

RC 梁に作用する衝撃波力および部材の応答特性に関する 大規模水理模型実験

下迫健一郎*・大木泰憲**・高野忠志***・津田宗男****

1. はじめに

防波堤や護岸など海の構造物の被災のうち、ケーソン壁の破壊のような構造的な被災は、一般に前面に積まれた消波ブロックなどの物体が構造物に直接衝突することによって生じると言われている。しかしそれ以外にも、衝撃的な波力が部材に作用することも要因の一つであり、例えば衝撃砕波力によるケーソン壁の破壊事例（高橋ら, 1998）や衝撃的な揚圧力による棧橋上部工の破壊事例（伊藤ら, 1967；堀川ら, 1967）など多くの被災事例が報告されている。

衝撃波力については、古くから多くの研究者によって種々の検討がなされており（例えば, Wagner, 1932; Bagnold, 1939; 合田, 1967; 高橋ら, 1983）、水面付近の部材に作用する衝撃波力についても、谷本ら（1978）によってその発生モデルが構築されている。このモデルでは、波面と部材の衝突速度 V および衝突角度 β によって衝撃波力を定義し、 β が正で波面と部材の間に空気を巻き込まない Wagner 型と、 β が負で波面と部材の間に空気を巻き込む Bagnold 型に分類している。また近年における研究で、衝撃波力による部材の破壊について、高橋ら（1999）が水理模型実験を行っており、鉄筋コンクリート（RC）部材に作用する衝撃波力の特性や、衝撃波力が作用した場合の RC 部材の応答特性などについての検討を行っている。その検討の中では、衝撃波力の算定方法について、比較的簡単な算定式で衝撃波力を表すことが出来ることを示しているものの、Bagnold 型の場合の空気圧縮波圧については相似則が成り立たないため、さらに大きなスケールの実験が必要であるとの見解も併せて示している。そこで本研究では、高橋らと同様に、直立壁前面に設置した RC 部材に揚圧力を作用させる実験を、部材の寸法および波高をさらに大きな規模にして行い、衝撃波力の作用特性や RC 部材の応答特性について検討した。

2. 実験の概要

2.1 実験水路

実験は、2000 年 3 月に港湾空港技術研究所に新しく開設された大規模波動地盤総合水路にて行った。この水路は長さが 184 m、幅が 3.5 m、深さが 12 m であり、水路全長のうち 67 m は水路底から深さ 8 m まで厚さ 4 m の砂地盤槽となっている。また、水深 5 m、周期 6 s～8 s においては、最大波高 3.5 m を造波することが可能であり、ほぼ実規模で波と地盤に関する実験を行うことが出来る水路である。図-1 は、実験状況の概略を示したものであり、造波機から約 130 m の位置に鋼製の反射壁を設けて重複波を発生させ、その前面に RC 梁を設置して揚圧力を作用させた。

2.2 RC 梁模型

実験に用いた RC 梁の寸法は、幅 $b=40$ cm、固定間長 $l=280$ cm（固定部を含め 342 cm）で、厚さが $d=20$ cm と $d=30$ cm の 2 種類である。コンクリートの設計基準強度は $f'_{ck}=24$ N/mm²、使用鉄筋は SD 295 で、 $d=20$ cm、 $d=30$ cm の梁ともに、上下 2 段に $\phi=10$ mm の鉄筋を 10 cm 間隔で入れ、さらに固定端部にはその間に補強鉄筋として $\phi=13$ mm の鉄筋を入れている。

2.3 実験ケース

実験波は規則波を用いた。周期は $T=3$ s と $T=6$ s の 2 種類とし、入射波高は、 $T=3$ s の場合には $H=50$ cm～120 cm、 $T=6$ s の場合には $H=50$ cm～225 cm とし、原

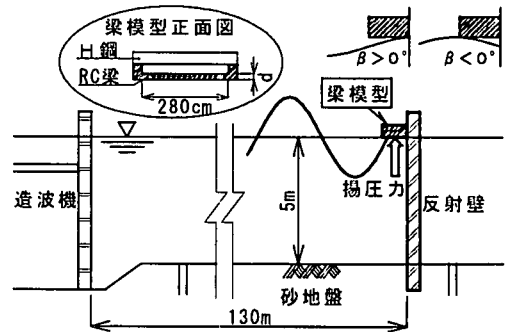


図-1 実験状況の概略図

* 正会員 港湾空港技術研究所 海洋・水工部耐波研究室長
** 正会員 工修 東亜建設工業(株) 技術研究所
*** 港湾空港技術研究所 海洋・水工部耐波研究室
**** 正会員 工修 東亜建設工業(株) 大阪支店

