

## 衝撃突き上げを受けるコンクリート柱の動的応答特性に関する理論的考察

THEORETICAL STUDY ON DYNAMIC RESPONSE OF RC COLUMN UNDER IMPUSIVE VERTICAL MOTION

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

Masuhiro BEPPU, Satoshi KATSUKI, Nobutaka ISHIKAWA and Ayaho MIYAMOTO

\*工修 防衛大学校研究員 土木工学科 (〒239-8686 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 (〒239-8686 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 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*\*\*工博 山口大学教授 知能情報システム工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2557)

キーワード：コンクリート柱，過渡振動，衝撃的上下動，波動論，振動論

(concrete column, transient vibration, impulsive vertical motion, wave propagation theory, vibration theory)

### 1. 緒言

1995年に発生した兵庫県南部地震においてRC橋脚の水平輪切り状ひび割れがみられた。このような損傷は衝撃的な上下動でも説明できるという考えも多く<sup>1)~5)</sup>、著者らもコンクリート柱供試体に対する衝撃突き上げ実験<sup>6), 7)</sup>を行い、RC橋脚と同様の水平輪切り状ひび割れの再現に成功した。また、衝撃突き上げ実験のシミュレーション解析を行った結果、この輪切り状ひび割れの発生メカニズムは、1質点系モデルで説明できることがわかった。すなわち、コンクリート柱供試体に上載した重錘に発生する引張慣性力が、コンクリート柱部に発生した輪切り状ひび割れの原因であることが明らかとなった<sup>7)</sup>。一方、その他の実験的研究として、大野ら<sup>4)</sup>は、水平衝突実験装置を用いてRC橋脚模型の引張、圧縮および引張・圧縮複合破壊の再現に成功している。また園田ら<sup>5)</sup>は、水中線爆装置によりRC橋脚模型に衝撃荷重を与え、供試体の引張および圧縮破壊を再現するとともに上載質量の影響などについても検討している。さらに原田ら<sup>8)</sup>は、実橋脚の1/10模型供試体に対して下方向から飛翔体を衝突させる衝撃突き上げ実験を行い、応力波の伝播から供試体の振動へと移行する現象を実験的に明らかにするとともにコンクリート柱の引張破壊の再現に成功している。このように、衝撃的突き上げによるRC橋脚模型の衝撃的破壊に関する再現は、それぞれの立場から

成功しているが、それぞれの実験において供試体に与える衝撃荷重が異なっていることからわかるように、RC橋脚模型の衝撃的破壊に関する考察は、大きく波動論的観点と振動論的観点に別れている<sup>9)</sup>。これらの実験研究を概観して整理すると、衝撃的上下動を受けるRC橋脚の挙動は、地盤から伝わる応力波の伝播から始まり構造系の振動へと移行する過渡振動と考えられるが、橋脚下端に入力された応力波の伝播から構造系の振動へと移行するメカニズムについては未だよくわかっていない現状にある。

そこで本研究は、このようなRC橋脚の動的応答特性についてはねー質点系モデル法を用いて理論的な検討を行ったものである。すなわち、衝撃的突き上げを受けるトップヘヴィーなコンクリート柱の過渡振動の特徴より、応力波系成分と上部工を模擬した1質点系モデルの振動系成分とに分離できることを見出し、この分離モデルを用いてRC橋脚の応答が波動場から振動場へと移行するメカニズムについて解明した。

### 2. トップヘヴィーなコンクリート柱の過渡振動の特徴

ここでは、単柱型で比較的重い上部工を持つようなRC橋脚が衝撃的な突き上げを受ける場合の基本的な挙動特性を把握するため、ばねー質点系モデル法により衝撃的突き上げを受けるトップヘヴィーなコンクリ

表-1 RC橋脚の解析定数

橋脚の弾性係数 $E$	$3.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$
断面積 $A$	$7.069 \times 10^4 \text{cm}^2$
密度 $\rho$	$2.5 \times 10^{-9} \text{N} \cdot \text{s}^2/\text{mm}^4$

