

## (34) 衝撃的上下動を受けるRC橋脚模型における帯鉄筋の影響について

## THE HOOP REINFORCING EFFECTS OF RC PIER MODEL UNDER IMPULSIVE VERTICAL MOTION

別府万寿博\*, 香月智\*\*, 石川信隆\*\*\*, 宮本文穂\*\*\*\*

Masuhiro BEPPU, Satoshi KATSUKI, Nobutaka ISHIKAWA, Ayaho MIYAMOTO

\*工修 防衛大学校研究員 土木工学科 (〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*工博 防衛大学校助教授 土木工学科 (〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*\*工博 防衛大学校教授 土木工学科 (〒239-0811 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*\*\*工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755-0091 山口県宇部市常盤台 2557)

キーワード: 衝撃的上下動, RC橋脚, 輪切り状ひび割れ, 帯鉄筋効果

(Impulsive Vertical Motion, RC Pier, Circumferential Crack, Hoop Reinforcing Effect)

## 1. 序言

1995年に発生した兵庫県南部地震において、写真-1に示すようにRC橋脚の輪切り状ひび割れなど破壊の原因が衝撃的上下動でも説明できるような被災例がみられた。そこで著者らは、先に主鉄筋のみを考慮したコンクリート柱供試体に対する衝撃突き上げ実験<sup>1)2)</sup>を行い、衝撃的上下動によるコンクリート柱供試体の輪切り状ひび割れの再現に成功した。ところで阪神大震災においては、RC橋脚段落し部などでせん断破壊が数多くみられた。このような脆性的な破壊を防止するため、平成8年に改訂された道路橋示方書ではじん性を向上するための構造細目として、帯鉄筋間隔に関する規定や中間帯鉄筋の配筋などが新たに付記され<sup>3)</sup>、せん断補強を配筋目的の一つとする帯鉄筋本数を増加させる傾向にあり帯鉄筋の重要性が再認識されている。ここで先に行った衝撃突き上げ実験では、主として主鉄筋比や段落しの影響を考察する目的で供試体には主鉄筋のみを配筋しており、帯鉄筋は考慮しなかった。

そこで本研究は、実際のRC橋脚の配筋状況をより正確に模擬するために供試体内部に帯鉄筋を配筋したコンクリート供試体に対して衝撃突き上げ実験を行い、帯鉄筋が輪切り状ひび割れ性状や供試体軸方向ひずみに及ぼす影響について実験的に考察し、実験のシミュレーションを行ったものである。

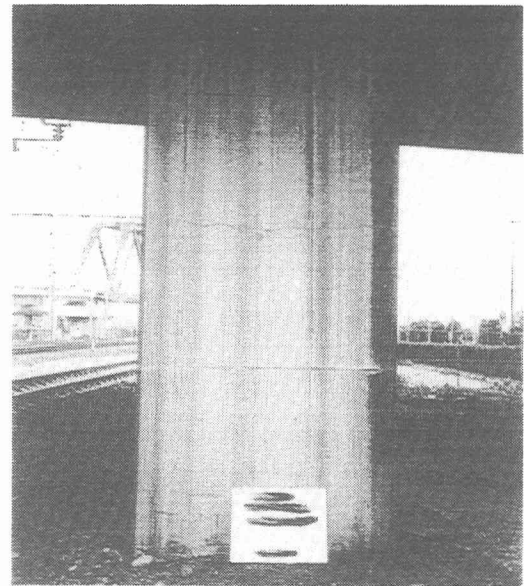


写真-1 RC橋脚の輪切り状ひび割れの例

## 2. 実験の概要

## 2.1 実験装置

衝撃突き上げ実験は、図-1に示すように高速変形荷重装置からの高速荷重をこの原理を利用して、入力側アクチュエーターからの油圧を載荷力伝達ホースを介して出力側アクチュエーターに伝えるものでコンクリート柱供試体を衝撃的に突き上げる仕組みになっている。突き上げ最大速度は1.38m/sで、

