

# 模型振動実験によるRC柱の破壊性状とエネルギー入力

大谷圭一<sup>1</sup>・加藤敦<sup>2</sup>・長島一郎<sup>3</sup>・船原英樹<sup>4</sup>・藤井俊二<sup>3</sup>・岡本晋<sup>5</sup>

<sup>1</sup>工修 防災科学技術研究所 総合防災研究部門 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 防災科学技術研究所 総合防災研究部門 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

<sup>3</sup>工博 大成建設株式会社 技術センター 建築技術研究所 (〒245-0051 神奈川県横浜市名瀬町344-1)

<sup>4</sup>工修 大成建設株式会社 技術センター 建築技術研究所 (〒245-0051 神奈川県横浜市名瀬町344-1)

<sup>5</sup>正会員 工博 科学技術振興事業団 (防災科学技術研究所へ派遣) (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

RC 構造物の強度を評価する際に考慮すべき載荷速度の影響と、RC 構造物の被害と入力エネルギーの関係について調べるため、RC 造の柱をモデル化した 1/2 スケール試験体の模型 2 体の振動実験を実施した。実験の結果、鉄筋のひずみ速度の効果と考えられる耐力の増加が見られた。また、実験結果から瞬間入力エネルギーと総入力エネルギーを評価し、実験時の最大応答変形と比較したところ、最大応答変形は両試験体ともに瞬間入力エネルギーと相関があるが、繰返し加振を行い損傷が徐々に進行した場合は総入力エネルギーとの相関のほうが良くなることがわかった。

**Key Words :** reinforced concrete column, shaking table test, dynamic failure test, energy input

## 1. はじめに

強震時の RC 構造物の強度を評価する際に、載荷速度の影響を考慮する必要性が報告されている<sup>1)</sup>。また、構造物の損傷における最大瞬間入力エネルギーの重要性が広く認識され、RC 構造物の被害と入力エネルギーの関係についても数値解析的及び実験的な研究が実施されている<sup>2)</sup>。

本研究では、RC造3階建て程度のピロティー形式の建物の1階柱を想定して、強震時の破壊性状を、繰返し加振の影響、および、地震時のエネルギー入力と破壊性状の関係に注目して振動台実験を実施した<sup>3)</sup>。また、載荷速度に伴いRC試験体の強度が増加することを見込んだ解析を実施することにより、実験結果の評価を試みた。なお、振動台実験には防災科学技術研究所の大型振動台を使用した<sup>4)</sup>。

## 2. 模型振動実験

### (1) 試験体

試験体は写真-1に示すように2本のRC造の柱で支持される1層1スパンの構造物である。試験体は同一のものを2体製作した。柱は30cm×60cmで、試験体の上部構造に1Gの加速度が生じても柱下端に生じる曲げモーメントが終局モーメント以下となるように図-1のように配筋した。また、はりの上面に鋼製のインゴットを載せることにより上部構造の質量を $32.9 \times 10^3 \text{kg}$ と、柱の圧縮応力が圧縮強度 $\sigma_B$ のほぼ1/6程度となるようにPC鋼棒で軸力を導入した。使用したコンクリートの

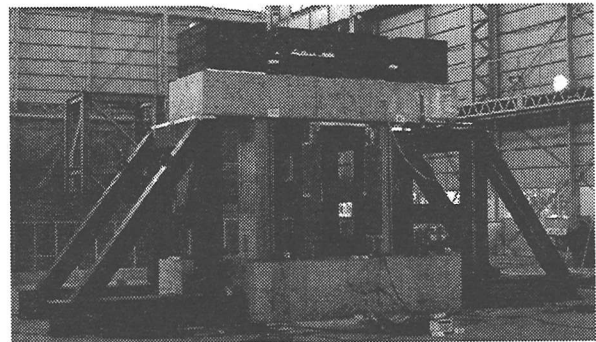


写真-1 試験体外観

表-1 試験体の強度等

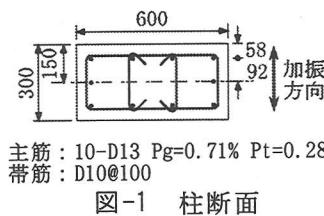


図-1 柱断面

試験体	A	B
圧縮強度 $\sigma_B$ (Mpa)	18.2	19.1
ヤング係数 E $\times 10^4 \text{MPa}$	2.19	2.20
柱の曲げ 終局モーメント Mu $\times 10^4 \text{kN} \cdot \text{cm}$	1.156	1.163

