

# 論文 衝撃的上下動による大型 RC 橋脚モデルの水平輪切り状ひび割れに関する実験的研究

原田 耕司 \*1・石川 信隆\*2・香月 智\*3・太田 俊昭 \*4

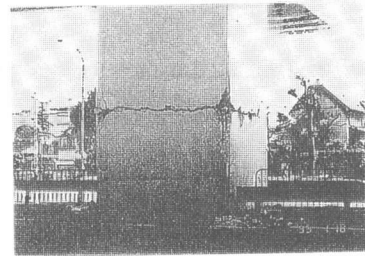
要旨：本研究は、直下型の兵庫県南部地震の被害で観察された RC 橋脚の水平輪切り状ひび割れの原因について、大型 RC 橋脚モデルを用いた衝撃突き上げ実験により検討を行ったものである。実験の結果、大型 RC 橋脚モデルに水平輪切り状ひび割れを再現することに成功し、RC 橋脚の水平輪切り状ひび割れの原因として、衝撃的上下動の可能性もあることを確認した。

キーワード：直下型地震、衝撃的上下動、水平輪切り状ひび割れ、大型衝撃実験

## 1. はじめに

直下型の兵庫県南部地震では、写真一1に示すような RC 橋脚の水平輪切り状ひび割れが観察された。この損傷メカニズムとしては、水平動による交番曲げにより発生した損傷とする考え方もあるが、その一方で「ドンと突き上げるような揺れを感じた」などの被災者の証言<sup>1)</sup>等から上下動に注目して、原因の一つとして衝撃的上下動を提案した報告<sup>2)</sup>等もある。

兵庫県南部地震では、地震計にこのような波形が記録されていなかったため、一般的には、RC 橋脚の水平輪切り状ひび割れは、水平動によるものであるとの見解が主流である。しかし直下型地震では、震源から表層までの距離が短いために震源で放出されたエネルギーが、減衰せずに短周期の上下動として構造物に作用する可能性もあり、また、現在使用されている地震計測システムではこのような高周波の波は捕らえることができない等の理由から、著者らは、RC 橋脚の水平輪切り状ひび割れの原因として、衝撃的上下動の可能性もあるのではないかと考えている。水平輪切り状ひび割れは、直接的に



写真一1 水平輪切り状ひび割れ

は構造物を破壊させるものではないが、その後の水平地震動による橋脚の挙動に影響を及ぼす可能性があり、その発生メカニズムを把握することは、耐震安全上必要性が高いと考えられる。

一方、兵庫県南部地震以降、衝撃的上下動を対象とした数々の衝撃実験が行われているが、実験の特殊性のため供試体サイズに制約があり、より詳細な検討を行うための大型衝撃実験が望まれていた。

そこで、できるだけ RC 橋脚に近いサイズの模型を用いた衝撃突き上げ実験を行い、水平輪切り状ひび割れの再現を試みるとともに、供試体の挙動を観察し水平輪切り状ひび割れの発生メカニズムについて検討を行った。

\*1 西松建設(株) 技術研究所技術部土木技術課主任 工修(正会員)

\*2 防衛大学校教授 土木工学科 工博(正会員)

\*3 防衛大学校助教授 土木工学科 工博(正会員)

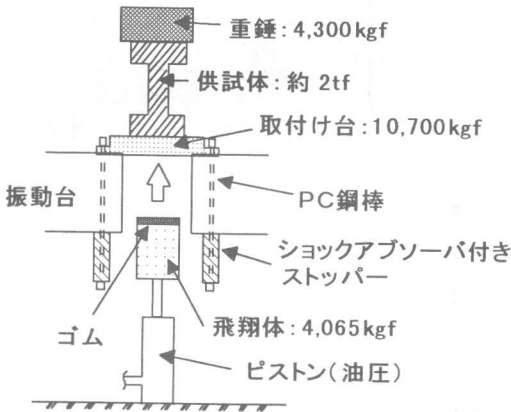
\*4 九州大学教授 大学院工学研究科 工博(正会員)

