

論文 鉄筋コンクリート柱の高周波数振動と破壊挙動の考察

渡辺健*1・大津政康*2・坂本健俊*3

要旨: 阪神淡路大震災では多くの鉄筋コンクリート柱に被害が認められた。この原因については様々な角度から究明がなされているが、衝撃的な外力としての高周波振動の影響が言及されている。そこでこれについて上下動の影響を含めて明らかにするために、鋼球落下試験とBEM解析を行った。その結果、鉄筋コンクリート柱に働く高周波成分の影響は、水平力による変形が卓越しており、それにとまなう曲げによる引張りひ割れの形成が認められた。また内部応力の偏差応力成分が増大している箇所破壊が生じていることが認められた。

キーワード: 高周波数振動、相似律、鋼球落下試験、境界要素法

1. はじめに

阪神淡路大震災では多くの鉄筋コンクリート柱に認められた。これらの被害の原因の一つとして衝撃的な外力である高周波数振動の上下動の影響が言及されている[1]。そこで、実構造物で予想される地震時の衝撃応答(高周波数挙動)を相似律に基づき考察した[2]。これらの結果を参考に、高周波数振動の影響を、モデル供試体の鋼球落下試験によって再現し、そこで発生する変形、内部応力を境界要素法(BEM)により解析し、地震時高周波成分によるコンクリート構造物の破壊要因について検討した。

2. 衝撃力と相似律

2. 1 衝撃応答理論

構造物の弾性動的応答は、変位法ならば変位に関する弾性波動の基礎式を解けばよい[2]。その場合、構造物への地震力あるいは衝撃力は時間の関数 $g(t)$ として与えられる。一般の解析では弾性波動方程式を満足するように、初期条件及び境界上としての $g(t)$ に対する応答を直接に解くことにより時刻歴応答が決定される。一方、時間関数はフーリエ解析の理論により、

$$g(t) = \sum G_k \exp(i 2 \pi f_k t) \quad \text{あるいは連続関数として} \quad g(t) = \int G(f) \exp(i 2 \pi f t) df \quad (1)$$

と周期関数に分解可能である。この外力の周期関数の振幅値 $G(f)$ の絶対値を周波数 f に対してプロットしたものが周波数スペクトルであり、図-1 に代表的な外力のスペクトル成分の概念図を示す。静的な外力は周波数ゼロの成分のみであり、完全なインパルスではゼロから無限大まで同じ大きさの成分を持つ。一般には図-1 のように準静的で 1Hz 以下、地震力で 10Hz 程度まで、衝撃力としてはそれ以上 100Hz 程度までの成分を持つと考えられている。

式(1)より、構造物の動的な変位応答も周期成分に分解可能となる。ただし、周期関数の解は、

*1 熊本大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻 (正会員)

*2 熊本大学教授 工学部環境システム工学科、工博 (正会員)

*3 富士ピー・エス (株)

ある周波数成分 f に対する応答しか与えない。ところが、式(1)よりすべての外力は周期関数の和で表せるため、解も同様に重ね合わせることにより、種々の衝撃的な外力に対しても弾性応答の範囲では解析可能となる。

2. 2 相似律

鉄筋コンクリート柱の破壊原因としては、縦揺れ、衝撃的な地震力、ひずみ速度の影響等が指摘されて

いる。構造物の動的挙動は、材料特性、入射する波の挙動、材料寸法などによって特徴付けられ、時間の効果が含まれる。したがって、実構造物の挙動をモデル供試体によって検討するには、相似律による考察は不可欠となる。RC 柱(橋脚)を対象を絞り、橋脚の長さを L 、幅あるいは径を h 、橋脚内の弾性波動の伝播速度を v 、周波数を f として次元解析を行うことにより、以下の2つのパラメータが得られる[2]。

$$\alpha = fL / v, \quad \beta = L / h \tag{2}$$

v/f が波長に相当することより、 α は入力波の波長と橋脚の長さ L の比の無次元パラメータである。 β は橋脚のアスペクト比であり多質点モデルあるいは1次元モデルなどでは考慮されにくいパラメータで、構造物の形状の振動モードに及ぼす影響が評価できる。相似律の概念によればパラメータ α, β の値が一定ならば、モデルと実構造物の応答は類似となる。一般に地震波入力数は10Hz までと知られている。また弾性波の伝播速度は、一般的な鉄筋コンクリート構

