

斜め入射波による円形シェル面に働く波力に関する研究

神 崎 正*・藤 井 俊 二**

1. 緒 言

北海のコンクリート製プラットフォームの例をあげるまでもなく、円形シェル面は耐波構造として優れた利点をもっている。

本研究の目的は、この円形シェル面を防波堤、護岸等の外壁に適用するに際して、その波力特性を明らかにし、安全な円形シェル面の設計法を導き、円形シェル面の構造上の有利性を定量的に明らかにすることにある。

従来の円形シェル面を扱った研究例として、単体構造に関する報告は多く見られるが、連続した構造系を扱ったものとしては永井ら¹⁾の報告など比較的その例は少ない。また、主として水理学的な観点からの研究が主体で、実験も二次元であるため、斜め入射波によって生ずる様々な問題については言及されていない。特に円形シェル構造は、斜め入射波によって偏圧をうけ応力的に厳しい状態になることが考えられ、これを解明しない限り安全な耐波設計を行うことはできない。

こうした観点から、本研究を進めるに際しては、まず斜め入射波によって生ずる円形シェル面の偏圧機構、偏圧応力の解明に主眼をおいて行った。その結果、円形シェル面特有の波力特性が明らかになり、また現行設計法との適合性の検討を通じて円形シェル構造の安全な設計法を導くことができた。

2. 実験シリーズおよび実験模型

表-1 に示す手順で研究を進めた。第一ステップとして、平面水理実験によって斜め入射波の円形シェル面に及ぼす影響を調べ、第二ステップとして二次元水理実験によってさらに詳細な設計データを収集した。こうした基礎実験に基づいて円形シェル面の設計法を導き、第三ステップとして実大実証実験によって設計法の検証を行った。

平面水理実験では、幅 27.6m×長さ 40m×水深 1.9m の平面水槽（運輸省）に海底勾配 1/11.4 の架台を取付け、架台上に 図-1 に示す縮尺 1/30 の円形シェル混

表-1 実験シリーズ

実験シリーズ	実験項目	検 討 項 目
Ⅰ 平面水理実験	斜め入射波による波圧強度、波圧分布	・入射角 β の影響 ・シェル面の平面分布特性 ・シェル面の鉛直分布特性 ・合田式との適合性
	斜め入射波によるシェル応力	・シェルに働く偏圧応力 ・偏圧機構、偏圧荷重分布
	円形シェル面に働く波圧合力	・合田式による合力値との比較 ・測定水圧の合力値との比較
Ⅱ 二次元水理実験	波圧強度、波圧分布	・マウンド水深比 d/h との関係 ・平面とシェル面の比較 ・合田式との適合性
Ⅲ 実大実証実験	波圧強度、波圧分布	・平面および鉛直分布特性 ・合田式との適合性
	円形シェル面に働く応力	・波圧によるシェル応力計算値と実測値 ・合田式によるシェル応力計算値と実測値 ・設計偏圧応力と実測値

成堤模型を設置して行った。斜め入射波を与えるため、模型を回転することによって入射角 β を 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° と変化させた。入射波の波高は実大で 2.0m～11.0m、周期は 6.02 秒～13.7 秒とし、砕波領域に至るまで測定を行った。

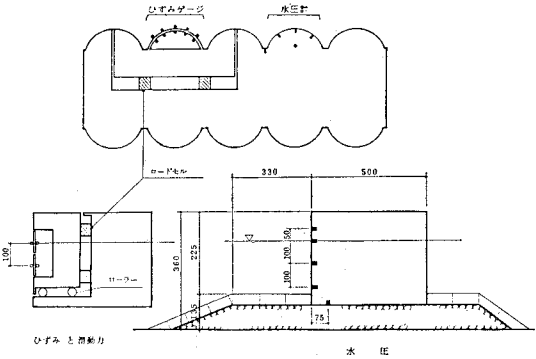


図-1 平面水理実験模型

二次元水理実験では、図-2 に示すように幅 1.35m×長さ 30m×水深 0.9m の水槽（日大）を 2 分し、縮尺 1/40 のケーソンおよび円形シェル混成堤模型を並置して同じ入射波に対する波圧強度等を詳細に調べた。入射

