

衝撃砕波力によるケーソン壁の土圧とひずみに関する実験

高橋 重雄*・鈴木高二朗**・油谷 進介***

1. はじめに

ケーソン式防波堤においては、条件によって強大な衝撃砕波力が作用し、ケーソン壁が破壊されることがある(谷本ら, 1975)。しかしながら、そうした場合は衝撃砕波力のピーク値が設計波力を非常に大きく上回る場合であり、衝撃波力が発生してもケーソン壁が破れる事例は意外に少ないのが現状である(Takahashi et al., 1994)。

現地のケーソンでは中詰砂があり、波力が作用するとき中詰砂が抵抗として働き、結果としてケーソン前壁のひずみが小さくなっていると考えられる。実際、現地のケーソンで中詰砂の土圧とケーソン壁のひずみを計測した結果では、土圧によってひずみが70%程度になっていることが確かめられている。この場合は重複波力による準静的な現象で、土圧は中詰砂のパネ的な反力と考えられる。一方、衝撃的な砕波力の場合、さらに中詰砂の付加質量力が版に作用する可能性がある。こうした波圧と土圧、そしてひずみの関係についてはほとんど研究されていない。本研究ではこれらの点を検討し、より経済的なケーソン設計に資するために水理模型実験を行った。

2. 水理模型実験の方法

(1) 模型と実験水路

図-1は今回の実験の模型を示すものである。模型は高さ86.8cm、幅78cm、法線方向の長さ60cmで、アクリル樹脂製である。この模型を1/100の海底床上に厚さ56cmの捨石マウンドを設置して据え付けた。消波ブロックによるマウンド被覆層を24cmにして、ケーソンの前面水深 d を40cmと浅くし衝撃波力が発生し易い条件としている。ここで、マウンドの前肩幅 $B_M=108.8$ cmである。ケーソンは滑動等の動揺を完全に抑えるために背後に鉛詰め箱を設置するとともにケーソン上部も板によって押さえつけてある。また、ケーソン内部には隔壁が無く一室のみの構造であり、現地のケーソンに対して比較的一室の体積が大きい構造である。ケーソンの上

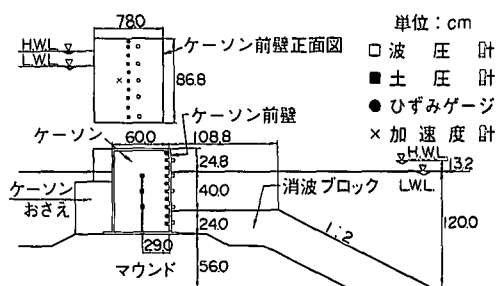


図-1 実験の模型断面図

蓋はケーソン側壁で二辺固定とし、前面版は側壁と底版で三辺固定とした。ケーソン前壁に厚さ D が10mmと15mmの2種類のアクリル版を用い、それぞれに波圧計、土圧計、ひずみゲージをとりつけた。また、ケーソン内部中央付近にも土圧計を設置した。なお、ケーソン前壁の弾性係数はケーソン内に水を入れていきながらひずみを計測し、三辺固定版として求めたが、現地のケーソン壁と比較するとやわらかく、ひずみのやややすい構造である。

(2) 実験波および実験ケース

実験は規則波で行い、3種類の周期で重複波から衝撃砕波が作用するような波高の条件で実験を行った。水深 h はH.W.L.で133.2cm、L.W.L.で120cmであり、また、ケーソン内は中詰砂を入れた場合と入れない場合(水張り)について実験した。なお、ケーソン内は満水状態で実験を行ったが、センサーのケーブルの取り出し孔等があり、ケーソン内の水の圧力は抜けやすくなっている。

(3) 静水時土圧および版の固有振動

図-2は砂を投入した後に波を作用させ、締め固まるにつれての静水時土圧分布の変化を表したものである。波が作用すると砂の体積が減少し、土圧が上昇する様子が分かる。現地でも施工直後の中詰砂はあまり締め固まっておらず、このような現象が起きている可能性がある。図中、現行設計土圧より土圧が小さい理由はケーソン前壁の剛性が小さくたわみが大きくでたためと考えられる。

表-1に前面版の固有振動数と減衰係数を示す。水張

* 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
 *** 正会員 運輸省第四港湾建設局 下関調査設計事務所長

