

衝撃的な波圧を受けるコンクリート梁部材の動的応答

DYNAMIC ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BEAM LOADED BY IMPULSIVE WAVE PRESSURE

尾崎 精一* 清宮 理** 高橋 重雄***

Seiichi OZAKI, Osamu KIYOMIYA and Shigeo TAKAHASHI

*学生会員 早稲田大学 理工学部 土木工学科大学院(〒160-8555 新宿区大久保 3-4-1)

**工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科(〒160-8555 新宿区大久保 3-4-1)

***工博 運輸省 港湾技術研究所 水工部耐波研究室長(〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

キーワード：有限要素法, 衝撃波圧, 動的解析, 波圧実験

(finite element method, impulsive wave, dynamic analysis, wave pressure test)

1.はじめに

衝撃的な波力は、主に波浪や津波によって引き起こされ、波面と海洋構造物の衝突によって発生する。この衝撃的な波圧が繰り返し作用すると、部材内に動的な応力応答が発生し、構造物の破壊につながる事が知られている。しかしこの衝撃波力は各種の条件下で性状が異なり、かつ非常に短い時間で作用するため現象の把握が困難である。このため海洋構造物の構造設計で、どの程度まで衝撃波圧を考慮する必要があるか十分な知見がない。そこで今回、単純な鉄筋コンクリート製(RC)の梁を対象とした波圧実験を実施して、実際にどの程度のひずみや加速度がRC部材に生じるか調べ、その衝撃的な応答特性について検証した。衝撃波圧実験では、全長約100mの大型長水路内に幅40cm、長さ2.4mの模型のRC梁部材を反射壁前面に水平におき、重複波の波面の衝突による衝撃揚圧力を下方から作用させた。その一方で、波圧実験モデルに用いた試験体を対象に有限要素法プログラム(SOLVIA)を用いて動的応答解析を行い実験結果との比較を行った。また波の立ち上がり時間や継続時間を変えることによって、波の動的効果がどのくらい出るかについての検証も合わせて行った。この結果、衝撃波が作用する時には局所的に大きな衝撃波圧が発生するものの、RC部材へのひずみに影響があるのは全体波力であることが判明した。本

論文では、波圧実験と有限要素法の結果について報告する。

2.実験の概要と結果¹⁾

2.1 実験方法

(1) 実験水路と模型

図-1に示すように全長105m、内幅3m、深さ2.2mの大型造波水路に、造波機から42m地点に反射壁を設置して重複波を発生させて、反射壁の直前に水平に設置したRC梁に衝撃揚圧力を作用させた。

水深 h は130cmで、実験波は規則波(波高 $H=30$ と 40 cm、周期 $T=2$ s、波長 $L=560$ cmと 1349 cm)であり、設置高さ(水面とのクリアランス $s=0$ と 30 cm)を変化させた。

