 は、横軸に静水面上の天端高さ  $h_c$  をとり、それに対応する各危険の限界波高の計算値を示したものであり、左側縦軸には最高波高、右側縦軸には有義波高を示している。天端高さが小さくなると、各危険波高は小さくなる。例えば、現施設の利用限界条件である波しぶき発生時の波高  $H_{ss}$  は、 $h_c$  が 2.9 m (H. W. L. 上の現施設の天端高さ) で前述のとおり 1.03 m であるが、 $h_c$  が 1.6 m のとき 0.59 m となる。

図-7 は、天端高さや施設の稼働率および各危険波高超過確率を示すものであり、横軸に天端高さ、縦軸に確率をとっている。天端高さが低くなると、利用限界波高や各危険波高が低下するために、当然稼働率は下がるとともに、危険超過確率は逆に上昇する。天端高さが 1.4 m 以下 (平均有義波高  $\bar{H}_{1/3}$  の約 4 倍以下) になると、稼働率が 90% を下回り急激に低下している。一般に、稼働率は、その海域での常時波浪と施設の天端高さによってほぼ決まり、常時波浪の代表値を平均有義波高  $\bar{H}_{1/3}$  とする

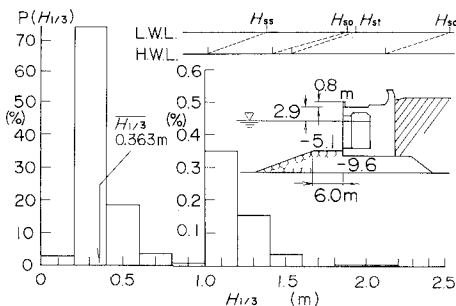
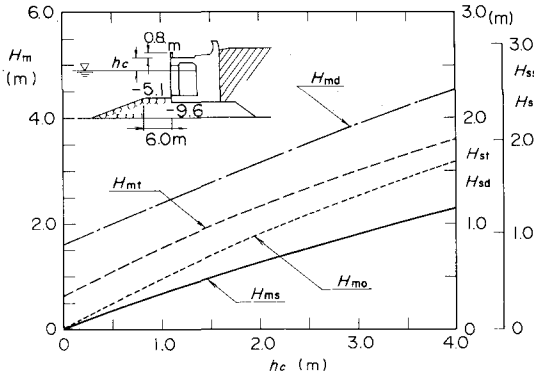
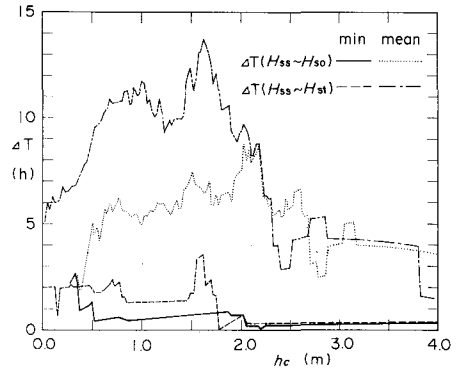
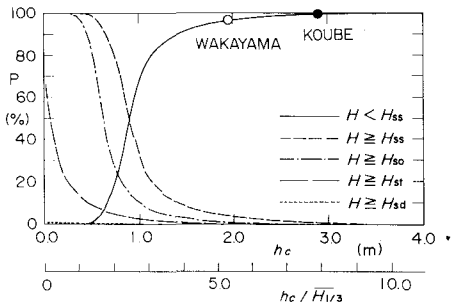


図-4 有義波高の頻度分布と危険限界波高

図-6  $h_c$  と各危険の限界波高図-8  $h_c$  と危険までの余裕時間図-7  $h_c$  と稼働率および危険超過確率

と、 $h_c/\overline{H}_{1/3}$  によって概ね説明することができると考えられる。なお、図中の横軸には、 $h_c/\overline{H}_{1/3}$  も合わせて示しており、現状の施設ではその値が8.0となり、図中の●で示すようにそのとき実際の稼働率が99.6%と計算による稼働率(実線)と一致している。また、図中には参考のため和歌山の魚釣り護岸のデータ(○)も示している。この施設は、天端高さが1.9 m (H. W. L.上)で $\overline{H}_{1/3}$ が0.355 m ( $h_c/\overline{H}_{1/3}=5.35$ )であり、施設の稼働率が96.7%となっている。これについても稼働率の計算値に概ね一致しているのがわかり、稼働率の概算するときに図-7が参考になる。