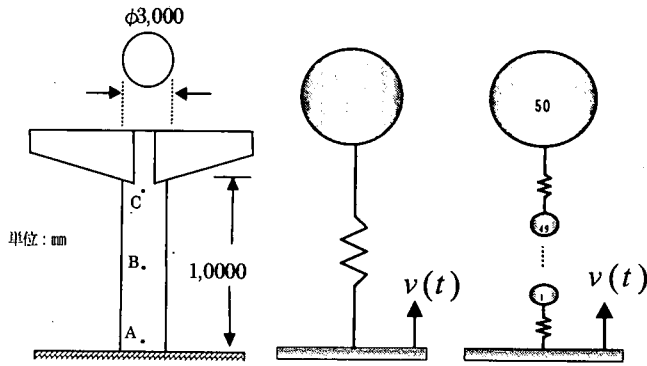


図-1 RC橋脚の概要 (a) 1質点モデル (b) 50質点系モデル

図-2 橋脚のモデル化

一ト柱の過渡振動特性について検討する。まず、橋脚部分を多質点系モデルで離散化したうえで、モデル最上部の質点（以下、上部質点という）に上部工の質量分を加えたトップヘヴィーなコンクリート柱モデルを作成し、このモデル下端に衝撃的上下動を作用させて衝撃応答解析を行い、その過渡振動の特徴について考察する。

## 2.1 解析対象としたRC橋脚と入力条件

解析の対象としたRC橋脚は、図-1に示すような衝撃突き上げ実験<sup>6)</sup>で想定した高さ10m、直径3mの円形断面を有する橋脚とした。解析モデルは図-2のようにはね一質点系でモデル化し、モデルの要素分割数については、振動応答の基本となる1自由度系とより複雑な挙動を示す多自由度系を比較するため、1質点系と50質点系モデルにより解析を行った。ここで、上部工は橋脚と剛接状態にあるものと仮定し、上部工重量  $M$  については  $1.5 \times 10^4 \text{kN}$  とした。なお、計算の時間刻みについては、1質点系、50質点系モデルのいずれについても Courant 条件を満足するように  $\Delta t = 1.0 \times 10^{-7} \text{s}$  とした。表-1に解析定数を示す。入力波形は、衝撃的な上下動を連続した定常波ではなく孤立した一波と想定し、物理的な意味がわかりやすい  $\sin$  半波の速度を解析モデルの下端に与えた。すなわち、モデル下端には速度  $v(t)$  に相当する応力 ( $\sigma = -\rho c v(t)$ ) が時々刻々入射されることになる。この速度関数は次式で表わされる。

$$v(t) = v_{\max} \sin \omega_0 t \quad (0 \leq t \leq \pi / \omega_0) \quad (1)$$

ここで、 $v_{\max}$  : 最大入力速度、 $\omega_0$  : 入力の固有円振動数、 $T_0$  : 入力時間。

したがって、入力加速度  $\alpha(t)$  および入力変位  $u(t)$  は次式で表わされる。

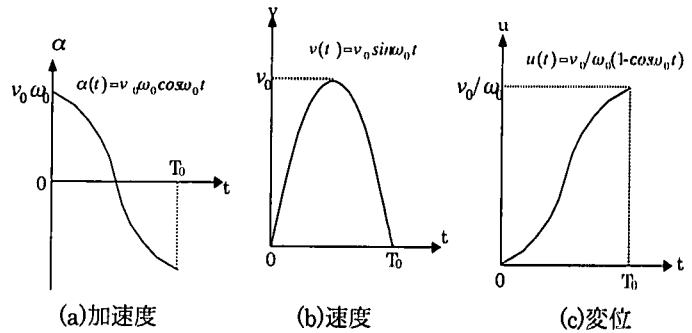


図-3 解析に用いた入力特性

$$\alpha(t) = \alpha_{\max} \cos \omega_0 t = v_{\max} \omega_0 \cos \omega_0 t \quad (2a)$$

$$u(t) = u_{\max} (1 - \cos \omega_0 t) = v_{\max} / \omega_0 (1 - \cos \omega_0 t) \quad (2b)$$