## 2. 実験概要

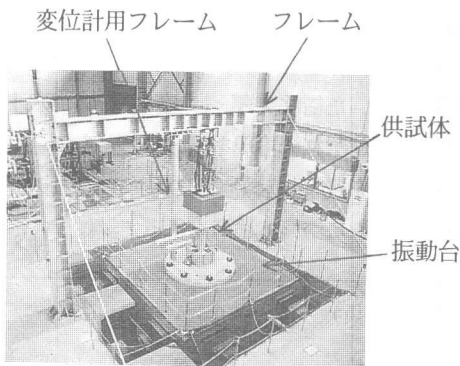
### 2.1 衝撃実験装置

実験装置は、図一1に示すような飛翔体を衝突させることにより衝撃的上下動を再現させるシステムとなっている。具体的には、飛翔体が油圧により上方向へと急速に上昇し、供試体を取り付けている台（以下、取付け台と呼ぶ）に衝突する。この時点で飛翔体の上昇側の弁が閉じられ、下降側の弁が開放され飛翔体の上昇力はなくなり飛翔体は下降を始める。飛翔体衝突後、今度は取付け台が上昇を始め、ある上昇量を超えるとショックアブソーバ付きストッパーが働き、取付け台が停止するシステムとなっている。

飛翔体の衝突速度は  $1\text{m/s} \sim 10\text{m/s}$  まで



図一1 衝撃実験装置

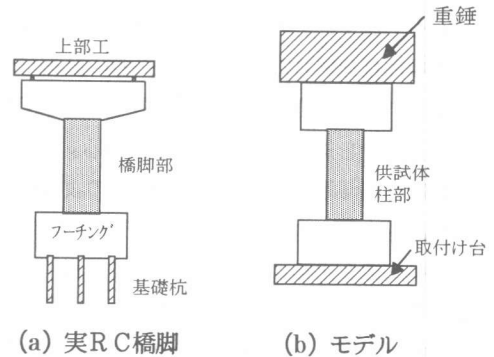


写真一2 実験状況

$0.5\text{m/s}$  単位で調整ができるようになっている。また、飛翔体および取付け台ともに金属製のため、金属同士の衝突によるノイズを軽減するために、飛翔体の衝突面に硬質ゴムをセットした。なお、実験状況を写真一2に示す。

### 2.2 供試体

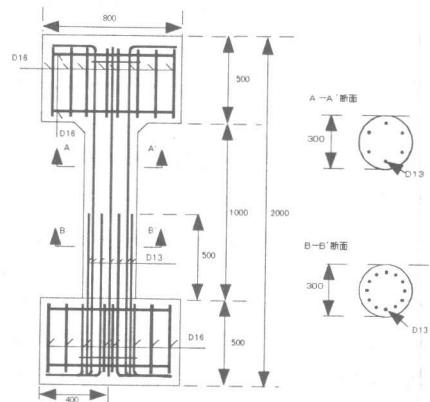
モデル化は、図一2 (a) のような実RC橋脚を (b) のようにした。具体的には、高さ  $10\text{m}$ 、直径  $3\text{m}$  の実RC橋脚の橋脚部（網掛け部）を約  $1/10$  程度の大きさに縮尺した。配筋は図一3のように段落しを有するものとし、軸方向鉄筋比を実RC橋脚のそれとほぼ等しいものとした。また、帯筋は現象を把握し易くするために今回は省略した。なお、供試体柱部には、実構造物とほぼ等しい初期圧縮応力（約  $0.69\text{N/mm}^2$ ）が加わるよう、図一2 (b) のように上部に重錘を取り付けた。コンクリートは粗



(a) 実RC橋脚

(b) モデル

図一2 モデル化



図一3 供試体の配筋

骨材最大寸法 20mm のものを、鉄筋は SD295B (D13) を使用した。なお、コンクリートおよび鉄筋の材料試験結果を表一に示す。

表一 コンクリートおよび鉄筋の材料試験結果

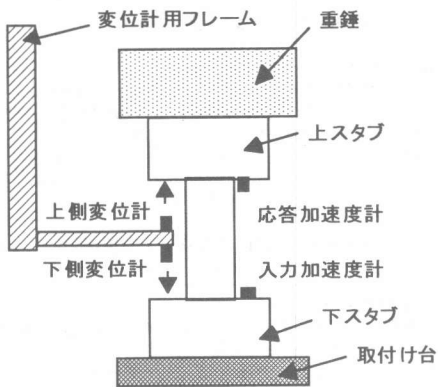
試験体	コンクリート (N/mm <sup>2</sup> )		鉄筋 (N/mm <sup>2</sup> )	
	圧縮強度	引張強度	降伏点	引張強さ
1 体目	23.1	2.05	365	521
2 体目	26.5	1.74	371	530

