

論文 継続時間の異なる入力波による鉄筋コンクリート柱の振動台実験

菅野秀人*1・Wenliuhan・Heisha*2・井上範夫*3・小川淳二*4

要旨：地震動の破壊力の検証を目的として、鉄筋コンクリート造柱試験体の振動台実験を行った。実験は静的載荷実験と、応答スペクトルが同一で継続時間の異なる模擬地震波を2種類作成し、それぞれ同形状の試験体に入力する振動台実験を行った。実験の結果、動的載荷では静的載荷に比べ、最大耐力は約 10%増大した。また、エネルギー応答性状に着目すると、継続時間が短く瞬間的な入力を受ける場合は、継続時間が長く繰り返し回数が多い入力時の場合と比べて瞬間的な入力エネルギー量の割に応答変位が小さいことが確認された。

キーワード：振動台実験, 継続時間, 模擬地震波, 減衰性状, 瞬間入力エネルギー

1. はじめに

直下型地震のように繰り返し回数が非常に少なく瞬間的な入力を受ける場合と、海洋型地震のように多数回繰り返し入力を受ける場合とでは構造物に対する破壊力特性は異なる。地震動の破壊力特性は構造物に対する影響力の大きさを評価すべきと考えられ、地震動の破壊力の違いを定量的に検討することが重要である。

本研究では、地震動の破壊力の検証を目的として、継続時間の異なる模擬地震波を2種類作成し、1層1スパンの鉄筋コンクリート(RC)造4本柱試験体に入力し、振動実験を行い、応答性状の差について比較検討を行った。

2. 実験概要

試験体は1度のコンクリート打設で製作した、同形状の試験体3体であり、1体を静的載荷実験に、2体を動的載荷実験に用いた。動的実験では2種類の模擬地震波を作成し1体は海洋型地震動を想定した継続時間が比較的長い地震動入力、もう1体は直下型地震動を想定した継続時間が比較的短い地震動入力とした。表-1に実験の種類及びその名称を示す。

表-1 実験の種類

名称	実験の種類	
CASE1	静的載荷実験	
CASE2	動的載荷実験	継続時間の長い地震動入力
CASE3		継続時間の短い地震動入力

3. 試験体

試験体は、鉄筋コンクリート造柱4本からなる1層1スパンのラーメン試験体である。加力方向には剛な上部梁と基礎梁を有するが、加力直交方向にRC梁はなく、鋼板と鋼板製の重錘とで結合する型式とした。試験体の設計は、振動台の加振性能限界より判断して、試験体の弾性周期と耐力が適切な範囲に収まるように行った。試験体の頂部重量は48.8kNである。柱の軸力は平均すると、1本あたり12.2kN($\sigma=1.02\text{N/mm}^2$)である。柱の断面寸法は120mm×100mm、高さは600mmである。シアスパン比は3.0であり、曲げ降伏先行型である。柱の主筋は6-D6とし、帯筋にはD4(@30)を用いた。主筋は上下梁内に定着され、その端部はエンドプレートに溶接してある。コンクリートは10mmの豆砂利コンクリートを用いた。コンクリート強度は、現場養生した供試体を実験日に合わせて強度試験を行い確認した。試験体の概観図、

*1 東北大学大学院生 工学研究科 都市・建築学専攻 (現 西松建設) 工修 (正会員)

*2 東北大学大学院生 工学研究科 都市・建築学専攻 工修 (正会員)

*3 東北大学教授 工学研究科 都市・建築学専攻 工博 (正会員)

*4 秋田県立大学教授 システム科学技術学部 建築環境システム学科 工博 (正会員)

