

# 衝撃的波圧を受ける鉄筋コンクリートの挙動

## BEHAVIOR OF RC SLAB SUBJECTED TO UP LIFT IMPULSIVE WAVE FORCE

伊藤公一<sup>1</sup>・清宮理<sup>2</sup>・下迫健一郎<sup>3</sup>・大木泰憲<sup>4</sup>  
Koichi ITO, Osamu KIYOMIYA, Kenichiro SIMOSAKO and Yasunori OOKI

<sup>1</sup>学生会員 早稲田大学大学院 理工学研究科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1 51号館16階)

<sup>2</sup>フェロー 早稲田大学教授 土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1 51号館16階)

<sup>3</sup>正会員 独立行政法人港湾空港技術研究所 水工部耐波研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

<sup>4</sup>正会員 東亜建設工業株式会社 (〒231-8983 横浜市中区日本大通18 KRCビルディング6階)

To consider impulsive wave force in design is important for a marine structure. However a impulsive phenomenon is complicated to observe according to various kinds of conditions and to act in very short time. This research aimed at obtaining the fundamental data of reinforced concrete slab by the impulsive wave force through the large-scale waterway test. Strains of the reinforced concrete slab and distribution of impulsive wave pressure are measured to know the phenomenon. An effect of impulsive component is small for strains in RC slabs.

*Key Words : impulsive wave, water way test, F.E.M, RC slab*

### 1. 序論

衝撃的な波圧は、波面と構造物の衝突によって発生するものであり、海の構造物にとって非常に危険な波圧である。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。例えば、強大な衝撃碎波圧によるケーソン壁の破壊事例は少なくなく、また栈橋上部工が衝撃的な揚圧力によって破壊することもある。しかしこの衝撃的波圧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。本研究は、大規模水路によって波による衝撃の基本的なデータを得ることを目的としており、反射壁前面に鉄筋コンクリート製(RC)の版を置き、重複波の波面の衝突による揚圧力を作用させている。実験では、衝撃的波圧の波圧特性やRC部材の動的応答特性の基本的な事項を検討している。その一方で、衝撃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(プログラム名SOLVIA)を用いて、静的・動的応答解析を行い実験結果の歪みとの比較を行った。

写真-1は実験の様子を示すもので、実規模のRC部材に衝撃的な揚圧力が作用し、沖側に衝撃波による飛沫が上がっている。

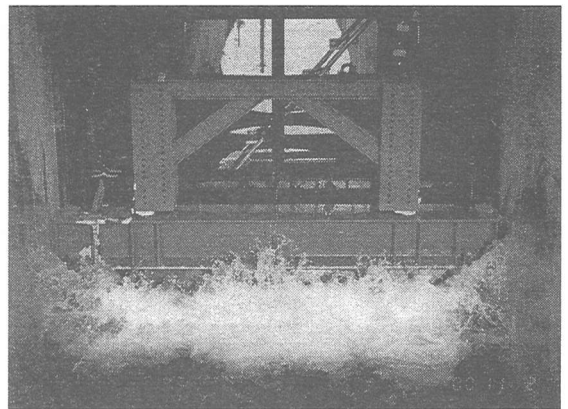


写真-1 RC版に作用する衝撃波

### 2. 実験の概要と実験結果

#### (1) 大規模水深水路と実験条件

図-1に示すように全長184m、内幅3.5m、深さ12mの大規模水深水路内に、造波機から120m地点に反射壁を設置して重複波を発生させ、反射壁の直前に設置した実規模の水平版に衝撃揚圧力を作用させた。水深は5mで、実験波は規則波(波高75cm、周期3s)であり、水面とRC版のクリアランスは30cmとした。