\*コンクリートの値は実験時のものである。

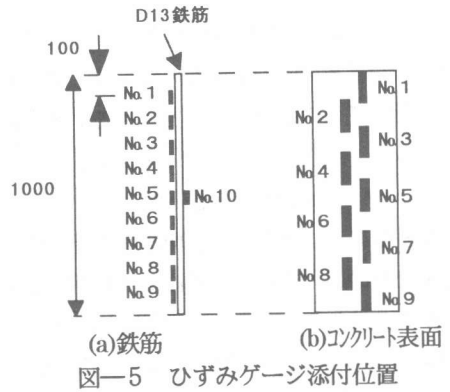
### 2.3 計測項目

図一四に加速度計および変位計のセット位置を示す。入力加速度は供試体柱部にできるだけ近い位置に加速度計 (±1,000G, 10KHz) を固定、応答加速度は入力加速度計の真上に加速度計 (±1,000G, 10KHz) を固定して計測を行った。変位は、不動点である写真一二のフレームを基準にして上下スタブ面の変位量をレーザー式変位計 (±100mm, 915Hz) で測定した。

図一五には、供試体柱部のコンクリートおよび鉄筋のひずみゲージ添付位置を示す。なお、実験計測のサンプリングタイムは 0.02ms とした。



図一四 測定位置

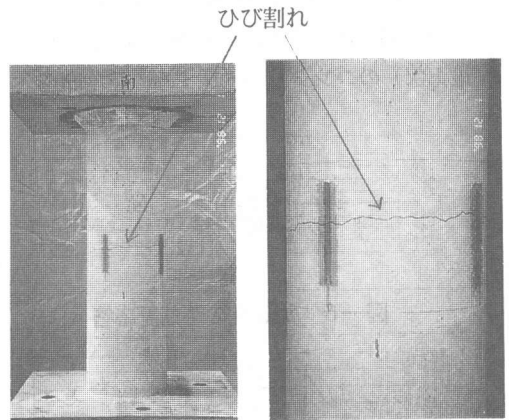


図一五 ひずみゲージ添付位置

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 水平輪切り状ひび割れの再現

今回の衝撃突き上げ実験は、2体の供試体について同一加力条件 (飛翔体衝突速度 5m/s) で行った。いずれの供試体も写真一三に示すように段落し部近傍に水平輪切り状ひび割れが発生しており、このひび割れ発生状況を見る限りでは、写真一三のひび割れが写真一に類似していることから、RC橋脚の水平輪切り状ひび割れの原因として衝撃的上下動の可能性もあると考えられる。



写真一三 水平輪切り状ひび割れの発生 (1体目の供試体の場合)

### 3.2 時刻歴応答

ここでは、①応力波の伝播状況を調べるため、②水平輪切り状ひび割れの発生メカニズムを調べるため、ひずみ等の時刻歴応答を(1)0~3ms

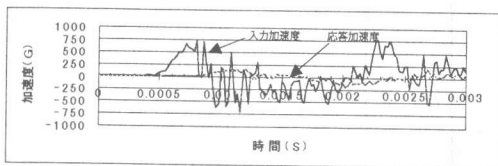
と(2)0~14msの2区分に分類して考察する。  
 なお、ひずみの時刻歴応答の縦軸は、マイナスが圧縮、プラスが引張を示している。また、 $G=980\text{cm/s}^2$ 、 $\text{kine}=\text{cm/s}$ である。

(1) 0~3msの時刻歴応答

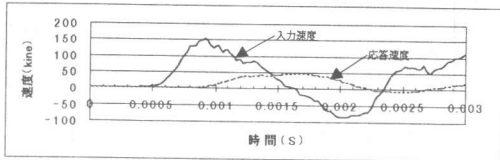
図一6に示すように応答加速度の最大値は入力加速度の最大値に対して約1/4程度と非常に小さな値となっており、加速度が供試体柱部中を伝わる間にかなり減衰していることがわかる。また、図一7の加速度を積分して求めた速度に関しても、加速度と同様に応答速度の最大値が入力速度の最大値に比べ約1/3になっている。