強度試験結果から略算式<sup>5)</sup>に基づいて評価した曲げ終局モーメントを表-1に示す。2つの試験体、A、Bには曲げ終局モーメントに大差ないことがわかる。

### (2) 実験方法

前述の2体の試験体に対して地震動のレベルを漸増させて破壊に至らせるケース(A試験体)と、一回の大きな地震動で破壊させるケース(B試験体)の2種類の実験を実施し、両者の破壊性状の相違を確認した。地震波は兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録NS成分を

表-2 試験ケースと代表的試験結果

試験体	ケース名	加振加速度 cm/sec <sup>2</sup>	頂部加速度 cm/sec <sup>2</sup>	相対変位 mm	変形角	固有振動数 Hz
A	試験前	---	---	---	---	7.48
	A01K080	81	109	0.5	1/3922	---
	A02K240	217	298	1.6	1/1290	7.40
	A03K400	375	704	11	1/182	6.60
	A04K818	926	845	97	1/21	3.28
	A05K1040	1372	823	177	1/11	1.92
B	試験前	---	---	---	---	7.36
	B01K1040	1383	897	143	1/14	2.28
	B02K1230	1762	777	185	1/11	1.92

試験体の長手1方向に入力した。長さの相似則を1/2とし、加速度を実物と一致させるため、時間軸を1/√2とした。表-2に加振ケースと各加振直後に実施した目標20cm/sec<sup>2</sup>のホワイトノイズ加振の結果得られた固有振動数を、試験前の結果とともに示す。試験前の固有振動数は7.36~7.48Hzで、破壊の進展に伴い剛性が低下し、実験終了時には両試験体とも1.92Hzと、固有振動数が実験開始時の約1/4に低下した。

### (3) 実験結果

表-2に実験結果を併記する。A試験体は400 cm/sec<sup>2</sup>目標加振(A03K400)で柱上下端に曲げクラックが生じた。818 cm/sec<sup>2</sup>目標加振(A04K818, 以下、原波加振と呼ぶ)でコンクリートの一部が圧壊し、剥落が生じた。この時点で柱下端で計測した鉄筋の抜け出し量が10mmを超えた。1040 cm/sec<sup>2</sup>目標加振(A04K1040, 以下、限界加振と呼ぶ)でコンクリートの損傷が進行し部分的に鉄筋が露出し、変形角が1/11に達した。B試験体は限界加振(B01K1040)で柱上下端のコンクリートの一部が圧壊し、剥落が生じ、変形角が1/14に達した。この時点で鉄筋の抜け出し量が10mmを超えた。1230 cm/sec<sup>2</sup>目標加振(B02K1230, 以下、最大加振と呼ぶ)でコンクリートの損傷が進行し、変形角が1/11に達し、部分的に鉄筋が露出した。

図-2にA試験体の原波加振、限界加振およびB試験体の限界加振における上部工に作用した慣性力と柱の水平変形量との関係を示す。A試験体は原波加振時(A04K818)に試験体が降伏した。最初に降伏した時の水平慣性力(以下、最大耐力と呼ぶ)は255kNで、略算式に基づいて算出した値(以下、水平耐力と呼ぶ)230kNの約10%増となった。この後の限界加振時には耐力が低下した。B試験体では最大耐力が275kNに達し、略算式による水平耐力の約20%増となった。

## 3. 実験結果の解析

### (1) 鉄筋のひずみ速度による耐力増加

一般に、鉄筋はひずみ速度の増加に伴い耐力が増加する<sup>1)</sup>。図-3にB試験体の限界加振時の鉄筋のひずみ波形と、この波形から算出したひずみ速度波形