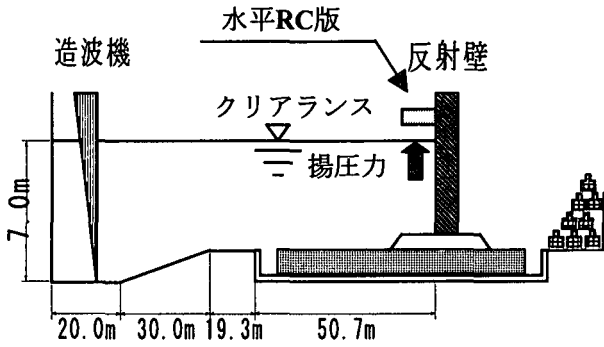


図-1 大規模実験水路

(2) 実験模型

図-2に示すように実験体は厚さ  $d = 20\text{cm}$ 、幅  $L_w = 40\text{cm}$ 、長さ  $L_B = 280\text{cm}$  (固定部を含め342cm) のRC部材であり、部材の内部には固定端部の補強としてD13鉄筋を上下それぞれ3本・計6本、主鉄筋としてD10鉄筋を上下それぞれ4本・計8本を10cm間隔で入れている。また、コンクリートの圧縮強度は設計値として  $24\text{N/mm}^2$  と定めた。

実験の計測は図-3～図-5 (表示単位はmm) に示したように、波圧計20箇所 (PA～PT)、コンクリート表面歪みゲージ5箇所 (CA～CE)、鉄筋歪みゲージ15箇所 (鉄筋上面RAU～REU、鉄筋下面RAL～REL)、部材の応答として加速度計3箇所 (AA～AC) とした。

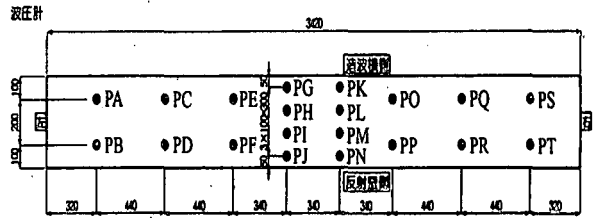


図-3 波圧計の設置箇所

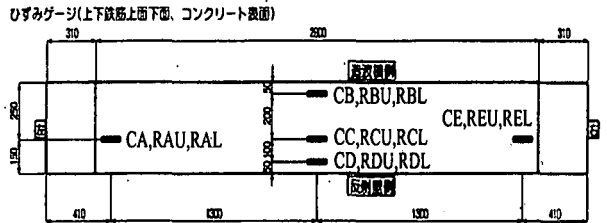


図-4 コンクリート・鉄筋歪みゲージの設置箇所

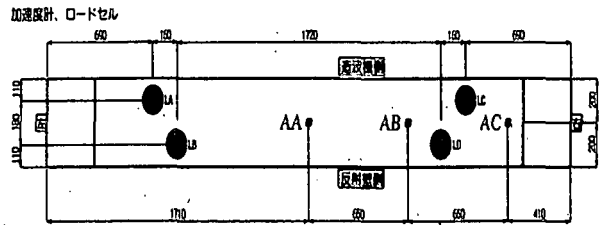


図-5 加速度計の設置箇所

(3) 実験結果

約一分間重複波を作用させた結果、波面と構造物の衝突によって13回もの衝撃波圧が発生した。そこで今回は開始から38.2s～38.8sの0.6秒間に発生した衝撃波圧に注目してみる。

ただし、生データはノイズがのっていたので、高周波成分(約75Hz以上)と低周波成分(約0.1Hz以下)をカットしてノイズを削除した。サンプリング間隔は0.001sである。

図-6では、版中央部で計測された波圧の様子を、図-7には時間ごとの波の移行状況をTIME (サンプリング時間) = 38.466s, 38.473s, 38.482sの時間単位で示している。また、各波圧計で計測された最大波圧とその時間を表-1に示す。

これより、波は初めにRC版の中央部から衝突し、造波機側・反射壁側・左右方向へ移行している事がわかる。表-1の最大波圧と時間の関係を見て分かるように、波が版全体に伝わるには0.041sとかなり短い時間であったといえるが、これはサンプリング間隔(0.001s)を考慮すると、同時には波が版には衝突していなかったといえ、最大波圧発生には各計測位置で位相のずれがあったことがわかる。また、衝撃波の継続時間は0.09sであり、一番立ち上がりの鋭い波形(衝撃波の立ち上がりから、最大波圧の発生までの時間)の立ち上がり時間は0.008sであった。