図-3に入力に用いた加速度、速度、変位波形の概要を示す。また、入力の固有円振動数と最大速度は次のようになる。

$$\omega_0 = \pi / T_0 \quad (3a)$$

$$v_{\max} = \alpha_{\max} / \omega_0 \quad (3b)$$

ここでは、最大加速度を  $2G$  ( $\alpha_{\max} = 1960 \text{cm/s}^2$ ) とし、トップヘヴィーなコンクリート柱の過渡振動について検討する。

## 2.2 衝撃的な上下動を受けるRC橋脚の過渡振動の特徴

一般に、調和関数の外力を受ける1質点系モデルでは、外力の周期がモデルの固有周期と等しい場合に、質点の応答変位、要素の発生応力は最大になる。一方、波動論的観点に立つと、先に解析した等密度、等断面の棒などの場合は、固定端で応力波の反射、干渉がある場合に最大応力を示すが、ここで対象としているトップヘヴィーなモデルの場合の応答は不明である。

いま、本解析モデルの時間的特性に着目すると、1次固有周期  $T$  は  $T = 2\pi \sqrt{M/K} = 0.053 \text{s}$  で、波動伝播速度  $c$  は  $c = \sqrt{E/\rho} = 3436 \text{m/s}$  となり、モデル下端から入力された応力波が上部質点に伝わる時間は約  $0.00288 \text{s}$  ( $2.88 \text{ms}$ ) となる。ここでは、トップヘヴィーな構造の過渡振動特性が現出しやすいように、入力時間  $T_0$  を固有周期  $T$  の  $1/10$ 、すなわち  $T_0 = 0.1T$  ( $T_0 = 0.0053 \text{s}$ )