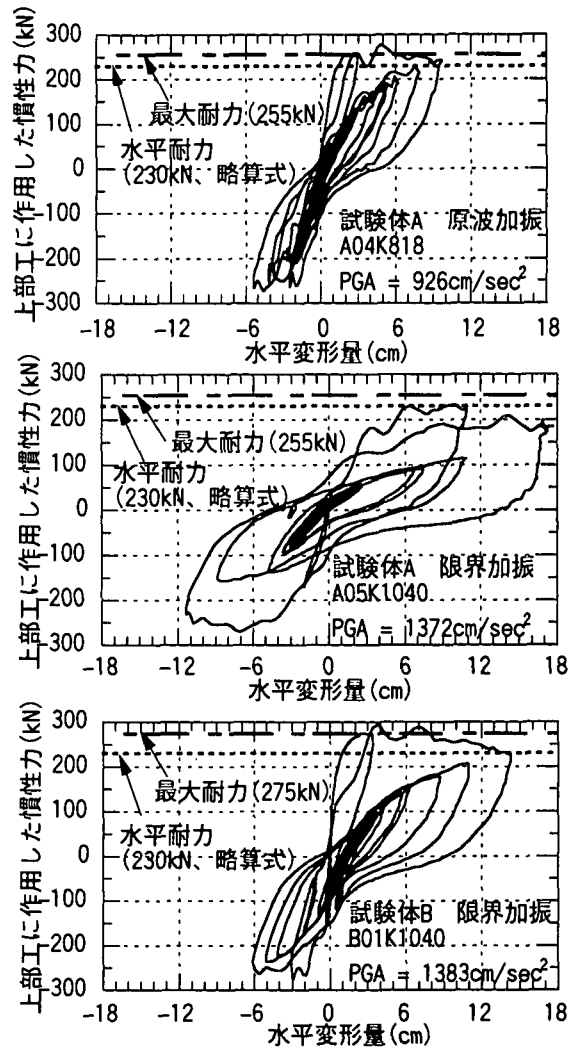


図-2 代表ケースの慣性力-水平変形関係

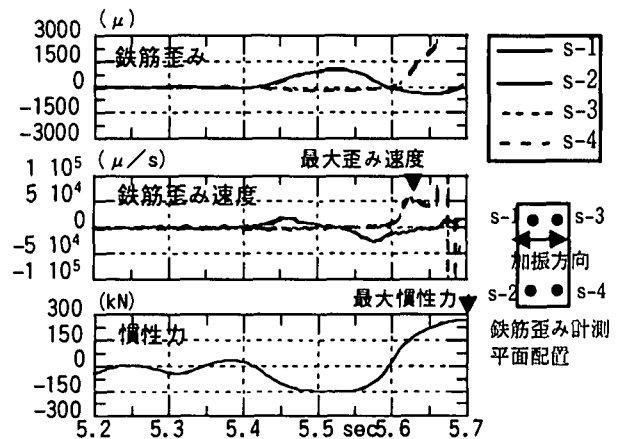


図-3 鉄筋のひずみ速度(B01K1040: 1383Gal入力)

を集中質量の慣性力の時刻歴波形とともに示す。s-1とs-2, s-3とs-4の波形はそれぞれ重なっており計測精度は高い。鉄筋ひずみは引張が正であり、s-3, s-4が計測不能となるまでの最大値は概ね50,000 μ/sであった。この値をひずみ速度に伴う鉄筋の耐力増加を表す式(1)<sup>1)</sup>に代入すると、耐力の増加率が1.13となった。この値は実験から得られたA試験体の耐力増加率約10%、B試験体の耐力増加率約20%と概ね対応した。

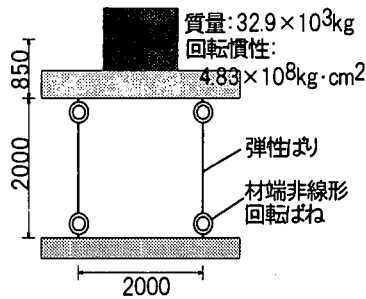


図-4 解析モデル

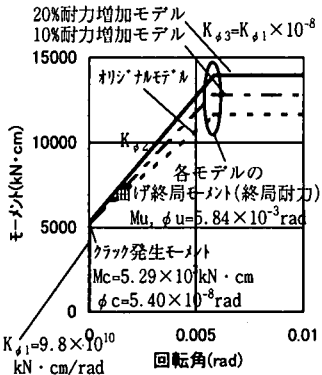


図-5 柱頭・柱脚部の弾塑性回転ばね

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

ここで、 $\alpha$  : ひずみ速度に伴う耐力の増加率  
 $\dot{\epsilon}$  : ひずみ速度 (1/sec)