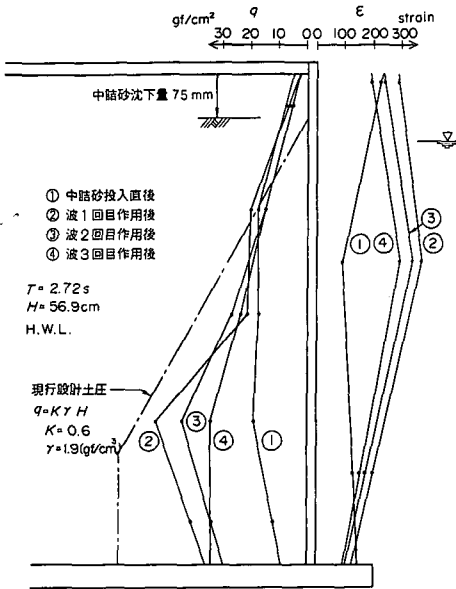


図-2 砂の締め固めによる静水時土圧の変化

表-1 前面版の固有振動数と減衰係数

		空中	水張り	中詰め (締め固め前)	中詰め (締め固め後)
振動数 (Hz)	ハンマー打撃時	38.5	8.1	(12.5)	(25.0)
	波作用時		7.3		6.3
	計算値	40.2	7.6		6.3
減衰率	ハンマー打撃時	0.06	0.47	0.67	0.71
	波作用時				

り、中詰有の場合には前面版の幅を直径とする円筒の付加質量が作用するものとして振動数を計算した。空中、水張りの場合、底面からの高さ 52 cm の部分をハンマーでたたいた時に発生する振動数は前面版を梁と考えて得られた計算値にほぼ一致している。また、波を作用させた場合、ひずみ波形に振動が見られるがその振動数も計算値にほぼ一致している。中詰有の場合、ハンマー打撃時の振動数が計算値と異なっているのは、ハンマー打撃が局所的であるためと考えられる。なお、中詰砂の場合は減衰率が非常に大きい。

3. 重複波的な波の作用による土圧とひずみ

(1) 測定波形

図-3(a), (b) は、重複波的な波力が作用する場合の波圧波形の例である。なお、波圧 p 、土圧 q_s (内部水圧 q_w)、ひずみ ϵ の波形は 5 測点平均の波形である。(a) の中詰砂有の場合には、波圧、土圧、ひずみが同位相で発生しており、版のたわみを介して波圧と土圧、および版のパネ力がつり合っていることが分かる。(b) の水張り場合には、内部水圧が波圧より位相が早くでている。

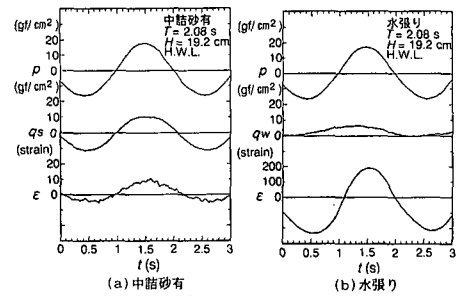


図-3(a), (b) 重複波状態での測定波形

この理由は、今回のケーソン模型では天端の隙間を通して水が出入りしており、ケーソン内部の体積変化率 dV/dt による内部水圧が発生しているためと考えられる。

(2) 波圧と土圧 (内部水圧)

図-4 は波圧の全振幅 p_r と土圧の全振幅 q_{sr} (内部水圧の全振幅 q_{wr}) の関係を 2 種類の版厚 D について示している。なお、波圧、土圧は 5 測点の平均である。中詰砂有では波圧に対する土圧はかなり大きく、版厚 15 mm では波圧の 70 %、10 mm では版のたわみが中央で最大になることも影響して波圧より大きな値が得られている。また水張りでも内部水圧は波圧の 40 % とかなり大きい。

(3) 波圧、土圧 (内部水圧) とひずみ

a) 中詰砂有の場合

図-5(a) は、ひずみの全振幅 ϵ_r と土圧の全振幅 q_{sr} の関係であり、横軸にはひずみを 5 測点での平均のたわみ w_r に変換したのもも示している。版のたわみと土圧は、版厚に関係なく同一直線上にのっており、土圧が一定のパネ係数 ($q_{sr}/w_r = 1.3 \text{ kgf/cm}^3$) を持つパネ力として発現していることが分かる。ここで前掲図-4 を見ると同じ波圧に対して版の薄い 10 mm 版の方が 15 mm 版より大きな土圧がでている。版と中詰め砂のパネは並列で波圧に対抗しているが、圧倒的に土圧で受け持つ分の方が