則として 25 cm 間隔で変化させた。ただし、砂地盤が実験の進行とともに変形し、模型位置での波高がケースごとに異なったため、実験結果の解析の際には、実験初期の砂地盤が変形していない状況での RC 梁模型前面波高を基準として、各ケースごとに波高を換算している。また RC 梁の設置高さを、静水面上(クリアランス) $s=0$ cm と $s=30$ cm の 2 種類に変化させている。なお、水深は 5 m で一定とした。

2.4 計測項目

RC 梁には、底面に波圧計を 20 箇所、上面にひずみゲージを 5 箇所、加速度計を 3 箇所、上下の鉄筋の裏表両面にひずみゲージを 20 箇所取り付けるとともに、RC 梁と取付部材の接続部には荷重計を取り付けている。また、RC 梁の前後には波高計を設置している。これらすべての計測装置に対して、サンプリング間隔 1 ms (1 kHz) でデータを収録した。

これらの計測結果から、重複波面の上昇速度、RC 梁底面に作用する波圧や波力、鉄筋やコンクリート表面に生じるひずみなどの時間的・場所的な変化や作用時間、ピーク値の特性についての検討を行った。また、取付部材を含めた全体系の取付固さの違いによる波力の作用特性についても検討している。

3. 作用波の特性

図-2 は、RC 梁に作用する重複波面の上昇速度 V の実測値 (●) を示したものである。また、RC 梁がない場合の実測値 (○)、およびストークスの 3 次近似理論値 (実線) も併せて示している。実験値の波面上昇速度は、RC 梁背後(反射壁直前)の波高計データを用いて算出しており、RC 梁がある場合には、衝撃波圧が作用し始めてからピークを取るまでの平均速度、RC 梁がない場合には、RC 梁の底面に相当する位置を波面が通過する際速度として定義している。

図-2 によると、 $T=3$ s の場合には、クリアランス $s=$

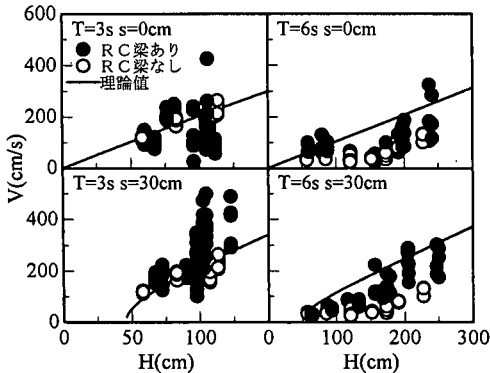


図-2 波面の上昇速度

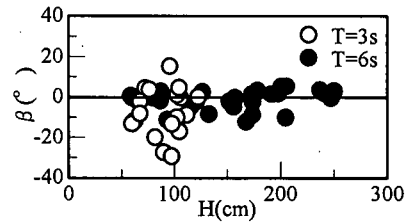


図-3 波面の衝突角度

0 cm, $s=30$ cm のいずれの場合にも RC 梁がない場合と理論値がよく一致しており、ほぼ理論どおりの重複波が RC 梁に作用していたと思われる。一方、 $T=6$ s の場合には、RC 梁がない場合の値が理論値よりかなり小さくなった。これは、砂地盤の変位による影響と考えられ、理論とは異なる重複波が作用していたと思われる。次に、RC 梁がある場合とない場合を比較すると、ばらつきが大きいものの、平均的には、 $T=3$ s, $s=0$ cm を除いて RC 梁のある場合が波面の上昇速度が速くなっている。これは RC 梁があることで波面が乱され、乱れの上昇成分と波面の上昇成分が重なったためと考えられる。なお、 $T=3$ s, $s=0$ cm で波高が大きい場合には、波面の乱れが特に大きく、反射壁前面の波高が必ずしも正確に計測されていない。