造物の弾性係数から3000m/s 程度と考えられる。その場合にRC 橋脚の高周波数

振動挙動の検討としては、 $\alpha = (10\text{Hz} \cdot 20\text{m}) / (3000\text{m/s}) = 0.067$ となる。10Hz 以上の高周波成分まで考慮に入れると、 α が0.1 程度の場合が実構造物の高周波振動に相当すると考えられる。ただし形状のアスペクト比 β の一致にも考慮は必要である。

3. 実験概要

3. 1 使用供試体

RC 橋脚の高周波数挙動を検討するために、本実験では無筋と、軸方向のみ $D 10$ で補強した $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 40\text{cm}$ の角柱供試体を用意した(図-2 参照)。よって、この供試体のアスペクト比は $\beta = 4$ である。コンクリートの配合を表-1 に、28 日間水中養生後の力学的特性を表-2 に示す。

3. 2 鋼球落下試験

モデル供試体に高周波数の外力を入力するために、鋼球落下試験を行った。この場合に衝撃力

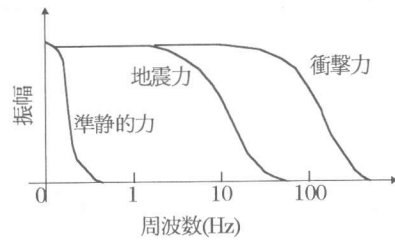


図-1 外力と周波数成分

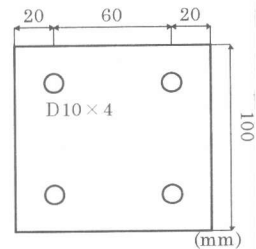


図-2 断面の配筋図

表-1 配合設計

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				AE 剤 (cc)	スランプ (cm)	空気量 (%)
	W	C	S	G			
50	172	346	834	1021	104	5.0	4.7

表-2 材料の力学的特性 (1 軸圧縮試験)

圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
48.5	4.0	33.0

の入力関数は正弦波の 1/2 波長で近似できることが知られている。そこでは次式で与えられる衝撃の接触時間 T_c が衝撃力の周波数成分を決定することになる[3]。

$$T_c = [5.97 \{ \rho (\delta p + \delta s) \}^{0.4} R] / H^{0.1} \quad \text{ただし } \delta p = [1 - \nu p^2] / [\pi E p], \delta s = [1 - \nu s^2] / [\pi E s] \quad (3)$$

ρ は鋼球の密度 (kg/m^3)、 R は鋼球の半径 (m)、 H は落下高さ (m)、 $\nu p, E p$ は落下面材料のポアソン比と弾性係数 (Pa) で、 $\nu s, E s$ は鋼球のポアソン比と弾性係数 (Pa) である。鋼球の径を 3cm、落下高さを 17cm とした場合に鋼球の密度を 7781kg/m^3 、ポアソン比を 0.3 とすれば表-2 のコンクリートの場合には $T_c = 151 \mu \text{sec}$ となる。したがって、衝撃力を正弦関数と見なした場合、入力周波数の上限は $1/(2T_c) = 3311 \text{Hz}$ 程度であることがわかる。一方、モデル実験の高さ 40cm の柱の場合にパラメータ α を 0.1 程度とするには、実験供試体での一般的な値 $v = 4000 \text{m/s}$ とすれば $f = 1000 \text{Hz}$ となる。つまり、相似律で検討した $\alpha = 0.1$ の条件を満足させるために、この鋼球落下は十分な周波数範囲を備えていることを確認できた。以下の鋼球落下試験で入力される周波数の上限は、式(3)で決定される接触時間より $1/(2T_c)$ と設定している。

予備実験として無筋供試体を直立させ、上部先端中央に高さ 17cm から直径 3cm の鋼球を落下させた。この場合の入力周波数の上限は 3311Hz となる。ところが応答を供試体高さ方向中央部に取り付けた加速度計で記録し、周波数分析を実施したところ共振周波数は 5120Hz となった。つまり、入力周波数帯よりも高い共振周波数が測定された。これは入力波の影響を含まない共振であるので、これを軸方向の共振周波数として弾性係数を求めたところ、38.1GPa となり表-1 の結果よりやや大きめの値を示した。