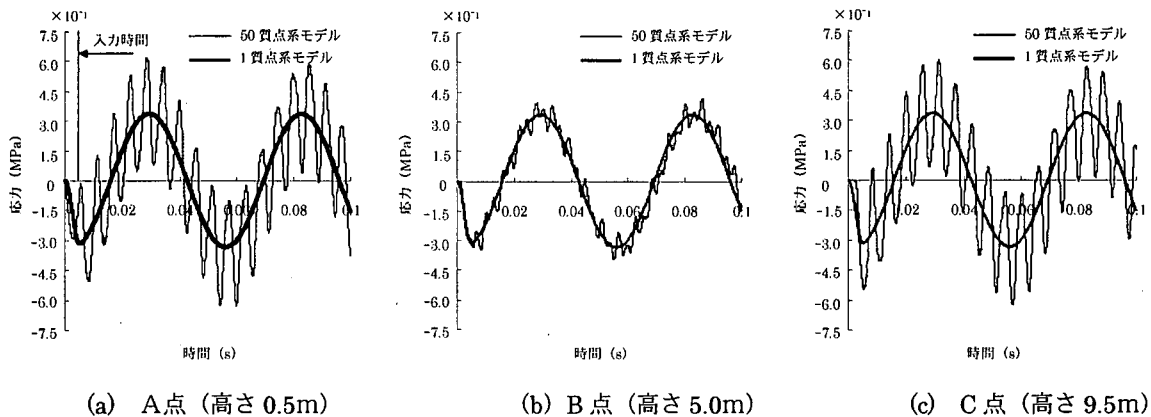


図-4 応力～時間関係

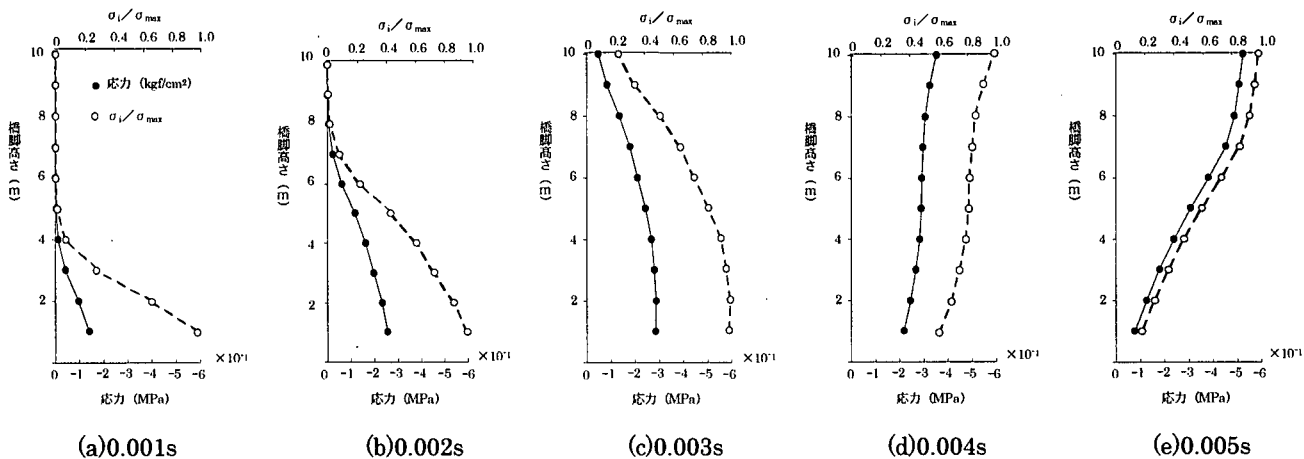


図-5 応力分布の推移

と極めて衝撃的な現象とした。したがって、式(3b)より最大速度  $v_{max}$  は 3.3cm/s となる。

図-4 に A (高さ 0.5m), B (高さ 5.0m) および C (高さ 9.5m) 点 (図-1 参照) における応力～時間関係をそれぞれ示す。図-4 より、50 質点系モデルの応力は、1 質点系モデルの応力値を中心に等振幅の高周波振動が確認できる。この最大応力は、A、C 点で約 0.6MPa と小さく、また高周波成分の振幅は約 0.3MPa で、ピークの間隔は応力波が柱を伝播する時間の約 2 倍 (0.0058s) であることがわかる。ここで、最大入力速度  $v=3.32\text{cm/s}$  に対応する最大応力を求めると、応力波振幅の算定式  $\sigma = |\rho cv|$  より 0.282MPa となる。

すなわち、A、C 点における高周波成分の応力振幅は、入力された最大応力とほぼ等しいことがわかる。また、A、B、C 点の波形を比較すると、モデル下部の A 点、上部の C 点に比べて中央部の B 点の波形は高周波成分の振幅が小さいことがわかる。この理由については、3. で詳細に検討する。

図-5 に応力分布の時刻歴を示す。この場合、入力が

完了するまで ( $T_0 = 0.0053\text{s}$ ) に波長  $\lambda = c \cdot T_0 = 18.55\text{m}$  の応力波が柱内に入射されるが、この長さは柱高さの約 2 倍であり、突き上げ直後の柱には図-5 に示すような軸方向の応力分布が生じる。まず図-5(a), (b) より、モデル下端から入射された応力波が柱上方へと伝達している様子がわかる。図-5(c) は、応力波が柱上端に到達した直後の様子を示しており、柱内にはこの時間までに入力した速度波形と同様の応力分布 ( $\sigma = -\rho cv(t)$ ) が確認できる。また図-5(d), (e) では、柱上端部において応力が増幅しており、特に図-5(e) は入力がほぼ完了した時間であるが、応力分布の形状は固定端反射に近い形で増幅していることから、突き上げ直後の柱上端では固定端反射に近い現象が生じていると思われる。また、図-5(e) における A、B、C 各点の応力値と図-4 の応力の時刻歴を比較すると、時刻歴波形にみられる高周波成分は応力波に起因していると考えられる。