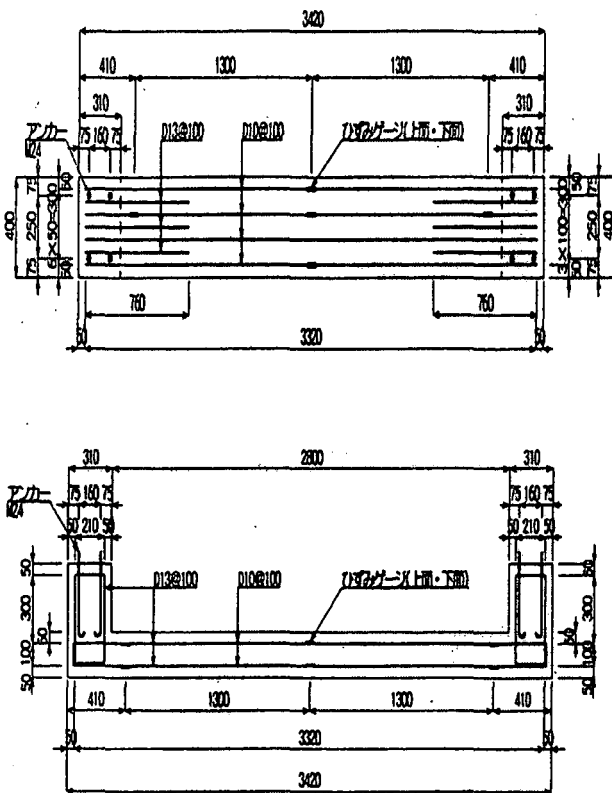


図-2 実験体の上面図と断面図

表-1 各波圧計での最大波圧と時間

波圧計	最大波圧 (N/mm <sup>2</sup> )	時間(s)	波圧計	最大波圧 (N/mm <sup>2</sup> )	時間(s)
PA	4.88E-02	38.49	PK	3.24E-02	38.471
PB	2.59E-02	38.49	PL	2.41E-02	38.47
PC	2.99E-02	38.481	PM	2.50E-02	38.471
PD	3.03E-02	38.486	PN	2.97E-02	38.473
PE	3.05E-02	38.475	PO	4.51E-02	38.475
PF	2.60E-02	38.482	PP	2.71E-02	38.472
PG	2.05E-02	38.462	PQ	5.18E-02	38.487
PH	2.26E-02	38.454	PR	3.38E-02	38.49
PI	2.36E-02	38.466	PS	2.92E-02	38.489
PJ	2.86E-02	38.472	PT	3.15E-02	38.495

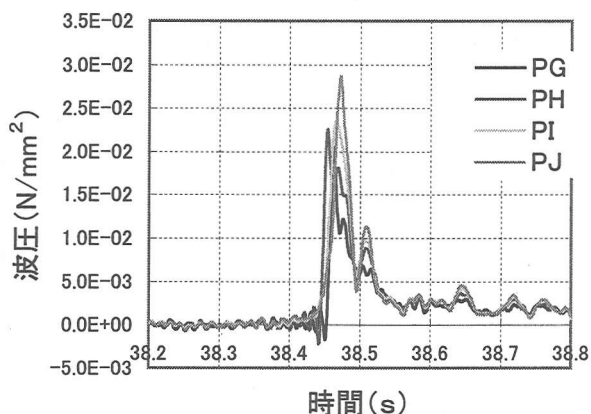


図-6 波圧の分布状況

図-8は、20点の波圧計の合力分布を示したものである。この合波力の最大値はTIME=38.49sのとき33.0kNを記録した。この合力では、衝撃波の特性ともいえる碎波圧成分と重複波圧成分が顕著に出なくなっている。つまり、各位置での衝撃波のピークが隠れ、重複波の合計となっていることが分かる。