動的弾性係数は静的弾性係数よりも大きいとされているが、ここではポアソン比の影響が無視されている。今回の場合はこれを考慮したので、測定時に材齢が 2 ヶ月程度になった影響が主因と考えられる。同様に軸鉄筋補強の供試体では 5150Hz に共振周波数が認められ、供試体としての弾性係数は 40.6GPa となった。この実験により決定された 2 種類の供試体の平均密度と弾性係数を表-3 に示す。ただしポアソン比は 0.2 としている。

表-3 鋼球落下試験による弾性係数

供試体	平均密度 (kg/m^3)	弾性計数 (GPa)
無筋	2470	38.1
軸鉄筋補強	2602	40.6

4. BEM 解析

2次元動的 BEM 解析として、任意の周波数 f での定常場の積分方程式を解くことにより境界上の変位と応力ベクトルを決定した。それより内部応力の積分表示を用いて任意の点の応力を求めた。ここで BEM 解析では均質体としての力学的特性が必要であるため、表-3 に示す弾性係数と平均密度を使用した。まず手法の検討として弾性係数の決定に用いた鋼球落下試験の解析を試みた。図-3 のように無筋コンクリート柱を直立させた場合に、5120Hz で 1N の衝撃が垂直に作用した場合と、同時に水平方向からも作用した場合について解析した。この場合周波数が非常に高いことにより $\alpha = 0.51$ となり、前述のように $v = 3000 \text{m/s}$ で 20m の鉄筋コンクリート柱で考えれば 76.5Hz と現実には相当な高周波数の地震が衝撃的に作用した場合に相当する。図-3 には動的変位の振動モードも記載している。図-3 では強調されているが、値としては垂直力のみによる変位は非常に小さいことが判明した。そのため、水平力のみの場合と、図-3 に示す垂直力と

水平力が同時に作用する場合の変位はほとんど同じであった。そこで、1N の垂直力と水平力が同時に作用した場合に、図-3 に示す断面における応力分布を求めた。その結果も図-3 中に示されている。すべての断面での最大応力は断面④の例のように軸方向応力 σ_{yy} であった。実在の RC 柱は軸鉄筋により補強されているために軸方向応力は問題とならないであろうが、载荷断面のみならず各断面でかなり大きなせん断応力 σ_{xy} のみられることが特徴的である。

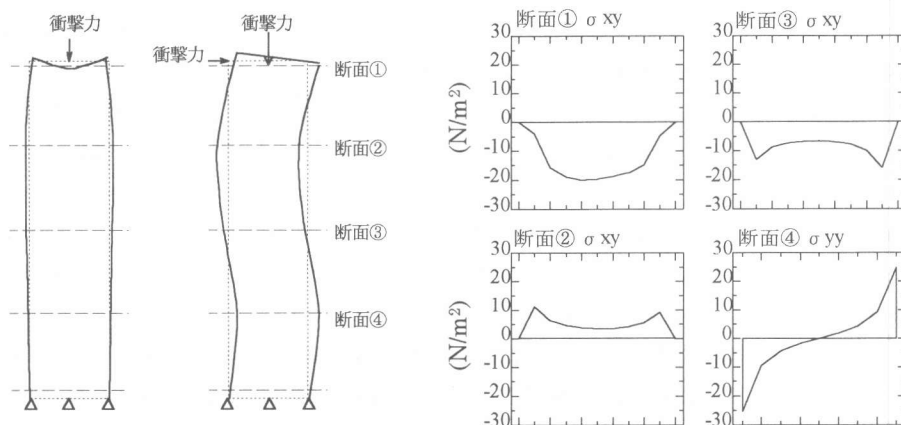


図-3 無筋供試体の 5120Hz における変形モードと内部応力

5. 鉄筋コンクリート柱の水平方向衝撃力に対する考察

直立させたモデル供試体の BEM 解析結果から、高周波数振動でも水平方向の衝撃力の影響が卓越していることが認められたことより、供試体を固定し水平力を与える実験を行った。図-4 に実験と対応する BEM モデルを示す。長さ 40cm の供試体の一端 10cm を固定し、一方の自由端に鋼球を自由落下させ 15cm 離れた箇所