一方、図-3 は RC 梁と波面の衝突角度 β を示したものである。ここでの衝突角度 β は、RC 梁前後の波高計データを用いて算出しており、波面が RC 梁の前端あるいは後端いずれかの底面を横切った瞬間の、RC 梁底面と、前後端での波面 2 点を結んだ線とのなす角度として定義している。すなわち、波面が RC 梁後端から先に当たる場合に β が正となる。図-3 をみると、衝突角度 β も波面の上昇速度 V と同様ばらつきが大きいものの、多くのケースで $\beta=0^\circ$ または $\beta<0^\circ$ となっており、 $\beta>0^\circ$ となる場合にも、波面の乱れを考慮するとその値はいずれも 0° に近い値といえる。よって、いずれのケースにおいても、波面が衝突する際に空気を巻き込む Bagnold 型波圧が作用していたと考えられる。

4. 計測波形の特徴

図-4 は、クリアランス $s=0$ cm に設置した厚さ $d=30$ cm の RC 梁に、入射波周期 $T=3$ s、入射波高 $H=75$ cm の重複波が作用した場合の、RC 梁底面に作用する波圧、波圧合力、荷重計合力、コンクリート上面中央のひずみ、中央上側鉄筋のひずみ、および加速度の時系列波形を示したものである。波圧波形を見ると、ピークの立ち上がりが緩やかで、かつ水路延長方向でほぼ同時に波圧ピークが現れており、波面が RC 梁に衝突する際に空気を巻き込んで、平面的にはほぼ同時に空気圧縮圧力が作

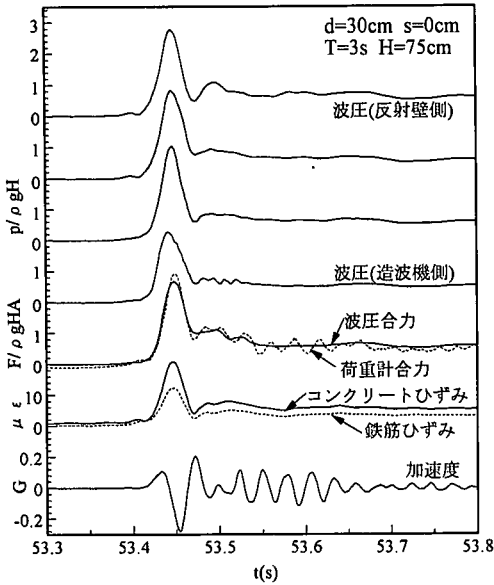


図-4 計測波形の一例

用する Bagnold 型波圧の特徴が見られる。波圧が同時に作用するため、波圧合力（底面積で除した平均波圧で表示）でもピーク値は各測点の波圧とほとんど変わらず、 $2.7\rho gH$ 程度の平均波圧となっている。コンクリート表面のひずみ波形を見ると、波力が比較的緩やかに作用し RC 梁が波力に追従してたわむため、波圧合力がピークをとった時点でひずみもピークをとり、その値は約 21×10^{-6} となっている。また、鉄筋のひずみも同形状を示しており、そのピーク値は 12×10^{-6} 程度である。Bagnold 型波圧が作用した場合には、巻き込んだ空気によって波圧は低減されるものの、各点のピーク波圧が同時に作用するため、RC 梁のたわみに対しては各点の波圧の位相差による波圧合力の低減効果は少ないといえる。

5. 波圧算定式

高橋らによれば Bagnold 型の平均波圧 p は、無次元のパラメータで空気圧縮圧力を定義する Bagnold 数、および空気圧縮圧力 p_a と大気圧 p_0 の比を用いて以下のように表すことが出来る。

$$\beta_g = 5 \left(\frac{p_a}{p_0} \right)^{2/7} + 2 \left(\frac{p_a}{p_0} \right)^{-5/7} - 7 \quad (1)$$