## (2) 解析モデル

図-4 にここで使用した解析モデルを示す。柱は弾性ばりとし、柱頭部と柱脚部に Degrading Tri-Linear(武田)モデル<sup>6)</sup>の特性を有する材端回転ばねを設けて柱の非線形特性を表す。クラック発生モーメント、曲げ終局モーメント(以下、降伏耐力と称す)は鉄筋コンクリート構造の耐震設計<sup>5)</sup>に基づいて設定した。なお、この解析では図-2 に示した最大耐力および水平耐力を降伏耐力と呼ぶことにする。クラック発生後の剛性は、せん断も考慮したはりの弾性時剛性に対する等価降伏剛性低下率 $\alpha_y$ を用い(2)式により評価した<sup>7)</sup>。

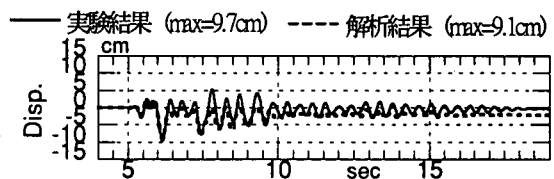
$$\alpha_y = (0.043 + 1.64np_t + 0.043 \frac{a}{D} + 0.33 \frac{N}{bD\sigma_B}) (\frac{d}{D})^2 \quad (2)$$

ここで、 $n$  : 鉄筋とコンクリートの弾性係数比、 $p_t$  : 引張鉄筋比、 $a$  : せん断スパン、 $D$  : 部材せい、 $N$  : 初期軸力、 $b$  : 部材幅、 $\sigma_B$  : コンクリート圧縮強度、 $d$  : 有効せい

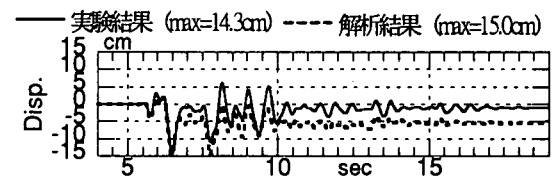
クラック発生前の剛性  $K_{d1}$  は  $9.8 \times 10^{10} \text{ kN} \cdot \text{cm/rad}$  と回転が生じないようにし、降伏後の剛性はこの値の  $1/10^8$  とした。ただし、降伏耐力は(1)式に示したように、鉄筋のひずみ速度の増加に伴う耐力の増加に伴って増加するものと考え、近似的に降伏耐力を試験体 A で 1.1 倍、試験体 B で 1.2 倍として解析した。図-5 に使用した弾塑性回転ばねの特性を示す。

## (3) 解析結果

モデル	割捨	10% 耐力増加	20% 耐力増加
曲げ終局モーメント (終局耐力)			
$M_u$			
$\times 10^4$			
kN·cm	1.16	1.28	1.40
$K_{d2}$			
$\times 10^3$			
kN·cm	1.09	1.28	1.48
rad			
$K_{d2}/K_{d1}$			
$\times 10^{-5}$	1.11	1.31	1.51



(a) 最大応答変形 (A04K818 : 926cm/sec<sup>2</sup> 入力)



(b) 最大応答変形 (B01K1040 : 1383cm/sec<sup>2</sup> 入力)

図-6 実験結果と解析結果の比較

各試験体で、それぞれ最大耐力に達した加振、すなわち、A 試験体では原波加振(A04K818)のケース、B 試験体では限界加振(B01K1040)のケースについて解析した。なお、これらの解析では試験体の履歴減衰の影響が大きいため粘性減衰は無視した。

解析結果と実験結果を比較して図-6 に示す。最大応答変形は両者でほぼ一致しているが、最大変形発生後は両者に差が見られ、解析結果のほうが残留変形が大きかった。実験では軸力を付加するために PC 鋼棒を使用しており、この張力による復元力の影響も一因と考えられる。