また、この合波力を合波圧に変換した場合、最大合波力33.0kNは最大合波圧2.41N/cm<sup>2</sup>に変換される。

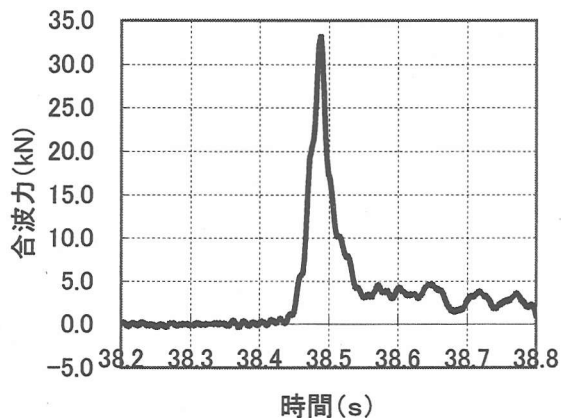


図-8 波圧計の合力

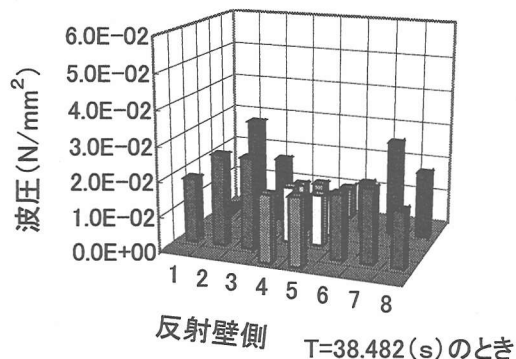
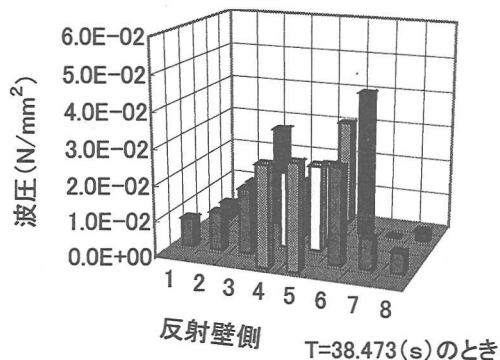
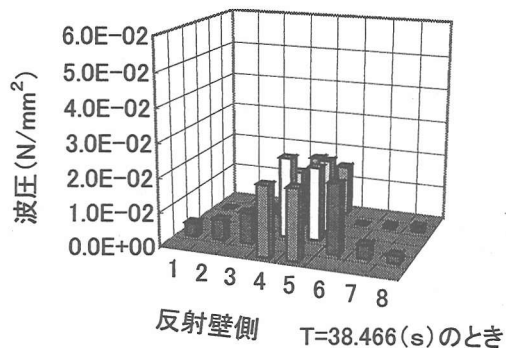


図-7 波圧の移行状況

RC版の振動特性を確認するため、加速度の検討を行った。結果は図-9に示す。加速度は上向きを正とし、AA・AB・ACともに時間成分では同一挙動していたといえる。また、最大値は0.3~0.43Gであり、版の中央部から離れるほど最大値が小さくなっている。衝撃波の発生に伴って版が振動していることが確認できた。

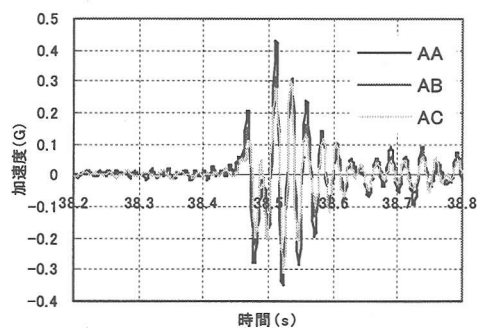


図-9 加速度応答分布

また、図-10、11に示したようにコンクリート内部の鉄筋における歪みの分布を左右方向、反射壁・造波機方向に示すと、コンクリート内部の上部鉄筋では中央部と端部では符号が逆転しており、中央部では引張力が、端部では圧縮力が作用している。またピーク値に差はあるものの時間成分では同一挙動をしていることがわかる。また歪みの最大値は $20\mu$ と小さな値であり衝撃的な成分は見られなかった。またこの程度の歪みでは、コンクリートにひび割れは生じてないと判断された。