また、上部質点の速度時刻歴を入力速度と比較して図-6 に示す。これより、応力波が柱上端に到達する時間 0.003s までは、上部質点は速度をもたず、応力波が柱上端に到達した直後に上部質点は速度をもって動き

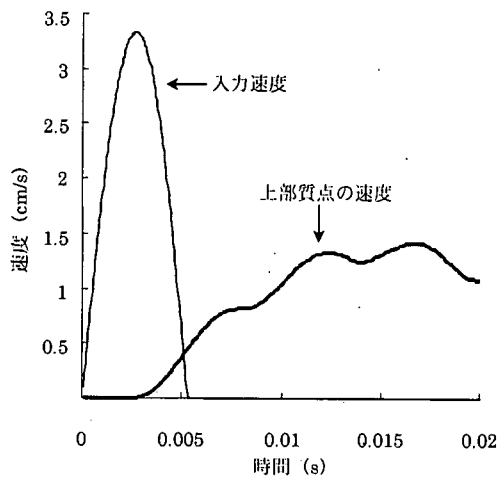


図-6 入力速度と上部質点の速度～時間関係の比較

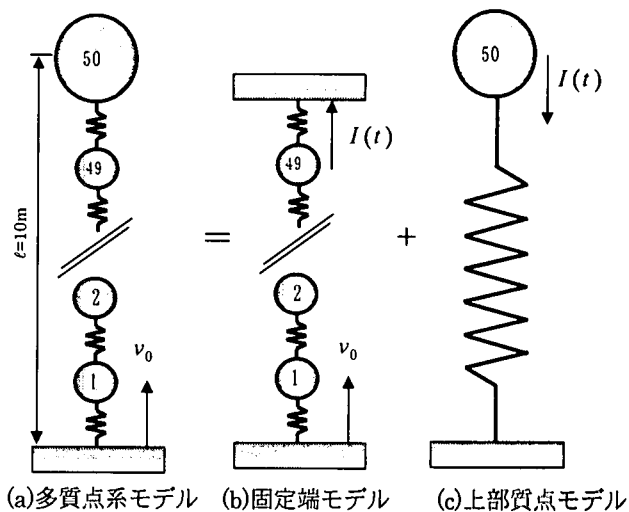


図-7 応力波系と振動系の分離モデル

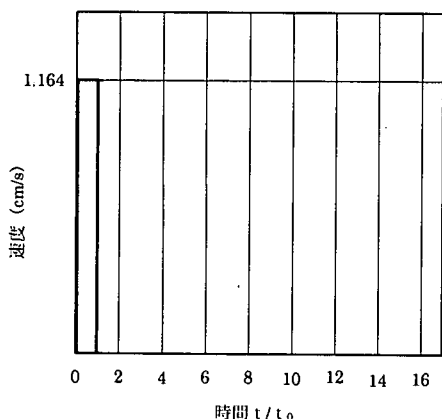


図-8 固定端モデルに入力した速度～時間関係

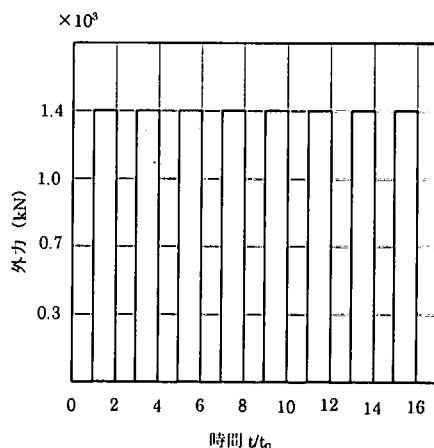


図-9 上部質点モデルに入力した力積

だしている。また、応力波が柱を往復する時間間隔ごとに小さな山なりが観察できる。これより、応力波が上部質点に到達する時間に上部質点がいくらかの速度を得ていることがわかる。そこで、この上部質点のみに運動量保存則  $M \Delta v = F \Delta t$  を当てはめて考えてみると、柱上端に到達した応力波による軸力  $N (= F)$  が上部質点  $M$  へ力積を与えることで、上部質点に力積  $I = N \Delta t$  に対応した速度  $\Delta v = N \Delta t / M$  が生じたことを示している。