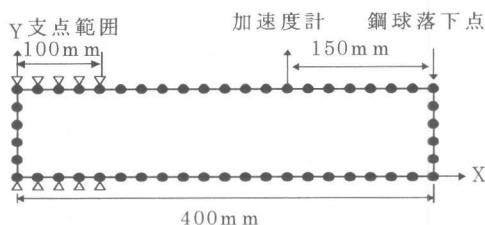


図-4 水平力を与える際の BEM モデル

箇所

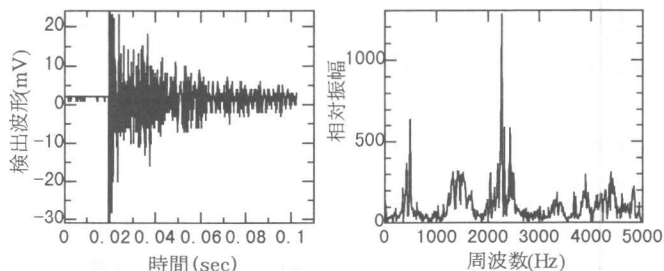


図-5 計測波形とスペクトル図

と、その周波数スペクトル解析結果を示す。周波数解析のためのサンプリング時間間隔は 100 μ

sec でサンプリングデータは 1024 個である。この場合、接触時間は $T_c=101 \mu \text{ sec}$ であることに
 より、上限周波数は 4951Hz となり図-5 のス
 ペクトル解析の周波数帯とほぼ一致する。図
 -5 より 500Hz、1500Hz、及び 2400Hz 付近
 の 3 か所に共振周波数がみられる。第 1 次ピ
 ークに相当する 500Hz での衝撃力で BEM 解
 析を行ったところ、図-6 のように 1 次モード
 の振動を生じていることが確認できた。ただ
 し、 $f=500\text{Hz}$ の場合には $\alpha=0.0375$ となり、
 衝撃力としては低い周波数成分のものとなっ
 た。これは、前述の 20m の RC 柱の場合（た
 だしアスペクト比 3）で 5.6Hz に相当し、一
 般の地震の周波数帯にあたる。

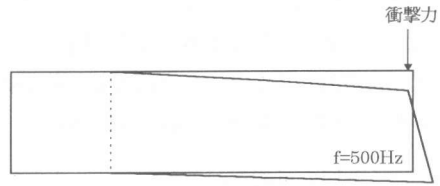


図-6 500Hz の衝撃時の変形モード

そこで直径 7.6cm の鋼球を 2m の高さから
 落下させ高周波衝撃力による破壊試験を行っ
 た。この場合には接触時間 $T_c=299.4 \mu \text{ sec}$ と
 なり、無筋供試体では上限周波数が 1672Hz、
 軸鉄筋補強供試体では 1712Hz となる。これ
 より α の上限値は 0.125、0.128 となり、今回
 の実験で対象とした周波数範囲となっている。
 これらを 20m の RC 柱に換算すると 19.3Hz
 に相当し、実際の地震での高周波成分として

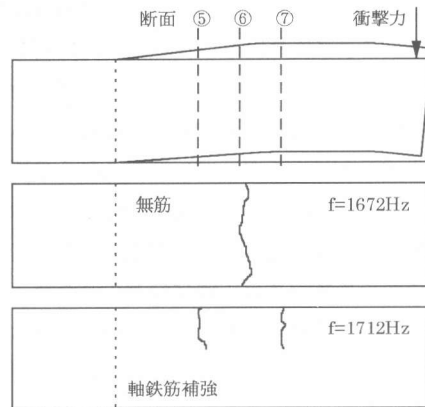


図-7 変形モードと破壊パターン

妥当な値であると考えられる。無
 筋供試体および軸鉄筋補強供試体
 で行った衝撃力による破壊試験の
 結果を図-7 に示す。図-7 の上図
 は無筋供試体の 1672Hz における
 変形モード図であり、中段は鋼球
 落下試験による破断図、下段は軸
 鉄筋補強供試体に 4 回鋼球を落下
 させた後のひび割れ図である。い
 ずれも曲げひび割れが観察されて
 いる。

そこで、これらの破壊性状を解
 明するために、破断およびひび割
 れの認められた図-7 の断面にお
 ける応力分布を求めることにした。
 解析は、上限周波数である 1672Hz
 と共振周波数である 500Hz、
 1350Hz において行った。ただし