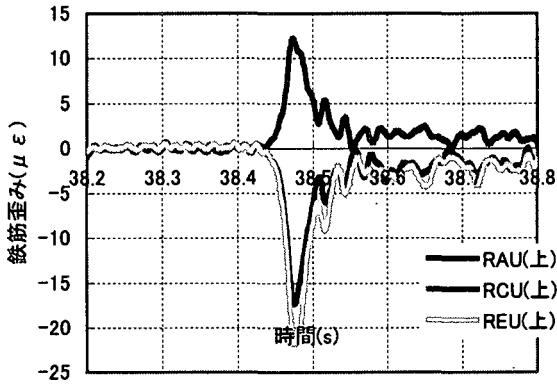


図-10 鉄筋歪み（左右方向）

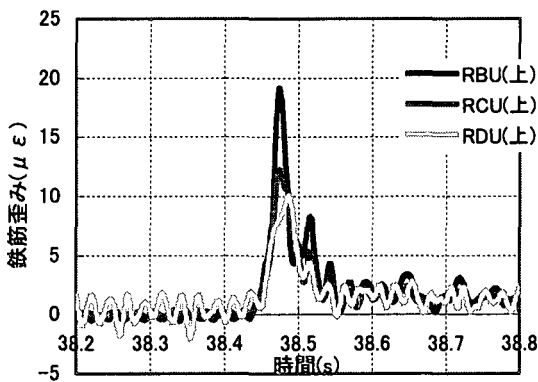


図-11 鉄筋歪み（反射壁・造波機方向）

### 3. 有限要素法による解析

実験結果から波圧・合波力の実験体下面での移行状況、版の振動状況（加速度応答分布より）が明らかになった。そこで、実験により得られたコンクリート表面歪みとコンクリート内部に埋め込まれた鉄筋の歪みの応答が数値解析値とどのように異なるかを検討するため、有限要素法汎用プログラムSOLVIAを用いて動的と静的の二通りの解析を行った。解析方法の概要としては、有限要素法によりRC版をモデル化し、三次元の梁と仮定した。

また、荷重として図-6に示した各計測地点の波圧

計で得られた実験波圧と図-8に示した波圧計の合力である合波圧を用いて、三次元の線形弾性解析を行った。

#### (1) 解析モデル

モデルとなる梁の寸法は、長さ342cm、厚さ20cm、幅40cmとし、内部の鉄筋の位置・長さ・直径は実験のものを忠実に再現した。実験では梁が破壊しなかったことから線形解析で行い、三次元要素を用いた。鉄筋コンクリート版は節点数11645、要素数1796の梁要素で置換した。境界条件は実験の再現を目指し、アンカー部分を完全固定とし、それ以外はY・Z方向の変位、X軸回りの回転を自由とした。鉄筋コンクリート版の全体図を図-12に示す（アンカー部分はBと記す）。

構造形式として、コンクリート部材では、ヤング率 $E=29.4\text{kN/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.167$ 、密度 $\rho=2.35\text{E-}6\text{g/cm}^2$ 、鉄筋部材では、ヤング率 $E=205.9\text{kN/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、密度 $\rho=7.85\text{E-}6\text{g/cm}^2$ を与えた。また、版の剛性を考慮し、減衰率はRayleigh減衰で与え、 $\alpha=6.60\text{E-}1$ 、 $\beta=4.75\text{E-}4$ とした。数値積分の時間間隔は実験同様 $1.0 \times 10^{-3}$ で行った。ただし、実験結果では38.2s~38.8sの0.6秒間を対象に検討しているが、動的解析ではプログラムの都合上38.4s~38.7sの0.3秒間を対象に行った。

構造物のRayleigh減衰は次の式

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (1a)$$

$$\alpha = \frac{2\omega_1\omega_2(h_1\omega_2 - h_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad (1b)$$

$$\begin{aligned} &= 6.60 \times 10^{-1} \\ \beta &= \frac{2(h_2\omega_2 - h_1\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2} \quad (1c) \\ &= 4.75 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