(2) 実験ケース

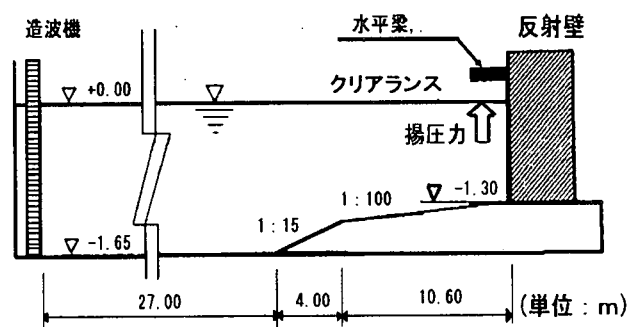


図1 水路実験と模型概要

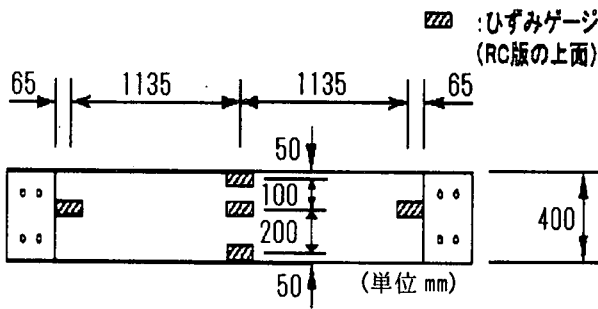


図 2-1 RC 部材平面図

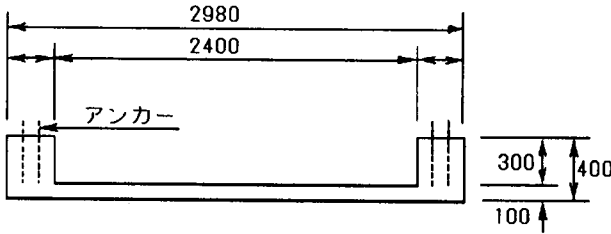


図 2-2 RC 部材断面図

RC 各々部材実験: 図 2-1, 図 2-2 に RC 部材の上面図, 側面図を各々示す. 梁中央部に D10 鉄筋を 3 本, D6 鉄筋を 4 本を 5cm 間隔で入れている. この RC 部材は厚さ $d=10\text{cm}$, 幅 $L_w=40\text{cm}$, 長さ $L_B=240\text{cm}$ (固定部を含め 298cm) で, RC 部材に作用する波の波高, 波圧 (20 箇所), 波圧合力を, また部材の応答として加速度を 3 箇所, コンクリート表面に生じたひずみを 5 箇所計測した. 図 3, 図 4 及び図 5 に波圧計, コンクリートひずみゲージ, 加速度計の計測地点を示す. また以下において, 波高が 30cm でクリアランスが 0cm の実験波を B30, 波高が 40cm でクリアランスが 30cm の波を B43 と表す.

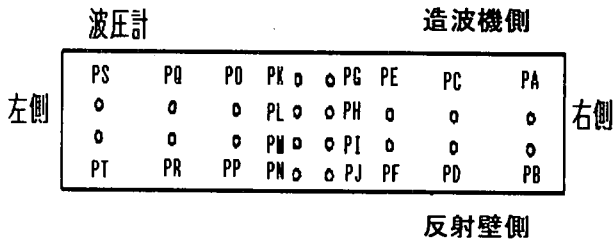


図 3 波圧測定地点

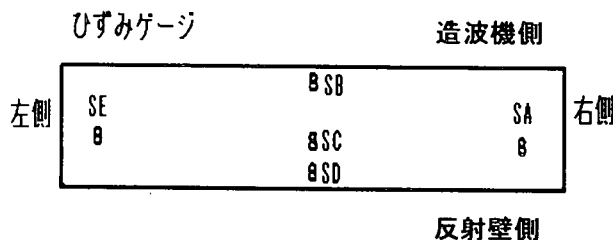


図 4 コンクリートのひずみ測定地点

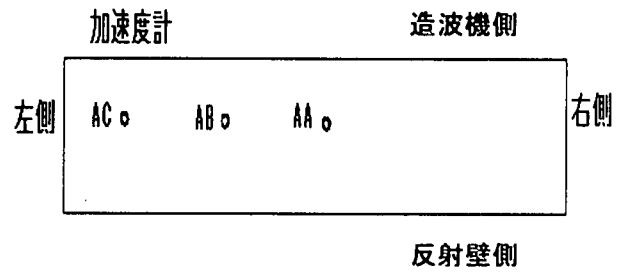


図 5 加速度測定地点

2.2 RC 部材特性

RC 模型の部材特性について静的載荷試験で検討した. コンクリートの圧縮強度は 34.6N/mm^2 であった. また, 曲げ強度は 4.46N/mm^2 であり, 引張強度は 2.44N/mm^2 であった. 計算によるひび割れ発生モーメントは $1.63\text{kN}\cdot\text{m}$ で終局曲げモーメントは $8.37\text{kN}\cdot\text{m}$ である.