* 正会員 大成建設（株） 技術開発部 海洋開発室
** 大成建設（株） 技術開発部 海洋開発室

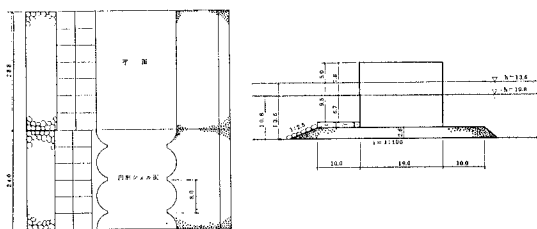


図-2 二次元水理実験模型

波の波高は実大で 3m~11m, 周期は 6.3 秒~13.9 秒まで与えた。なお海底勾配は 1/100 とした。

実大実証実験は千葉県館山湾で行われた。水深 -5m, 海底勾配 1/100 の海域に円形シェル防波堤を据付け、5 回の波浪観測および計測を行い、設計法の検証を行った。

3. 円形シェル面における波力特性

(1) 実験概要

円形シェル混成堤模型に、図-1 のように水圧計を平面方向 4 点、鉛直方向 4 段、計 16 点取付け、表-2 の条件で平面および鉛直方向の波圧強度、波圧分布を測定した。

二次元実験では、表-3 の通り水深を変えて d/h の

表-2 平面水理実験の条件

縮尺	水深 (実大)	入射角 β	周期 (実大) 秒	波高 (実大)
1/30	36cm (10.8m)	0°, 15°, 30°, 45°, 60°	1.10, 1.80, 2.15, 2.50 (6.02, 9.86, 11.8, 13.7)	6.7cm~36.7cm (2m~11m)

表-3 二次元水理実験の条件

縮尺	水深 (実大)	d/h	周期 (実大) 秒	波高 (実大)
1/40	27cm (10.8m)	0.67	1.0, 1.3, 1.6, 1.9, 2.2 (6.3, 8.2, 10.6, 12.0, 13.9)	7.5cm~27.5cm (3m~11m)
	34cm (13.6m)	0.70		

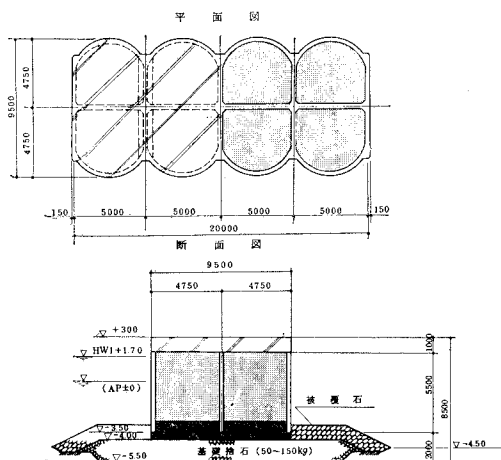


図-3 実大実証実験諸元

影響、越波の有無による影響などを調べた。なお水圧計は横方向 5 点、鉛直方向 6 点、計 30 点取付けた。

(2) 実験結果および考察

図-4 は斜め入射波による円形シェル面の平面方向の波圧強度および波圧分布を、入射角 β ($0^\circ \sim 60^\circ$) をパラメーターにとって示したものである。図からわかるように、波圧分布は波の入射角が変化しても大きな変化はなく、ほぼ同様な分布性状を示す。分布性状は中央に比べて端部では 20~30% 大きくなっている。この傾向は、入射角 β が大きいほど、水面上ほど若干ではあるが大きくなる。ただし、端部の波圧はシェル凹部の値であり、厳密にはシェル面の波圧分布を示してはいない。図-7 の二次元実験にはその違いが示されており、シェル凹部ではシ