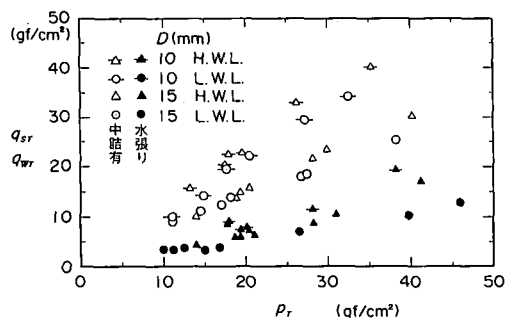


図-4 重複波状態での波圧と土圧 (内部水圧)

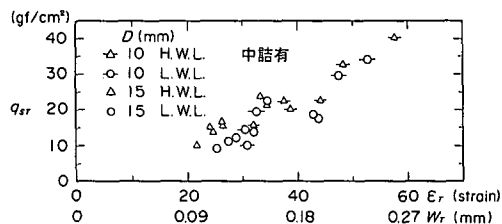


図-5(a) 重複波状態でのひずみと土圧

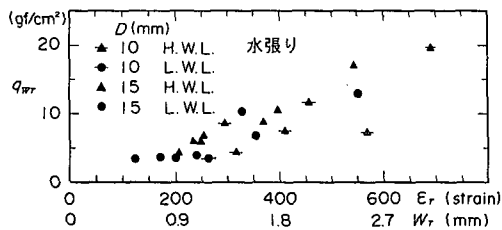


図-5(b) 重複波状態でのひずみと内部水圧

大きいことが中詰砂，版それぞれのバネ係数 ($q_B/w_B = 0.04, 0.13 \text{ kgf/cm}^3$) から分かる。

b) 水張りの場合

図-5(b) はひずみの全振幅 ε_r (たわみ w_r) と内部水圧の全振幅 q_{wr} の関係である。図-5(a) と比較すると一定のたわみに対する内部水圧 q_{wr}/w_r は 0.05 kgf/cm^3 と中詰砂有の場合より 1 オーダー以上小さく，波圧に対しては水圧より版で受け持つ分が大きく，前面版がたわみやすいことを示している。これは，前述したように天端があいており，ここから水が出入りするためと思われる。

4. 衝撃的な波の作用による波圧，土圧とひずみ

(1) 測定波形と外力，ひずみ発生の関係

図-6(a)，(b) は周期 $T=2.72 \text{ s}$ ，波高 $H=56.9 \text{ cm}$ ，潮位が L.W.L. の場合で，衝撃砕波力が作用した時の波形の一例である。同時の波圧 p_3 ，土圧(内部水圧) q_3 ，加速度 a_1 (底版上 43 cm)，ひずみ ε_3 (底版上 52 cm) の波形を示している。ただし，(a) は中詰砂有，(b) は水張りの場合である。(b) をみると版の振動にあわせて波圧，内部水圧波形が振動していることが分かる。この周波数は 7.3 Hz で付加質量を考慮して計算した版の固有振動数と一致する。(a) の中詰砂有ではこのような振動がすぐに減衰しており，中詰砂が版の振動を吸収することが分かる。

ところで，ケーソン壁に働く動的な力としては①波力；②版の加速度に比例する力(版の慣性力，中詰砂の慣性力，ケーソン内部水の付加質量力，ケーソン外の水の付加質量力)；③版の変位に比例する力(版自体の弾性

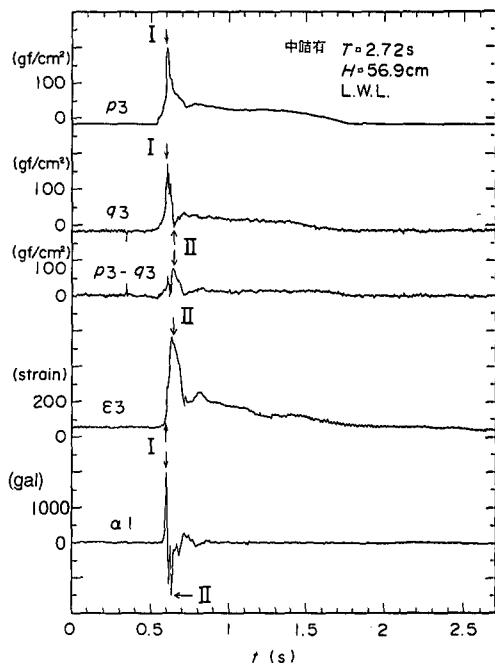


図-6(a) 衝撃波力作用下の測定波形(中詰有)