2.3 実験結果

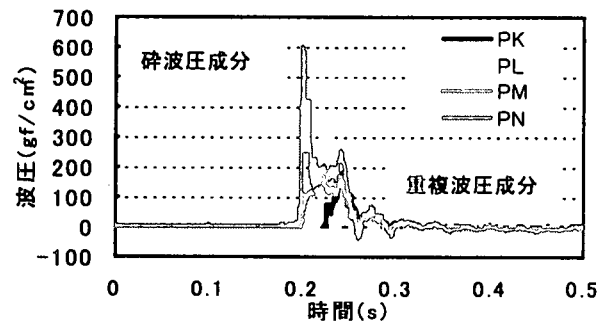


図 6-1 B43 の実験波における PK, PL, PM, PN 地点の波圧の計測結果

波は初めに RC 梁の奥に当って反射し, 造波機側に波峰が走った. RC 梁の奥から造波機までは, B30, B43 の実験波において共に 0.08(s) とかなり短い時間で走った. 図 6-1, 図 6-2, に B43 の実験波とその合波力の一例を示す. 実験波では一番立ちあがりの鋭いものでは, 立ちあがり時間は 0.05(s) であり, 波圧のピーク値は $600\text{(gf/cm}^2\text{)}$ であった. 図 6-3-1, 図 6-3-2 に B30, B43 の実験波の分布状況を示す. 衝撃波の継続時間は 0.29(s) でこのピークには位相のずれがあり, 衝撃波が同時には RC 梁に作用していなかった. 合波力では各位置で衝撃波のピークが隠れ, 重複波の合計となっていた. また波高が 30cm のケースではより一様に当たっていた.

