

衝撃砕波圧による直立壁の動的応答特性

由 井 孝 昌*・服 部 昌 太 郎**

1. 研究の目的

耐波構造物設計では、滑動・転倒などの構造物の安定性に対する検討はなされているが、衝撃砕波圧による構造物材の動的変形を十分考慮した設計は行われていない。Weggel と Maxwell (1970) は、構造物材の材料特性によっては、衝撃波圧が局所破壊に重大な影響をもたらすことを指摘している。しかし、衝撃波圧による壁体の動的応答に関する研究は極めて少なく(Witte, 1988; Kirkgöz, 1990; 由比・服部, 1992), その解明が求められている。

本研究では、壁面剛性(壁厚)を変化させ、直立壁への作用衝撃波圧と砕波衝突状況の同時記録によって、下記の事項に対して検討を行う。

- (1) 砕波衝突条件と壁体応答特性
- (2) 最大衝撃波圧と壁体変形の相互干渉
- (3) 最大壁体変形の発生条件

2. 実験装置と測定方法

実験は、反射吸収式造波装置を備える両面ガラス張り二次元波動水槽(0.3 m×0.55 m×20 m)内に設置した1/20 勾配斜面上に、直立堤体を固定して行った。(図-1) 壁面への砕波衝突が安定して起こるよう、捨石マウンドに相当する前面勾配1/10 のプラスチック製マウンドが、堤体の下面に置かれている。

直立壁は、鉄製枠に四辺固定した板厚 35 mm・15 mm・10 mm・5 mm の 4 種類の透明アクリル板で、壁体の固有振動数(水中) f_n を表-1 に示す。実験値は鉄球衝突実

表-1 直立壁体の固有振動数

壁厚 (mm)	35	15	10	5
実験 (Hz)	900	600	440	340
計算 (Hz)	1010	660	540	380

験、計算値(空气中)は材料試験によるアクリル板のヤング率($E=3.65 \times 10 \text{ kgf/mm}^2$)とポアソン比($\nu=0.44$)によったもので、条件の違いを考慮すると両者の一致の程度は良好である。

入射波測定は、一様水深部に設置した分圧式波高計により行った。波圧測定は、直立壁面上の 6 測点に設置した半導体圧力計(直径: 10 mm, 容量: 200 gf/cm², 固有振動数: 9.6 kHz)を用いて行い、また壁面変位は直立壁背面の中心位置に設置した加速度計(容量: $\pm 50 \text{ G}$, 固有振動数: 2 kHz)よりえられる加速度記録を、線形加速度法により算定した。波圧と加速度の測定出力は増幅後、サンプリング周波数 5 kHz でデジタル記録計に収録し、電算処理を行った。

波圧測定と同時に、砕波の衝突状況を高速ビデオ(NAC 製, 200 コマ/s)で撮影記録した。ビデオ画像と波圧記録との同期は、ビデオ画像上の静水面での波圧記録により行った。衝突時の砕波諸量と封入空気塊の形状と寸法は、水槽側面に設置した 1.0 cm の正方格子を用いて、29 インチビデオ画面から読みとった。

実験の再現性を高めるため、先行実験による水面攪乱が十分静まった後、同一条件で造波するため規則波造波用アナログ信号により造波装置を駆動した。

実験条件は、直立壁前面水深 $h_w=5.0 \text{ cm}$ 、入射波周期 $T=1.5 \text{ s}$, 1.7 s, 2.0 s、一様水深部での進行波としての波高 $H_i=3 \sim 6 \text{ cm}$ である。

3. 実験結果とその考察

3.1 衝撃波圧と壁面変動

直立壁への砕波の衝突過程は砕波点と直立壁との相対位置に依存し(Chan and Melville, 1988), 衝撃波圧は単発型と減衰振動型に大別される(合田・原中, 1986; 荒見・服部, 1990)。以下に、典型的な衝撃波圧特性と壁