表-2 実験ケースの一覧

	タイプA	タイプB	タイプC	タイプD	タイプE	タイプF
1 体目	TH-H0-H-1	TH-H1-H-1	TH-H2-H-1	CO-H0-H-1	CO-H1-H-1	CO-H2-H-1
2 体目	TH-H0-H-2	TH-H1-H-2	TH-H2-H-2	CO-H0-H-2	CO-H1-H-2	CO-H2-H-2

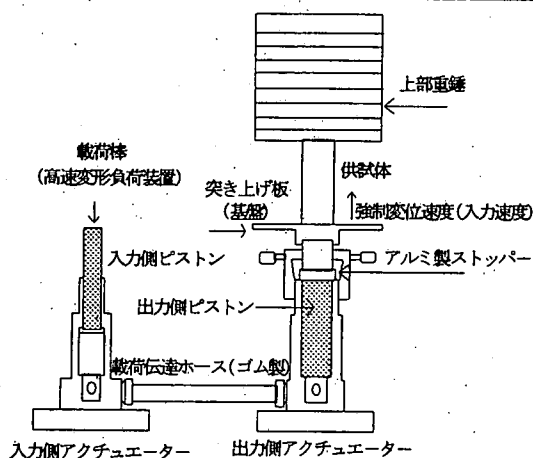


図-1 衝撃突き上げ実験の概要

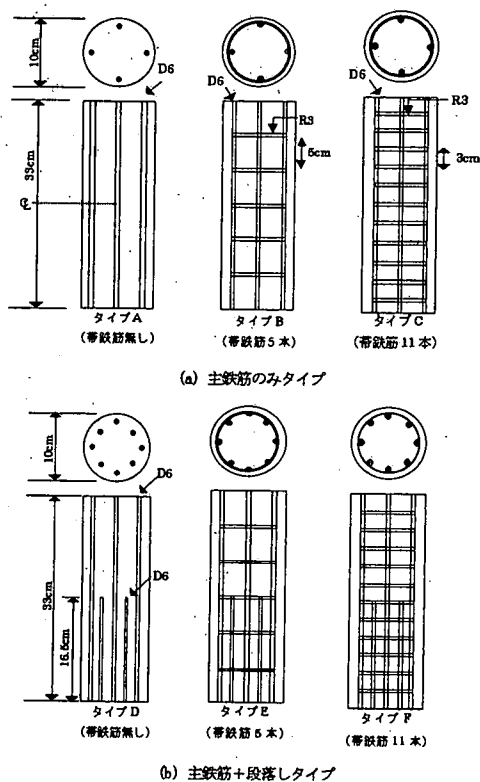


図-2 供試体の概要

表-1 主鉄筋の引張試験結果

弾性係数	$1.96 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
降伏点	$461 \text{ N/mm}^2$

突き上げ変位量は 0.5cm である。

## 2. 2 供試体

実際の RC 橋脚を高さ 10m, 直径 3m の円形断面

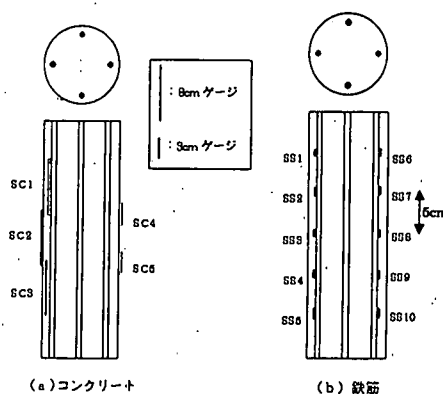


図-3 ひずみの測定位置

のものと想定し配筋状況を変えながら、縮尺を 1/30 としてコンクリート円柱供試体を作製した。供試体作製には、平均圧縮強度約  $24.5 \text{ N/mm}^2$  のモルタルを用いた。配筋については図-2 に示すように大きく主鉄筋のみタイプ(A, B, C)と主鉄筋に段落し(柱高さ半分まで配筋)を考慮したタイプ(D, E, F)を作製し、それぞれ帯鉄筋を 5 本(タイプB, E; 帯鉄筋間隔 5cm)と帯鉄筋を 11 本(タイプC, F; 帯鉄筋間隔 3cm)配筋したものを作製した(計 6 種類)。主鉄筋には D6 の異形鉄筋を、帯鉄筋には 3.2mm の鉄線を用いて結束線により主鉄筋と結合した。表-1 に主鉄筋の引張試験結果を示す。また、各供試体には約 4.9kN の重錘を載せることにより上部工を表現した(初期圧縮応力約  $0.63 \text{ N/mm}^2$ )。