ここに、 β_g は Bagnold 数であり下式のように示される。

$$\beta_g = \frac{\rho_w k V^2}{p_0 D} \quad (2)$$

ここに、 ρ_w は水塊の密度、 V は波面の上昇速度、 D は巻き込んだ空気層の厚さである。 k は衝突する水塊の付加質量厚さであり、幅 $2b$ の平板の付加質量の $1/2$ に対する平均厚に等しいとして、次式で与えられる。

$$k = \pi b / 4 \quad (3)$$

また、空気圧縮圧力 p_a は絶対圧力で表したものであり、衝撃波圧が作用しない場合には、その値は大気圧 p_0 に等しい。よって、平均波圧 p は以下のように示される。

$$p = (p_a - p_0) / \lambda_1 \quad (4)$$

ここに、 λ_1 は補正係数であり、空気漏れおよび場所的な平均を取ることにによる値の低減を表すものである。

6. 衝撃波圧の特徴

6.1 波圧の作用時間

Bagnold 型波圧が作用した場合には、その圧力は空気振動を伴う。そして圧力の作用時間 τ は、空気振動の半周期として、下式のように示される。

$$\tau = \pi \sqrt{\frac{\rho_w k D}{1.4 p_0}} \quad (5)$$

図-5 は、波圧合力の作用時間を示したもので、 $d=20$ cm、 $d=30$ cm の両者について黒塗りで実験値を示している。実験値の作用時間 τ は、波圧の時間変化を正弦波と仮定して、波圧ピークの前後でピーク値の $1/2$ の値をとる点の時間幅の 1.5 倍として定義している。図-5 をみると、特に $T=6$ s の場合にばらつきが大きいものの、作用時間 τ は 40 ms ~ 70 ms 程度に分布しており、また、波高が大きくなるのにしたがって作用時間がやや長くなる傾向がみられる。

6.2 巻き込まれた空気層の厚さ

図-6 は、横軸に波形勾配 H/L をとり、縦軸に波面と RC 梁底面の間に巻き込まれた空気層の厚さ D を示したものである。ここで空気層の厚さ D は、波力が作用し始める時点での波高計の水位を読みとって、その時点での梁底面から水面までの距離として求めている。図-6 によると、巻き込まれた空気層の厚さ D は、実線で示しているように、 H/L が 0.04 より小さい場合には $D=5$ cm ($b/8$) の一定値、 H/L が 0.04 より大きい場合にはある勾配を持った直線上の周りに分布する傾向にある。そこで、空気層の厚さ D を H/L をパラメータとした次の式により表すこととする。なお、 H/L が小さく波面が梁底面にほぼ水平に衝突する場合にも、梁の幅 b の $1/8$ 程度の空気を巻き込むものとしている。

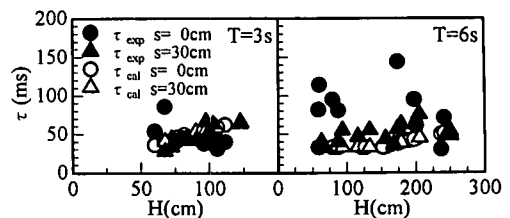


図-5 波圧の作用時間

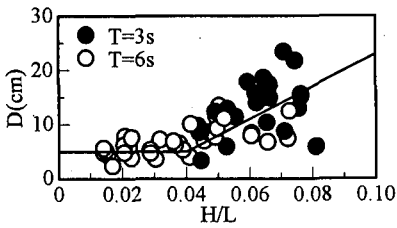


図-6 波形勾配と巻き込まれた空気層厚の関係

$$D = \begin{cases} b/8 & (0 \leq H/L < 0.04) \\ 300(H/L) + \{(b/8) - 12\} & (0.04 \leq H/L) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

先に示した図-5には、波圧作用時間の実験値とともに、計算値として、式(6)で得られた空気層厚 D を式(5)に代入して得られた値も併せて示している。波圧の作用時間の実験値と計算値は比較的良好に一致しており、式(6)で得られる空気層厚 D を用いても、波圧の算定値に大きな誤差が生じることは少ないと思われる。

6.3 衝撃波圧の特徴および波圧算定式の適用性

図-7は、厚さ $d=30$ cmのRC梁に作用する波圧合力について、実験値および5.で示したBagnold型波圧式により算出された計算値を示したもので、波圧合力については、水の単位体積重量 ρg と波高 H で無次元化している。計算では、巻き込まれた空気層の厚さ D は式(6)により得られたものを用い、波面上昇速度 V については、ここでは実験値の各ケースの平均値を用いている。そして補正係数は $\lambda_1=0.28$ (空気漏れの影響0.40、場所的な平均の影響0.70)としている。

