

## [討議・回答]

原田耕司  
石川信隆  
香月 智 共著  
太田俊昭  
日野伸一

# 「下方向からの衝撃力を受ける RC 柱の波動場から振動場への移行状態に関する実験的研究」への討議・回答

(土木学会論文集, No. 662/V-49 2000 年 11 月掲載)

## ▶ 討議者 (Discussion)

大津政康 (熊本大学)

Masayasu OHTSU

## 1. はじめに

本論文は、衝撃的な上下動によるコンクリート構造物、特に RC 橋脚の破壊現象の解明に関する一連の研究<sup>1)</sup>の最新の成果がまとめられたものである。このために特別な載荷装置を開発され、実験的ならびに解析的に研究を遂行されており、その真摯な研究への取組みに敬意を表するものである。しかし、これまでの成果の総括と本論文のまとめに当たっての考え方に討議者と異なる見解あるいは、不明瞭と思われる議論がなされていることより、討議をお願いする。

## 2. 波動と振動の概念について

土木工学での従来からの教育・研究では、波動学はあまり馴染みの無い分野と言える。そのために不明確で不適切な議論がなされることも少なくない。この振動と波動の区別については、前報に対する討議<sup>2)</sup>において、筆者の概念を明確にし、波動と振動の違いを議論させていただいている。

筆者等の論点では、論文題目にあるように振動場から波動場への移行として、同じ現象を時間経過によって分けられ波動場を振動的応答が励起する以前の極めて短時間の波動伝播と定義されている。しかし、これは物理的に正しい定義なのでしょうか。ここで研究されているのは、下方向からの衝撃力を受ける RC 部材の非定常状態から定常状態への応答の実験的および解析的な検討に他ならない。非定常場を波動、定常場を振動と定義するような科学的な根拠は存在しないと考えられる。波動と振動の違いは、前報<sup>2)</sup>に述べたとおり、支配方程式の定式化によるものである。ある系全体を質点系でモデル化した場合の工学的な取り扱いが振動場であり、論文で実際に研究されている実験および解析ともに、検討されているのは全て波動場であ

る。このような概念を普遍的なものとして論文題目を含めて提示されることに問題はないのでしょうか。

以上の論点に関連しての表記の誤りを 1 件指摘します。表-5 中にコンクリートと鉄筋中の弾性波 (P 波) の伝播速度が示されているが、弾性体中の P 波の伝播速度  $v$  は、弾性波動論に従えば次式で与えられる。

$$v = [(1-\nu)(1-2\nu)E / \{\rho(1+\nu)\}]^{1/2} \quad (1)$$

ただし、 $\nu$  はポアソン比、 $E$  はヤング率、 $\rho$  は密度である。これに対して表中の式、

$$v = [E/\rho]^{1/2} \quad (2)$$

は、1 次元部材を仮定した場合の特殊なものであり、これを実験での材料の特性値として表記されることおよび解析に使用されることは問題があると考えられます。

## 3. 衝撃的な上下動の影響について

本論文の「はじめに」でも書かれているとおり、一連の特別な載荷装置による研究は、阪神・淡路大震災でのコンクリート橋脚の被害が、衝撃的な上下動の影響<sup>3),4)</sup>であるかどうかを解明するためであったと理解している。それについては、筆者は前回の討議<sup>2)</sup>で否定的な見解を述べさせていただいたが、討議への回答では研究成果は肯定的であると述べられていた。しかし、本論文では非定常状態ではひび割れは発生せず、定常場において共振現象により引張破壊が発生したと結論付けられている。このことは、例えば入力波動の上縁での反射波とさらなる入力波の干渉が部材中に生じることによって、ひび割れが発生したとするこれまでの衝撃的な上下動の影響を否定する結果と理解できる。したがって、論文中には明確には記載されていないが、衝撃的な上下動が阪神・淡路大震災での大きな被害の原因であろうとする考え方は完全に否定されたと判断されるが、よろしいでしょうか。

#### 4. 共振現象としての動的破壊

図-17に明確に現れているが、初期の非常常場の波長の長い入力波は、その後減衰し、供試体内には定常共振が発生するようになる。このときの引張応力の集中によって、非常常場では発生しないが、定常場では輪切り状のひび割れが発生したと議論されている。この結果によって、上下動の破壊への影響は確認されたとされている。しかし、筆者等の別の研究成果<sup>5)</sup>によれば、橋脚の棒部材としての共振振動中の内部応力の発生は、縦振動モードに比べて曲げモードによるものが数オーダー大きく、実際の地震時の橋脚の一般的な運動を考えれば、上下動の影響はむしろ曲げ振動に比べて、無視できる程度ではないかと考えざるを得ない。したがって、存在の可能性までも否定するものではないが、衝撃的な上下動のみがひび割れの発生原因ではなく、水平動の影響がさらに大きく影響していると考えるのが一般的と思われるが、同意されるでしょうか。

