

RC 建物の中間階崩壊メカニズムに関する基礎的考察

CONSIDERATIONS ON MECHANISM OF RAPTURE FAILURE
IN SOME RC BUILDINGS DUE TO IMPULSIVE EARTHQUAKE MOTION

大野 友則*、藤掛 一典**、那谷 晴一郎***、上田 東****

Tomonori OHNO, Kazunori FUJIKAKE, Sei-ichiro NATANI and Azuma UEDA

*工博 防衛大学校 教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**博(工) 防衛大学校 講師 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

***工修 大阪市立大学 助手 工学部建築学科 (〒558-0022 大阪府大阪市住吉区杉本 3-3-138)

**** 防衛大学校 学生 土木工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

キーワード：衝撃的地震動、RC 建物の中間階崩壊、初期軸圧比、衝撃インピーダンス

(impulsive earthquake motion, rapture failure in RC buildings, initial axial stress state, impulsive impedance)

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、鉄筋コンクリート(以後 RC)造および鉄骨鉄筋コンクリート(以後 SRC)造建物に多くの被害が生じた。その中で注目された被害形態に、中低層 RC 建物に生じた中間階崩壊あるいは層崩壊と呼ばれる現象がある。中間階崩壊または層崩壊とは、「特定の階(層)に損傷集中が起こり、その階(層)が鉛直力支持能力をなくして崩壊に至る」破壊形態のことである。柱が水平方向に変位して崩壊に至るのではなく、鉛直(柱軸)方向に崩壊したところに特徴がある。破壊形態としての中間階崩壊はどの階にも発生の可能性はあるが、今回の地震では1階(最下層)と中間階に発生している例が多い。最下層の崩壊は、剛性・耐力が1層で急減するピロティ形式の建物に多く発生していることが報告されている¹⁾。また中間階の崩壊は、10階程度の SRC/RC 造建物の中間で起こっており、日本における構造物の地震被害史上初めての経験であり関係者に大きな衝撃を与えている。その後の調査によれば、崩壊した建物はすべて旧基準による非充填型 SRC 造であり、現行基準により設計された建物は無被害であったことが報告されている。つまり、関係技術者や研究者にとって、中間階崩壊に対する関心はその形態の新奇さから取り上げられたものであり、現行基準の設計法を見直

すためのものではないということである。

震災後5年を経過したが、この間この形態の崩壊問題に対して多くの解析的検討がなされてきた。その検討結果のほとんどは、以下のような原因であることを説明している¹⁾。

(1) 最下層崩壊は、1層部分へのせん断変形の集中と他層との強度比(水平剛性が小さい)および高圧縮軸力の作用により生じたものと考えられる。すなわち、中間層に比べ最下層の柱は大きな長期軸力を支えているが、鉛直動が崩壊に及ぼす影響は小さい。また、ピロティ形式建物の最下層では転倒曲げによる変動軸力の影響が大きく、崩壊した建物を対象として鉛直動を考慮した解析を行っても鉛直動の影響は小さい。

(2) 中間階崩壊は、柱のせん断変形にともなう耐力低下により崩壊が生じたと考えられる。その崩壊は、水平変形が10%以上となるような大変形で起こる。また、どの階で変形集中が起こるかは耐力低下の度合いによるため、崩壊の場所を特定することは困難である。すなわち、水平変形によるせん断耐力不足および水平剛性の不均一さに起因している。

このように、一般論としては鉛直動の存在を認めながらも、その影響を十分に考慮して今後の対策に生かすという積極的な検討は行われていないのである。しかし、この破壊形態をもたらした原因は、急

激な鉛直下方向からの衝撃的な作用したことにありと考えた方が良くと考えられる事例が多くあることも見逃せない^{2),3)}。

中低層建物が水平力を受けると、建物階柱は柱が接合されている位置の床移動の相対量だけ水平面内で移動する。水平動が作用して生じる柱頭と柱脚の相対水平変位量は、剛床の仮定が成立していれば同一階の柱には同一形式の破壊モードと破壊の大きさが生じる。そのため、大きな正負の水平変形が生じると、柱の上下には同程度の破壊が生じるはずである。ところが実際に層崩壊した建物の柱には、中間部の X 型の破壊だけが生じており、中間階崩壊の原因が水平力によると断定するには力学的な矛盾がある。