配筋図及び構造諸元を図-1、図-2、表-2 にそれぞれ示す。

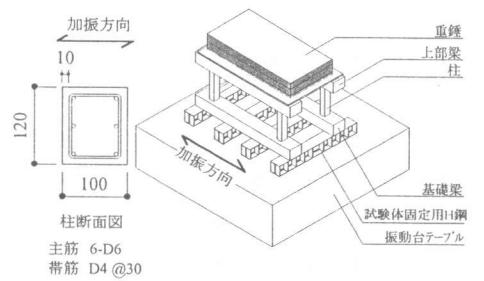


図-1 試験体概観

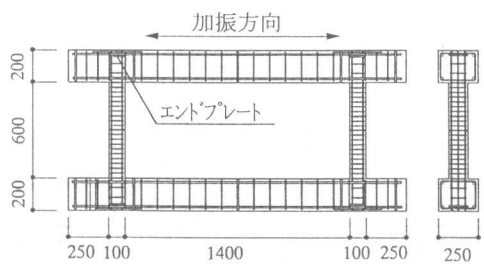


図-2 試験体配筋図

表-2 試験体構造諸元

シアスパン比		3
コンクリート強度	CASE1	30.8 N/mm ²
	CASE2	33.1 N/mm ²
	CASE3	35.9 N/mm ²
主筋	配筋	6-D6
	引張鉄筋比	Pt=0.8%
	降伏強度	416.5 N/mm ²
平均軸応力		1.02 N/mm ²
試験体頂部重量		48.8 kN

4. 実験方法

4. 1 静的載荷方法

試験体の力学的特性を把握するために、静的水平交番載荷実験を行った。載荷はネジを用いた手動加力により、荷重または変位制御で行った。8段階の載荷階を設定し、各載荷階では1～3回の交番載荷を行った。なお、動的載荷と同様に重錘を載せて載荷を行い、静的載荷と動的載荷の直接的な比較が可能となるようにした。静的載荷装置及び静的載荷パスを図-3、図-4にそれぞれ示す。

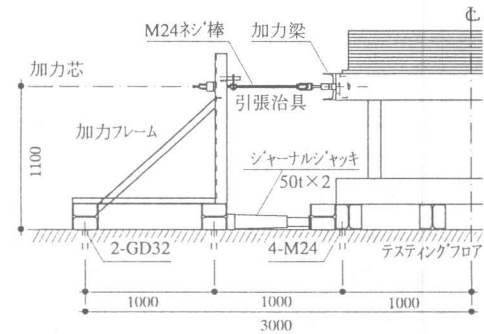


図-3 静的載荷装置

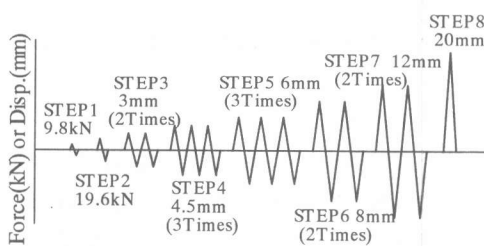


図-4 静的載荷パス

4. 2 動的載荷方法

動的実験には、東北大学工学研究科都市・建築学専攻附属建築実験所に設置されている、2次元3自由度電気油圧式振動台を使用した。振動テーブルの寸法は3m×3mで重量は43.5kNである。

入力波の周波数特性は、試験体の弾性域から終局耐力時に至るまで、加速度応答倍率が3(減衰定数2%)と一定値になるように設定し、加振中の試験体の固有振動数が変化しても同じ破壊力が入力されるようにした。位相特性については一様乱数で与えることとした。包絡関数はJennings型とし、継続時間を変えて、長い方を(CASE2)、短い方を(CASE3)と呼ぶこととした。図-5に入力波の周波数特性と時刻歴包絡関数を示す。なお、加振レベルは試験体の応答の大きさが弾性から大変形までを5段階に分けて漸増するように配慮し、CASE2、CASE3それぞれにおいて、前加振階までの試験体の応答性状に応じて次加振レベルを決定した。

本実験のように入力波をパラメータとした振動台実験を行う場合、振動テーブルに如何に目標とする波を入力させるかが重要であり、入力波の補償が問題

となる。一般に振動テーブルの重量が試験体に比べて十分に重くない場合、振動テーブルに試験体を載せて加振すると試験体の固有周期近傍で、試験体とテーブルの相互作用により入力波の振動エネルギーが有効に入力されない現象が起きてしまう。そこでこの吸収されるエネルギーだけ、入力波の周波数特性を補償する必要がある。入力波の補償方法はいくつかの報告例があるが¹⁾、本研究では、静的載荷実験の終了した試験体に太さの異なるブレースにより補剛し、数種類の固有周期を持たせて、この各々の周期に対して、入力波の補償を事前に行っておくこととした。これにより試験体の各段階の損傷レベルに応じた固有周期を補償した入力波を事前に準備した。