ここに、 $h_1, h_2$ : 1次、2次の減衰定数

$\omega_1, \omega_2$ : 1次、2次の固有円振動数

$h_1, h_2=0.02$ とした。実験では厳密には両端固定ではなかったが、両端固定の梁の値を用い、 $\omega_1=22.51(1/s)$ 、 $\omega_2=61.70(1/s)$ とした。

#### (2) 解析ケース

解析パターンは4通りあり、静的解析は各波圧計で計測された最大値のみを入力したものと合波圧の最大値のみを入力したものの2通り（共に時間軸・密度の概念はなし）。動的解析は各波圧計で計測された波形をそれぞれ入力したものと合波圧の波形を入力したものの2通りとなっている。

以上の解析条件で実験値と解析値の鉄筋コンクリート版の歪み値を比較した。

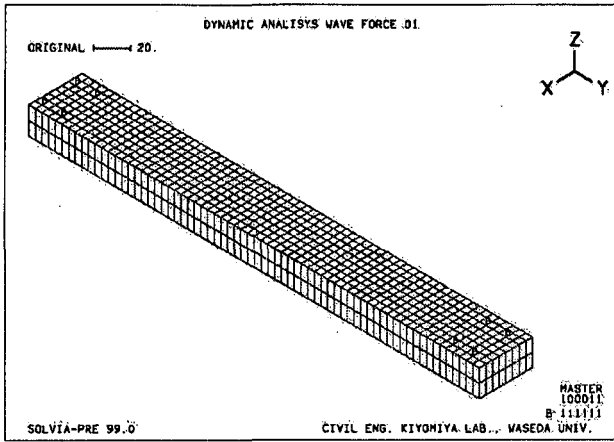


図-12 解析モデル図

#### 4. 有限要素法による解析結果

##### (1) 静的解析

静的解析では、CASE1として各波圧計で計測された最大値のみを入力した場合とCASE2として合波圧の最大値のみを入力した場合の2通りのパターンにおける歪み応答の結果を求めた。表-2にその結果を示す。鉄筋コンクリート全体でみると、引張力よりも圧縮力の方が強いものとなり、RC部材の上部と下部では引張・圧縮の符号が逆になっており、曲げ成分が卓越している。また、各波圧計で計測された波による歪みの方が合波圧のものより大きいものとなっている。

表-2 静的解析結果

コンクリート 表面歪み	CASE1	CASE2	上部鉄筋 歪み(下面)	CASE1	CASE2
	計算値(μ $\epsilon$ )			計算値(μ $\epsilon$ )	
CA	-40.2	-31.9	RAU(下面)	-35.2	-27.9
CB	21.3	18.1	RBU(下面)	18.0	15.3
CC	21.3	18.1	RCU(下面)	18.0	15.3
CD	21.3	18.1	RDU(下面)	18.0	15.3
CE	-36.8	-28.9	REU(下面)	-36.1	-28.2
上部鉄筋 歪み(上面)	CASE1	CASE2	下部鉄筋 歪み	CASE1	CASE2
	計算値(μ $\epsilon$ )			計算値(μ $\epsilon$ )	
RAU(上面)	-40.8	-32.4	RAL	12.4	10.3
RBU(上面)	24.9	21.0	RBL	-43.0	-34.6
RCU(上面)	24.9	21.0	RCL	-43.0	-34.6
RDU(上面)	24.9	21.0	RDL	-43.0	-34.6
REU(上面)	-41.1	-32.1	REL	13.7	10.9

(-) 圧縮 (+) 引張

##### (2) 動的解析

動的解析では、静的解析のCASE1とCASE2のパターンに時間と密度の動的振動の概念を考慮して計算した。それぞれ入力波形として実験で計測された波形を元にしており、20箇所の波圧計での計測値とその合波圧の2通りを入力した。それぞれ簡略化のため波圧計と合波圧と以後呼ぶことにする。また、解析対象時間は38.4~38.7(s)の計0.3秒間とした。