上側および下側変位に関しては、図一8に示すように若干ノイズが多いものの、まず下側変位が生じてから上側変位が発生しており、その時間差は約0.9ms程度となっている。上側変位と下側変位との差(相対変位)より求めた供試体柱部のひずみ(以下、平均ひずみと呼ぶ、 $\text{平均ひずみ}=\text{相対変位}/\text{供試体柱部の長さ}$ )を図一9に示す。平均ひずみは当初圧縮側に推移しており最大で約1,000 $\mu$ 程度を示している。

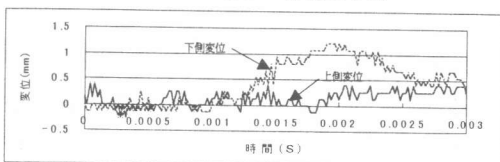
No.1(最上部)、No.5(中間部)およびNo.9(最下部)のコンクリートひずみの時刻歴応答



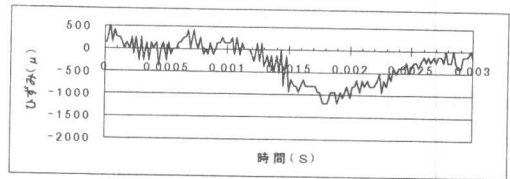
図一6 加速度の時刻歴応答



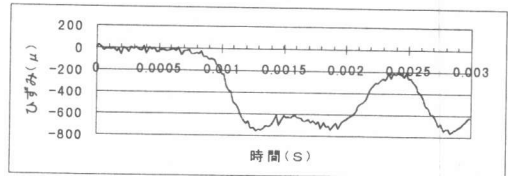
図一7 速度の時刻歴応答



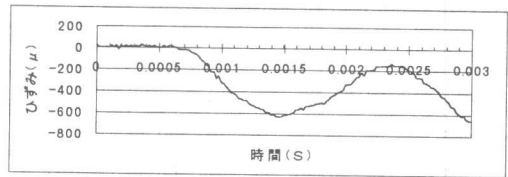
図一8 上側、下側変位の時刻歴応答



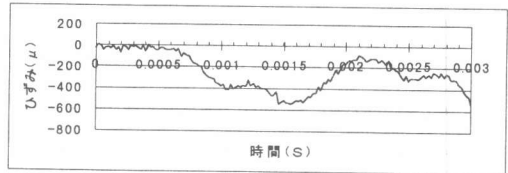
図一9 平均ひずみの時刻歴応答



(a)No. 1ゲージ(最上部)

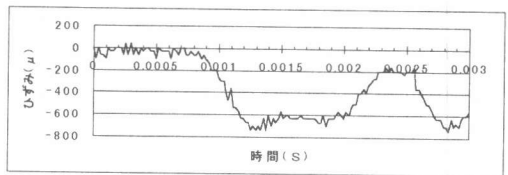


(b)No. 5ゲージ(中間部)



(c)No. 9ゲージ(最下部)

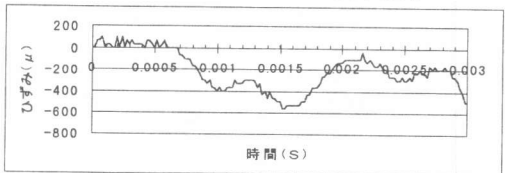
図一10 コンクリートひずみの時刻歴応答



(a)No. 1ゲージ(最上部)



(c)No. 5とNo. 10の平均(中間部)



(c)No. 9ゲージ(最下部)

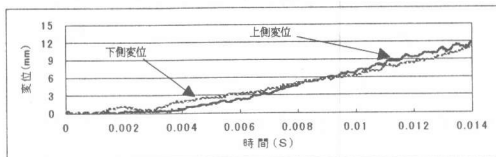
図一11 鉄筋ひずみの時刻歴応答

を図—10に示す。いずれのコンクリートひずみもまず圧縮を示し、ひずみの最大値は約 500~800 $\mu$ 程度を示しており、圧縮破壊が生じるひずみ値(約 2,000 $\mu$ )に比べ十分余裕があるものとなっている。

