

(27) コンクリート部材の衝撃応答における周波数の影響に関する考察

EFFECT OF FREQUENCY COMPONENTS ON IMPACT RESPONSE OF CONCRETE MEMBER

渡辺 健*, 大津政康**

Takeshi WATANABE, Masayasu OHTU

*熊本大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2-39-1)

**工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2-39-1)

キーワード：境界要素法、鋼球落下試験、衝撃応答、周波数スペクトル
(Boundary Element Method, Impact Test, Frequency Resuponse)

1. はじめに

阪神・淡路大震災での橋脚の破壊様式などから、衝撃的な外力の鉄筋コンクリート(RC)部材への影響が問題となっている^{1),2)}。この問題究明に向けて様々な研究が進められているが、これを次元解析に基づいてモデル供試体の鋼球落下試験により検討してきた。これまでに実施したRC部材の衝撃試験の結果より、入力周波数の影響によって部材内部の応力分布ならびに応力値が大きく変動することが明らかとなっている³⁾。そこで、衝撃的な外力における周波数成分の影響を実験と解析により検討することを試みた。

落下高さ(m)、 νp , E_p は落下面材料のポアソン比と弾性係数(Pa)で、 νs , E_s は鋼球のポアソン比と弾性係数(Pa)である。

この場合には、sin関数のスペクトル分析により、図-1のように接触時間 T_c から入力周波数の上限として

$$f_{max}=1.25/T_c \tag{2}$$

が導かれる。これが、鋼球落下試験で与える衝撃力の上限周波数である。式(1)によれば、接触時間の最も大きな要因は鋼球の径であることが認められる。

2. 衝撃力と相似律

2.1 衝撃力

鋼球落下試験においては、入力する外力の周波数成分が大きな影響を与える。衝撃力を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⁴⁾。したがって、次式で与えられる Herz 理論の接触時間 T_c が衝撃力の周波数成分を決定する。

$$T_c=[5.97\{\rho(\delta p+\delta s)\}^{0.4}R]/H^{0.1} \tag{1}$$

ただし

$$\delta p=[1-\nu p^2]/[\pi E_p]$$

$$\delta s=[1-\nu s^2]/[\pi E_s]$$

ρ は鋼球の密度(kg/m³)、Rは鋼球の半径(m)、Hは

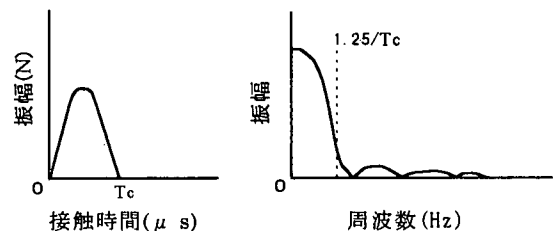


図-1 鋼球落下による入力波形とスペクトル成分

2.2 相似律

鉄筋コンクリート柱の衝撃力による破壊原因としては、衝撃力の大きさ、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、材料特性と材料寸法などによって特徴付けられ、波動現象としての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 部材に対象を絞り、部材の長さを L 、幅あるいは径を h 、部材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。

$$\alpha = fL/v, \beta = L/h \quad (3)$$

vf が波長に相当することより、 α は入力の変長と部材の長さ L の比の無次元パラメータである。 β は部材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⁵⁾。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。したがって、式(1)より求められる入力の上限周波数と式(3)より得られる部材長に関する相似律が衝撃応答を解明するための鍵となる。

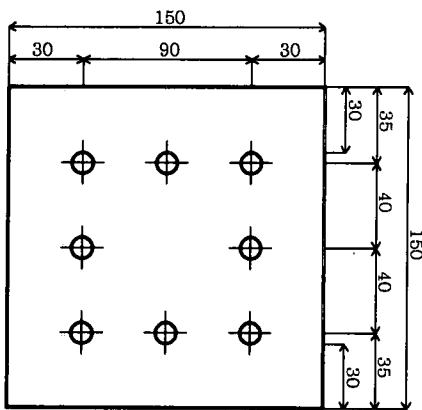


図-2 供試体の断面の配筋状況

3. 実験概要

3.1 使用供試体

RC 部材の衝撃挙動を検討するために、本実験では、軸方向のみ D10 で補強した 150mm×150mm×1200mm の角柱供試体を用意した(図-2 参照)。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。