ここに実験により計測された歪みと解析により得られた歪みデータをそれぞれ版の端部であるAポイ

ントと版の中央部であるCポイントに着目して比較してみる。表-3に実験値、波圧計、そして合波圧の最大歪みを示す。図-13, 14ではコンクリート表面の歪みを、図-15, 16ではコンクリート内部の上部鉄筋の上面における歪みを、図-17, 18ではコンクリート内部の下部鉄筋の上面における歪みを示した。また、上部鉄筋の下面における歪みは上面のものとはほぼ同一なものだったので割愛した。図-19では鉄筋コンクリート全体における歪みの分布状況を示している。

時間成分に着目すると、実験で得られた歪みは各波圧計で計測された波圧を入力条件としている歪みとはほぼ同一挙動をしている。つまり版は個々の波圧の波形に応答していたといえる。

また歪みの大きさは、合波圧による歪みの方が個々の波圧による歪みよりやや大きくなっている。

表-3 版中央部・端部にみる実験結果と動的解析結果の歪みの比較

歪みゲージ		実験値	波圧計	合波圧
		応答値(μ $\epsilon$ )		
コンクリート 表面歪み	CA	-27.0	-28.2	-31.8
	CC	31.6	17.4	18.0
上部鉄筋 歪み(上面)	RAU(上面)	-17.3	-28.9	-32.3
	RCU(上面)	12.2	20.1	20.9
上部鉄筋 歪み(下面)	RAU(下面)	-14.1	-24.7	-27.8
	RCU(下面)	8.5	14.9	15.2
下部鉄筋 歪み	RAL	12.5	9.8	10.2
	RCL	-22.9	-31.0	-34.5