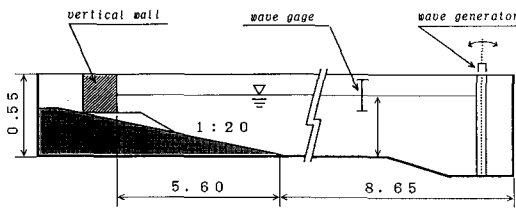


図-1 実験装置の配置(単位: m)

* 正会員 工修 石川島播磨重工業(株)

** 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

面の応答変動の検討を行う。

(1) 単発型衝撃碎波圧

ほぼ鉛直な碎波波面が微小な空気塊を巻き込んで衝突する場合に見られる、鋭い立ち上がりから最大波圧を記録後、腰掛け部に続く典型的な波圧である。

図-2 (壁厚 10 mm) と 3 (壁厚 5 mm) は、波圧 p と壁面変位 δ の時間記録で、時間軸は静水面での測点 P_4 での最大波圧記録時を $t=20$ ms としている。図-2 (壁厚 10 mm) には、静水面 (P_4) 下 1.0 cm の測点 P_3 で最大波圧 $p_{\max}/\rho g H_b = 43.7$ (衝撃圧の立ち上がり時間 $\tau = 1.0$ ms) が発生し、その直後に 1.5 kHz 程度の高周波の圧力振動が発生している。壁体の固有振動数 $f = 440$ Hz と比較して圧力振動数が極めて高いことから、微小な封入空気泡の圧縮・膨張による振動であると認められる。

壁体の最大変位 $\delta_{\max} = 0.009$ cm は P_4 の最大波圧発生時より 1.0 ms 遅れて発生した後、壁体は固有振動数に相当する 440 Hz で振動する。

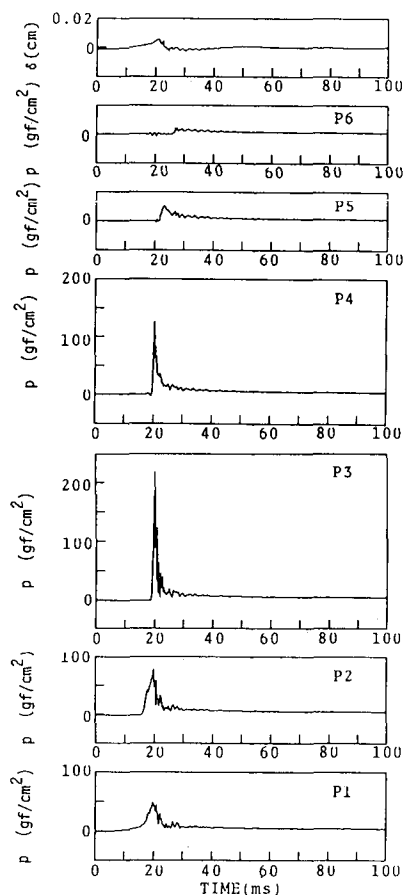


図-2 単発型波圧記録 (壁厚 10 mm)

$H_b = 5.0$ cm, $T = 1.7$ sec, $\tau = 1.0$ ms, $p_{\max} = 218.6$ gf/cm², $p_{\max}/\rho g H_b = 43.7$, $\delta_{\max} = 0.009$ cm

図-3 (壁厚 5 mm) では、静水面上 1.0 cm の測点 P_5 で比較的小さい最大衝撃波圧 $p_{\max}/\rho g H_b = 32.4$ を記録している。静水面とその 1.0 cm 下方の測点 P_4 と P_3 での衝撃圧記録と衝突状況とから、衝突瞬間時に封入された空気塊の一部が、打ち上げ波と共に放出していることが確認できる。全波力が最大となる時点とみなされる、 P_4 での最大衝撃波圧発生後 5 ms に、 $\delta_{\max} = 0.044$ cm の壁体の最大変位が生じている。衝撃圧により誘起される壁体振動の振動数は 80 Hz で、衝撃圧後の波圧記録にも同様の変動が認められる。壁体の固有振動数 $f = 340$ Hz のほぼ 4 倍周波数に相当する 80 Hz の壁体振動が発生した原因として、全波力の作用位置が壁面中心から下方にずれていることが挙げられる。