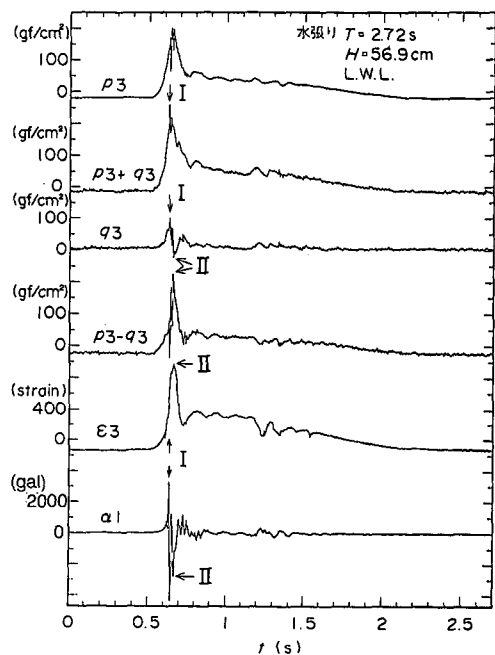


図-6(b) 衝撃砕波力作用下の測定波形(水張り)

力，中詰砂の弾性力) があり，これらの力が釣り合いながら版のひずみが発生している。測定波形をみるとこうした力がピークとなる位相が明確に認められており，説明のために以下のような位相を定義する。

位相 I：波圧，土圧(内部水圧)，加速度がほぼ同時

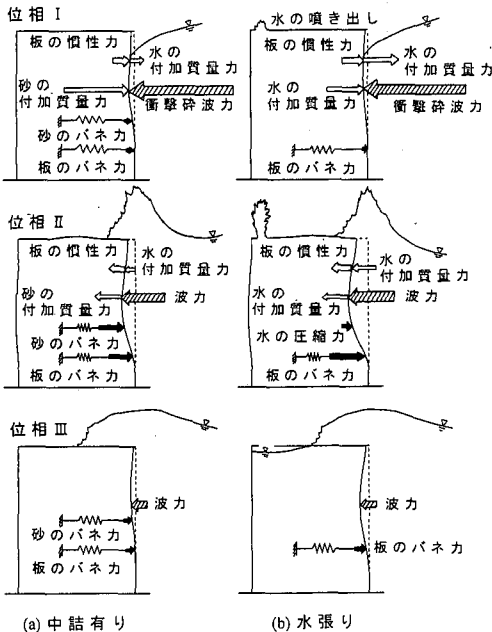


図-7 衝撃砕波力作用下での外力とひずみの発生

にピーク値をとる位相

位相II：位相Iに遅れてひずみのピーク，加速度の負のピークが発生する位相

位相III：波圧の腰掛け部で波圧，土圧（内部水圧）ともに準静的な力になっている位相

図-7(a), (b) は，これらの位相別に，力のつり合いと版の変形を表した模式図である。

a) 中詰砂有の場合

位相Iでは，まず，衝撃砕波力が作用して版が加速すると同時に版はケーソン内部の中詰砂とケーソン外部の水を加速するためその付加質量力を受ける（注：測定波圧にはすでにケーソン外部の付加質量力が入っている）。位相Iでは，版のたわみはまだ小さいため中詰砂と版のパネ力は小さく，衝撃砕波力に対して中詰砂と水の付加質量力および版の慣性力がつり合っている。