## 2. 3 測定項目

コンクリートおよび鉄筋のひずみ測定位置を図-3 に示す。コンクリート表面は、8cm ゲージを 3 枚、対面に 3cm ゲージを 2 枚貼付し、計 5 箇所ひずみを測定した。鉄筋は相対する 2 本に、鉄筋中央から 5cm 間隔で 1 本にそれぞれ 2mm のひずみゲージを 5 枚、計 10 箇所ひずみを測定した。また、突き上げ板(基盤)と供試体上部の重錘の変位と加速度も測定した。

## 2. 4 実験ケース

各供試体タイプに対し、最大突き上げ速度約 110cm/s で 2 回行った。実験ケースの一覧を表-2 に示す。

表-3 最大入力速度の一覧 (単位: cm/s)

	タイプA	タイプB	タイプC	タイプD	タイプE	タイプF
1体目	104.9	97.6	110.0	109.6	101.7	108.6
2体目	111.6	111.6	96.2	90.8	91.1	96.1

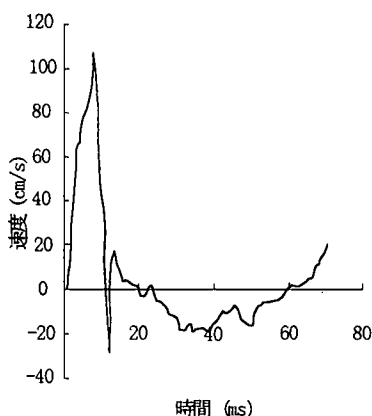


図-4 TH-H0-H-1 の入力速度  
～時間関係

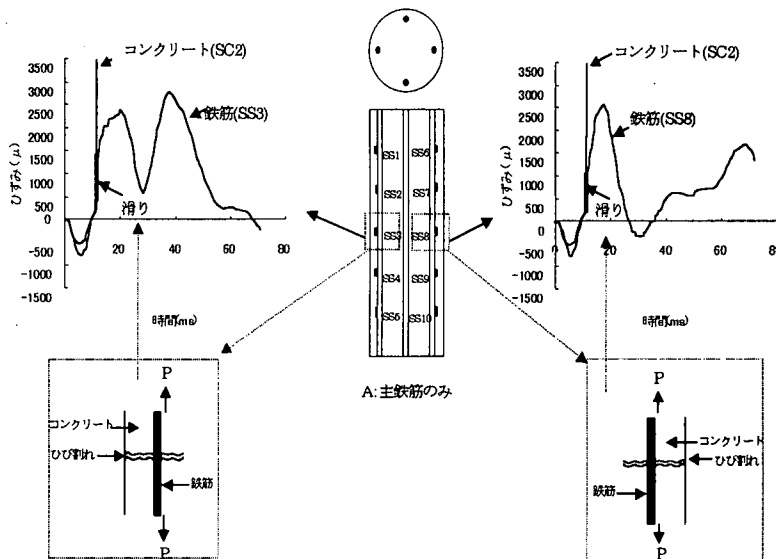


図-5 TH-H0-H-1 のコンクリート(SC2)と  
鉄筋(SS3, SS8)のひずみ～時間関係

### 3. 実験結果と考察

#### 3. 1 時刻歴応答特性

時刻歴応答の一例として実験ケース‘TH-H0-H-1(タイプA, 1体目)’の入力速度およびひずみ応答の特性について考察を行う。

##### (1) 入力速度～時間関係

図-4 に入力速度～時間関係を示す。これより、突き上げ開始後約 8ms で最大速度約 105cm/s を示し、その後急激に速度が低下して約 10ms で速度はゼロになっている。すなわち、約 8ms で突き上げが急停止していることがわかる。表-3 に各実験ケースの最大速度の一覧を示す。

