

構造物に作用する段波波力の実験

水谷 将*・今村 文彦**

1. はじめに

1960年に発生したチリ津波の被災以降、全国規模で精力的に防災対策が実施され、高さ5~6m規模の防潮堤等が数多く建設されたが、その設計方法は、津波の挙動特性を十分反映したものとなっていない。例えば津波は浅海域に到達するとその波高も大きくなり砕波に到るが、波長が長いためにその後段波のような波形となる 경우가多く、通常の波動(重力波)より動水圧が大きいと指摘されている(福井ら, 1962a)。

また、沿岸の環境保全、景観への要求の高まりおよび防災予算の緊縮といった時代背景を受け、1983年に津波常襲地域総合防災対策指針(案)が発表された。ここでは津波の越流も想定しているが、構造物を越える津波が生じた時、その津波が構造物およびその後背地域にどのような影響を及ぼすのか未だ不明であり、効果的な計画、設計手法がなされていない。この場合、構造物にかなり大きな波圧が発生し、もし破壊すれば大惨事につながる。それを防ぐためには、津波の動的挙動を適切に考慮したり、越流を許容するが破壊しないような条件が必要である。

重力波に関する波圧算定式としては、1973年に提案された合田式が知られており、現行設計法で主に用いられている(合田, 1973)。最近の研究では、台形ケーソンに作用する波圧算定式(谷本ら, 1985)や衝撃砕波圧を考慮した算定式(高橋ら, 1994)が提案されている。しかし、これらの研究において用いられている波圧算定式は合田式であり、津波段波の特性を考慮していない。

津波の段波波力を対象にした研究としては、まず、福井ら(1962a)が段波の堤体衝突により生じる水位および波圧を詳細に測定し、段波津波の波速算定式を提案している。さらに福井ら(1962b)は、段波津波の堤防面遡上高、重複波高、波圧、堤防越流量についても同様に検討している。谷本ら(1984)は日本海中部地震津波における被災原因を検討する際に、直立壁に作用する津波力の

算定方法を提案している。松富(1991)も水路実験により津波による砕波段波の波圧分布を詳細に測定し、段波波力の特性について検討している。以上のように、様々な研究はなされているが、現在のところ、実用的に設計に用いられる段階には到っていない。

このような状況を踏まえて、本研究ではまず室内実験水路を用いて水理実験を行い、勾配の異なる傾斜構造物に作用する段波の波力を詳細に測定する。その実験結果をもとに、傾斜角度を考慮した新しい段波波圧の算定式を開発することを目的とする。

2. 模型実験

(1) 実験方法

使用した装置は図-1に示すように高さ0.44m、幅0.3m、全長12mのアクリル製矩形水路である。水路の一端に勾配可変の傾斜板を設け、この傾斜面の中央部に高精度の波圧計(直径1cm、定格容量9800Pa)1基を取り付けた。この波圧計設置部分は埋め込み式の板になっており、上方向に移動できる。段波は鉛直造波板を水路傾斜板方向に平行に約1m、一定の速度で移動させることにより発生させた。また、段波の波形変化、波速および流速を測定するために、水路の造波板側、中央部、受圧板直前に計3基の水位計、造波板側と中央部の水位計の間に流速計1基を配置した。

実験条件は、傾斜板の勾配を1:1.53, 1.3, 1, 0.6, 0.3, 0の6ケース、静水深 h を5, 10, 15cmの3ケースに設定した。

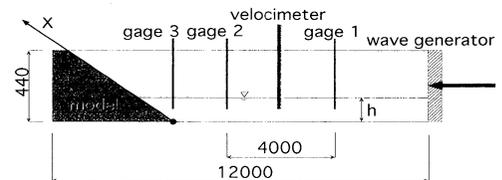


図-1 実験装置(単位 mm)

(2) 測定時間間隔の重要性

衝撃力を測定する際には、測定間隔の選定に注意が必要である。図-2に測定時間間隔(Δt)を除き、同一条件

* 正会員 工修 東北大学大学院工学研究科(五洋建設(株))