### 3. 応力波系と振動系の分離モデルの提案

以上のトップヘヴィーなコンクリート柱の過渡振動の特徴より、応力波が柱上端に到達すると、固定端反射に近い現象を示すこと、また応力波による軸力と上部質点の間に運動量保存則が成り立つ可能性が推察された。そこで、図-7(a)の多質点系モデルを図-7(b)のように柱部分をばね-質点系で離散化した固定端モデル

(応力波系)と図-7(c)のような上部質点のみをもつ上部質点モデル(1質点系モデルによる振動系)に分離するモデルを考える。ここで入力速度は、簡単のためパルス波とし、その大きさは単位の圧縮応力波  $\sigma = -1.0 \text{MPa}$  が入射されるように  $v_0 = -\sigma / \rho c$  より、 $v_0 = 1.164 \text{cm/s}$  とした。固定端モデルと上部質点モデルの入力については、まず固定端モデルは多質点系モデルと同様の速度パルスモデル下端を入力する。一方、上部質点モデルには、固定端モデルにおいて応力波が固定端に与える力積  $I$  を与えた。したがって、固定端モデルは応力波の伝播過程を、上部質点モデルは応力波に起因する上部質点の振動状態を表わすことになる。

本モデルの妥当性を検証するための基本的な例として、図-8に示す速度パルスで、入力時間  $t_0$  については応力波が柱高さ  $l$  を伝播する時間  $t_0 = l/c$  と短い時間の場合を考える。この速度パルスを固定端モデル下端に入力すると、固定端に反力として生じる力積は式(4)