表-2 コンクリートの力学的特性値

引張強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
2.76	33.07	27.37	0.20

3.2 鋼球落下試験

実験では、供試体に鋼球を自由落下させ、その時生じる弾性波を加速度計により検出し、波形および応答スペクトルを調べた。鋼球の落下は落下装置を用いて、常に一定となるようにした。そして、供試体を直立させ鋼球を落下させる場合と、片持ち張りの状態に固定し、鋼球を落下させる2種類の実験を行った。

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。また3次元 BEM 解析も行い、3次元と2次元解析での変形挙動の差異も検討することにした。

5. 結果及び考察

5.1 動的ヤング率の同定

供試体を直立させ、その上面に直径 3.0cm の鋼球を、高さ 10cm より自由落下させる鋼球落下試験を行った。検出波形より得られたピーク周波数とソニック法による共振周波数を比較したところ、いずれの場合にも縦方向の1次モード共振が、1800Hz のところに認められた。そこで式(4)を用いることにより、RC 供試体の動的ヤング率を決定した。

$$E = 4L^2 f^2 \rho \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (4)$$

ここで L : スパン長 (m)、 f : 周波数 (Hz)、 ρ :

表-1 コンクリートの配合表

最大粒径 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤 (cc)	スラフ° (cm)	空気量 (%)
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G			
20	50	48	172	344	830	1021	104	3.0	6

密度 (kg/m^3)、 ν : ポアソン比である。

この結果、表-3 のように弾性係数は 44.1GPa と求められた。この弾性係数は、表-2 の力学特性と比較すると、5割ほど大きくなっている。これは、鉄筋補強による影響、および鋼球落下試験と1軸圧縮試験時の材齢の差(約110日)によると考えられる。RC 供試体の BEM 解析に使用したパラメータを表-3 にまとめて示す。

表-3 解析に使用するパラメータ

密度(kg/m^3)	ポアソン比	弾性係数(GPa)
2594	0.19	44.1

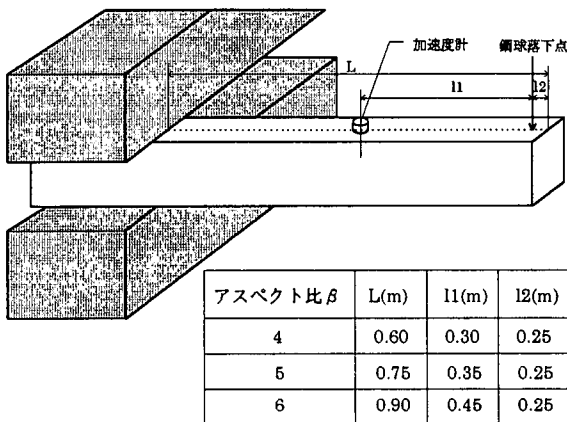


図-3 片持ち梁として供試体を固定した場合の鋼球落下試験

5. 2 鋼球落下によるスペクトル応答

鋼球落下試験としては、図-3 のように供試体を片持ち張りの状態でスパン長 L を変化させ固定し、アスペクト比 β を 4、5、6 に変化させた。この実験においては、鋼球の直径 3.0cm、落下高さ 10cm である。この場合、鋼球の密度を 7750kg/m^3 、ポアソン比を 0.3 とすれば、式(2)より接触時間 $T_c = 150 \mu\text{sec}$ となり、供給の衝撃の持つ上限周波数は式(3)により、8330Hz となる。

実験によって得られた周波数スペクトルから、ア

スペクトル比 β が大きくなるに従い、周波数スペクトルの 1次ピーク、2次ピークの周波数が減少していることが確認された。これは、アスペクト比 β が大きくなることによって、スパン長 L が長くなっている影響である。この実験でのピーク周波数をまとめたものを表-4 に示す。