## 4. エネルギー入力

### (1) 瞬間入力エネルギーと総入力エネルギーの計算方法

試験体のエネルギー収支は、試験体を 1 質点振動系とみなすと下式のように表される<sup>2)</sup>。

$$\int_0^T M \ddot{x} \dot{x} dt + \int_0^T D(\dot{x}) \dot{x} dt + \int_0^T F(x) \dot{x} dt = - \int_0^T M \dot{x}_0 \dot{x} dt \quad (3)$$

ここで、 $M$  : 質点質量、 $x$  : 質点相対変位、  
 $D(\dot{x})$  : 減衰力、 $F(x)$  : 復元力、  
 $\dot{x}_0$  : 入力加速度、 $T$  : 継続時間

総入力エネルギー及び瞬間入力エネルギーは下式で表される。

$$\text{総入力エネルギー} : E = - \int_0^T M \dot{x}_0 \dot{x} dt \quad (4)$$

$$\text{瞬間入力エネルギー} : \Delta E = - \int_t^{t+\Delta T} M \dot{x}_0 \dot{x} dt \quad (5)$$

$\Delta E$  の評価において、 $\Delta T$  の設定方法はいくつか提案されているが、ここでは井上等<sup>2)</sup>にならない、運動エネルギーがゼロになる時間間隔を採用した。したがって  $\Delta T$  が時刻によって異なる。これは、変形の正負極大値間の入力エネルギーを評価することに対応する。ここでは、加振直交成分および回転成分は並進成分に比べて小さかったため並進成分だけを考慮した。

### (2) 入力エネルギーと最大変形

限界加振に対する A、B 両試験体の総入力エネルギー、瞬間入力エネルギーと応答変形を比較した結果を図-7 に

示す。ここで、瞬間入力エネルギーはその値を算出する際に使用した $\Delta T$ で割った値で示しており、時間ゼロからの積分値が総入力エネルギーとなる。同図から応答変形と瞬間入力エネルギーの最大値発生時刻が良く対応した。ただし、瞬間入力エネルギーの最大値が両者でほぼ一致しているのにB試験体の最大応答変形がやや小さく、また、B試験体では瞬間入力エネルギーが一つの顕著なピークを持つのにに対し、A試験体ではB試験体に比較して長い時間にわたって瞬間入力エネルギーが大きくなった。これらは、繰り返し加振により試験体の損傷が進行した影響によるものと考えられる。

各加振時の最大瞬間入力エネルギー及び総入力エネルギーと最大応答変形との関係を図-8に示す。最大瞬間入力エネルギーと最大応答変形の間には相関が見られるものの、ほぼ同一の最大瞬間入力エネルギーであってもA05K1040とB01K1040のように、最大応答変形に若干の差が見られた。これは、繰返し載荷により損傷が徐々に進行した影響によると考えられる。一方、総入力エネルギーと最大応答変形との関係は繰返しの影響も考慮しているため、最大応答変形との相関は、最大瞬間入力エネルギーよりも良くなった。

## 5. まとめ

RC製の柱をモデル化した1/2スケールの1層試験体を2体製作し、地震動を漸増して破壊に至らせるケース(A試験体)と、一回の大きな地震動で破壊させるケース(B試験体)について模型振動実験を実施し、両者の破壊性状を比較した結果、以下の点が明らかとなった。

- (1) 目標最大加速度を $1040\text{cm/sec}^2$ まで漸増させた加振により試験体柱の変形角は $1/11$ 、いきなり $1040\text{cm/sec}^2$ を入力した試験体の変形角は $1/14$ に達し、どちらも柱頭・柱脚部で曲げ破壊が生じた。
- (2) 略算式を使用して算出した水平耐力と比較すると、地震動のレベルを漸増して破壊させた場合には約10%、一回の大きな地震動で破壊させた場合には約20%最大耐力が増加した。この耐力増加は、一般に言われているように鉄筋のひずみ速度の効果と考えるとほぼ説明できる。
- (3) 柱頭・柱脚部に弾塑性回転ばねを設けたモデルを使用し鉄筋のひずみ速度に伴う耐力の増加を考慮した解析を行ったところ、最大変形を概ね評価できた。
- (4) 最大応答変形は最大瞬間入力エネルギーと良い相関があることを確認した。ただし、繰返し載荷の影響で損傷が進むと、総入力エネルギーとの相関のほうが良くなる傾向が見られた。