#### 5. おわりに

以上、論文の内容について質問と討議を御願いましたが、筆者の意図は本論文の価値を問うものではない。

(2001.1.25 受付)

▶回答者 (Closure) ————— 原田耕司 (西松建設㈱)・石川信隆 (防衛大学校)・香月 智 (防衛大学校)  
・太田俊昭 (九州大学)・日野伸一 (九州大学)  
*Koji HARADA, Nobutaka ISHIKAWA, Satoshi KATSUKI, Toshiaki OHTA and Shinichi HINO*

#### 1. はじめに

著者らの論文に対して貴重なご討議を頂き、深く感謝申し上げます。

今回の著者らの研究は、前回<sup>1)</sup>と同じく兵庫県南部地震の被災例で見られたRC橋脚の水平輪切り状ひび割れ現象の解明に関する実験的研究である。今回もRC橋脚の輪切り状ひび割れの原因が衝撃的上下動によるものであるとの見解に立ち、新たに下方向から衝撃力を与える大型衝撃振動台を開発して実験した。

前回の実験と異なる点は、以下のとおりである。

1) 前回の衝撃力の入力方法は、ある設定速度で強制変位を与え、ある変位でストッパーにより急ブレーキ(制動)がかかる強制変位入力であるのに対し、今回の衝撃力の与え方は、下方向から上方向へ飛翔体(重量39 kN)を最大衝突速度10 m/sで供試体の下

むしろ、これまでにあまり注目されなかった波動問題の重要性を動的な破壊現象の解明に関連して明示されたこと、現象解明のために特別な載荷装置を開発されたことなど、先駆的な成果の盛り込まれたよい研究であると考えている。ただし、本討議で指摘させていただいた論点と疑問は、多くの読者にも明確に認識されていないものと考え、貴重な成果における論点を明らかに示していただくために討議を申し込ませていただいた。

#### 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年10月.
- 2) 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. 60/I-45, pp. 295-297, 1998年10月.
- 3) 竹宮宏和, 堀内 深: 衝撃的次振動による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講演論文集, pp. 133-138, 1996年6月.
- 4) 小野紘一: 道路橋脚の被害とそのシミュレーション, コンクリート工学, Vol. 11, pp. 53-55, 1996年11月.
- 5) 渡辺 健, 大津政康, 坂本健俊: 鉄筋コンクリート柱の高周波数振動と破壊挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, pp. 363-368, 1997年6月.

面の取付け台に衝突させる物体の衝突入力である。つまり今回の実験は、RC柱の上に上載荷重として重錘(49 kN)を載せ、下から39 kNの飛翔体を衝突させた縦衝突問題である。

2) 前回の供試体の大きさは、実物のRC橋脚(高さ10 m, 直径3 m)を想定して約1/30のモデル(高さ33 cm, 直径10 cm)の小型であったのに対し、今回の供試体は、約1/10のモデル(高さ1 m, 直径30 cm)のやや大型となっている。

3) よって、前回の研究目的は、どの程度の変位速度のときに輪切り状ひび割れが生じるかという入力変位速度に着目したのに対し、今回は輪切り状ひび割れが衝突直後の応力波による波動伝播によって生じたのか、あるいはその後の系全体の振動によるものなのかについて、その現象発生メカニズムを調べようとしたものである。

## 2. 波動と振動の概念について

まず波動と振動の定義についてであるが、著者らは「波動」とは空間的・時間的に変化するある波動量(変位、ひずみ、応力など)をいい、「振動」とはある位置での時間的に変化する振動量(変位、ひずみ、応力など)と考えている。

次に、衝撃力を受ける構造物の応答は、一般に一次応答と二次応答に分けられる<sup>2)</sup>。「一次応答」とは、衝撃直後の極く短時間内に発生する局所的な「応力波の伝播による応答」であり、「二次応答」とは、その後しばらく経ってから発生する全体的な「弾塑性変形応答」である。今回の論文では、この一次応答を「波動場」と称し、二次応答を「振動場」と称して、このことを本文中の3.(3)で定義したつもりである。