(2) 減衰振動型衝撃碎波圧

衝突直前での碎波波頂部の巻き込みによって、壁面と波面間に空気塊を封入した場合には、衝撃圧に続いて波圧の減衰振動が認められる。単発型衝撃碎波圧と比較して最大波圧は低下し、圧力振動が持続している。

図-4 (壁厚 10 mm) と 5 (壁厚 5 mm) は、ほぼ同一の衝突条件で十分に空気塊を巻き込んだ減衰振動型衝撃圧の波圧と壁面変位の記録である。

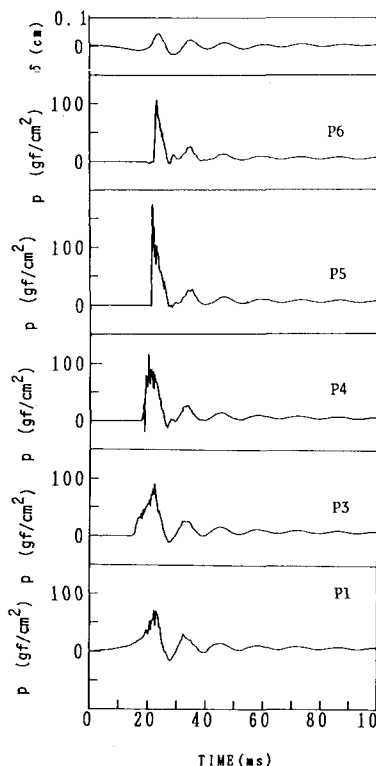


図-3 単発型波圧記録 (壁厚 5 mm)

$H_b = 5.4$ cm, $T = 1.5$ sec, $\tau = 0.9$ ms, $p_{\max} = 174.9$ gf/cm², $p_{\max}/\rho g H_b = 32.4$, $\delta_{\max} = 0.044$ cm

壁面が封入空気塊と接触している測点 $P_4 \sim P_2$ の波圧は、ほぼ同一の振幅と位相で変動している。壁面最大変位は最大波圧とほとんど同時に発生した後、壁面変動は波圧の減衰振動（振動数 $f_{ap}=85\text{ Hz}$ と 69 Hz ）に追随している。減衰振動型衝撃波圧が作用する場合には、壁面と封入空気塊との接触面積が大きいことから、衝撃圧が単発型の場合に比べて低いにも係わらず、波圧変動の主要な発生機構である空気塊の圧縮・膨張（断熱過程）によって、比較的大きな壁面変位が発生する。

以上のことから、衝撃碎波圧と壁面の挙動特性について認められた事項をまとめると、(1)単発型衝撃碎波圧の場合には碎波衝突によって壁体変形が誘起され、最大変位発生後は壁体の固有振動数で振動する。特に、壁面剛性が低い壁厚 5 mm の壁体の場合には、衝撃波圧後の波圧記録にも壁体振動に相当する圧力変動が認められ

る。(2)減衰振動型衝撃碎波圧の場合には、封入空気塊の断熱圧縮・膨張による波圧変動により、顕著な壁面変形と振動が誘起される。(3)壁面の最大変位は、最大波圧の大きさと衝撃波圧の立ち上がり時間(作用時間)、すなわち力積に関係する。