##### (2) コンクリートおよび鉄筋のひずみ～時間関係と内部ひび割れの定義

図-5 はコンクリートと主鉄筋のひずみ～時間関係を重ねて示したものである。突き上げが急停止する約 8ms でコンクリートは最大圧縮ひずみ約 400 μm を示し、その後、急激に引張側に転じ約 10ms で引張側に振り切れており、鉄筋のひずみ応答はコンクリートの振り切れ応答に重なるように瞬時に滑るような応答を示し、最大で約 2500 μm の引張ひずみを生じている。これは、図中の模式図に示すように

ひび割れの発生した断面部分で鉄筋のみが引張力を負担するためと考えられる。またこれらのひずみ応答特性から供試体内部の断面を部分的あるいは貫通したひび割れが発生したものと思われ、これを内部ひび割れと定義する。

#### 3. 2 ひび割れ性状

実験結果の目視による観察では輪切り状ひび割れを明瞭に確認できなかったため、供試体にアセトン浸透させ浮出たひび割れを外部ひび割れと定義し、これを図-6 のようにスケッチした。

##### (1) 帯鉄筋有無の影響

図-6 には外部ひび割れと内部ひび割れを重ねたものを示す。ほぼ同じ入力速度で突き上げられた供試体タイプに分類した一例として入力速度が約 100cm/s の実験ケース(主鉄筋のみタイプ: TH-H0-H-1, TH-H1-H-1, TH-H2-H-2, 主鉄筋+段落しタイプ: CO-H0-H-1, CO-H1-H-1, CO-H2-H-2)の結果である。内部ひび割れは、鉄筋ひずみを測定した断面において 2 本の鉄筋のひずみ応答がともにひび割れ発生に伴う滑り応答を示した場合を横断する点線(輪切り状ひび割れ)で示し、片側のみの場合は断面端から中央までの点線で表示した。また図

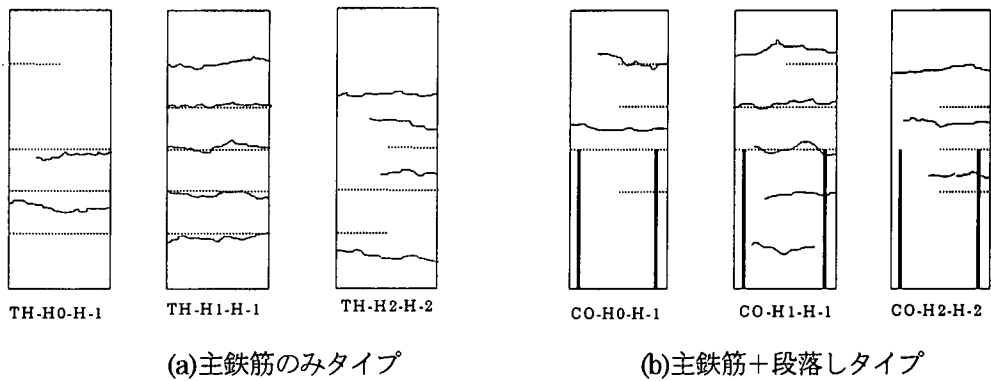


図-6 ひび割れ性状図

(～:外部ひび割れ, —:内部ひび割れ)

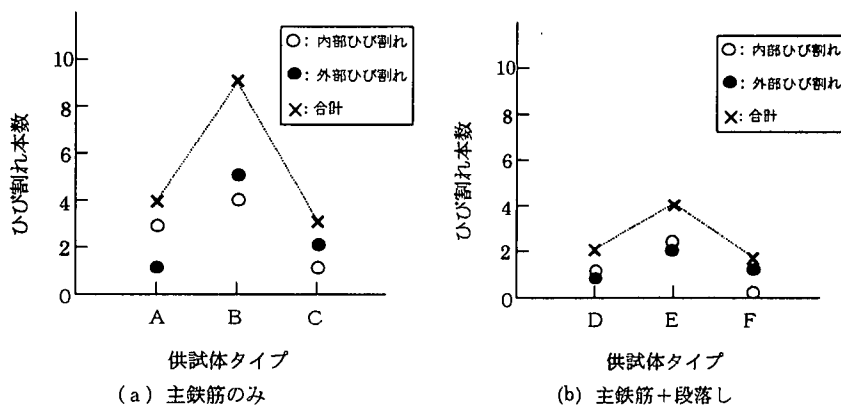


図-7 各供試体の外部ひび割れと内部ひび割れ本数  
(輪切り状ひび割れ)