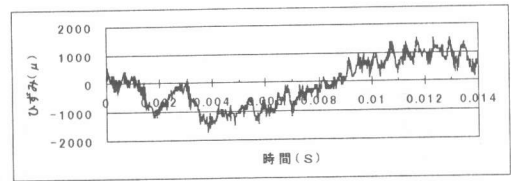
コンクリートのひずみの立ち上がりは、No.9(約 0.5 ms), No.5(約 0.7ms), No.1(約 0.8ms)の順になっており、No.9~No.1までの立ち上がりの時間差は約 0.3ms になっている。コンクリートの応力波の伝播速度は  $C = \sqrt{E/\rho}$  ( $E=2.50 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ,  $\rho=2.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )より約 3,300m/s となる。No.1~9までの長さを供試体柱部の長さ(1m)とした場合、No.1~No.9までコンクリート中を伝わる応力波の伝播時間は約 0.30ms になり、今回の結果と完全に一致しており、応力波の伝播が観察できる。なお、応力波の伝播については、3.3節にも詳細検討を述べる。また、図—11に示す鉄筋ひずみに関しても、コンクリートひずみと同様な傾向が観察できる。鉄筋ひずみの立ち上がり時間は、No.9(約 0.7ms), No.5と No.10の平均(約 0.75ms), No.1(約 0.85ms)の順になっており、No.9~No.1までの立ち上がり時間差は約 0.15ms である。鉄筋の応力波の伝播速度( $C = \sqrt{E/\rho}$ ,  $E=2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ,  $\rho=7.86 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ )約 5,000m/sより求めた応力波の伝播時間(約 0.2ms)とほぼ一致している。

## (2) 0~14msの時刻歴応答

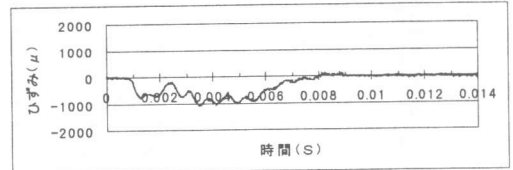
上側変位および下側変位は、図—12に示すように、約 8ms で下側変位より上側変位が大きくなっているのが観察できる。図—14(b)に示すように段落し部のコンクリートひずみは約 11ms で振り切れており、コンクリートひず



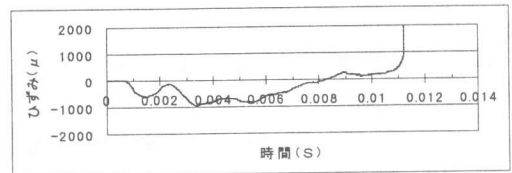
図—12 上側、下側変位の時刻歴応答



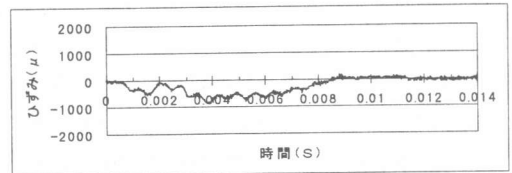
図—13 平均ひずみの時刻歴応答



(a)No.1ゲージ(最上部)

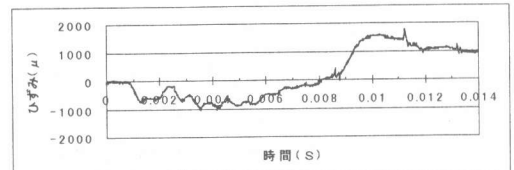


(b)No.5ゲージ(中間部)

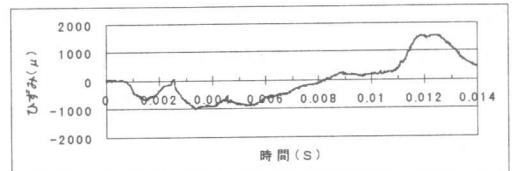


(c)No.9ゲージ(最下部)

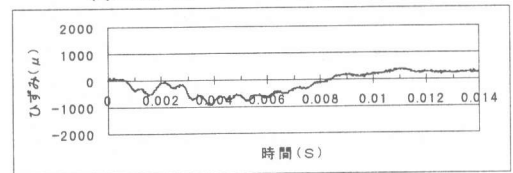
## 図—14 コンクリートひずみの時刻歴応答



(a)No.1ゲージ(最上部)