3.2 衝撃波圧と壁体変形の相互干渉

最大波圧 $p_{\max}$ 、減衰振動周波数 f_{ap} および力積 I に着目して、壁面変形が衝撃波圧特性にどのような影響をもたらすかを検討する。

(1) 最大波圧 $p_{\max}$

最大波圧 $p_{\max}$ と封入空気塊厚 l との関係を図-6に示す。黒丸、黒三角、白三角、白丸は、それぞれ壁厚 35 mm 、

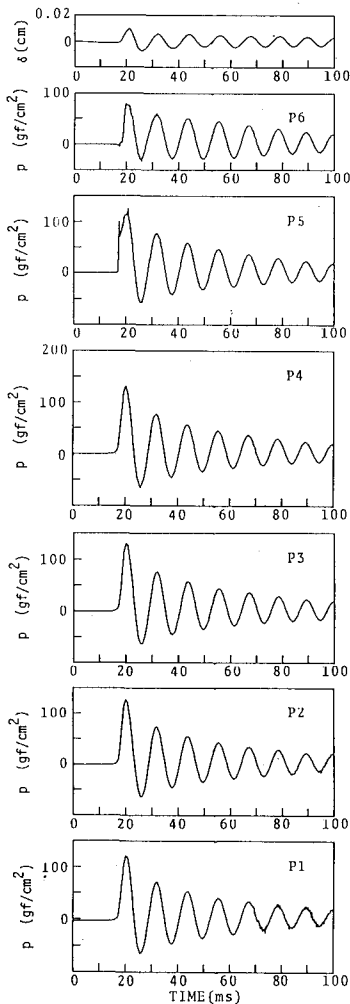


図-4 減衰振動型波圧記録（壁厚 10 mm ）

$H_t=3.0\text{ cm}$, $T=2.0\text{ sec}$, $\tau=2.4\text{ ms}$, $f_{ap}=85\text{ Hz}$, $p_{\max}=130.5\text{ gf/cm}^2$, $p_{\max}/\rho g H_b=19.5$, $\delta_{\max}=0.014\text{ cm}$

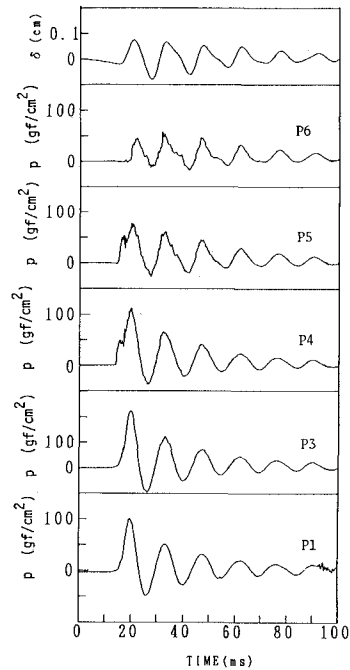


図-5 減衰振動型波圧記録（壁厚 5 mm ）

$H_t=4.0\text{ cm}$, $T=2.0\text{ sec}$, $\tau=3.6\text{ ms}$, $f_{ap}=70\text{ Hz}$, $p_{\max}=111.7\text{ gf/cm}^2$, $p_{\max}/\rho g H_b=16.0$, $\delta_{\max}=0.167\text{ cm}$

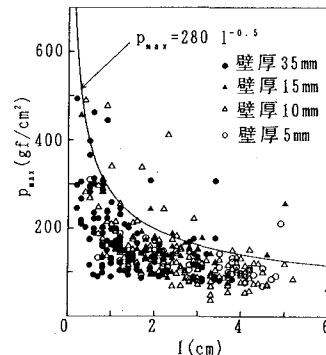


図-6 $p_{\max}$ と I との関係

15 mm, 10 mm, 5 mm の実験値を示し、実曲線は実験値の包絡線である。この結果から、壁厚に関係なく l の増大にともない $p_{\max}$ が低下する傾向が認められる。しかし、壁面変形が発生する場合には、封入空気塊の圧縮エネルギーの一部が壁面変形に吸収され、 $p_{\max}$ が低減することが考えられる。そこで、最大波圧の変動性を考慮して、図-7 に示す $p_{\max}$ の発生確率分布によって、壁面剛性の $p_{\max}$ に対する効果を検討する。黒三角、白三角、白丸は、それぞれ壁厚 15 mm, 10 mm, 5 mm、実線は剛体(壁厚 35 mm) の場合を示す。この図から、 $p_{\max}$ の発生確率はいずれの壁厚に対しても対数正規分布に従い、 $p_{\max}$ の発生範囲、平均 μ と標準偏差 σ が壁厚が減少するにつれて低下していることから、最大波圧に対する壁面変形効果が確認された。