2 中間階崩壊の原因に対する考え方と指標

2.1 衝撃波伝播層インピーダンス

衝撃的地震動に対する中間階崩壊現象を説明する一つの考え方として、衝撃理論に基づく衝撃波伝播層インピーダンスの概念がある。本来の力学的インピーダンスは単振動系における力と粒子速度の比として与えられるが、ここで定義する衝撃波伝播層インピーダンスは、強制力を受ける運動系における伝播抵抗力と媒質体内における衝撃波の伝播速度との比で与えられる。伝播抵抗力および衝撃波伝播速度は、無次元力としての初期層軸歪および衝撃波伝播速度をそれぞれ用いる。初期層軸歪は、静止つり合い系における層軸歪であり、各階重量の累和 $\Sigma (W_i)$ ($i=1, \dots, N$; N は最上階から当該階までの階数) を、当該階の鉛直構造部材断面積 A と材料の弾性係数 E との積 (軸剛性) の当該階での総和 (層軸剛性) $\Sigma (E_j A_j)$ ($j=1, \dots, M$; M はその階での全鉛直構造部材数) で除した値、すなわち初期層軸歪は、 $\Sigma (W_i) / \Sigma (E_j A_j)$ で与えられる。層インピーダンスが大きい階では、他の階に比べて抗力の累和による大きな静的圧縮ひずみが生じ、媒質の高密度化から剛な力学的境界条件が与えられるため運動エネルギーは速度の 2 乗で急激に増大し、この結果構造部材の破壊につながると思われる。

したがって、多層建物について層インピーダンス分布を求めることにより、層崩壊が生じる階の特定ができることになる。この考え方によれば、10 階建物の例では次のようになる。この建物は、上階に行く程柱幅が漸減する断面をもつラーメン形式の標準

タイプとする。また、各階床重量 W_0 および構造部材数は各階とも同一とする。この場合には、初期層軸歪比は表-1 のようになる。

表-1 各階柱の初期層軸歪比

階数	標準柱寸法 (cm)	各階重量累和	初期層軸歪比
10	35×35	W_0	1.00
9	40×40	$2W_0$	1.54
8	45×45	$3W_0$	1.82
7	50×50	$4W_0$	1.97
6	55×55	$5W_0$	2.03
5	60×60	$6W_0$	2.05
4	65×65	$7W_0$	2.04
3	70×70	$8W_0$	2.01
2	80×80	$9W_0$	1.73
1	90×90	$10W_0$	1.52

この例では、5 階の層インピーダンスが最大値となっており、この階に層崩壊が発生する可能性が高いことを示している。

2.2 初期軸歪比

物体が部材または材料に衝突する場合は衝撃問題として取り扱われ、材料の挙動は衝撃波の伝播理論や材料の高速度変形論が適用される。前述の衝撃波伝播層インピーダンスの概念は、この観点から考察したものである。断層破壊によって生み出される地震は、波動の地震力として地中を伝播し、反射や屈折を繰り返しながら地表面に到達して地盤を押し上げかつ振動させる。したがって、地盤上に立つ建造物の地震応答は、地盤と建造物の相互作用によって発生する応力波の建造物内での伝播問題として取り扱う方が妥当であると考えられる。

一般に、衝撃とは極めて短い時間に作用する力学的現象であり、2つの物体の衝突・接触間に発生する力が衝撃力である。衝撃力の大きさおよび作用時間は、衝突速度・物体の形状・材料特性および衝突面での接触条件などによって決まる。すなわち、2物体の衝突によって発生する応力の問題は、衝突体と被衝突体との相互作用に依存する。