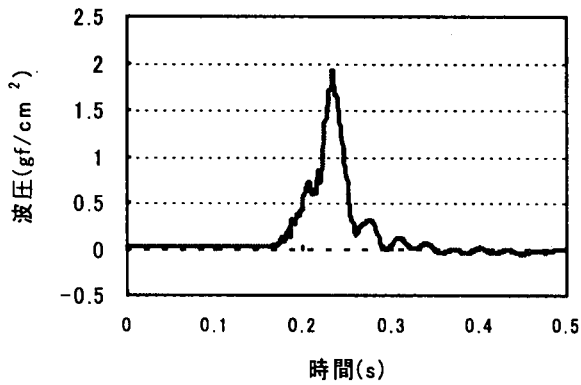


図 6-2 B43 の合波力の波圧測定

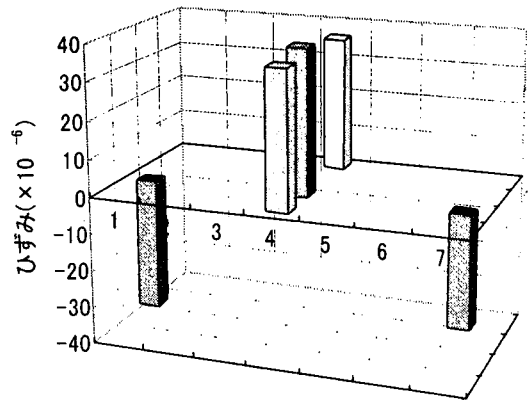


図 7-1 B30 の実験波によるひずみ分布

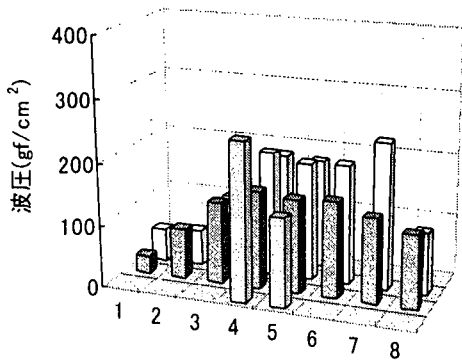


図 6-3-1 B30 の実験波における波圧の分布状況

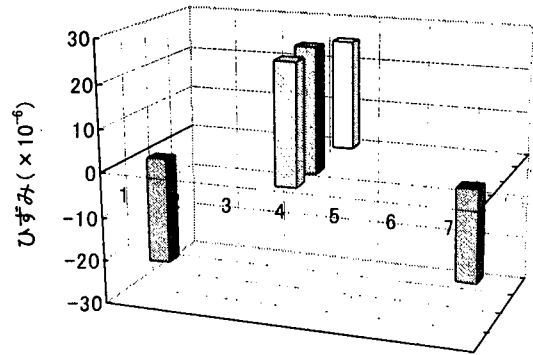


図 7-2 B43 の実験波によるひずみ分布

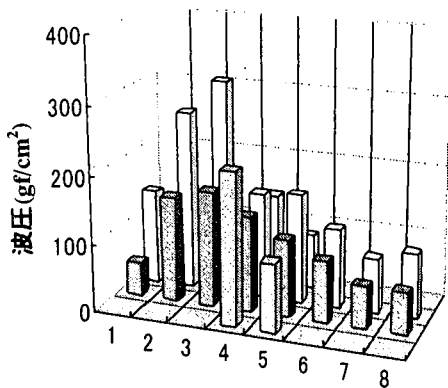


図 6-3-2 B43 の実験波による波圧

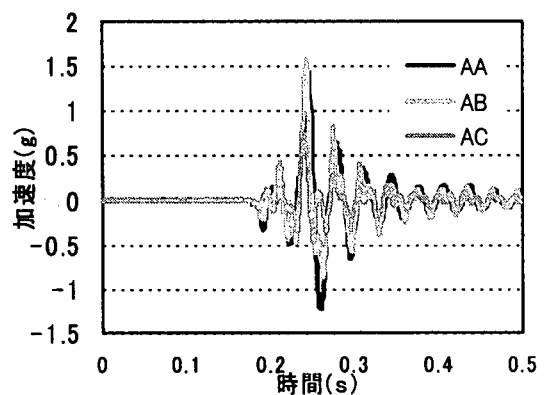


図 8 B43 の実験波による加速度応答

図 7-1, 図 7-2 に B30, B43 の実験波によるひずみの分布状況の一例を示す. RC 梁裏面のコンクリートのひずみは値, 位相とも同じで一断面内同一に挙動している. また, 梁中央部と端部で符号が逆転していた. 実験結果より, 両端固定端にほぼ三角形分布の形状をした波圧が作用しているものと思われる. ひずみの波形は一波が卓越し合波力と類似している. また, 周波数の高い成分には応答しなかった. つまり個々の衝撃波のピークには応答せず合波力による応答を示した. RC 梁のひ

ずみ値は静的に計算した結果では 30 止だったが, これは実験値と非常に近い値である. よって合波力が分かれば, それを三角形分布に与えればコンクリートのひずみを推定することが可能と思われる. 図 8 に B43 の実験波による加速度を示す. 最大加速度は 1.5G でこの加速度波形の卓越周期は約 30Hz であるが, 梁の 1 次固有振動数は 317Hz であり, RC 梁の振動は波圧の卓越成分からきている.

3 解析概要と結果

3.1 解析概要

実験結果を検証する目的で動的と静的の二通りの解析を行なった。動的解析では有限要素法汎用プログラム SOLVIA を用いて解析を行い、荷重として図 6-1 に示す各測定地点の波圧計で得られた実験波と図 6-2 に示す荷重計の合力である合波力の 2 つを用いた。静的解析では図 6-2 の合波力を用いて実験模型を両端固定の単純梁として弾性解を求めた。有限要素法解析モデルを図 9 に示す。梁両端部分のブロックを取り除いてモデル化し、寸法は、長さ 200cm、高さ 10cm、幅 40cm とした。実験では梁が一波では破壊しなかったことから線形解析で行い、平面ひずみ要素を用いた。境界条件は実験では厳密には両端固定ではなかったが、解析では固定とした。節点数は 485 個、要素数は 144 個に設定した。次に梁部材は、ヤング率が 3.0×10^5 (kgf/cm²) でポアソン比が 0.3、密度を 7.85×10^6 (kgf/cm³) とした。減衰率は Rayleigh 減衰で与え、 $\alpha=45.51$ 、 $\beta=5.19 \times 10^{-5}$ とした。数値積分の時間間隔は 1.0×10^{-4} (s) で行った。以上の解析条件で実験値と解析値の梁のひずみ値を比較した。