(2) 減衰振動周波数 f_{ap}

図-8 は、波圧の減衰振動周波数 f_{ap} と封入空気塊厚 l との関係を示したもので、壁厚に関係なく l の増大と共に f_{ap} が減少する。したがって、波圧の減衰振動は封入空気塊の変形によることが再確認された。しかし、壁厚 5

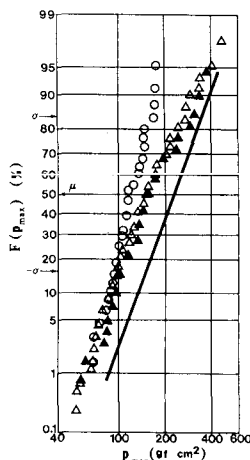


図-7 $p_{\max}$ の発生確率分布

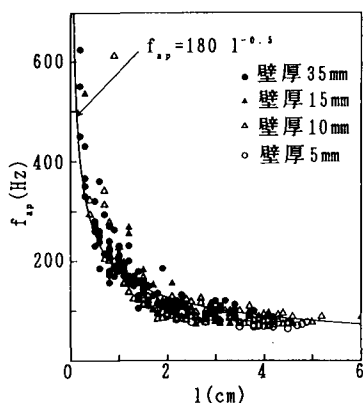


図-8 f_{ap} と l との関係

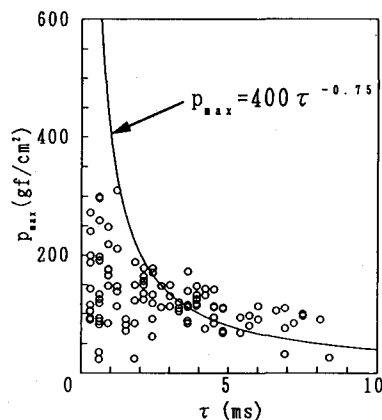


図-9 $p_{\max}$ と τ の関係 (壁厚 5 mm の場合)

mm に対する実験結果は、空気塊厚が $2 \text{ cm} < l < 5 \text{ cm}$ の範囲で f_{ap} は 85 Hz 程度とほぼ一定を示しているが、その原因を解明するまでには到っていない。

(3) 力積 $I (= \int_0^{\tau} p dt)$

衝撃圧力による構造物の弾性振動と変形が、衝撃圧力の力積に比例することに着目して、林ら(1958)と Kirkgöz (1990) は衝撃波圧の力積特性を検討している。

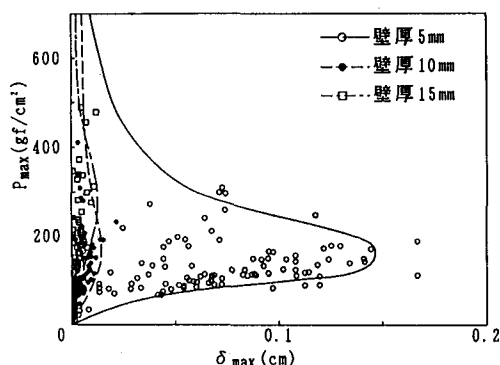
図-9 は、最大波圧 $p_{\max}$ と波圧の立ち上がり時間 τ との関係を示したもので、図中の実線は剛な壁体(壁厚 35 mm)での実験値の包絡線である。

図-9 の実験値と剛壁体の包絡線との比較より、衝撃圧におよぼす壁体剛性の効果は、 τ が短い、すなわち単発型衝撃圧の場合ではほとんど認められない。しかし、 τ が長くなり壁体の固有振動周期に近づく減衰振動型衝撃波圧が発生する衝突状況では、壁体変形により τ が増大する傾向が明瞭に認められる。これまで衝撃波圧の力積はほぼ一定であると考えられていたが、図-9 の結果より、碎波の衝突条件に加えて壁面剛性によって、力積が変化することが確認された。

3.3 最大変位ピークの発生条件

壁体の最大変位ピークの発生条件を調べるため、最大波圧 $p_{\max}$ と最大変位量 $\delta_{\max}$ との関係を、図-10 に示す。白丸、黒丸、白四角はそれぞれ壁厚 5 mm, 10 mm, 15 mm の実験値、実験結果の包絡線は実線、破線、一点鎖線で示される。