表-4 水平方向に関する周波数スペクトル

アスペクト比 β	ピーク周波数(Hz)		
	1次ピーク	2次ピーク	3次ピーク
4	180	960	2000
5	110	660	2000
6	100	550	2000

これらを実在の鉄筋コンクリート部材に対して弾性波の伝播速度を 3000m/s 、供試体での弾性波の速度を実際に計測した結果の 4386m/s として、表-4 に示す供試体のピーク周波数を式(4)の α を用いて実在する長さ 10~20m の構造部材における周波数に換算した。それら結果をまとめたものを表-5 に示す。これらの場合に、実験供試体における α は、1次ピーク周波数で 0.021~0.024 程度、2次ピーク周波数で 0.11~0.13 程度である。

例えば、実構造物に対して直径が 0.5m~1.0m の鋼球を 1m の高さから落下させるような鋼球落下試験を行う際、鋼球とコンクリートの材料特性を本研究と同じと仮定すると、上限周波数は 314~628Hz 程度となる。これは表-5 に示す 3次までのピーク周波数を全て含んでいることが分かる。

5. 3 解析でのスペクトル応答

動的 BEM 解析として、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を決定した。密度、ポアソン比、弾性係数は表-3 の値とし、供試体の解析を行った。解析においては、衝撃の入力を 1N とし、周波数 f を連続的に変化させて解析

表-5 実際の鉄筋コンクリート柱に換算したピーク周波数

実在するコンクリート柱のアスペクト比 β	実在の 10~20m のコンクリート柱に換算したピーク周波数(Hz)		
	1次ピーク	2次ピーク	3次ピーク
4	3.7~7.4	18.9~39.4	41.0~82.1
5	2.8~6.2	16.9~34.9	51.3~102.6
6	3.1~6.2	16.9~33.9	61.6~123.1

をすることにより、供試体における解析上の周波数スペクトルを求めた。周波数スペクトルは、実験では 9.76Hz の周波数刻みでプロットしたものであるのに対して、解析においては 97.6Hz の周波数刻みとなっている。これは、解析時間の問題により、このような値とした。3次元 BEM 解析に用いたモデルの概略を図-4 に示す。3次元解析により求めた周波数スペクトルと、実験により得られた周波数スペクトルを対応させたものを図-5 に示す。○でプロットしたものが解析結果である。アスペクト比 4 の場合には、実験結果の周波数スペクトルと比較すると、解析結果は 0~3000Hz では包絡線を与えている。しかし、アスペクト比 5, 6 の場合には周波数刻みの問題もあり、解析と実験が一致はそれほどよくはない。ただし、解析でもアスペクト比の増大によってピーク周波数の全体的な低下は認められる。

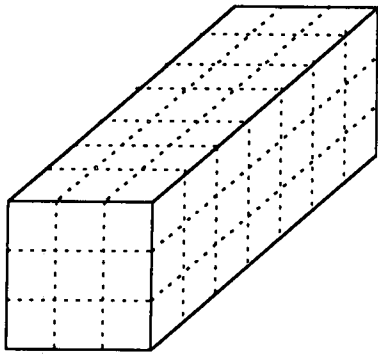


図-4 3次元 BEM 解析の概略図

5. 4 変形モードに関する考察

表-4 での、鋼球落下試験によって得られたピーク周波数に基づき解析を行い、共振周波数に対する供試体の変形モードを求めた。2次元の解析モデル

を図-6 に示す。矢印は実験と対応した載荷点となっており、解析上では、載荷点に 1N の衝撃力が作用した状態で解析を行っている。解析に用いた周波数を表-6 に示す。これは、3次元解析で使用した周波数刻み 97.6Hz の倍数で表-4 に最も近い周波数として決定したものである。

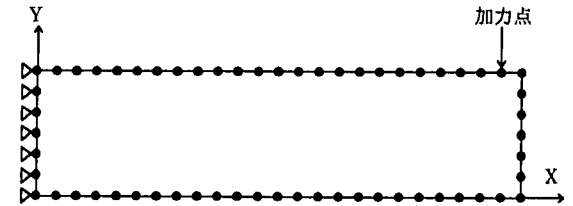


図-6 2次元解析モデル(アスペクト比 $\beta=4$)