謝辞：本研究は「アジア・太平洋地域に適した地震・津波災害軽減技術の開発とその体系化に関する研究」(研究リーダー：亀田弘行)の内、「地域特性を反映した建築物の耐震化技術の開発」の一環として実施したものである。研究を進めるにあたり、東北大学建築学科井上範夫教授の御指導・御助言をいただきました。記して感謝致します。

### 参考文献

- 1) 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, pp. 23-34, 1983.11

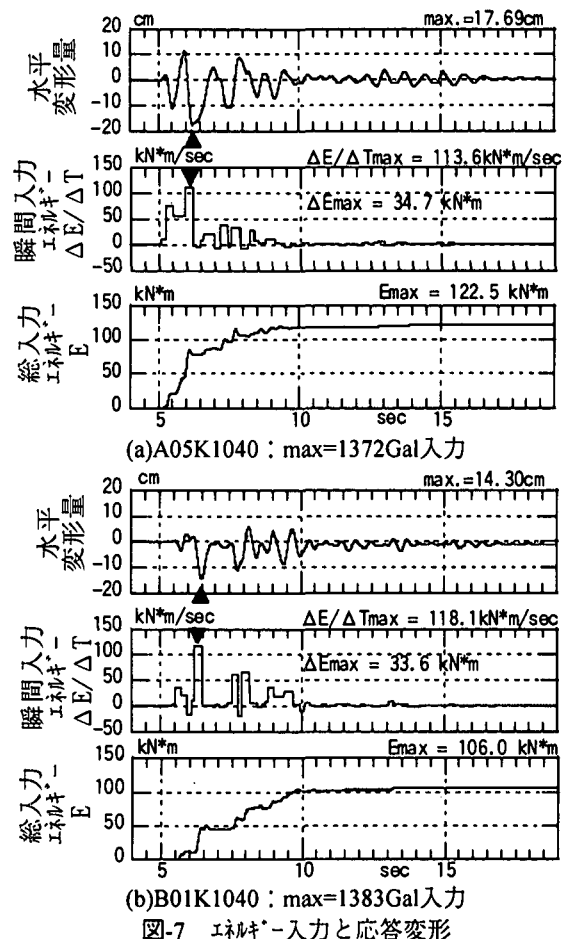


図-7 エネルギー入力と応答変形

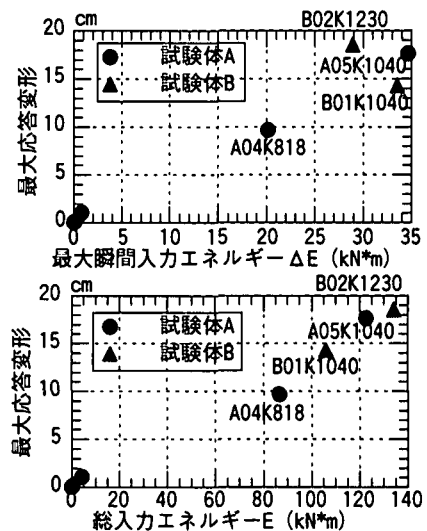


図-8 入力エネルギーと最大応答変形

- 2) たとえば、井上範夫他：RC 構造物の応答に対する地震動のエネルギー入力性状の検討，コンクリート工学年次論文報告集
- 3) 加藤敦他：RC 柱の振動台破壊実験(その 1)試験計画と結果概要，日本建築学会大会学術講演概要集,2001(投稿中)
- 4) 長島一郎他：RC 柱の振動台破壊実験(その 2)エネルギー入力と破壊性状，日本建築学会大会学術講演概要集,2001(投稿中)
- 5) 梅村魁，大澤胖監修：新しい耐震設計講座 鉄筋コンクリート構造の耐震設計，オーム社
- 6) Takeda, T, et al : Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, ASCE, Vol.96, No. ST12, 1970
- 7) 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，日本建築学会