一方、ある境界面で接している2つの物体があり、相対的に大きな質量を有する物体が急激な高速度の運動を生じたとすると、接触している静止物体の接触面近傍に高速の力が作用することになる。この現象は、物体の衝突によるものではないため「衝撃」ではなく、取り扱いの区分上「衝撃的」と呼んでいる。ある質量と長さを有する1次元棒の一端が衝撃

的な力の作用を受けると、棒は慣性のため静止状態を保とうとし、力の作用端から離隔した他端は瞬間的に固定の条件となる。これは、剛な床に鉛直に固定された棒に、高速度の荷重または変位を軸方向に負荷する急速載荷実験の状況と同様の現象であるとみなせる。また、急速載荷の場合は衝突載荷とは異なるので、応力波による破壊ではなく材料の高速度変形破壊の問題として取り扱えばよい。

そこで本研究では、地盤の急激な変位により地震力が衝撃的に建物に作用し、中間階崩壊が発生したと考える。一端固定条件下にある断面が全体にわたって均一な棒の一端に急速荷重を載荷した場合、荷重作用端または固定端近傍に局部的な破壊が生じることが知られている。これに対し、軸方向に断面が異なる棒（変断面棒）が急速載荷を受ける場合については、破壊位置を特定するまでには至っていない。上階に行くほど柱断面が減少する建物では各コンクリート柱の間に床等の重量が作用しているため、位置によって初期軸応力の値が異なる変断面棒の状態となっている。この場合には、一端に高速の荷重が作用すると、時間的に最も早く材料の圧縮強度に達した断面に破壊が生じると考えられる。

したがって、各階柱が同一の材料特性を有する場合は、柱の初期軸応力 $(\Sigma (W_i)) / A_i$ ($i=1, \dots, N$; N は最上階から数えて当該階の数) を求めておけばよい。すなわち、最初に崩壊が発生する階の柱は、最大の軸応力を負担している柱であり、各階柱の軸応力の比（初期軸圧比： γ ）を求めることにより位置を特定できることになる。

初期軸圧比 γ は、

$$\gamma = (\Sigma (W_j)) / A_j \bigg/ (\Sigma (W_i)) / A_i$$

で定義する。ここに、 $j = 1, \dots, K$ ； K は基準となる階の番号、 A_K は基準とする K 階の柱の断面積、 W は重量である。

例えば、表-1 に示した標準タイプの建物に対して計算 ($K=1$) すると、表-2 のようになる。表をみると、初期層軸歪比の最大値 (2.05) は 5 階で、初期軸圧比の最大値 (2.04) は 5 階となり、両者は同じ結果を与えることがわかる。

ここで、初期層軸歪は、

$$\Sigma (W_i) / \Sigma (E_i A_i)$$

初期軸圧比は、

$$\gamma = (\Sigma (W_j)) / A_j \bigg/ (\Sigma (W_i)) / A_i$$

である。 $K=1$ の場合は、

表-2 初期層軸歪比と初期軸圧比の比較

階数	標準 柱寸法 (cm)	各階 重量	初期 層軸歪比	初期 軸圧比
10	35×35	W_0	1.00	1.00
9	40×40	$2W_0$	1.54	1.53
8	45×45	$3W_0$	1.82	1.82
7	50×50	$4W_0$	1.97	1.96
6	55×55	$5W_0$	2.03	2.03
5	60×60	$6W_0$	2.05	2.04
4	65×65	$7W_0$	2.04	2.03
3	70×70	$8W_0$	2.01	2.00
2	80×80	$9W_0$	1.73	1.72
1	90×90	$10W_0$	1.51	1.51

$$\gamma = (\Sigma (W_i)) / A_i \bigg/ W_i / A_i$$

で、それぞれ与えられる。初期層軸歪比は、上記の場合

$$\begin{aligned} & (\Sigma (W_i) / \Sigma (E_i A_i)) \bigg/ (\Sigma (W_i) / \Sigma (E_i A_i), i=1) \\ & = (\Sigma (W_i)) / E_i A_i \bigg/ W_i / E_i A_i \end{aligned}$$