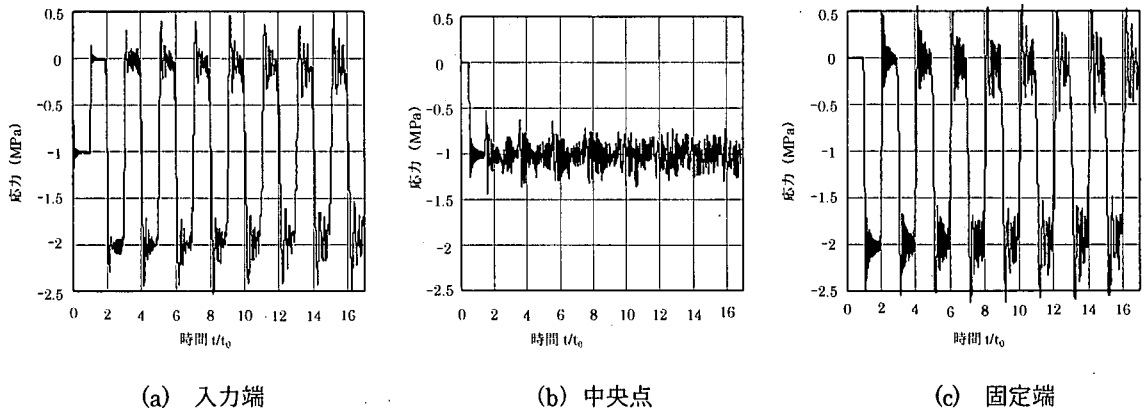


図-10 固定端モデルの応力～時間関係

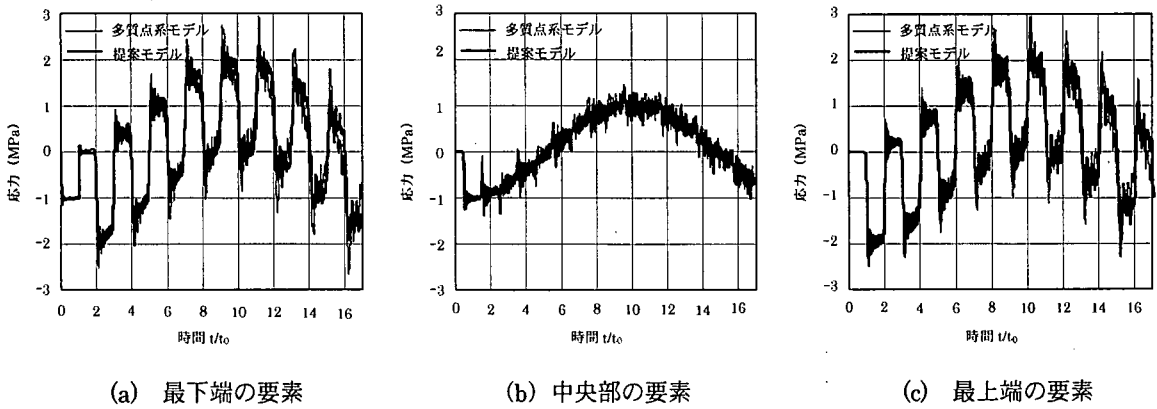


図-12 多質点系モデルと提案モデルの比較（応力～時間関係）

および図-9のようになり、これを上部質点モデルに与えた。

$$\frac{2n-1}{2}t_0 \leq t \leq 2nt_0 \quad (n=1,2,\dots) \text{ において,}$$

$$I = Pt, \quad P = 2\sigma A \quad (4)$$

ただし、 $I$ ：柱上端の固定端反射で生じる力積、 $\sigma$ ：柱に入力される応力、 $A$ ：柱の断面積、 $t_0 = \ell/c$ ：応力波が柱高さ $\ell$ を伝播する時間、 $\ell$ ：柱の高さ。

図-10に固定端モデルの下端、中央点および固定端に生じた応力～時間関係を示す。まず図-10(a)より、モデル下端に時間 $t_0 = \ell/c$ の間入射された応力 $\sigma = -1.0$  MPaは、 $2t_0$ では固定端反射して $2\sigma$ となり、 $2t_0$ 以降は、同様の反射、干渉が繰り返され、数値誤差による高周波成分が大きくなる傾向はあるが、理論とよく一致している。また、図-10(c)の固定端では、時間 $t_0$ で固定端に到達した応力波は固定端反射して2倍となり、その後は $2t_0$ を周期とした応答を示しており、これも理論解とよく一致している。図-10(b)の中央点では、時間 $t_0/2$ で伝達した応力波は最後まで $\sigma = -1.0$  MPaを維持している。これは、柱に入力される応力波の波長が柱高さと同しいため、固定端反射した波頭と反射前

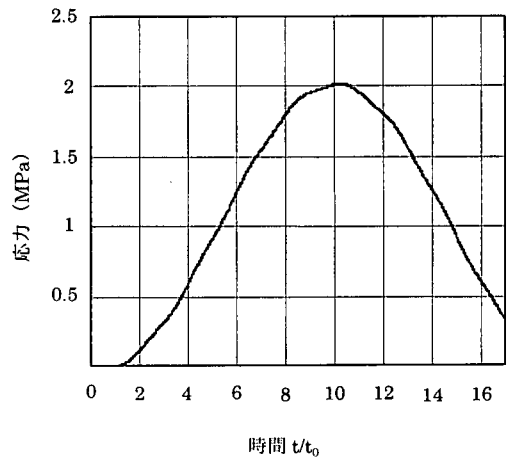


図-11 上部質点モデルの応力～時間関係

る波の最後尾は柱の中央点において重ならないためである。

次に上部質点モデルによる応力～時間関係を図-11に示す。これより、力積が作用した直後に応力が発生し、固有周期 ( $T = 0.0534$ s,  $T/t_0 = 18.54$ ) で振動していることがわかる。また、固定端モデルでは圧縮応力のみが生じるのに対して、上部質点モデルでは引張応