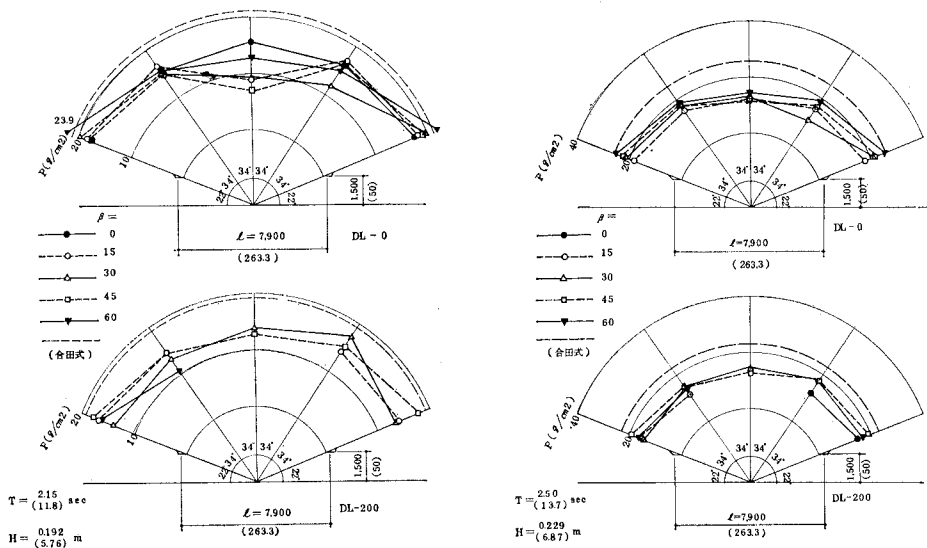


図-4 平面波圧分布 (斜め入射波)

エル端部より 20~30% 高い波圧になっている。従って、シェル面の平面波圧分布に限って言えば、ほぼ同心円的な分布と考えて良いものと思われる。

図-5 は、鉛直方向の波圧分布で、破線で示した合田式²⁾による波圧分布と傾向は良く合っている。

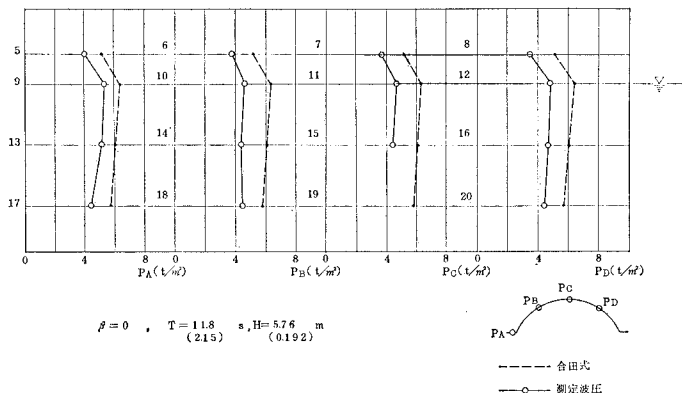


図-5 鉛直波圧分布

図-6 は、入射角が 45° の時の円形シェル凹部における入射波高と波圧強度の関係を、波の周期をパラメータに示したものである。図より明らかなように、円形シェル面に働く波圧は波の周期との相関が小さい。従って、波の周期が大きくなるほど合田式によって求めた波圧強度との差は大きくなるものと推定されるが、このことは 5. 図-12 に後述する。円形シェル面に働く波圧が波の周期との相関が小さい理由としては、永井ら¹⁾が指摘した円形シェル面凹部における部分砕波現象によるものと考えられる。

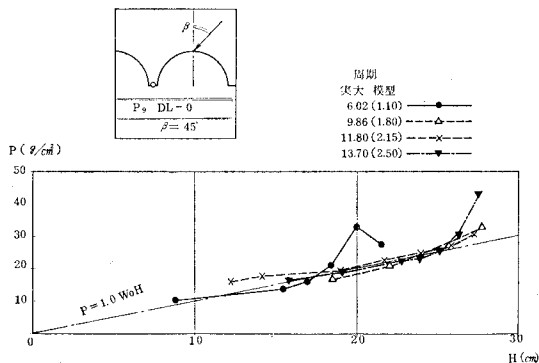


図-6 波高と波圧強度との関係

図-7 は、二次元水理実験で得られた円形シェル面の波圧分布を示したもので、図中ケーソン混成堤における波圧強度もプロットしてある。両者とも合田式(破線)を下まわっており、 P/w_0H はほぼ 1.0 で平面水理実験の結果と比較的良好に対応していた。

図-8 は、 H/h と P/w_0H の関係を、マウンド水深比 d/h を変えて調べたものである。 d/h が 0.62 から 0.70

に変化すると、同じ H/h に対する P/w_0H は合田式による値以上に減少している。これは久保ら³⁾が指摘した越波による重複波圧の減少の影響も加わったためと見られる。図中併記した谷本ら⁴⁾の実験結果とも比較的良好に対応している。