-7 は外部ひび割れと内部ひび割れの本数を示したものである。これより、帯鉄筋の有無の影響については、帯鉄筋の無いタイプA、Dは帯鉄筋を疎に配筋したタイプB、Eよりもひび割れが少ないことがわかる。またタイプB（帯鉄筋5本）は、5本の外部ひび割れが確認でき、その位置は帯鉄筋近傍であった。これは、帯鉄筋を配筋することにより供試体内に不連続部が形成され、応力集中等によりひび割れが発生しやすいためと思われる。

## (2) 帯鉄筋間隔の影響

タイプCとF（帯鉄筋11本）は、タイプB、E（帯鉄筋5本）に比べて外部、内部ひび割れともに減少しており、供試体に帯鉄筋を配筋する場合は帯鉄筋数の増加により供試体の引張剛性が大きくなるような効果があると考えられ、輪切り状ひび割れを抑制するものと思われる。これより、衝撃的上下動に対して帯鉄筋の間隔は狭い方が有効であると考えられる。

## (3) 段落しの影響

図-7より段落しのあるタイプは、主鉄筋のみタイプに比べて外部と内部ひび割れの合計が少ないことがわかる。これは、供試体下部を段落し鉄筋で補強しているためひび割れ発生が抑制されたものと思われる。しかし図-6より段落し部には必ずひび割れが発生していることが確認され、段落し鉄筋の配筋には注意を要すると考えられる。

## 4. 実験結果のシミュレーション

### 4.1 解析モデル

図-8に解析モデルを示す。供試体コンクリート部は三角形一次要素で、主鉄筋および帯鉄筋は棒要素として考慮した。ここで、コンクリートおよび鉄筋は弾性材料とした。また供試体断面は、要素の板厚を長方形として近似し、重錘はモデル最上部の接点に相当するマスを付加した。重錘と柱部分の境界部は剛接ではないことを考慮し、その間に境界ばね

表-4 解析に用いた入力データ

	弾性係数(kgf/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
コンクリート	2.5×10 <sup>5</sup>	0.2	2.5
鉄筋	2.1×10 <sup>6</sup>	0.3	7.8
減衰定数	0.05		

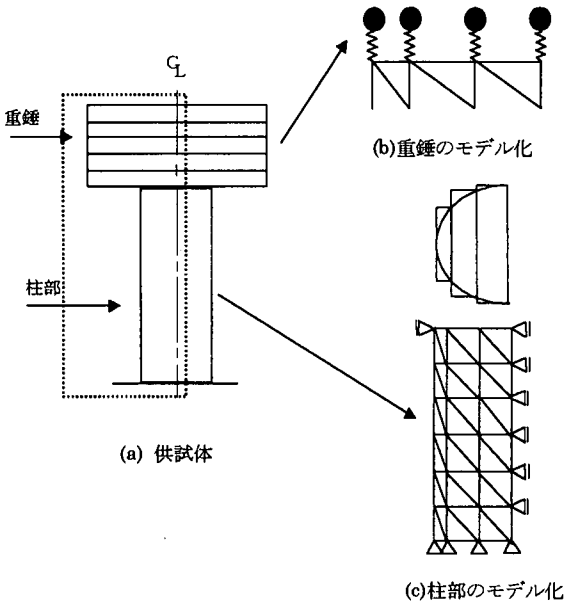


図-8 解析モデル

要素 (ばね係数  $k_D = \gamma k$ ,  $\gamma$ : 境界要素低減定数,  $k$ : 供試体の一質点系ばねモデルのばね係数) を挿入してモデル化した。