** 正会員 工博 東北大学助教授 大学院工学研究科附属災害制御研究センター

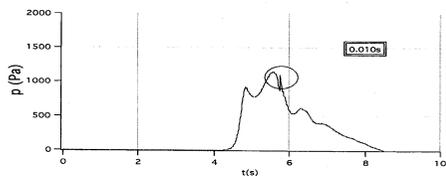


図-2(a) $\Delta t = 0.010$ s

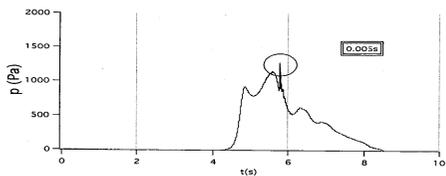


図-2(b) $\Delta t = 0.005$ s

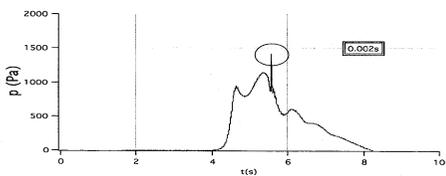


図-2(c) $\Delta t = 0.002$ s

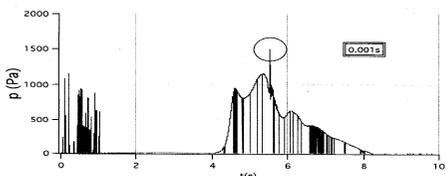


図-2(d) $\Delta t = 0.001$ s

である4つの波圧の時間変化分布を示す。これらを比較すると、測定時間間隔が小さい程、丸で囲まれた瞬間的な波圧のピークがより顕著に示されていることがわかる。ただし、1/1000秒まで縮めるとノイズが発生するため、本実験では測定時間間隔を2/1000秒に設定した。

(3) 実験結果および考察

図-3に勾配1:1.53、静水深10cm、傾斜板上、底面より2cmの測点における波圧の時間変化分布を示す。ここで波圧は、傾斜板最下点を起点とし、傾斜板上、鉛直上向きに測っている。この結果より、構造物に作用する段波波圧には3つのピークが存在することがわかる。まず、入射波が構造物に衝突する際に発生する動波圧(Dynamic wave pressure)、次に入射波の連続的な到達により著しい水位上昇が発生する際に生じる持続波圧(Sustained wave pressure)、さらにその直後、反射波と入射波の衝突により瞬間的に発生する波圧である。最後の波圧は既往の研究で述べられていないが、波長の長い津波段波特有の性質であり、構造物の安定を考える上で非常に重要な波圧である。本研究では、この波圧を重複衝突波圧(Impact standing wave pressure)と呼ぶ。