その後位相IIでは版のひずみが極大値をとり，地盤と版のパネ力が極大になる。一方，このとき版の加速度は負で，版には中詰砂の負の付加質量力が作用する。土圧計で計測されるのは中詰砂のパネ力と負の付加質量力を足したもので，0程度となる。この状態では波力に対する中詰砂の効果が期待できず，実質的に版のひずみを発生させる波圧と土圧との差は位相IIで極大値をとり，最も版がたわむ位相となる。位相IIIでは波力が準静的で波力と中詰砂のパネ力および版のパネ力がつり合っている。

b) 水張りの場合

まず，位相Iで衝撃砕波力が版を加速する。同時に版がケーソン内外の水を加速し，その付加質量力を受ける。中詰砂有の場合と比較すると版のまわりの付加質量は単位体積重量の違いだけ小さいため，版の加速度は中詰砂有の場合より大きくなる。位相Iでは波圧がピークに達していないが，これはケーソン外部の付加質量力が作用しているためである。図中の $p_3 + q_3$ はケーソン外側の付加質量力を加えた波圧を示すものであり，これは版が固定されたときの波圧で，このピークは位相Iにほぼ一致していることに留意すべきである。位相IIでは版のたわみが極大になるが，水は天端の隙間を通して抜けるため水の圧力は小さい。一方このときの版の加速度は負で，ケーソン内外では水の負の付加質量力が作用している。従って，付加質量力は波力と同じ方向に働き，抵抗しているのは版のパネ力だけである。版の固有振動周期が衝撃砕波圧の作用時間に近いため，内部水圧の負のピーク値により，波圧と水圧の差 $p_3 - q_3$ のピーク値は波圧 p_3 自体のピーク値よりもかえってやや大きくなってしまっている。すなわち水張りの場合は動的効果により発生するひずみが逆にやや大きくなることもあることが分かる。

(2) 位相Iでの波圧と土圧（内部水圧）

図-8は，位相Iでの波圧 p_p と土圧 q_{sp} （水張りの場合は内部水圧 q_{wp} ）の関係である。水張りでは内部水圧が波圧の40～80%，中詰有では土圧が波圧の70～90%でている。大まかには土圧が内部水圧の1.5倍程度でおり，水と中詰砂の単位体積重量の割合が反映されているものと推定される。

図-9は位相Iでの加速度 a_p と土圧 q_{sp} （内部水圧 q_{wp} ）の関係である。 a_p と q_{sp} , q_{wp} はほぼ比例関係にあり，中詰砂およびケーソン内部水の付加質量力がそれぞれ土圧，内部水圧となっていることが分かる。グラフの傾きから相当する付加質量を求めると，水張りではおよそ41 (g/cm³)，土圧では60 (g/cm³) であり，これを密度で割ると水張りは41 cm，中詰有では32 cmとなる。これは版背後の付加質量の範囲を示しているものと思われる。

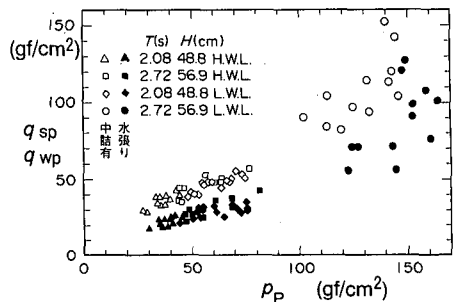


図-8 衝撃砕波作用下での波圧と土圧（内部水圧）

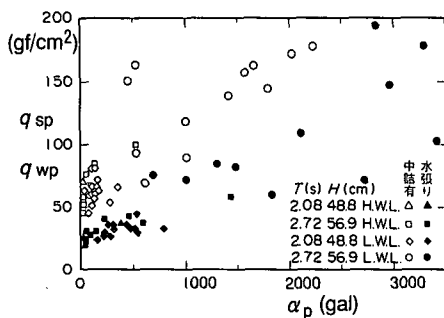


図-9 加速度と土圧 (内部水压)

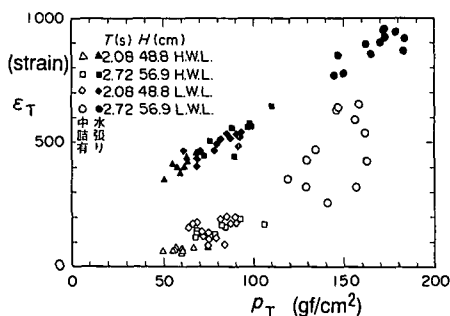


図-10 波圧とひずみ

る。

(3) 位相IIでの波圧, 土圧 (内部水压) とひずみ

4. (1) で述べたように, 衝撃砕波力が作用する場合, 版が最もたわむ位相は, ケーソン前壁背後の中詰砂あるいは内部水の抵抗が最小になり, 波圧から土圧 (内部水压) を差し引いた値が最大になる位相IIである。4 u_0H 程度の衝撃砕波が作用する条件では, 水張りの場合, 波圧から内部水压を引いた値が3~4.5 u_0H 程度にまでなり, 波圧と変わらない。一方, 中詰砂有の場合は1~2 u_0H まで減少する。この値は腰掛け部の波圧よりは大きい, 衝撃波圧のピーク値よりかなり小さい。