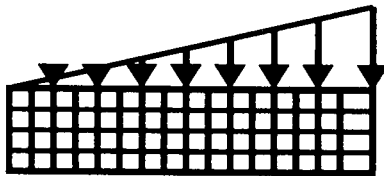


図 9 解析モデル概要

3.2 解析結果

図 10-1、及び 10-2 に梁の中央部と固定部における実験と解析のひずみの比較を示す。ここで、図 6-1、図 6-2 に示す各測定地点の波圧計から得られた実験波と荷重計の合力である合波力による梁中央部の最大ひずみ

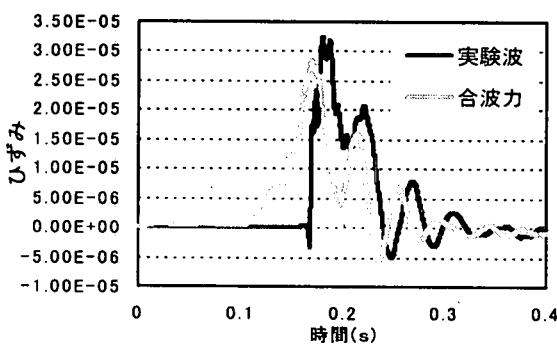


図 10-1 実験波と合波力による梁中央部のコンクリートひずみ

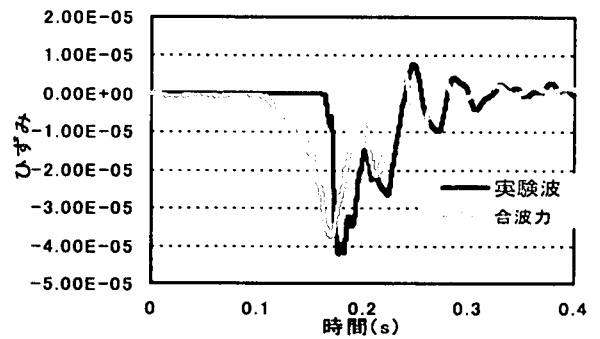


図 10-2 実験波と合波力による梁端部のひずみ

値はそれぞれ 32.8μ 、 28.2μ となった。合波力を用いた静的解析では 30.0μ だった。実験値では 34.4μ だった。また実験波、合力波による梁端部のひずみ値はそれぞれ -36.8μ 、 -41.4μ となり、実験値は -33.25μ であった。解析結果と実験値はほぼ等しい値を取ることが分かった。また解析結果では、個々の実験波をかけた方が合波力よりも約 1.2 倍大きな値となった。このひずみ量ではコンクリートにひび割れは発生しないと想定される。しかし模型の梁は繰り返し波圧により疲労破壊生じた。今回は一波のみの動的応答に着目しており疲労破壊については今後の問題としたい。

4. 結論

- (1) 今回の実験結果と解析結果を比較すると、梁のひずみは衝撃波圧の合波力がわかるとそれを静的にほぼ載荷することによってほぼ精度よく算出できる。
- (2) 衝撃波圧は碎波部と重複波部に分かれるが、一般的には構造物に大きな影響を及ぼすのは重複波部分であって碎波部分ではなかった。

5. あとがき

今回は実験値を用いて一般的な波における碎波部と衝撃波部の影響を調べたが、今後は波の立ちあがり時間と継続時間を変えて、実際にはどのくらいの立ちあがり時間で碎波圧が影響してくるのかを調べたい。今回の実験は運輸省港湾技術研究所で実施されたもので貴重な波圧データの提供をして頂いた下迫健一郎氏、鈴木高二郎氏、津田宗男氏、横田弘氏、高野忠志氏に深い感謝の意をここに記す。

参考文献

- 1) 高橋重雄他：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. pp812-pp817, 1999