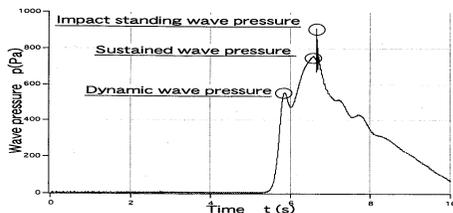


図-3 波圧の時間変化

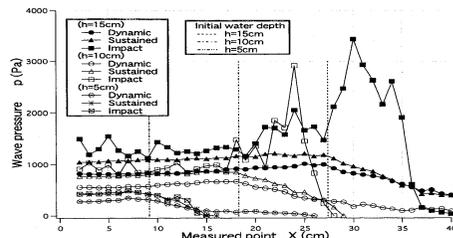


図-4 波圧の測点変化

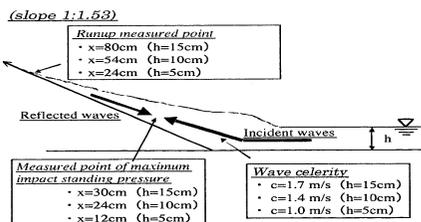


図-5 波速および遡上測点

今回の条件の中で、この重複衝突波圧が最も顕著に現れる勾配1:1.53について、動波圧、持続波圧および重複衝突波圧の測点ごとの変化を図-4に、波速、最大重複波圧発生測点および遡上測点を図-5に示す。重複衝突波圧に注目すると、静水深15cmおよび10cmでは、静水深よりやや上方の測点で急激に増加し、顕著な最大値を示している。非常に短時間ではあるが動波圧、持続波圧の3倍程度の値である。これに対し、静水深5cmの場合、このような変化は見られない。このような顕著な変化は、他の傾斜勾配では1ケース(傾斜勾配1:1.3、静水深15cm)で見られただけで、残りの勾配が急なケースでは見られなかった。

3. 測定された水理量

(1) 波 速

福井ら(1962a)は、初期の平均流速 $\bar{u}=0$ の場合、波速 c 、静水深 h 、入射波高 H 、重力加速度 g 、および静水深の段波水深に対する比 $h/(h+H)$ により決まり、段波の進行にともなうかく乱と底面粗度の程度を示す抵抗係数 η の間において、次式を提案している。

$$c = \sqrt{\frac{g(H+h)(H+2h)}{2(H+h-\eta H)}} \dots\dots\dots (1)$$

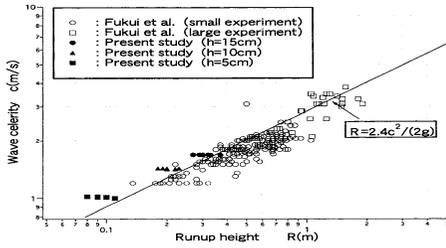


図-6 波速と遡上高の関係

式(1)による算定値は本実験結果と非常に近い値である。

(2) 遡上高

福井ら(1962b)は、静水面上の遡上高R, 波速c, 重力加速度g, および遡上係数kの間において、次式を提案している。

$$R = \frac{k}{2g} c^2 \dots\dots\dots (2)$$

図-6に本実験および福井ら(1962b)の実験結果を示す。福井ら(1962b)はk=2.8~3.3を提案しているが、本実験結果を考慮し、本研究ではk=2.4とする。

(3) 動波圧

a) 最大動波圧

福井ら(1962b)は、段波波速c, 最大動波圧p_{dm}, 入射波高H, 動波圧係数K, 水の単位重量wおよび重力加速度gの間において、次式を提案している。

$$p_{dm} = K \frac{wc^4}{g^2 H} \dots\dots\dots (3)$$

図-7に本実験と福井ら(1962b)の実験結果を示す。両方の結果は1つの直線に分布している。福井ら(1962b)はc=2m/sあたりのデータに影響されてK=0.33~0.51を採用しているが、本実験結果を考慮するとK=0.12程度が適当である。

b) 動波圧の鉛直分布

動波圧p_dの鉛直分布についても、福井ら(1962b)は実験結果をもとに静水面より上部において、次式のような直線式(Rは遡上高, zは測点高)を提案している。ただし、鉛直高は静水面を基準高とし、瞬間的かつ急激に発生する衝撃波圧は除いてある。

$$p_d = p_{dm} \left(1 - 1.4 \frac{z}{R}\right) \quad (z/R > 0) \dots\dots\dots (4)$$

本実験結果を同様に整理したものを図-8に示す。

この図より、動波圧分布は静水面より上部において曲線分布、水中部において、直線分布となると推定できる。式で表すと、次のようになる。

$$p_d = p_{dm} \left(1 - \frac{z}{R}\right)^3 \quad (z/R > 0) \dots\dots\dots (5)$$

$$p_d = p_{dm} \left(1 + \frac{z}{2R}\right) \quad (z/R < 0) \dots\dots\dots (6)$$