表-6 解析で用いた周波数ピーク

供試体のアスペクト比 β	周波数ピーク(Hz)		
	1次ピーク	2次ピーク	3次ピーク
4	195.3	976.6	1953.1
5	97.6	683.6	1953.1
6	97.6	585.9	1953.1

表-6 の 2次ピークの周波数において、得られた 2次元解析の変形モードと 3次元解析のモードを図-7 に示す。ただし、入力する周波数により変形量に変化し、入力エネルギーがその都度変化することを考慮し、載荷点で 1 μ joule の衝撃エネルギーが与えられた場合に換算している。そして、変形モードは 1 μ joule の時の変位を 10000 倍して表示している。このように周波数の 2次ピークで 2次モードの変形が確認された。周波数の 1次ピークで 1次モード、3次ピークで 3次モードの変形となることも確認され、2次元と 3次元の変形モードの一致が明ら

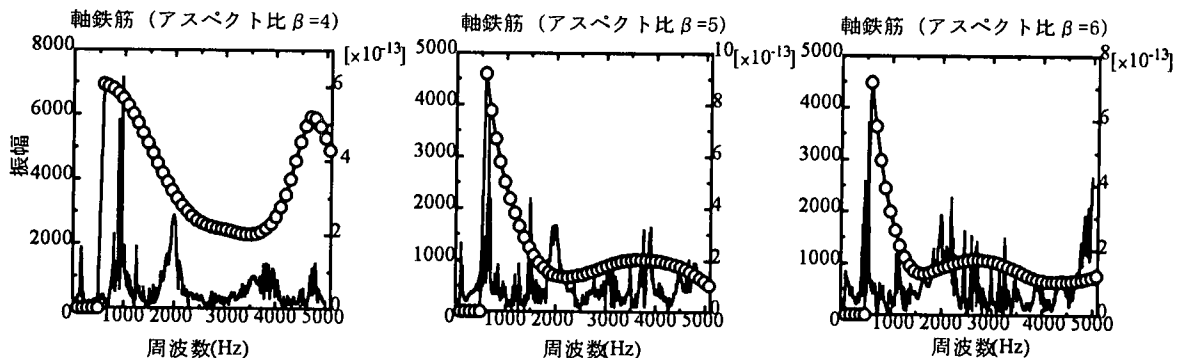


図-5 実験と 3次元 BEM 解析での周波数スペクトルの比較

かに認められた。

5. 5 内部応力に関する考察

3次元と2次元の変形モードの一致が確認されたことより、2次元 BEM 解析を用いて、各変形モードでの供試体の内部応力を求めた。この場合、内部応力は静水圧成分 $(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})/2$ と偏差応力成分

$$\sqrt{\left\{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})/2\right\}^2 + (\sigma_{xy})^2}$$

に分けて、考察した。ただし周波数により変形量が変化し、入力エネルギーがその都度変化することを考慮し、载荷点で1 μ joule の衝撃エネルギーが与えられた場合に換算することにした。1次モード、2次モードの結果を図-8に、3次モードの結果を図-9に示す。

1次モードの変形の場合には、アスペクト比に関係なく、载荷点において偏差応力成分が最大となっている。また、静水圧、偏差応力の大きさもアスペクト比にあまり関係なく同程度の値を示している。しかし2次モードの変形の際には、载荷点での偏差

応力は最大にならず、中央部の断面と载荷点断面との区間において、偏差応力が最大となる断面が現れている。これは図-7の2次変形モードより、中央部の断面より、载荷点に近い断面位置で、変形量が最大となっているためと考えられる。ところが、3次モードの変形においては、変形が複雑になることにより、内部応力の分布も複雑となっている。また応力値は2次モードに比べて低減している。