4. 斜め入射波によるシェル応力

(1) 実験概要

図-1 の通り、円形シェル混成堤模型の一部をアクリルで製作し、歪ゲージを平面方向 5 点×鉛直方向 2 段、合計 10 点取り付け、表-2 の条件で円形シェル面に働く偏圧応力を測定した。また、その時の水圧計の時刻変化も同時に記録し、作用波圧の位相差とシェル応力との関係を調べた。

(2) 実験結果および考察

図-9 は、斜め入射波による円形シェル面の応力の実測値を、波の入射角 ($\beta=15^\circ$)

$h = 10.8 \text{ m}$ $T = 8.2 \text{ s (1.3)}$
 $H = 7.44 \text{ m (18.6 cm)}$

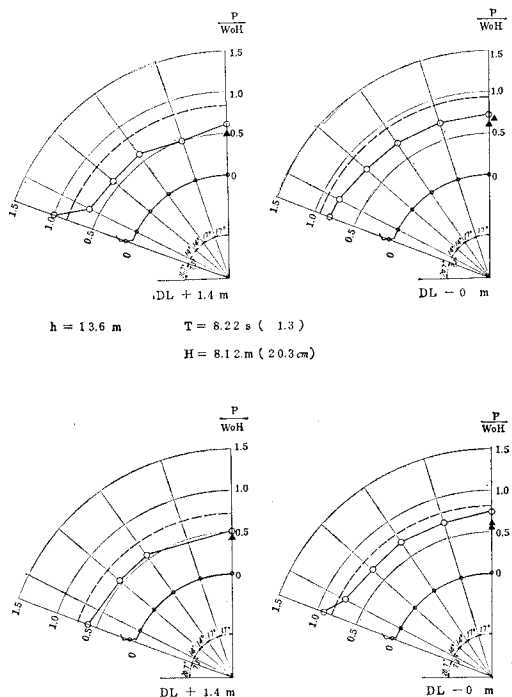


図-7 平面波圧分布 (二次元)

~ 60°) をパラメータとしてプロットしたものである。このように斜め入射波によって円形シェル面には偏圧応力が発生し、設計上その影響を考慮しなければならないことが明らかになった。この偏圧に対する設計法として、図-10 に示すようにスパンの 1/2 に合田式による

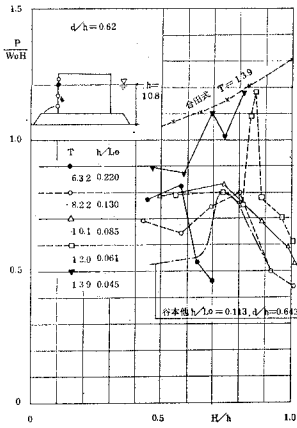


図-8 $H/h \sim P/w_0 H$ の関係

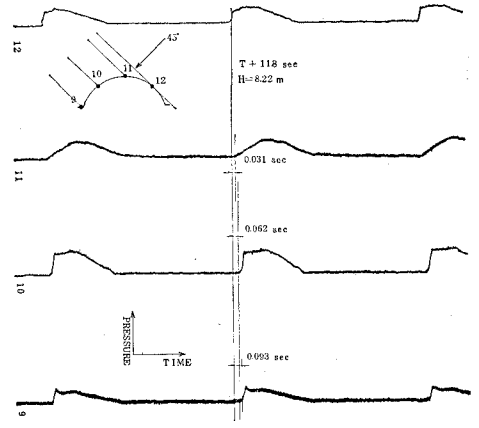
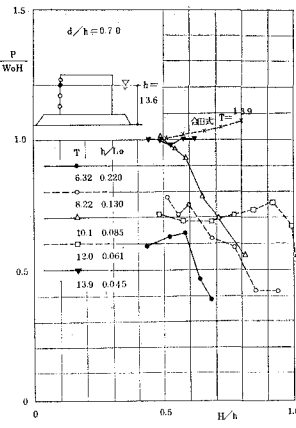