(-) 圧縮 (+) 引張

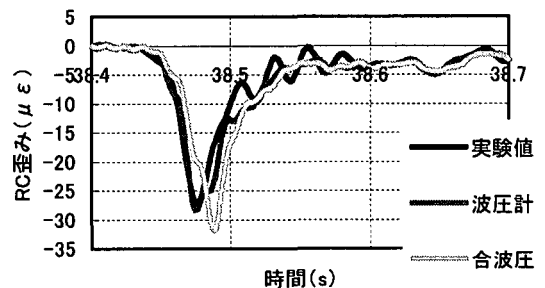


図-13 版端部におけるコンクリート表面歪み

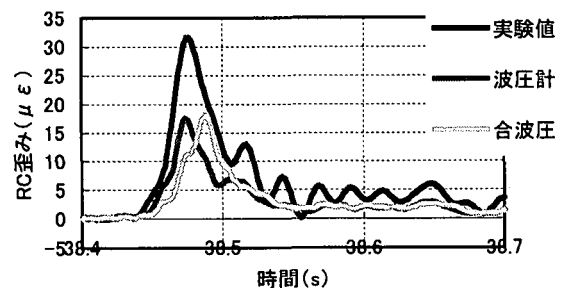


図-14 版中央部におけるコンクリート表面歪み

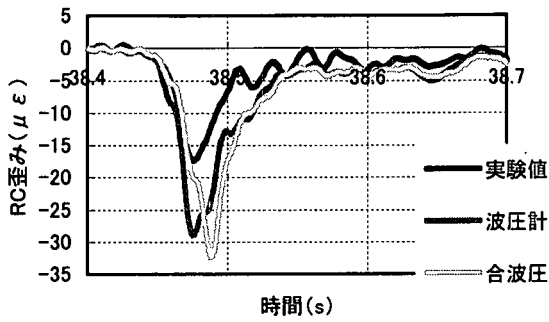


図-15 版端部における上部鉄筋歪み

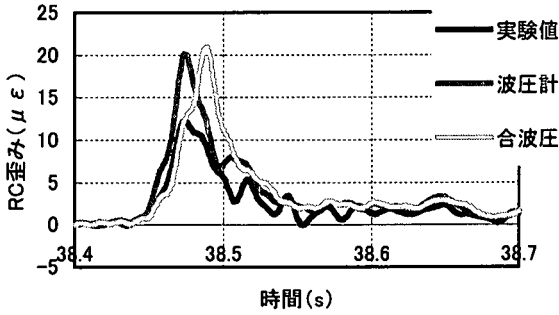


図-16 版中央部における上部鉄筋歪み

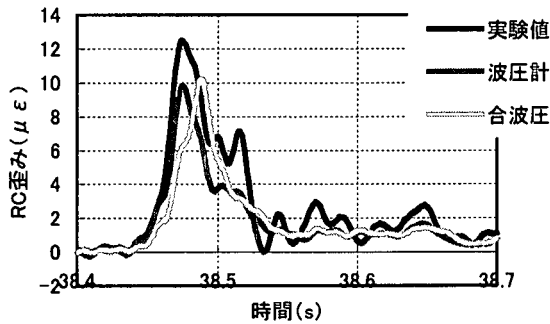


図-17 版端部における下部鉄筋の歪み

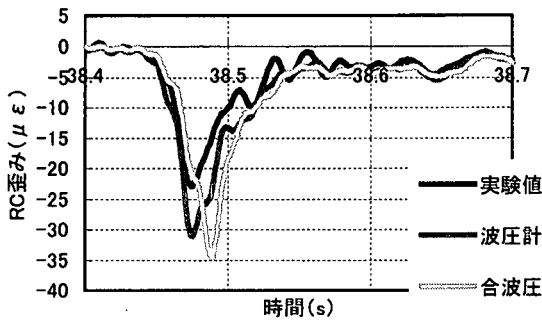


図-18 版中央部における下部鉄筋の歪み

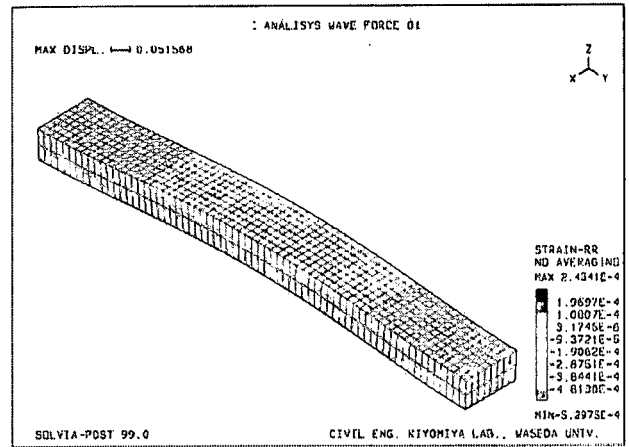


図-19 軸方向の歪み状況

## 5. 結論

衝撃応答実験で得られた衝撃の基本的なデータと有限要素法による静的・動的解析の結果との比較を試みたが、その結果は次のように要約される。

- (1) 波の移行状況や衝撃波の立ち上がり開始時間の各点間の異なりから判断すると、RC版には三角形分布に類似した形状の波圧が作用していた。
- (2) 衝撃波が作用するときには局所的に大きな衝撃的波圧が発生するものの、RC部材への歪みに対する影響は $20\mu$ とそれほど大きいものではなく、部材の破壊までは到達しなかった。
- (3) 衝撃的波圧のピークで構造設計を行うと現状では過大な設計となる。しかし多数の波が作用したときの疲労及び応力集中を生じやすい配筋方法見直し等の検討と併せて、構造部材の適切な耐波設計を今後考える必要がある。

## 6. あとがき

今回は実験値を用いて一般的な衝撃波圧に関する影響を静的解析と動的解析で比較しながら検討したが、今後は波の立ち上がり時間と継続時間を変えて、実際にどれくらい衝撃波圧が構造物に影響するか検討してみたい。今回の実験は実際に国土交通省港湾技術研究所で実施されたものである。

## 参考文献

- 1) 伊藤公一他：揚圧的な衝撃波圧を受ける水平RC版の挙動，2001年度全国年次学術講演会，2001
- 2) 尾崎精一他：衝撃的な波圧を受けるコンクリート梁部材の動的応答，第五回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.37-40，2000
- 3) 高橋重雄他：衝撃波圧による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.812-817，1999