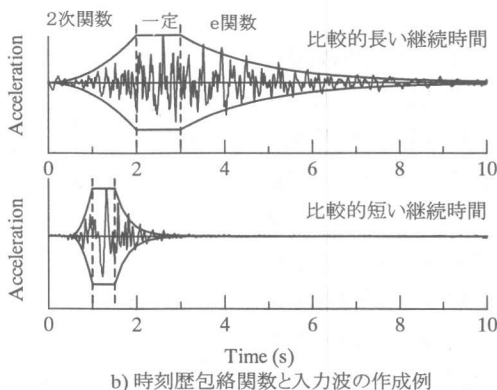
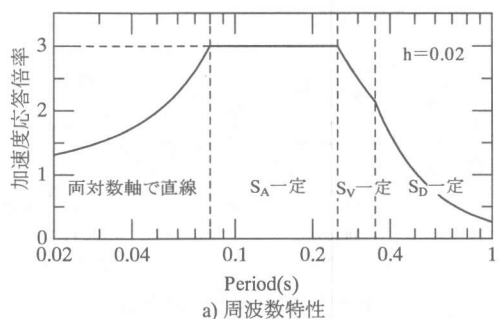


図-5 入力波の特性

計測は、加振方向、加振直交方向および鉛直方向の絶対加速度、試験体の相対変位について行った。計測項目を表-3に示す。ここで、加速度の計測には動歪み型加速度計を使用し、変位の計測にはレーザ変位計を使用した。本研究のように高速な振動現象を正確に把握するためには、これら各計測器から得られる全ての計測データに同時性がなければなら

ない。本研究では、A/D変換器に同時サンプリング機能を保証するものを使用した。加速度と変位のデータがそれぞれ違った増幅器、ローパスフィルタといった伝送経路を経てA/D変換器に入力されるため、これら伝送経路の差による位相差特性についても把握しておく必要がある。本研究では事前に、使用する計測器に対して、ファンクションジェネレータを用いた位相特性把握試験を行っておき、計測による位相誤差が生じないような計測計画を立てた。これにより、本研究の主目的である慣性力-変位関係を用いたエネルギー評価や、それに基づく等価な減衰の評価が可能となった。

表-3 計測項目

測定項目	測定方向
柱頂部と基礎梁の相対変位	X
上部梁加速度	X
基礎梁加速度	X
振動台テーブル上の加速度	X,Y,Z
振動台テーブル内の加速度	X,Y
重錘の加速度	Z

*X:加振方向 Y:加振直交方向 Z:鉛直方向

5. 実験結果

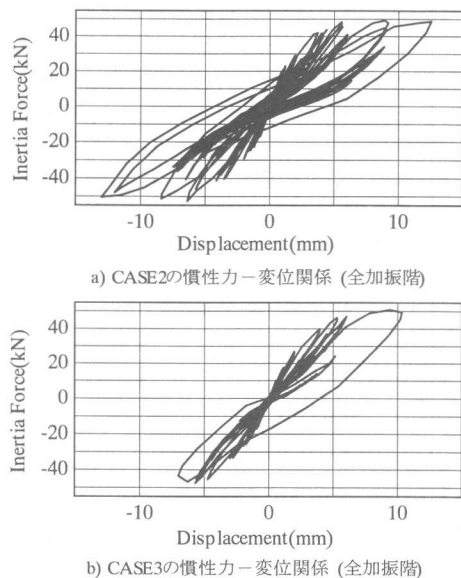
5.1 応答性状

CASE2, CASE3のそれぞれについて、各加振階の入力レベルと最大応答値を表-4に、全加振階の慣性力-変位関係を図-6に示す。これを見るとCASE2, CASE3の履歴性状は、降伏変位前までは、どちらも“両振幅型”の応答となっているが、大変形時のように大きな履歴ループを囲むようになると、CASE3は“片振幅型”の応答となった。

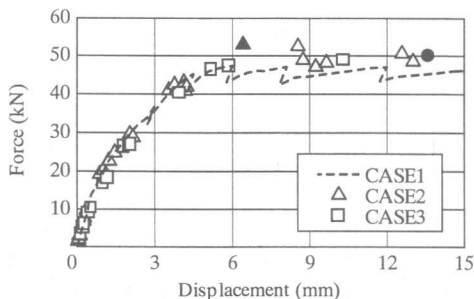
表-4 各加振階の入力レベルと最大応答値

加振階	最大入力加速度 (cm/s^2)		最大応答加速度 (cm/s^2)		最大応答変位 (mm)	
	CASE2	CASE3	CASE2	CASE3	CASE2	CASE3
RUN1	57.4	83.0	154.8	180.3	0.3	0.4
RUN2	195.2	227.0	465.8	549.1	1.2	2.0
RUN3	570.0	436.2	861.1	808.2	3.8	4.0
RUN4	504.0	459.8	1064.5	951.4	8.5	5.9
RUN5	722.7	792.8	1017.3	1029.4	13.0	10.3