図-11 斜め入射波の位相差

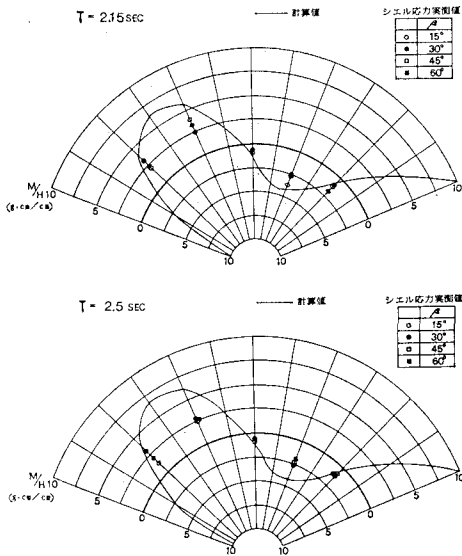


図-9 シェル面の偏圧応力の計算値と実測値

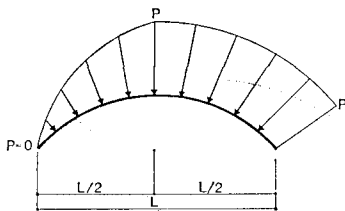


図-10 設計波圧分布

波圧をかけ、残りの $1/2$ を端部で 0 になるような分布を設定した。この提案した偏圧分布によって、図-9 に示す通り傾向の良く合った、かつ安全側な偏圧応力を設定することができる。

図-11 は、斜め入射波によって円形シェル面に作用する波圧の位相差を記録したものである。入射波は、まず入射方向に対するシェル凸部に作用し、ある時刻差をもって順次凹部に伝播していくことがこの記録から読みと

ることができる。この水圧計の示す時刻差は、進行波としての波速から求めた計算値と良く一致する。この位相差が、すなわち円形シェル面における偏圧応力の発生する原因である。偏圧応力が最大値を示す波の入射角は $30^\circ \sim 45^\circ$ で、 15° 、 60° では最大値の 30% ほど減少する。提案した偏圧分布は、この現象をふまえて導いたものである。一方、砕波領域においては、この位相差は計算値よりもかなり小さく、従って偏圧応力も小さい。なお、この実験は規則波中で行われたもので、不規則波においてはこうした理由によってこの偏圧応力は緩和される傾向にあるものと考えられる。

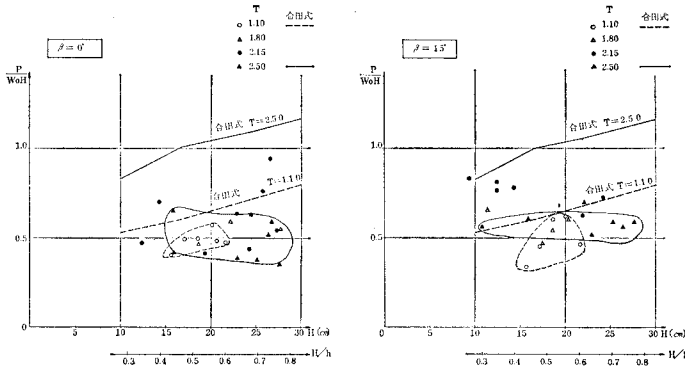
5. 円形シェル面に働く波圧合力

(1) 実験概要

図-1 の通り、2 スパン分のシェルに働く波圧合力をロードセルで直接測定し、受圧投影面積で除して単位面積当りの荷重として用いた。その測定値を、水圧計の平均波圧強度および合田式から求めた計算値と比較し検討を行った。

(2) 実験結果および考察

図-12 は、波圧合力の測定値における H/h と $P/w_0 H$ の関係を示したもので、合田式による計算値と対比させてある。図より円形シェル面に働く波圧合力は、合田式による計算値と比べ、35~50% 小さいことがわかる。この理由として第 1 は、前述したように、円形シェル面に働く波力に位相差があるためと考えられる。中村ら³⁾のケーソン混成堤の実験では、測定波圧合力と水圧計の積分値とは良く一致していることから、円形シェル面の形状効果に原因があるものと推測される。第 2 の理由としては、前述したように、円形シェル面に働く波力は周期との相関が小さいためと考えられる。合田式が波の周期、 H/h と密接に関係しているのに対し、測定値は両者には殆んど関係なく分布している。従って、波の周期が大きいほど両者の差は大きくなっている。測定波圧合力



図—12 測定波圧合力と合田式との関係

と水圧計の平均波圧強度とは、平均 20% 程度波圧合力の方が小さい。これはすなわち、第 1 の理由として述べた円形シェル面に働く波の位相差によって生じたものにはならない。