となる。つまり、本研究で定義した初期軸圧比は、各階柱がすべて同一材料 (E_i ：一定) であるとした場合である。したがって、材料が異なる柱から成る建物の場合は、

$$\gamma = (\Sigma (W_j)) / E_j A_j \bigg/ ((\Sigma (W_i)) / E_i A_i)$$

とする必要がある。このとき、初期軸圧比は初期層軸歪に等しくなる。言い換えれば、衝撃波伝播速度理論に基づいた概念として提案した衝撃波伝播層インピーダンスは、各階柱の静的な軸応力比と等価である。

ここで、中間階で崩壊した 8 階建て RC 建物の例について、各建物の初期軸圧比を算定してみる。

表-3 中間階で崩壊した建物の初期軸圧比

階	柱寸法 (cm)	柱の水平 剛性比率	柱の鉛直 剛性比率	柱の 初期軸圧 比	備考
8	55×55	17.3	46.4	0.335	
7	55×55	14.3	38.2	0.669	
6	55×55	14.7	39.4	1.004	
5	60×60	20.8	46.9	1.125	
4	60×60	20.8	46.9	1.406	崩壊
3	70×70	38.6	63.8	1.240	
2	80×80	65.8	83.3	1.107	
1	90×90	100.0	100.0	1.000	

実際に層崩壊した 4 階柱では、初期軸圧比が最大となっていることがわかる。一方、鉛直剛性比率をみると、3 階から 4 階に移ると剛性が大きく減少していることから、層崩壊は剛性変化位置で発生するとみなすこともできる。しかしながら、4、5 階の剛性は等しく、剛性の変化だけでは層崩壊の位置を

特定することは困難であると考えられる。

次に、新耐震設計法により設計された地上5階のRC建物（1階駐車場、2階以上は事務所・共同住宅）の最下層が層崩壊したケースについて検討する。

表-4 最下層崩壊した建物の初期軸圧比

階	柱寸法 (cm)	各階重量	柱の初期軸圧比	
5	60×60	W_0	0.200	
4	60×60	$2W_0$	0.400	
3	60×60	$3W_0$	0.600	
2	60×60	$4W_0$	0.800	
1	60×60	$5W_0$	1.000	崩壊

この例は、1～5階まで同一の柱断面で建設され、しかも新しい耐震設計基準で設計された建物が層崩壊した例である。この場合も、崩壊した1階の柱における初期軸圧比が最大となっていることがわかる。

一方、地上12階建SRC造ラーメン構造の5階で層崩壊したケースでは、表-5のようになる。

表-5 12階SRC建物の初期軸圧比分布

階	柱寸法 (cm)	各階重量 (tonf)	柱の初期軸圧比	
12	70×70	W_0	0.188	
11	70×70	$2W_0$	0.375	
10	70×70	$3W_0$	0.563	
9	70×70	$4W_0$	0.750	
8	75×75	$5W_0$	0.817	
7	80×80	$6W_0$	0.861	
6	80×80	$7W_0$	1.0049	
5	85×85	$8W_0$	1.0173	崩壊
4	90×90	$9W_0$	1.0208	
3	95×95	$10W_0$	1.0180	
2	100×100	$11W_0$	1.0106	
1	105×105	$12W_0$	1.000	

このケースでは、軸圧比の最大値は4階であり、数字上からの評価では層崩壊はこの階に発生することが予測される。しかしながら、実際には5階に生じている。この階の軸圧比と最大値（4階）との差はわずかに0.34%であり、さらにその下の3階との差も0.27%にすぎない。つまり、3～5階の柱に生じている初期軸応力はほとんど同じであり、このような場合の特定は困難である。