静的載荷より得られた荷重－変位包絡線と、各動的載荷より得られた履歴ループから、変位を更新した際の最大慣性力点をプロットしたものを図－7に示す。図－7の包絡線より、降伏変位を5mmとすると、変位が降伏変位より小さい範囲では、動的載荷による最大慣性力点は、ほぼ静的包絡線上にあるといえる。しかし、降伏変位以降は動的載荷の慣性力は静的耐力を約10%程度上回っていることが分かる。また図中の●印は静的実験を終了した試験体に、CASE2用の入力波を入力した際に得られた最大慣性力点である。これから、動的載荷による耐力上昇が試験体の個体差でないことが確認できる。



図－6 動的載荷による慣性力－変位関係



図－7 最大耐力の比較

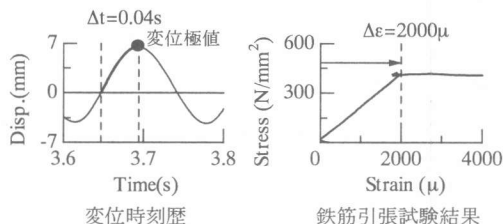
既往の研究では、歪速度による耐力上昇への影響が報告されているが²⁾³⁾、本研究では鉄筋等の歪

度は計測してないので、ここでは応答変位記録を用いて図－7の▲点についての歪速度の概算を試みた。図－8にこの概算方法を示す。まず、変位が極大値に至るまでの時間 Δt を決定する。この時主筋が上降伏点に達したと仮定して、主筋の引張試験結果より歪 $\Delta \epsilon$ を決定し、歪速度を $\dot{\epsilon} = \Delta \epsilon / \Delta t$ と定義する。

これによって得られた▲点での歪み速度の概算値は0.05/sであった。文献2)では、鋼材の上降伏点における歪速度の影響による耐力上昇率は次式のように報告されている。

$$\alpha = 1.2 + 0.05 \log \dot{\epsilon} \quad (1)$$

(1)式に $\dot{\epsilon} = 0.05$ を代入すると $\alpha = 1.13$ が得られ、実験結果における動的載荷による耐力上昇率と概ね一致することが確認できる。



図－8 歪み速度概算方法

5. 2 減衰性状

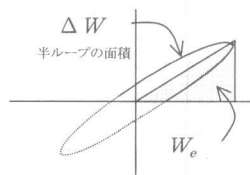
構造物の弾塑性復元力特性が亀裂や降伏のために、履歴ループ面積を囲むことによる履歴消費エネルギーは、構造物の地震時変形を減らし、耐震性能と密接な

関係がある。図－9に示すような定常ループが得られた時、各ループ毎の減衰性能指標として等価粘性減衰定数 h_{eq} は次式のように定義される。

$$h_{eq} = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{2\Delta W}{W_e} \right) \quad (2)$$

ここで定常ループを除荷時剛性が弾性時の $1/\sqrt{\mu}$ と仮定した剛性低下型復元力特性を仮定すると次式が得られる。

$$h_{eq} = \frac{1}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) \quad (3)$$



図－9

一方、過渡応答を考慮した平均的な減衰として、地震応答の終わった時点での地震のなした仕事 $\int_0^t (-m\ddot{y}_0) \dot{y} dt$ (全入力エネルギー) が等価ダッシュポットのなした仕事 $\int_0^t c_e \dot{y}^2 dt$ に等しいと考えた時の平均等価減衰 h_s (Substitute Damping) は次式のように定義される。⁴⁾

$$h_s = \frac{-\int_0^t (\ddot{y}_0) \dot{y} dt}{2\omega_e \int_0^t \dot{y}^2 dt} \quad (4)$$

ここで ω_e は、最大応答時の等価円振動数とした。

柴田は、前述の剛性低下型復元力特性を仮定し、粘性減衰を 0.02 としたモデルによる多くの地震応答解析結果より、次式のような平均等価減衰を提案した。⁵⁾

$$h_e = 0.2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) + 0.02 \quad (5)$$