5. 6 破壊モードに関する考察

アスペクト比 $\beta=6$ とした供試体に、直径7.6cmの鋼球を2mの高さから落下させ、高周波数衝撃による破壊試験を行った。この場合、接触時間 $T_c=283 \mu$ secとなり、上限周波数は4417Hzとなる。表-6より、3次元モードまでのピーク周波数は含まれる。図-10に鋼球を落下させた後の、各試体のひび割れの発生状況を示す。実験では、鋼球を2回落下させた後にひび割れを確認することができた。ひび割れ箇所は、固定端付近と、図-10で2次変形モード時の偏差応力成分が2番目に大きい断面付近であっ

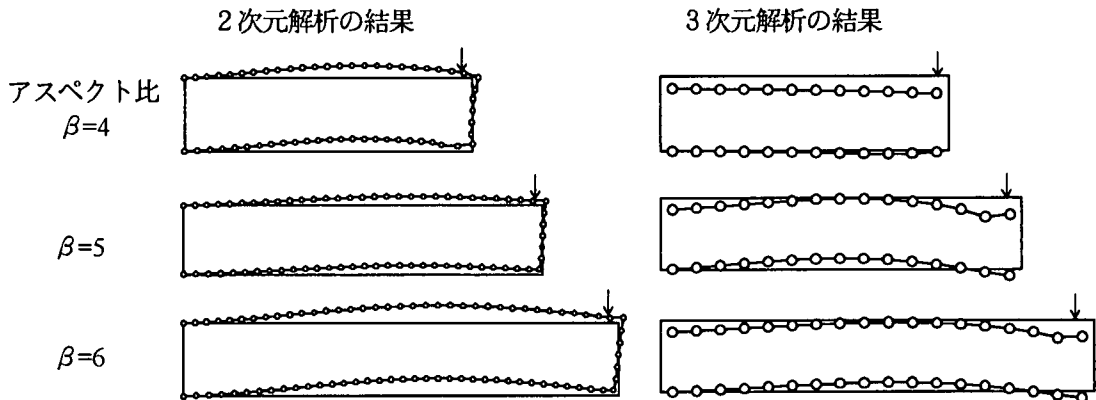


図-7 周波数スペクトルの2次ピークでの2次元と3次元BEM解析による変形モード

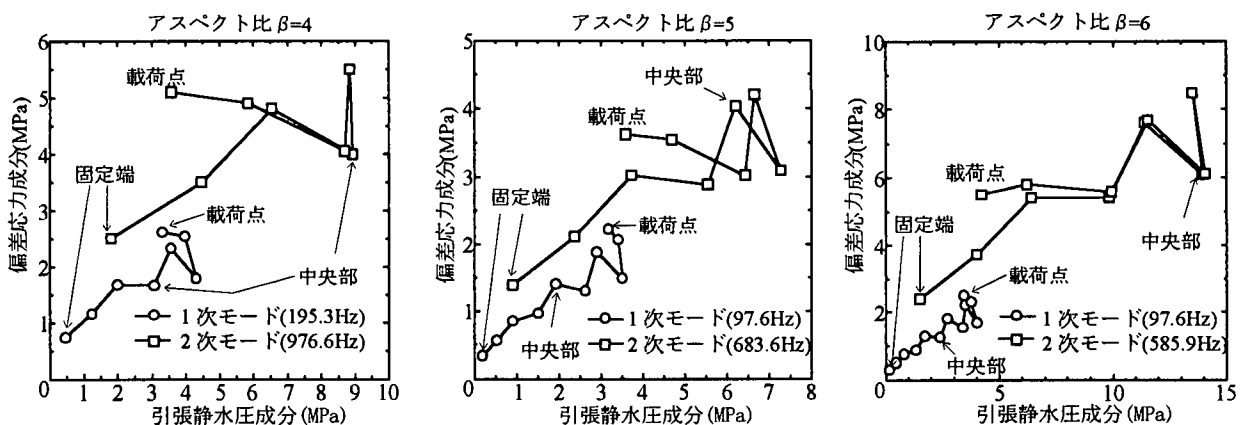


図-8 各アスペクト比における、1次、2次変形モード時の内部応力分布図

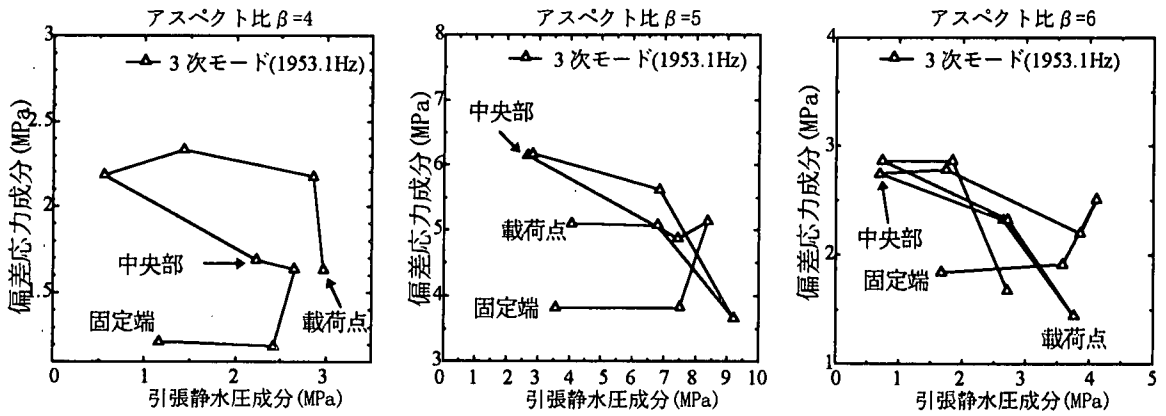


図-9 各アスペクト比における、3次変形モード時の内部応力分布図

た。いずれも曲げひび割れが観察されることが特徴的であり、2次モードでの偏差応力成分が大きな断面位置でひび割れが発生している。これより、1次、2次、3次のうちの最も応力値の大きかった2次モードでの偏差応力成分がひび割れの発生に大きく影響していることが認められた。

ド時には、アスペクト比に関係なく载荷点下の断面において偏差応力成分が最大となる。2次変形モードにおいては、アスペクト比が増大するにともない、载荷点下の断面の偏差応力成分は、他の断面のピーク値より減少していく傾向が見られる。

(4) 鋼球落下試験での供試体の破壊性状は、曲げひび割れの発生であった。BEM解析による断面の内部応力から、応力値が最大となる2次モードでの偏差応力成分が大きな断面で、ひび割れが発生していることが確認された。

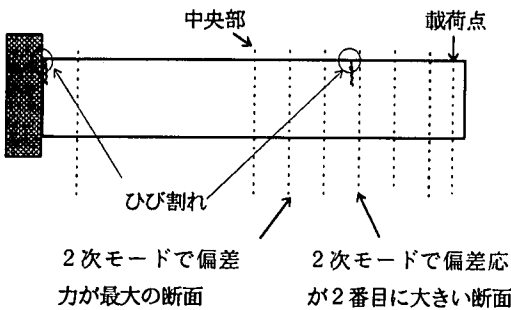


図-10 アスペクト比6の鋼球落下による破壊試験

6. 結論

コンクリート部材の衝撃応答における周波数の影響を、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き考察し、以下のような結果が得られた。

(1) 鋼球落下試験による供試体の横方向衝撃力による共振周波数は、アスペクト比 β が増大するに従い、低下する。この場合、衝撃力の接触時間から決定される入力の上限周波数も影響する。

(2) 実験による共振周波数の各周波数と、変形モードの次数が一致することが2次元および3次元BEM解析の振動モードから確認された。

(3) 供試体の内部応力を静水圧成分と偏差応力成分に分けてプロットすることにより、1次変形モー

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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.2, pp.269-274, 1996.6.
- 2) 石川達也・余 国雄・田辺忠顕：鉄筋反歩の不連続面が応力波の伝播に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.2, pp.293-298, 1996.6.
- 3) 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の考察、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 19, No. 2, pp.363-368, 1997.6.
- 4) 白鳥雅也・松貝 勇・岡村雄樹：軽い衝撃荷重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.
- 5) M.Ohtsu: On High-Frequency Seismic Motions of Reinforced Concrete Structures, J.Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, No.544/V-32, pp.277-288, 1992.6.