以上のことから、中低層RC建物の各階柱の初期軸圧比は層崩壊または損傷の集中する位置を予測する指標として有効であることがわかる。

3 RC建物の模擬試験体に対する急速突き上げ載荷実験

著者らは、RC中低層建物の中間階崩壊は、衝撃的な鉛直方向の地震動入力により生じたのではないかと考えている。そして、各階柱における初期軸圧比の大きさが最大となっている柱に崩壊が発生するという仮説をたてた。その仮説に基づいて、実際に中間階で崩壊した建物の柱断面から軸圧比を概算したところ、崩壊した階と最大軸圧となる柱の階はほぼ一致することがわかった。そこで本章では、任意に設定した柱断面をもつ建物柱模型に対して「初期軸圧比」という指標により中間階崩壊の位置の特定が可能かどうかを実験的に調べることにした。実験は、急速載荷装置を用いた高速度急速突き上げ実験とし、建物が建っている地盤が瞬間的に（衝撃的に）鉛直方向に変位した場合を想定したものである。

3.1 急速突き上げ実験の概要

載荷装置は、急速載荷装置（最大荷重容量50tf、最大載荷速度4m/s および最大載荷ストローク150mm）本体と上から下向きの力の流れを下から上方向に変換するピストン装置（通称、突き上げ装置）から構成される。装置の概要を図-1に、試験体の設置状況を写真-1に示す。突き上げ装置は、急速載荷装置の載荷棒で入力側ピストンを急速に下降させることにより、出力ピストンに上昇の変位を与えるメカニズムになっている。出力ピストンによる突き上げ最大速度は1.4m/s、最大変位60mmである。

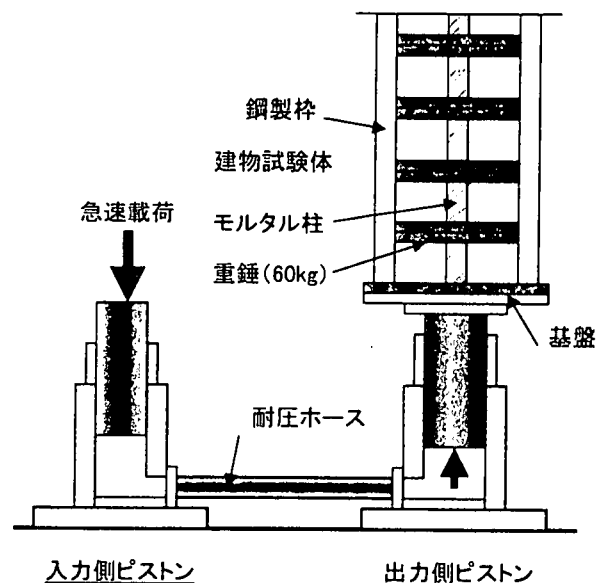


図-1 突き上げ実験装置の概要

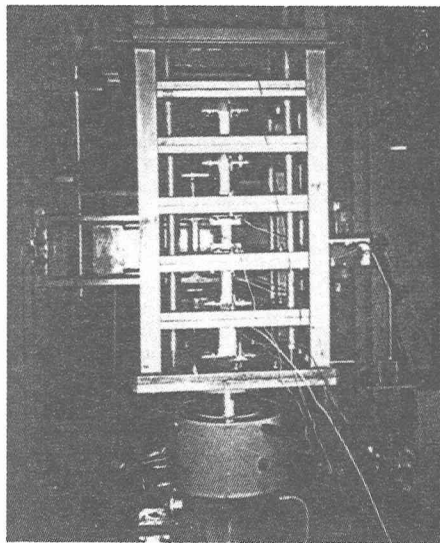


写真-1 建物柱模型試験体の設置状況

3.2 試験体

(1) 形状・寸法

中低層 RC 建物の中間階崩壊メカニズムを調べることを目的としているが、建物全体の模擬試験体を製作することは複雑かつ困難である。そこで、ある一つの柱列を取り出した模型を試験体とした。各階の柱に相当する柱模型は、実験室および装置の制約のため、最大寸法が断面 $5 \times 5 \text{cm}$ 、高さ 10cm の正方形柱とした。すなわち、これを1階（最下層）部分の柱とし、上階柱の断面は逐次減少させている。例えば、昭和 30 年に設計・建設された地上 8 階建ての SRC/RC 造建物が兵庫県南部地震によって 6 階部分が崩壊している。この建物の代表的な柱断面および模型断面は次の通りである。