#### 4.2 解析基本式

衝撃的上下動の場合の運動方程式は、動的な力の釣合いより次のように導かれる。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M\ddot{\phi} \quad (1)$$

ここで、 $M$  は質量マトリックス、 $C$  は減衰マトリックス、 $K$  は剛性マトリックスで、 $\ddot{u}$ ,  $\dot{u}$ ,  $u$  はそれぞれ節点の相対加速度、速度、変位ベクトルである。また、 $\ddot{\phi}$  は衝撃的上下動の加速度ベクトルを示す。これをウィルソンの  $\theta$  法により時刻歴に各節点の変位を求めて、節点間の相対変位からひずみを算出した。

#### 4.3 解析結果

解析には表-3 の材料定数を用い、式(1)の衝撃的上下動の加速度ベクトル  $\ddot{\phi}$  には図-9 のような実験のデジタルデータを入力した。

計算の一例として、図-10 にタイプA (帯鉄筋無, 要素分割数: 36), タイプB (帯鉄筋 5 本, 要素分

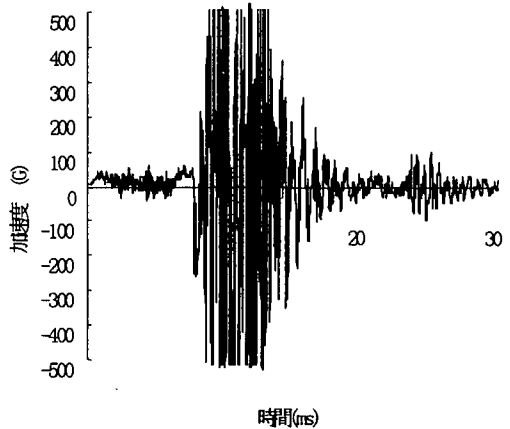


図-9 解析に用いた入力加速度の例

割数: 36) およびタイプC (帯鉄筋 11 本, 要素分割数: 72) の鉄筋ひずみ(SS8)~時間関係の実験および解析結果を重ねて示す。これより、コンクリートにひび割れが発生する時刻約 12ms までは実験をよくシミュレートしていることがわかる。しかし、ひび割れ発生以降はあまり一致しておらず、今後この点に関して修正し検討する予定である。

#### 5. 結言

本研究の成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 帯鉄筋の有無の影響については、帯鉄筋を疎に配筋したタイプB, Eは、帯鉄筋の無いタイプA, Dよりもひび割れが多いことがわかった。これは、帯鉄筋を配筋することで供試体に不連続部が形成され応力集中が生じたためと思われる。
- (2) 供試体に帯鉄筋を配筋する場合は、帯鉄筋数の増加により供試体の引張剛性が大きくなるような効果があると考えられ、輪切り状ひび割れを抑制するものと思われる。これより、衝撃的上下動に対して帯鉄筋の間隔は狭い方が有効であると考えられる。
- (3) 段落しタイプでは、供試体下部を段落し鉄筋で補強しているため、ひび割れ発生が抑制されている