図-7をみると、実験値は、 $T=6$ sでは波高が大きくなるにつれて波圧合力もやや大きくなる傾向にあるが、その値は $0.2\rho gH \sim 0.8\rho gH$ 程度と衝撃的な成分は小さい。一方 $T=3$ sでも、波高が大きくなるにつれて波圧合力も大きくなる傾向にあり、その値は $1.2\rho gH \sim 3.8\rho gH$ と、 $T=6$ sの場合に比べてかなり大きい。しかし、 $s=30$ cmのケースでは一度ピーク値が大きく低下するなど、その傾向は不安定である。これらの特徴は、図に示して

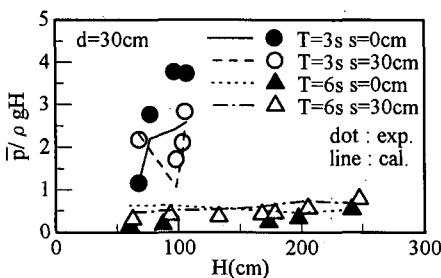


図-7 ピーク値の計測値と計算値

いない $d=20$ cmの場合にも同様である。

次に、線で示した計算値を実験値と比較すると、計算値は実験値に近く、 $T=3$ sの場合の不安定な傾向もよく再現している。ただし、 $T=3$ s、 $s=0$ cmで波高が大きい場合には、前述したように波面の乱れによってRC梁背後(反射壁直前)の波高が正しく測定されておらず、上昇速度が正しく評価されないため、実験値と計算値が異なっている。このような理由から、実験値と計算値が合わない場合があるものの、高橋らのBagnold型波圧の算定式は、空気圧縮波圧のスケールの違いによる影響を考慮したものであり、今回新たに提案した波形勾配と空気層厚の関係を適用することで、規模や波高が大きくなっても十分適用可能であるといえる。

7. RC梁の応答特性

7.1 RC梁の剛性と波圧の関係

図-8は、 $T=3$ s、 $s=0$ cmの時のRC梁スパン中央部8点の波圧について、厚さ $d=20$ cmの場合と $d=30$ cmの場合で比較したものである。ほとんどのデータが $d=30$ cmの側に偏っており、 $d=30$ cmの波圧のほうが大きく出ている。この理由としては、 $d=20$ cmのRC梁のほうが剛性が小さいため $d=30$ cmよりたわみやすく、その慣性力によって波圧を低減しているためと考えられる。

7.2 RC梁のひずみと波力の関係

図-9は、 $T=3$ sの場合の、RC梁スパン中央部表面3点のひずみの平均値と波力の関係を示したもので、○が $d=20$ cm、●が $d=30$ cmの場合である。また、実線および破線は計算値であり、両端固定梁に等分布荷重が作用した場合について、ひび割れが発生していないためRC梁全断面を有効とみなして算定した、ひずみと荷重の関係を示している。図-9で、実験値と静的載荷状態での計算値を比較すると、作用する波力が小さい場合には計算値より実験値のひずみが小さく、波力が大きくなるにつれて計算値と実験値が近くなる傾向がある。この理