表-6 8 階建 SRC/RC 建物の柱断面

階	実断面 (cm)	模型断面 (cm)	(模型/実) 比
8	55×55	2.5×2.5	0.045
7	60×60	3.0×3.0	0.050
6	65×65	3.0×3.0	0.046
5	70×70	3.5×3.5	0.050
4	79×79	4.0×4.0	0.051
3	84×84	4.5×4.5	0.054
2	94×94	4.5×4.5	0.048
1	104×104	5.0×5.0	0.048

表から、模型試験体は厳密ではないが約 $1/20$ ($=0.05$) の縮小サイズであるとみなせる。

(2) 柱材料・強度

本研究では、中低層建物に相当する 5 階と 8 階柱模型試験体を対象とした。各階の柱間に挿入する重

量は、約 60kgf ($44 \times 44 \times 2 \text{cm}$ の鋼板 2 枚) である。急速突き上げ実験において、いずれかの中間柱を圧縮崩壊させるにはできるだけ強度を小さくする必要があり、柱試験体はモルタル (設計強度: 200kgf/cm^2) で製作することにした。

3.3 実験条件

(1) 載荷速度: 兵庫県南部地震で記録された地震動の基盤変位速度の平均値に対応して、約 1m/s とした。

(2) 試験体: 5 階と 8 階の 2 種類の建物柱試験体を対象とし、2 階以上の柱断面を種々変えた場合に生じる中間階崩壊と各階柱の初期軸圧比との関係を探ることとした。5 階柱試験体は 2 種類、8 階柱試験体は 4 種類である。試験体の諸元を、表-7 に示す

表-7 試験体の種類と柱辺長

階	No.1		No.2		No.3	
	柱辺長 (cm)	軸圧比	柱辺長 (cm)	軸圧比	柱辺長 (cm)	軸圧比
8	—	—	—	—	2.5	0.50
7	—	—	—	—	3.0	0.69
6	—	—	—	—	3.5	0.77
5	4.0	0.20	2.5	0.80	4.0	0.78
4	4.5	0.40	2.5	1.60	4.0	0.98
3	4.5	0.60	2.5	2.40	4.0	1.14
2	5.0	0.80	2.5	3.20	4.5	1.08
1	5.0	1.00	5.0	1.00	5.0	1.00

階	No.4		No.5		No.6	
	柱辺長 (cm)	軸圧比	柱辺長 (cm)	軸圧比	柱辺長 (cm)	軸圧比
8	3.0	0.35	2.5	0.50	2.5	0.50
7	3.0	0.69	2.5	0.69	3.0	0.69
6	3.0	1.04	3.0	1.04	3.0	1.04
5	3.5	1.02	3.0	1.39	3.5	1.02
4	3.5	1.28	3.5	1.28	3.5	1.28
3	4.0	1.17	4.0	1.17	4.0	1.17
2	4.5	1.08	4.5	1.08	4.5	1.08
1	5.0	1.00	5.0	1.00	5.0	1.00

表-7 において、各試験体の軸圧比は各階柱の初期軸圧縮応力 σ_{oi} を 1 階柱の σ_{o1} で除したものであり、1 階柱に対する相対的な軸応力の大きさを表している。各試験体において、最大軸圧比の柱が急速突き上げ載荷によって崩壊すると予測した。

3.4 計測

中間崩壊メカニズムを考察する目的から、基盤と最上階における加速度応答、初期軸圧比の大きさから崩壊が予測される階柱とその上下の柱のひずみ応答、基盤速度を調べるための変位について計測を行った。建物柱試験体の概要および計測センサーの設置位置を、図-2 に示す。