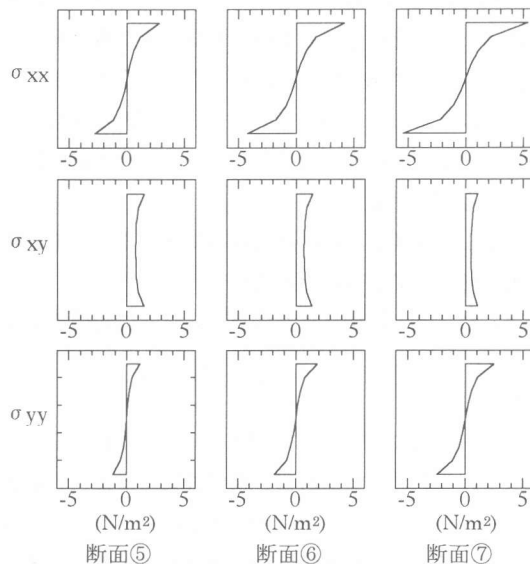


図-8 断面の内部応力

BEM 解析の結果、前述の解析手法のように 1N の荷重を与えれば周波数により変形量も変化し、入力エネルギーがその都度変化することを考慮し、載加点で $1 \mu \text{ joule}$ の衝撃エネルギーが与えられた場合に換算して、応力をプロットしている。図-8 の応力分布は、上限周波数の 1672Hz での無筋コンクリートの結果である。図-8 より、ここに選んだいずれの断面においても軸方向応力 σ_{xx} が卓越しており、それによる引張破壊が断面上部より形成されたことが認められる。またどの断面においてもかなりのせん断応力 σ_{xy} が発生しており、軸方向の補強が十分な場合にはこれによる破壊の可能性が予想される。そこで、内部応力を静水圧成分 $(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})/2$ と偏差応

力成分 $\sqrt{\left\{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})/2\right\}^2 + (\sigma_{xy})^2}$ に分けて、これをプロットしたものを図-9 に示す。図-9 は右から左へ支点から載荷点の間を 4cm 間隔で取った断面での応力分布から求めた結果を示している。これにより同一の入力エネルギーに対する応力は、周波数の上昇に伴い増大していくことがわかる。そして、載荷点をのぞけば、断面⑤⑥⑦のあたりでいずれの周波数に対しても偏差応力成分が最大となっている。これらの断面は図-7に見られるとおり、破断面、ひび割れの発生断面と一致していることが認められる。つまりこれらの断面では引張破壊が生じたが、応力としては、等価せん断力としての偏差応力成分が破壊要因に大きく影響していることが明らかとなった。

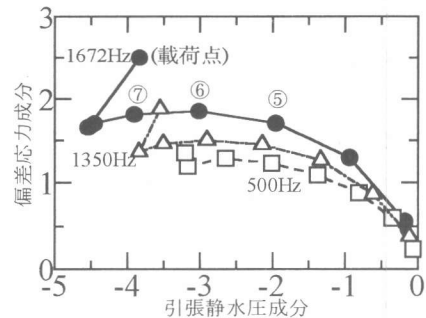


図-9 内部応力分布図

6. 結論

RC 橋脚での高周波数挙動を鋼球落下試験と境界要素法の応力解析より検討した。その結果を相似律に基づいて考察し、以下のような結果が得られた。

- (1) 直立させた供試体の BEM 解析から、高周波数成分を持った衝撃力の場合にも上下動よりも水平力による変形が卓越していることが認められた。
- (2) 鋼球落下試験による供試体の水平動に伴う破壊性状は、曲げひび割れおよび引張による破断であることが判明した。
- (3) ただし、破断面の内部応力分布に関する BEM 解析から、偏差応力成分が、大きな断面位置で破壊の発生していることが認められた。

今後は、ねじりの影響なども含めた 3 次元における高周波数挙動の検討も必要である。

参考文献

- [1]宮本文穂・小野紘一・北村八朗・井上正一：RC 橋脚の損傷に及ぼす衝撃的上下動の影響に関する一考察、コンクリート研究討論会論文報告集、Vol.18, No2, pp.269-274, 1996.6
- [2]M.Ohtsu: On High-Frequency Seismic Motions of Reinforced Concrete Structures, J. Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, No.544/V-32, pp277-288, 1992.6
- [3]白鳥雅也・松貝 勇・岡村雄樹：軽い衝撃を受けるコンクリート部材の応答解析、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, pp.679-684, 1992.6