図-8は、天端高さを利用限界から各危険状況までの余裕時間 $\Delta T$ との関係を示すものであり、利用限界波高 $H_{su}(=H_{ss})$ から越波限界波高 $H_{so}$ と転倒限界波高 $H_{st}$ までの時間 $\Delta T$ について、その最小値と平均値を示している。それらの最小値は、天端高さによって大きな変化はなく、 $\Delta T(H_{ss} \sim H_{so})$ で1 hr未満となることが多く、 $\Delta T(H_{ss} \sim H_{st})$ でも $h_c$ が2.0 m以上で1 hr未満となっている。平均値でみると、 $\Delta T(H_{ss} \sim H_{so})$ は3~9 hrとなり、 $\Delta T(H_{ss} \sim H_{st})$ で3~14 hrとなっている。また、天端高さを高くしても、余裕時間が必ずしも長くないのが特徴であり、平均的にみるとむしろ余裕時間は短くなっている。天端高さが高くなると、前掲図-6で示したよ

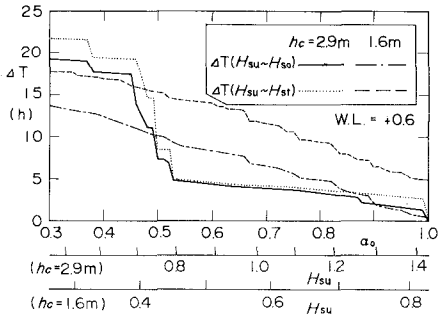
うに、各危険の限界波高が相対的に大きくなっており、それらの波高レベルでの波高変化率が比較的波高の小さい場合よりも大きくなっているために、 $\Delta T$ が短くなっていると考えられる。このように、天端高さを高くすると頻度的には安全になるが、時間的には逆に危険になる場合がある。

## 5. 利用限界条件が安全性に及ぼす影響

### (1) 利用限界波高の設定による施設の安全特性

施設の天端高さなどの形状が同じであっても、利用限界波高 $H_{su}$ の設定によって、施設の安全特性が異なってくる。そこで、本章では、利用限界波高 $H_{su}$ を変化させてその特性を検討している。なお、 $H_{su}$ は堤体前面での打ち上げ高さが $R$ が天端高さ $h_c$ の0.3~1.0倍( $\alpha_0=R/h_c$ )になるときの波高として考えており、 $\alpha_0=0.7$ のとき $H_{su}$ が波しぶき限界波高 $H_{ss}$ と等しくなり、 $\alpha_0=1.0$ とすると越波限界波高 $H_{so}$ に等しくなる。

図-9は、利用限界波高 $H_{su}$ と危険に対する余裕時間 $\Delta T$ の関係を示すものであり、 $\Delta T(H_{su} \sim H_{so})$ と $\Delta T(H_{su} \sim H_{st})$ の平均値を示している。なお、天端高さが静水面上2.9 mと1.6 mの場合について計算している。横軸には利用限界時の $R/h_c(=\alpha_0)$ をとるとともに、各天端高さにおける $H_{su}$ も合わせて示している。 $H_{su}$ を小さくすると各危険に対する余裕時間は増加するが、天端高さによってその変化率が異なっている。これは、前章で説明したように、波高の時間変化率が波高レベルで異なるためと考えられる。したがって、余裕時間を確保するためには、 $H_{su}$ をある程度下げることが一つの手段となるが、その効果は施設ごとの波浪条件や構造条件によって違ってくることに注意を要する。なお、 $H_{su}$ を下げると当然施設の稼働率も低下する。例えば、 $h_c$ が2.9 mで $\alpha_0$ が0.7のときの $H_{su}$ は、現施設の利用限界波高に相当し、そのときの稼働率が99.6%であるが、 $\alpha_0$ を0.4にすると $H_{su}$ が0.61 mとなり、稼働率は94.6%に低下して