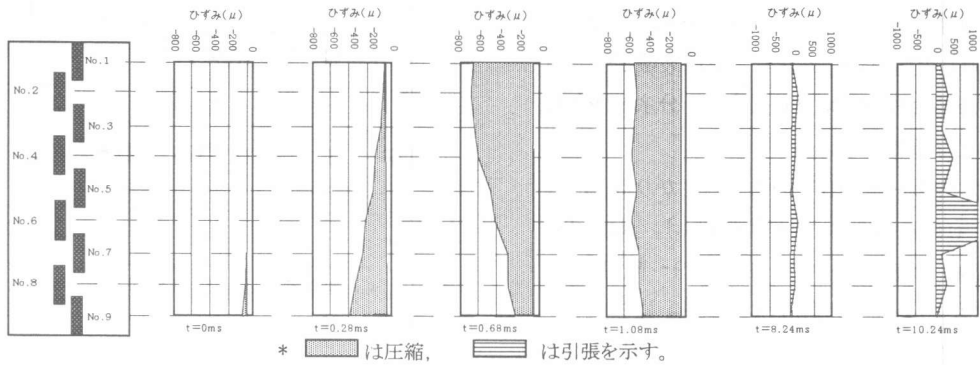


(b)No.5とNo.10の平均(中間部)



(c)No.9ゲージ(最下部)

図—15 鉄筋ひずみの時刻歴応答



図一 16 コンクリートひずみの分布

みが振り切れた時点つまり水平輪切り状ひび割れが発生した時点では、上側変位が下側変位より大きくなっている。また図一 13 に示す平均ひずみの波形は、図一 14 のコンクリートひずみの時刻歴応答、図一 15 の鉄筋ひずみの時刻歴応答とほぼ同じ形状を示しており、この時間長で見た場合、供試体全体が質点系の上下方向の第 1 次振動モードによって支配されている。すなわち、水平輪切り状ひび割れの主要因は、重錘の鉛直振動による引張力と考えられる。

### 3.3 コンクリートひずみの分布

図一 16 に No.9 のコンクリートひずみが立ち上がった時刻を基準にした、 $t=0\sim 10.24\text{ms}$  までのコンクリートひずみの分布を示す。

まず  $t=0\text{ms}$  では、No. 9 のひずみのみが生じており他のひずみ応答は見られない。続いて  $t=0.28\text{ms}$  では、No. 1 に  $t=0$  の No. 9 のひずみが到達しているのがわかる。3.2(1)でも説明したが、コンクリート中を応力波が伝播している様子がより明確に観察できる。続いて  $t=0.68\text{ms}$  では、応力波が反射、重複することによりひずみ値が上下逆転して No.1 の方が No.9 より大きな値となっている。この遷移期を終えた  $t=1.08\text{ms}$  では、ひずみが供試体全長に渡りほぼ均等になっており、3.2(2)でも述べたように、供試体が上下方向に単振動している状況が確認できる（ただし、波動も存在していると考えられる）。さらに、時間が経過するとひず

みが圧縮側から引張側へ移行して、最後に  $t=10.24\text{ms}$  で No.6 のコンクリートひずみが振り切れているのがわかる。

### 4. まとめ

約 1/10 の RC 橋脚モデルを使用して図一 1 の衝撃実験装置により衝撃突き上げ実験を実施し、以下の結果を得た。

- ①約 1/10 の RC 橋脚モデルに水平輪切り状ひび割れを発生させることに成功した。
- ②RC 橋脚の水平輪切り状ひび割れの原因として衝撃的上下動の可能性もあることが確認できた。
- ③供試体柱部を応力波が伝播する状況を観察できたが、波動による圧縮破壊は生じなかった。また、供試体柱部の挙動が波動から振動へ移行していることを確認できた。
- ④約 1/10 の RC 橋脚モデルの水平輪切り状ひび割れの発生メカニズムは、重錘の鉛直振動による引張力が主要因であると考えられる。

### 参考文献

- 1) 園田恵一郎ほか：阪神・淡路地震一初期震動の証言について、構造物の衝撃的破壊現象に関する学協会合同研究協議会、pp.20,1995
- 2) 別府万寿博ほか：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、pp.165-180,1997.10