(4) 持続波圧

a) 最大持続波圧

本実験結果より、最大持続波圧p_{sm}は波動の周期よりも波来襲時の最大動波圧p_{dm}に関係があることがわかった。図-9に構造物の傾斜勾配角度cosθと、最大持続波圧, 最大動波圧, 重力加速度g, 入射波高Hおよび波速cによる無次元値(p_{sm}/p_{dm})・gH/c²の関係を示す。この図より、次のような関係式が提案できる。

$$p_{sm} = 0.14(2 + \cos \theta) p_{dm} \frac{c^2}{gH} \quad (0 < \cos \theta < 0.71) \dots\dots\dots (7)$$

$$p_{sm} = 0.38 p_{dm} \frac{c^2}{gH} \quad (0.71 < \cos \theta) \dots\dots\dots (8)$$

b) 持続波圧の鉛直分布

動波圧の場合と同様に整理した持続波圧の鉛直分布を、図-10に示す。この図より、次のような関係式が提案できる。

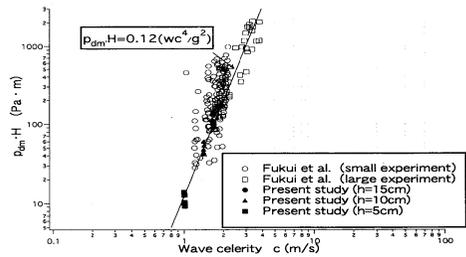


図-7 最大動波圧

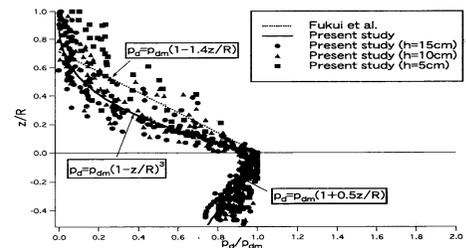


図-8 動波圧の鉛直分布

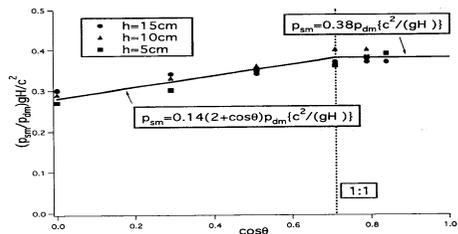


図-9 最大持続波圧

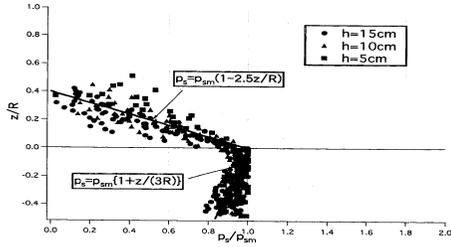


図-10 持続波圧の鉛直分布

$$p_s = p_{sm} \left(1 - 2.5 \frac{z}{R} \right) \quad (z/R > 0) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$p_s = p_{sm} \left(1 + \frac{z}{3R} \right) \quad (z/R < 0) \quad \dots\dots\dots (10)$$

(5) 重複衝突波圧

a) 最大重複衝突波圧

可視化によると、この波圧は反射波と入射波の衝突の際に発生していることがわかった。反射波を決める因子としては遡上高、入射波を決める因子としては波速が挙げられ、遡上高は持続波圧と、波速は動波圧と密接に関係があると考えられる。そこで図-11に最大動波圧、最大持続波圧の和と重複衝突波圧の関係を示す。これらの算定値は次に示す2つの直線式に分類できた。

$$p_{im} = 0.5(p_{dm} + p_{sm}) \quad (h \cot \theta \leq 0.15 \text{ m}) \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$p_{im} = 0.5(p_{dm} + p_{sm}) + 2200 \quad (0.15 \text{ m} < h \cot \theta) \quad \dots\dots\dots (12)$$