本研究では、最大応答変位が生じた時の半ループから(2)式より CASE1, CASE2, CASE3 に対して h_{eq} を求め、さらに(4)式より CASE2, CASE3 に対して h_s を求め、継続時間の違いによる比較を試みた。図-10 に横軸に最大変位をとり、縦軸に h_{eq} , h_s をとったものを示す。また図中には、(3)式、(5)式を併せて示す。これを見ると、まず静的載荷での h_{eq} は動的載荷に比べて大きな値を示している。動的載荷では最大変位が大きくなると、 h_s は h_{eq} よりも小さな値を示している。また CASE3 では、大変形時になると CASE2 に比べて減衰がかなり大きな値を示している。CASE3 のように瞬間的な入力を受ける場合と、CASE2 のように多数回繰り返しを受ける場合とでは、その減衰性状がかなり異なることがわかる。また柴田が提案した(5)式は、CASE2 の h_s とほぼ同じような値を示しているが CASE3 は(3)式に近いことが分かる。

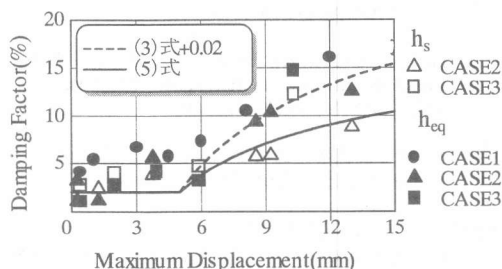


図-10 各減衰性状の比較

5. 3 エネルギー応答

エネルギー応答の釣合式は、振動方程式に微小変位 $dy = \dot{y} dt$ を乗じて積分することにより次式のように表される。

$$\int_0^t m\ddot{y}\dot{y} dt + \int_0^t D(\dot{y})\dot{y} dt + \int_0^t Q(y)\dot{y} dt = \int_0^t (-m\ddot{y}_0)\dot{y} dt \quad (6)$$

ここで右辺 $\int_0^t (-m\ddot{y}_0)\dot{y} dt$ は地震入力エネルギー E_I として建物に与える累積的な損傷を評価する 1 つの指標と考えられている。

また地震の途中で大きな変形を生じさせるようなエネルギー入力の激しさを表す指標として、ある単位時刻 Δt における入力エネルギーの増分値である瞬間入力エネルギー ΔE が重要である。本研究では、次式のように瞬間入力エネルギー ΔE を定義した。⁶⁾

$$\Delta E = \int_t^{t+\Delta t} (-m\ddot{y}_0)\dot{y} dt \quad (7)$$

ここで、 Δt は図-11 のように応答変位が極値から極値になるまでの半ループ継続時間と定義する。

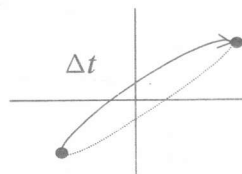


図-11

図-12 に CASE2, CASE3 の各 RUN5 における各エネルギー応答の時刻歴を示す。なお瞬間入力エネルギーのグラフは縦軸に Δt 中の単位時間当りの入力エネルギー量 $\Delta E / \Delta t$ で示している。これを見ると、CASE2 では何度も比較的大きなエネルギーが

入力されているのに対し、CASE3 ではほとんど 2 度だけしか入力されていない。また ΔE が大きな値を示している時刻では応答変位も大きいといえる。図-13 に各加振階において変位を更新した際の ΔE と、その変位最大値との関係を示す。これを見ると ΔE と応答変位との間には高い相関性があるといえるが、CASE3 の RUN5 は CASE2 と比べて、 ΔE の値の割に応答変位がやや小さい。また図-14 に CASE2, CASE3 の各 RUN5 での ΔE_{max} (ΔE の最大値) 入力時の半ループを示す。これを見ると、 ΔE_{max} 入力時の履歴性状は、CASE2 では両振幅型の傾向であるのに対して、CASE3 では片振幅型の傾向を示し、片側だけで大きなループ面積を囲んでいる。