力が生じていることは興味深い。これは、式(4)、図-7(b)、図-9より、固定端モデルで得られる負の圧縮外力 $P$  ( $P = 2\sigma A = -2\rho cvA$ )を図-7(c)の上部質点モデルの下方に作用させるので、上部質点に与える外力は図-9のように正の値となるためである。以上より、図-10と図-11を重ね合わせると図-12が得られる。ここで、図-12には多質点系モデルによる応力～時間関係も比較して示している。これより、提案モデルは多質点系モデルとよく一致しており、提案したモデルは妥当であると考えられる。また中央点の応力波形は、先に述べたように単位の応力波のみ存在しているため応力波の振幅がモデル下端、上端に比べて小さくなっており、図-4(b)と同じ傾向を示していることがわかる。すなわち柱中央点では、応力波の重複の影響が小さいために高周波（応力波系）成分が現出しにくいものと思われる。

以上の解析結果より、衝撃的突き上げを受けるトップヘヴィーなコンクリート柱が波動場から振動場へと移行するメカニズムは、応力波が上部質点に与える力積により上部質点に速度が生じて1次の振動モードが励起され、波動場と振動場が混在することがわかる。

#### 4. 結言

本研究は、衝撃的突き上げを受けるトップヘヴィーなコンクリート柱の過渡振動特性より、応力波系と振動系とに分離できるモデルを提案し、RC橋脚の挙動が波動場から振動場へと移行するメカニズムを明らかにしたものである。本研究の成果をまとめると以下のようなになる。

- (1) トップヘヴィーなコンクリート柱に  $\sin$  半波の速度を入力し、柱の過渡振動特性を調べた。その結果、50質点系モデルの応力の時刻歴波形に高周波成分が現れ、また柱下端から入力される応力波が上部質点に到達すると固定端反射に近い現象を示すことがわかった。
- (2) トップヘヴィーなコンクリート柱の過渡振動特性から、固定端モデル（応力波系）と上部質点モデル（振動系）とに分離する分離モデルを提案し、そのモデルの妥当性を検証した。
- (3) 提案した分離モデルにより、RC橋脚の応答が波動場から振動場へと移行するメカニズムを検討した結果、応力波が上部質点へ与える力積により上部質点に速度が生じて1次振動が励起され、波動場と振動場が混在することがわかった。

#### 参考文献

- 1) 園田恵一郎, 小林治俊, 永野圭: 兵庫県南部地震—初期上下動の証言について—, 大阪市立大学工学部紀要・震災特別号, pp.187-270, 1997.1.
- 2) 当麻庄司, 河村廣: 兵庫県南部地震の衝撃に対する被災者の意識調査, 第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.189-194, 1996.6.
- 3) 竹宮宏和, 堀内深: 衝撃的地震動によるRC構造物の引張破壊現象の可能性, 第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.133-138, 1996.6.
- 4) 大野友則, 喜多龍一郎, 藤掛一典: 軸方向に衝撃力を受けるRC円柱試験体の圧縮破壊メカニズムに関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 584/I-42, pp.229-242, 1998.1.
- 5) 園田恵一郎, 高田直俊, 石丸和宏, 林道廣, 奥田洋一: 水中線爆装置による高架橋RC橋脚モデルの衝撃破壊実験, 第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.251-256, 1998.6.
- 6) 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.
- 7) 別府万寿博, 香月智, 石川信隆, 宮本文穂: 衝撃的上下動を受けるコンクリート柱供試体の鋼板巻立て補強効果について, 土木学会論文集, No. 620/V-43, pp.215-231, 1999.5.
- 8) 原田耕司, 石川信隆, 香月智, 太田俊昭: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 21, No. 3, pp.1237-1242, 1999.7.
- 9) 大津政康: “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”への討議, 土木学会論文集, No. 605/I-45, 295-300, 1998.10.