図-10 に見られるように、 $\delta_{\max}$ のピーク値が発生する最大波圧 $p_{\max}$ は壁厚の減少と共に低下し、壁厚 5 mm で $p_{\max} = 150 \text{ gf/cm}^2$ 、10 mm で $p_{\max} = 180 \text{ gf/cm}^2$ 、壁厚 15 mm で $p_{\max} = 300 \text{ gf/cm}^2$ である。壁厚 10 mm と 15 mm に対する、図-9 と同様の $p_{\max} \sim \tau$ の実験結果より、 $\delta_{\max}$ のピーク値が発生する場合の τ を算定すると、 $\tau = 3 \text{ ms}$ 、


 図-10 $p_{\max}$ と $\delta_{\max}$ の関係

$\tau=2$ ms, $\tau=1.5$ ms を得る。また表-1 より、壁厚 5 mm, 10 mm, 15 mm の壁体の固有振動周期は $T_N=2.9$ ms, $T_N=2.3$ ms, $T_N=1.7$ ms である。したがって、壁体の固有振動周期と波圧の立ち上がり時間がほぼ等しくなる衝突状態で、壁面の最大変位ピークが発生することが明かとなった。

4. 結 論

壁体剛性を変化させて行った実験から、衝撃波圧による直立壁体の動的応答について明らかにされた、主たる事柄は以下のようである。

(1) 単発型衝撃砕波圧に対する壁体の応答特性は、砕波水塊の衝突によって誘発された壁体振動は、衝撃圧後の波圧記録に壁体振動が重合する。

(2) 減衰振動型の場合には、空気塊の圧縮・膨張(断熱過程)による振動が卓越し、壁体は波圧振動とほぼ同位相で変動する。

(3) 最大壁面変位は、最大波圧発生時より遅れて発生する。継続時間の短い単発型の場合より、低い衝撃性波圧で継続時間の長い減衰振動型の場合に最大変位量は大くなる。

(4) 最大波圧 $p_{\max}$, 減衰振動周波数 f_{ap} は、封入空気

塊厚 l の増大と共に低下する。 $p_{\max}$ の発生確率分布は壁面剛性によって変化し、剛性が低下すると $p_{\max}$ は減少する。

(5) $p_{\max} \sim \tau$ の関係より衝撃波圧の力積は、壁体剛性によって変化する。

(6) 壁体の最大変位ピークは、波圧の立ち上がり時間 τ と壁体の固有振動周期とが一致する条件で発生する。

以上のことから、耐波構造物設計では堤体の安定性だけでなく、空気塊を封入した場合の繰り返し荷重による壁体部材の疲労破壊を十分考慮する必要があることが明らかにされた。

謝辞：実験とデータ整理には、当時中央大学海岸研究室学部学生の小泉 博(東洋建設)、山室 明(三重県)両君の協力を得た。ここに記して謝意を表する。また、本研究の一部は、文部省科学研究費(特定研究 研究代表者 服部昌太郎)の補助により行った。

参 考 文 献

- 荒見敦史・服部昌太郎(1989): 衝撃砕波圧の発生機構に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 579-583.
- 林 泰造・服部昌太郎・林 憲吉(1960): 砕波の圧力と壁体の滑動, 第7回海岸工学講演集.
- 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.
- Chan, E. S. and W. K. Melville (1988): Deep-water plunging wave pressures on a vertical plane wall, Proc. Royal Soc. London, A, 417, pp. 95-131.
- Kirkgöz, M. S. (1990): An experimental investigation of a vertical wall response to breaking wave impact, Ocean Engng., Vol. 17, No. 4 pp. 379-391.
- Weggel, J. R. and W. H. C. Maxwell (1970): Experimental study of breaking wave pressures, Proc. Offshore Tech. Conf., Texas, pp. II-175-188.
- Witte, H. H. (1988): Wave-induced impact loading in deterministic and stochastic reflection Mitteilungen, Leichtweiss Inst. für Wasserbau, Tech. Univ. Braunschweig, 102, pp. 1-227.