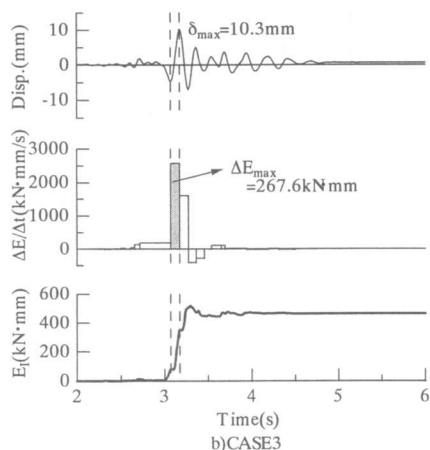
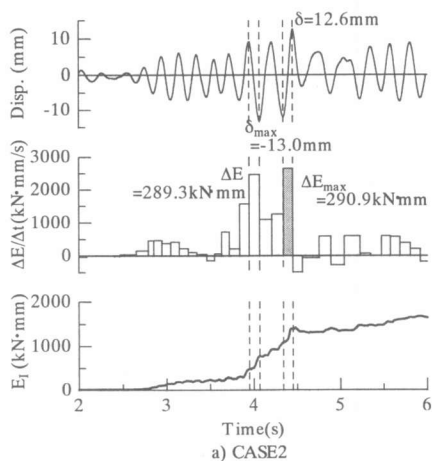


図-12 各エネルギー応答時刻歴

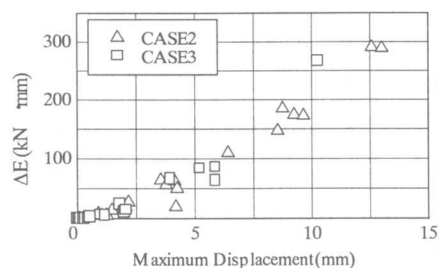


図-13 ΔE と最大変位の相関

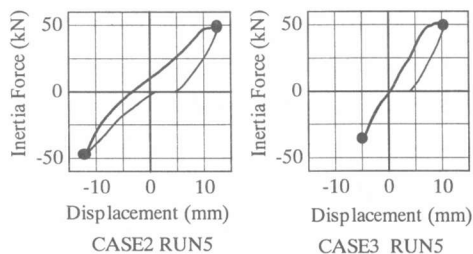


図-14 $\Delta E_{\max}$ 入力時の履歴性状

6. まとめ

RC 柱試験体について、静的載荷実験と継続時間の異なる 2 種類の模擬地震波による振動台実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 静的載荷より動的載荷の方が最大耐力が約 10% 程度上昇していることが確認され、この上昇率は最大耐力時に主筋が上降伏点に達したと仮定した時の、文献 2) の式(1)で概算した値と概ね一致した。
- 2) 減衰性状の比較では、静的載荷の CASE1 や繰返し回数の少ない CASE3 と比べて、繰返し回数の多い CASE2 の減衰が小さめの値となった。
- 3) 瞬間入力エネルギー ΔE と応答変位とは高い相関性があり、 ΔE が大きな値を示している時刻では応答変位も大きい値であった。
- 4) 大変形領域において、継続時間の長い CASE2 では、幾度も比較的大きな ΔE が入力されたが、継続時間の短い CASE3 では、瞬間的に入力を受ける片振幅型の傾向を示し、 ΔE の値の割に応答変位がやや小さかった。

謝辞

本研究は、1997 年度文部省科学研究費補助金 重点領域研究(2)「振動台実験による直下型地震の破壊特性の評価に関する研究」(課題番号 09234204, 研究代表者 井上範夫)の一環として行われました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 五十嵐克哉: 振動台による鉄筋コンクリート構造物の動的実験法に関する研究, 東京大学博士論文, 1993.1
- 2) 小谷俊介: 鉄筋コンクリートにおける載荷速度の影響, コンクリート工学, Vol.21, No.11, pp.23-34, 1983.11
- 3) 細谷 博ほか: 鉄筋コンクリート部材の耐力と破壊性状に及ぼすひずみ速度の影響に関する研究—材料実験と高軸力が作用する柱部材の水平加力実験, コンクリート工学論文集, Vol.4, No.2, pp.2343-56, 1993.7
- 4) Gulkan, P. and M.A. Sozen: Inelastic Response of Reinforced Concrete Structures to Earthquake Motions., Journal of ACI, Vol. 71, No.12, Dec. 1974
- 5) 柴田明徳: 等価線形系による非線形地震応答の解析に関する一考察, 東北大学建築学報, No.16, 1975.3
- 6) 中村孝也, 堀 則男, 井上範夫: 瞬間入力エネルギーによる地震動の破壊力特性評価と応答変形の推定, 日本建築学会構造系論文集, No.513, pp.65-72, 1998.11