ここで、横衝撃を受けるはりの場合は、載荷点近傍の局部応答(一次応答)とはり全体の弾塑性変形応答(二次応答)が区別し易いが、縦衝撃を受ける柱の場合は、局部応答と全体応答が区別しにくい。そこで、今回は敢えて一次応答を波動場(応力波の伝播が支配的な時間帯)と定義し、二次応答を振動場(応力波が減衰して系全体の振動が卓越する時間帯)と定義して区別した。

しかし、この二次応答つまり系全体の応答である「振動場」の説明が若干本文中で不足していたために、誤解を招いたのではないかとお詫びする。すなわち、もしRC柱の上端が完全固定の場合は、振動状態が起り得ず応力波の伝播による波動場のみとなる<sup>3)</sup>。しかし、今回の供試体のように1質点系モデル(上部スタブと上載荷重の合計重量49kNを一つの質点として柱をバネと考える)と仮定することができる。すると、本文図-14(c)のように系全体の応答を示す平均ひずみ(バネの伸縮を示す)の時刻歴応答とNo.5のひずみがほぼ一致する状態になり、これより系全体の振動状態つまり「振動場」が約4ms以降始まっていると考えられる。すなわち、供試体の上変位が動きはじめるのは、図-12(c)を見ると約2msであるが振動を始めるのは約4ms以降と思われる。そこで図-17のように応力波が定常状態になったときから系全体の応答つまり二次応答を「振動場」とみなしたのである。

表-5中の一次元波動論の伝播速度の式は、波動場と振動場を区別するために基本値として示したものであり、厳密には討議者のご指摘のとおり3次元波動論による式(1)の伝播速度の式が正しいと考える。

## 3. 衝撃的上下動について

本論文中に述べたように、波動場(一次応答)つまり応力法の伝播が卓越する時間帯(約3ms以内)では輪切り状ひび割れは発生しない。しかし、この時間帯で図-11に示したように輪切り状ひび割れのきっかけのような損傷を波動場で生じさせていることを観察している。よって、それを起点として振動場に移行(約4ms以降)してから、輪切り状ひび割れが発生することを確認した。したがって、著者らは、衝撃的上下動(一次応答と二次応答を含む)がRC橋脚の輪切り状ひび割れの原因であると考えていることに変わりはなく、ただ二次応答の「振動場」に移行してから生じたと結論したまでである。このことは、本文の結論⑥で述べたとおりである。

## 4. 共振現象としての動的破壊

著者らの輪切り状ひび割れの発生原因は、すでに(本文でも)述べたとおり、下からの衝撃的な力を受けたRC柱が波動場においてひび割れのきっかけを生じ、それが起点となって振動場において慣性力による引張りにより生じたと考えている。

討議者の見解は、輪切り状ひび割れの原因を水平動による曲げ振動によって生じたとしているが、その場合本文の写真-1のようなRC橋脚の損傷(これを輪切り状ひび割れと称している)が水平振動によって生じたとする解析的・実験的検証が必要と思われる。すなわち、写真-1は極めて軸対称性を有する損傷形態が得られているが、非対称なランダム波の水平地震動を受ける場合、どのような解析的条件においてそれが可能となるのか、手放しに水平振動によって再現できるとする条件を提示することは困難ではないかと考える。

## 5. むすび

著者らの拙文に対し注目していただき、討議者に再度お礼を申し上げます。また説明不足の点および著者らの知識不足により誤解を招いたことをお詫び致します。

なお、討議の範囲を超えるが、地震発生直後の衝撃的上下動によって発生した輪切り状ひび割れが、その後に来る水平動に対しどの程度水平耐力に影響を与えるかについて、模型実験により調べたので、ご関心が

あれば文献 4) を参照して頂ければ幸いです。

#### 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 年 10 月.
- 2) 土木学会: 構造物の衝撃挙動と設計法, 構造工学シリーズ 6, p. 64, 1993 年.
- 3) 別府万寿博, 香月 智, 石川信隆, 宮本文穂: 衝撃的突き上げを受けるコンクリート柱の過渡振動に関する基礎的考察, 構造工学論文集, Vol. 46 A, pp. 1893-1904, 2000 年 3 月.
- 4) 原田耕司, 石川信隆, 香月 智, 太田俊昭: 衝撃的上下動により水平輪切り状ひび割れを生じた RC 短柱の動的水平耐力に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, Vol. 12, No. 2, pp. 27-40, 2001 年 5 月.

(2001.8.22 受付)