式(11)は、傾斜勾配が比較的急である場合の直線式である。傾斜勾配が1:1より緩やかになり、かつ静水深が大きい場合、式(12)に移行する。式(11)と式(12)の違いは、反射波と入射波の衝突時間が異なるために生じる。すなわち、式(11)の場合、小規模の衝突が比較的長時間に渡って生じているのに対し、式(12)では大規模の衝突が極めて短時間に行われている。

b) 重複衝突波圧の鉛直分布

式(11)、(12)それぞれのケースについて、重複衝突波圧 p_{im} の鉛直分布を図-12示す。式(11)の場合、最大重複衝突波圧とその発生地点近傍での重複衝突波圧に大きな差がないことがわかる。

$$p_i = p_{im} \left(0.9 - 3 \frac{z}{R} \right) \quad (z/R > 0) \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$p_i = 0.9 p_{im} \quad (z/R < 0) \quad \dots\dots\dots (14)$$

これに対し、式(12)の場合、最大重複衝突波圧が静水面のやや上方 ($z/R = 0.1$ 程度) の測点で局所的に極めて大きく発生している。

$$p_i = p_{im} \left(2 - 10 \frac{z}{R} \right) \quad (0.1 < z/R) \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$p_i = p_{im} \left(0.35 + 6.5 \frac{z}{R} \right) \quad (0 < z/R < 0.1) \quad \dots\dots\dots (16)$$

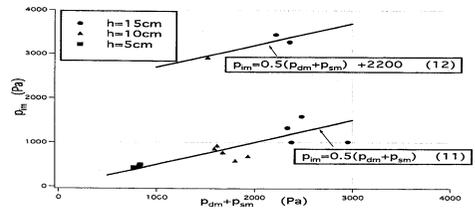


図-11 最大重複衝突波圧

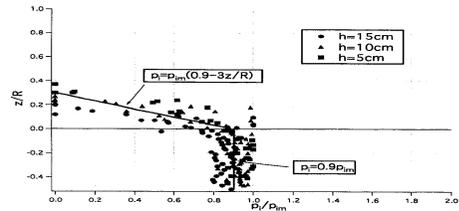


図-12(a) 式(11)の場合

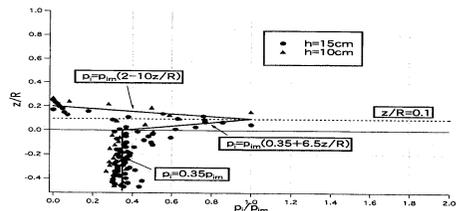


図-12(b) 式(12)の場合

$$p_i = 0.35 p_{im} \quad (z/R < 0) \quad \dots\dots\dots (17)$$

この場合、短時間ではあるが、局所的な力が大きく作用するため、堤体破壊の原因となっている可能性が高い。過去の津波による構造物の被災事例との関連について検討することが重要である。

4. 設計波力の算定

(1) 波力算出のフロー

ここまで提案した各波圧の最大値および鉛直分布算定式による段波の設計波力算出フローを、図-13に示す。この算出フローの正確性を調べるため、傾斜勾配1:1.53、静水深15cmという条件について、算出フローによる算定値と実験値の比較検討を行う。その結果を表-1に示す。ここで、推定誤差は算定値と実験値の差の絶対値と実験値の比である。

次に3波圧の中で最も大きな波力を示す重複衝突波圧の実験値と合田式による算定値について比較検討を行う。構造物に作用する水平全波力および水平波力による転倒モーメントの比較検討結果を表-2に示す。ただし、合田式については、波長1mの波を想定し、直立ケーソンに作用する波力算定式をそのまま用いた。本実験値は合田式による場合よりも大きい値を示しており、従来の設計方法(合田式)では過小評価であることがわかった。

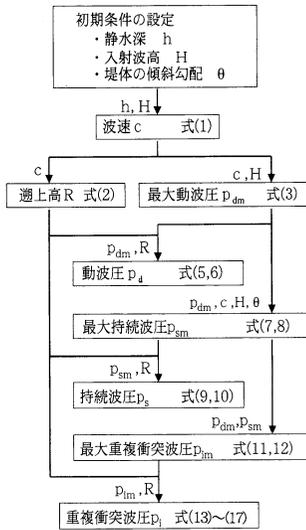


図-13 設計波力の算定フロー

(2) スケール効果

今回の実験は小型の室内実験装置により行われたため、この検討結果をそのまま現場に適用できるかという問題がある。福井ら(1962b)はこの点を踏まえ、大小2種類の実験装置により同様の実験を行った結果、この種の実験においてスケール効果の問題は発生しないと述べている。図-6, 7に示した遡上高, 最大動波圧の検討の中で、福井ら(1962b)の大型実験装置による結果と今回の実験結果は、ほぼ一直線上に存在する。このことから、今回の実験結果も福井ら(1962b)と同様、現場への適用ができると考えられる。