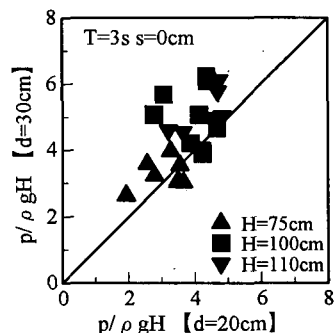


図-8 RC梁の厚さと波圧ピーク値の関係

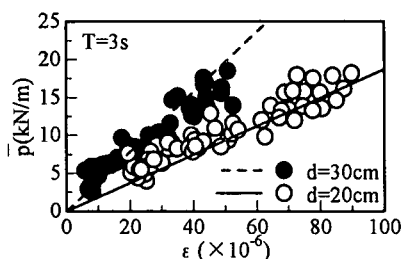


図-9 ひずみと波力の関係

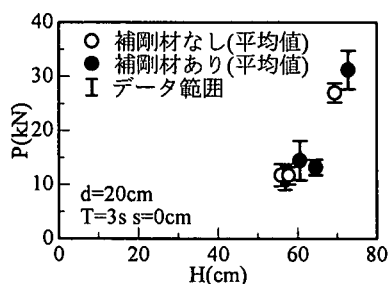


図-10 固定の程度と波力の関係

由としては、作用時間の影響が考えられる。一般に、荷重の作用時間が短い場合には、静的に作用する場合よりひずみが小さくなり、高橋らの実験でも、衝撃波力が作用した場合のひずみは静的載荷時より30%程度小さく出ることが示されている。図-5で示したように、波高が小さい（波力が小さい）ほうが作用時間が短い傾向にあるため、RC梁に生じるひずみが、波力が小さい場合ほど計算値より実験値のほうが小さくなったことが考えられる。

8. 全体の振動による波力の作用特性

図-10は、模型取付枠の水路壁への固定に際して、補剛材の有無によって全体としての振動の程度を変えた場合に、RC梁に作用する波圧がどのように変化するかを比較したものである。図は横軸に入射波高を取りそれに対応する全波力について示したもので、○が補剛材がない場合、●が補剛材がある場合のものである。補剛材がない場合には、波の作用時に模型を取り付けた固定枠全体が10 Hz前後で振動している。図をみると、補剛材を取り付けたほうが波力がやや大きく出る傾向にあり、図-8で示したRC梁の剛性と波圧の関係と同様、枠全体が振動することによる慣性力によって波力が低減していると考えられる。現地においても、たとえばケーソン

が捨石マウンドおよび地盤と一体となって動揺することによって、ケーソン壁に作用する波力が低減していることが考えられる。

9. あとがき

本実験結果から、規模や波高を大きくした場合のRC梁に作用する波圧の作用特性やその応答特性について次のようなことがわかった。

①新しく提案した空気層厚の算定方法を用いることによって、高橋らのBagnold型波圧の算定式は、規模や波高が大きくなっていても十分適用可能である。

②RC梁のたわみが作用波圧の低減に寄与する。

③構造物全体の動揺が、部材に作用する波力の低減に寄与する。

ただし、本検討では実験ケースが限られており、また、精度にやや問題のあるケースも含まれているため、さらに追加実験を行うなどの検討が必要である。なお本研究では、早稲田大学大学院伊藤公一氏、(株)エコーの藤本和利氏らに多大な御協力を得ている。また、港湾空港技術研究所高橋重雄海洋・水工部長、早稲田大学理工学部土木工学科清宮理教授より貴重な御助言を頂いている。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 伊藤彦行・竹田英章 (1967): 棧橋に作用する揚圧力, 港研報告, Vol. 6, No. 4, pp. 38-68.
- 合田良実 (1967): 構造物に働く波力, 土木学会水理委員会, 水工学シリーズ, 67-10, pp. 10-1-10-34.
- 高橋重雄・谷本勝利・鈴木論司 (1983): 直立壁に作用する衝撃波圧の発生機構, 港研報告, Vol. 22, No. 4, pp. 3-31.
- 高橋重雄・津田宗男・下迫健一郎・横田 弘・清宮 理 (1998): 防波堤ケーソン壁の破壊と衝撃碎波力について, 海岸工学論文集, Vol. 45, pp. 751-755.
- 高橋重雄・津田宗男・横田 弘・高野忠志・清宮 理 (1999): 衝撃波力によるRC版の破壊メカニズムに関する基礎実験, 海岸工学論文集, Vol. 46, pp. 811-815.
- 高橋重雄・山崎浩之・下迫健一郎・姜 閔求・菅 功企・高山知司 (2000): 大規模波動地盤水路の建設とその利用, 海洋開発論文集, Vol. 16, pp. 421-426.
- 谷本勝利・高橋重雄・和泉田芳和 (1978): 水平版に働く揚圧力に関する研究, 港研報告, Vol. 17, No. 2, pp. 3-47.
- 堀川清司・中尾忠彦・矢島昭弘 (1967): 棧橋に作用する揚圧力についての実験的研究, 第14回海岸工学講演会論文集, pp. 148-153.
- Bagnold, M. R. A. (1939): Interim Report on Wave Pressure Research, Jour. of Institute of Civil Engineers, Vol. 12, pp. 201-226.
- Wagner, H. (1932): Über stoss-und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten, Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, Band 12, Heft 4, pp. 193-215.