6. 実大実証実験による耐波設計法の検証

(1) 実験概要

円形シェル防波堤の前面シェル壁に図—3 に示すように水圧計を平面方向に 7 点、鉛直方向に 2 段、合計 14 点取付け、平面および鉛直方向の波圧強度、波圧分布を測定した。また、シェル壁内の鉄筋に取付けられた歪計によって、シェル応力も同時に測定した。なお、波高計は防波堤前面 100 m の位置にセットした。データは全て防波堤上の計測室内において自動記録された。

(2) 実験結果および考察

昭和 56 年 8 月 22 日、防波堤完成直後、台風 15 号の影響によって図—

13 に示す波高 H_{max}

1.93 m、周期 12.3 秒

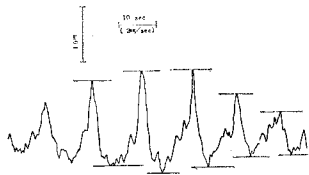
の波が観測された。

$H_{max}/H_{1/3}$ は 1.1、

周期の標準偏差 σ_n

は 1.12 秒で、波形

勾配の小さい比較的規則性のある波であった。なお入射角は 15° 程度であった。



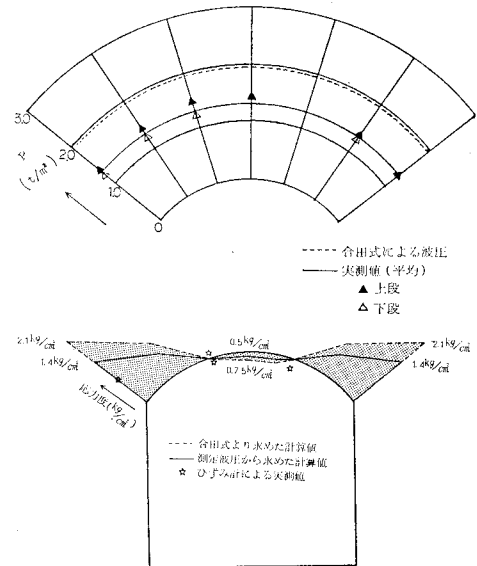
図—13 入射波の波形

図—14 は、その時のシェル面に働く波圧強度の平面分布とシェル応力の測定値を示したものである。平面分布特性は同心円的な分布をし、また波圧強度の実測値は合田式による計算値(破線)を下まわっていた。鉛直分布特性は水理実験と同様に合田式と傾向は良く合っていた。シェル応力の実測値は、測定波圧から求めた計算値よりも 30~40% 小さかった。この原因としては、中詰材のパネによる拘束効果、波の不規則性などの影響が考えられるが、前述のように比較的規則性をもった波であったことから中詰材のパネによる拘束効果がより大きく

影響したものと見られる。なお、このパネ効果は、計算上は 5 kg/cm^2 程度のパネ定数に相当するものである。

7. 結 言

各種の水理実験から実大実証実験に至る一連の実験と解析によって、円形シェル面に働く波力に関する様々な現象が明らかにされ、また安全な円形シェル面の設計法を導くことができた。その結果、円形シェル面に生ずる波力による最大曲げモーメントは、平面の場合のおよそ



図—14 波圧分布とシェル応力の計算値と実測値

$1/4$ 程度になることがわかり、耐波構造として優れた構造であることが明らかになった。

最後に、本研究の遂行にあたり御助言を戴いた東北大学岩崎教授、運輸省港湾技術研究所をはじめとする運輸省の方々に感謝の意を表します。なお、本研究の一部は、運輸省試験研究補助金の交付を受けて行われたことを付記します。

参 考 文 献

- 1) 永井莊七郎・玉井佐一・西村益夫: 円形セル型防波堤に関する研究, 第 10 回海岸工学講演会講演集, 1963.
- 2) 合田良実: 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第 12 巻第 3 号 2, 1973.
- 3) 久保弘一・井田康夫: 天端の低い直立壁に作用する波圧に関する研究, 第 23 回海岸工学講演会論文集, 1976.
- 4) 谷本勝利: 混成防波堤に作用する波力について, 港湾技術研究所講演会講演集, 昭和 51 年.
- 5) 中村竜二・守口照明・柳島慎一・田川昌宏: 大水深混成防波堤に作用する波力について, 第 25 回海岸工学講演会論文集, 1978.