5. まとめ

本研究結果により、以下のことがわかった。

- ① 今回の実験では、精度の高い波圧計を用い、測定時間間隔, 測定位置間隔をより小さくすることにより、極めて短時間, 局所的ではあるが非常に大きな値を示す重複衝突波圧の存在を確認した。
 - ② 重複衝突波圧は反射波と後続の入射波が衝突する際に発生し、その大きさは段波の波速および遡上高と密接に関係していることがわかった。
 - ③ 津波段波の波力の算定に従来の設計式(合田式)を用いることは、過小評価につながるということがわかった。
 - ④ 動波圧, 持続波圧, 重複衝突波圧について、既往研究で提案された算定式について改良等を行い、その最大値および鉛直分布の算定式を提案した。
- この結果、静水深, 入射波高および堤体の傾斜勾配がわかれば、動波圧, 持続波圧, 重複衝突波圧各々の最大値および鉛直分布の算定が可能となった。

表-1 算定値と実験値の比較

初期条件				
静水深 h	m	0.15		
入射波高 H	m	0.09		
堤体傾斜勾配		1.53		
		算定値	実験値	推定誤差(%)
波速 c	m/s	1.77	1.69	4.6
遡上高 R	m	0.38	0.29	30.3
動波圧				
最大動波圧 p_{dm}	Pa	4307	1012	29.2
動波力 P_d	N/m	449	363	23.6
持続波圧				
最大持続波圧 P_{sm}	Pa	1734	1210	43.4
持続波力 P_s	N/m	687	420	63.6
重複衝突波圧				
最大重複衝突波圧 p_{im}	Pa	3721	3444	8.0
重複衝突波力 P_i	N/m	662	600	10.3

表-2 算定値と実験値の比較

合田式(初期条件)			
波長 L (m)	1		
水深 h (m)	0.15		
波高 H (m)	0.09		
		モーメント	
		N/m	N/m・m
合田式	201	24.2	
重複衝突波圧	329	36.8	

今後は、室内実験水路により、傾斜構造物を越流する段波が構造物に与える波力について詳細に測定する予定である。また、設計津波の選定方法の改良を行い、越流を考慮に入れた構造物を建設した場合の被害想定を行いたいと考えている。

最後に、本研究の一部は、五洋建設(株)の社会人派遣制度のもとに行われたもので、ここに感謝の意を表します。

参考文献

合田良実(1973): 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, pp. 31-69.
 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎・細山田得三(1992): 混成防波堤のマウンド形状による衝撃碎波力係数の提案, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 676-680.
 谷本勝利・木村克俊(1985): 台形ケーソンの水理特性に関する実験的研究, 港湾技研資料, No. 528, 28p.
 谷本勝利・鶴谷広一・中野 晋(1984): 1983年日本海中部地震津波における津波力と埋立護岸の被災原因の検討, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 257-261.
 福井芳朗・白石英彦(1985): 台形ケーソンの水理特性に関する実験的研究, 港湾技研資料, No. 528, 28p.
 福井芳朗・白石英彦・中村 充・佐々木泰雄(1962a): 津波の研究(I)一段波津波の波速について, 第9回海岸工学講演会講演集, pp. 44-49.
 福井芳朗・白石英彦・中村 充・佐々木泰雄(1962b): 津波の研究(II)一段波津波の堤防におよぼす影響一, 第9回海岸工学講演会講演集, pp. 50-54.
 松富英夫(1991): 碎波段波衝突時の圧力分布と全波力, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 626-630.