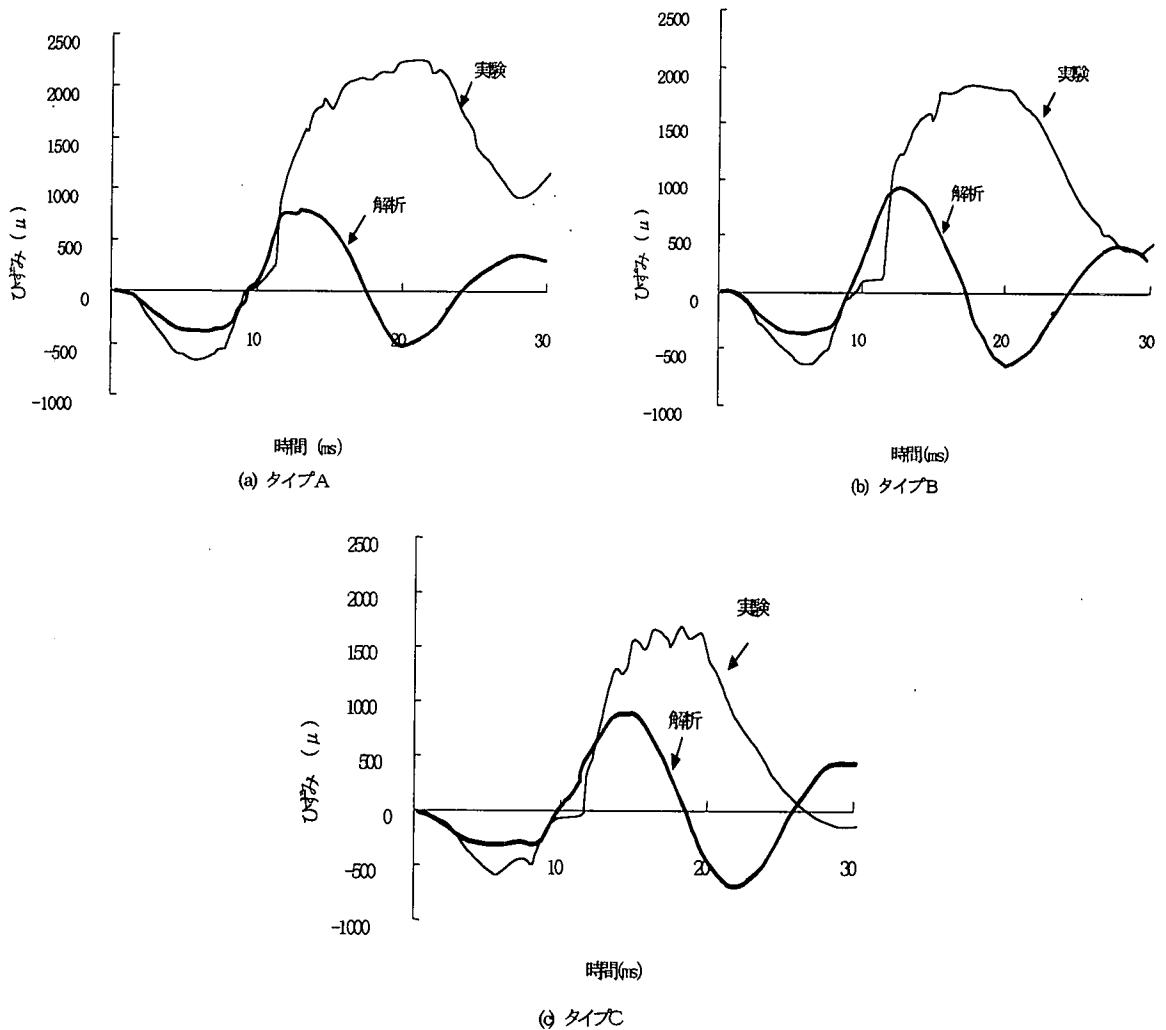


図-10 解析結果と実験結果の比較

ことが確認された。しかし、段落し部には必ずひび割れが発生することから、段落し鉄筋の配筋には注意が必要であると思われる。

(4)有限要素法により実験の動的弾性解析を行った。その結果、コンクリートにひび割れが発生するまでは、実験の鉄筋ひずみ～時間関係をよくシミュレーションできた。しかし、ひび割れ発生以降については今後の検討が必要であることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 別府万寿博, 香月智, 石川信隆, 宮本文穂: 衝撃突き上げ装置によるRC橋脚模型の輪切り状ひび割れに関する実験的研究, 土木学会論文集, No.577/I-41, pp.165-180, 1997.10.
- 2) 別府万寿博, 香月智, 石川信隆, 佐野正: 衝撃的上下動を受けるRC橋脚の輪切り状ひび割れの再現と鋼板巻立て補強に関する一考察, コンクリート年次論文報告集, Vol19, No2, pp.279-284, 1997.6.

3)道路橋示方書・同解説, V耐震設計編, 日本道路協会, 平成8年12月。