図-9 利用限界波高  $H_{su}$  と危険までの余裕時間

しまう。

## (2) 利用限界に波浪注意報を用いた場合

波浪に対する利用限界の基準としては、観測上の問題から直接波高を用いるのが難しく、実際には堤体前面の打ち上げ高さや波しぶきの発生を目視観測したり、波浪注意報を客観的な判断基準として用いる例が多い。そこで、ここでは、当施設で波浪注意報の発令を利用限界時とした場合について検討する。

図-10 は、神戸地区の波浪注意報の月別発令延べ日数とそのときの波高を示したものであり、1985～1990年までの平均値を示している。波高は発令時の有義波高  $H_{sc}$  と、発令中の平均有義波高  $\overline{H_{sc}}$ 、最大有義波高  $(H_{sc})_{max}$  の月別平均値を示している。個々の  $H_{sc}$  は、図に示していないが 20 cm～110 cm (平均 0.47 cm) と変動が大きく、神戸気象台の波浪注意報発令基準の 150 cm に比べてかなり小さくなっている。また、発令時の波高  $H_{sc}$  はこの場合の利用限界波高  $H_{su}$  であるが、当施設の実際の利用限界波高である波しぶき発生波高 1.03 m (H. W. L.) より小さく、当施設で利用限界に波浪注意報を適用すると稼働率が 86 % となり、現状に比べて安全すぎてしまう。一般に、波浪注意報は比較的低波浪海域に設置される場合には、注意を要する。

また、季節的にみると、波浪注意報の発令延べ日数は、11月～3月の冬季に多く、注意報発令時の波高  $H_{sc}$  は逆に夏季に大きくなるのが特徴である。稼働率の高い夏季には、冬季に比べて波浪注意報によって利用を停止するときの波高  $H_{su}$  が大きくなるために前掲図-9に示すように危険に対する余裕時間が低下することが考えられ、季節によっては頻度的には安全性が高くても、時間的な安全性が低くなることがある。したがって、波浪注意報

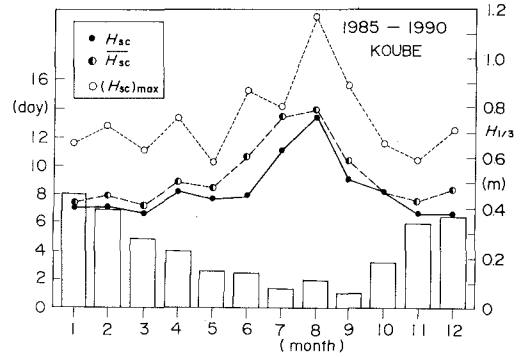


図-10 波浪注意報の月別発令延べ日数と波高

を利用限界として用いるときには、波浪と波浪注意報との季節的な特性などについても事前に把握する必要がある。

## 6. おわりに

本研究では、親水性施設の人の安全性を定量的に評価できる方法を明らかにし、その方法を用いて神戸垂水の親水性護岸の安全性を評価することができた。

最後に、本論文をとりまとめるに当たり、当所高山知司水工部長には、貴重なご意見を頂いた。また、神戸市開発局臨海開発事務所の皆木仁所長を始めとして、関係職員の方には神戸垂水の波浪データ、入園禁止データを提供してもらったとともに貴重なご意見を頂いた。住友金属工業(株)和歌山製鉄所西防室の野田真司室長や関係職員の方には魚釣り公園の入園禁止データや波浪データを頂いた。ここに記して深甚なる感謝の意を表する。

## 参考文献

- 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 (1992a): 親水性護岸や防波堤の利用限界に関する事例解析, 海洋開発論文集, Vol. 8, pp. 391-396.
- 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗 (1992b): 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.
- 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗 (1992c): 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—親水性港湾構造物に関する水工的研究(第一報)—, 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 (1993a): 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.
- 高橋重雄・遠藤仁彦・室善一朗 (1993b): 越波による人の転倒限界条件とその現地への適用, 海洋開発論文集, Vol. 9, pp. 295-300.