図-10は波圧の全振幅 p_T とひずみの全振幅 ϵ_T の関係であり, 上述した効果によって, 中詰砂有では水張りの場合の0.4~0.8倍程度のひずみになることが分かる。

5. 土圧や内部水压に及ぼすその他の要因

(1) 中詰砂の締め固めによる土圧

図-11(a), (b)はケーソン内に砂を締め固めずに入れた後に波を作用させた場合と一連の規則波を3回作用させた後にさらに波を作用させた場合の波圧, 土圧, ひずみ, 加速度波形の例である。

砂が締め固まっていなかった状態では, 中詰砂が液状のゆるい状態にあり, 水張りの際に見られるような版の振動とそれに起因する波圧の振動波形が見られる。波を繰り返し作用させ, 砂が締め固まった状態では版の振動は小

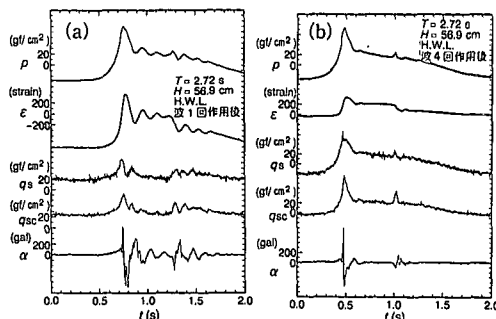


図-11 締め固めによる土圧の変化

((a) 締め固め前, (b) 締め固め後)

さくなり, 波圧波形にも振動が見られなくなる。土圧も締め固まった状態では大きくなり, 付加質量, および中詰砂の地盤反力係数が大きくなることから分かる。

(2) 水張り時の密閉度と滴水と非滴水の違い

水張りの場合には, ケーソン内が滴水で密閉されているか非滴水かで, 現象が大きく異なるものと考えられる。滴水で密閉されている場合は, 水の非圧縮性によりケーソン内部にすべて等しい圧力が作用し, 前面版のたわみは側壁を含めたケーソン全体の剛性で決まることになる。また前面版が加速している場合は, ケーソン内のすべての水が付加質量として前面版に作用する, 反対に非滴水でケーソン内部に自由表面がある場合は, 圧力が抜け, 付加質量も前面版のまわりに限られる。今回の実験は, 滴水状態で行ったが完全には密閉されていない, どちらかというとい非滴水の場合に近い実験結果である。

6. あとがき

現在, より複雑な構造を持つスリットケーソンについての実験も行っている。また, 今後は動的数値計算を行うことで現地との縮尺効果やケーソンの動揺の影響 (高橋ら, 1994) 等も考慮する予定である。

参考文献

- 合田良実 (1967): 衝撃荷重の測定について一減衰振動系の衝撃応答特性一, 港研資料, No. 33, 41 p.
- 高橋重雄・下迫健一郎・上部達生 (1994): 衝撃砕波力に対する防波堤ケーソンの動的挙動, 港研報告, 33巻2号, pp. 59-86.
- 谷本勝利・小舟浩治・大里睦男 (1975): ケーソン壁に作用する波力と応答計算, 港研資料, No. 224, 39 p.
- 安田孝志・篠田成郎・陸田秀実・三浦修一・S. A. Azarmsa・柳原幸雄 (1993): ステップ上の直立壁に作用する衝撃砕波圧と砕波形式の関係, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 756-760.
- 由井孝昌・服部昌太郎 (1992): 衝撃砕波圧におよぼす直立壁体の変形効果, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 681-685.
- Takahashi, S., Tanimoto, K. and Shimosako, K. (1994): Dynamic response and sliding of breakwater caissons, wave barriers in deepwaters, PHRI, pp. 362-401.