3.5 実験結果

代表的な実験結果の一例 (No. 6 試験体) を、写真-2 に示す。

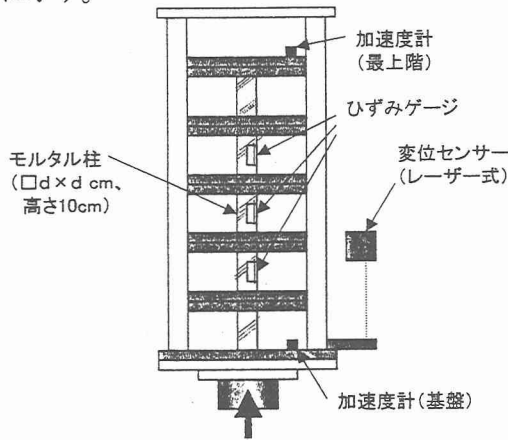


図-2 建物柱試験体の概要および計測センサーの設置位置

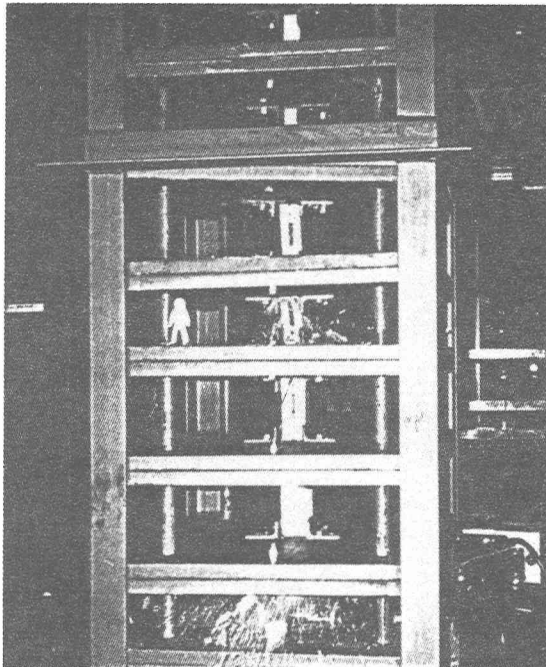


写真-2 No. 6 試験体の4階柱の崩壊

この試験体の1階(最下層)には、約480kgfの重量が載っており、初期軸応力は $\sigma_{01} = 19.2 \text{ kgf/cm}^2$ である。初期軸圧比の最大は4階柱であり、この柱が崩壊すると予測した。実験においては、突き上げの挙動をビデオカメラで撮影(シャッター速度:1/2000)し、崩壊の過程を調べた。その結果を見ると、最初に4階柱が圧壊し、次いで1階柱が崩壊していた。軸圧比が2番目に大きい3階柱には、柱上端に圧縮ひび割れが生じていたが、崩壊には至らなかった。

表-8に、すべての試験体の初期軸圧比分布と崩壊予測位置と実験結果の対応を示す。

表-8 実験結果一覧

階	試験体 No.					
	1	2	3	4	5	6
8						
7						
6				◎		
5					●◎	
4				●		●◎
3			●◎			
2		●◎		◎		
1	●◎					

表-8 中で、●印は崩壊が予測される階柱で、◎印は実際に生じた崩壊位置を示している。試験体 No. 4 を除き、崩壊予測階と実験結果は一致した。

4. まとめ

中間階崩壊のメカニズムは、衝撃応力伝播層インピーダンスの概念を用いることで検討できることを理論的観点から示した。層インピーダンスは、変位に関係する強制力と媒質体(建物柱)内の応力伝播速度の比で表され、応力伝播速度は各階柱重量の総和($\sum W_i$)を柱断面積と軸剛性の積の総和($\sum E_i A_i$)で除した値で与えられる($\sum W_i / \sum E_i A_i$:これを、初期層軸歪と定義)。初期層軸歪は、各階の柱部材の材料が同じ(E_i :一定)であれば、初期軸圧比($\sum W_i / \sum A_i$)と等価な意味を持っている。つまり、本研究で行った実験は急速载荷による鉛直方向入力であり、衝撃応力波の伝播が問題となるような衝撃問題ではない。しかしながら、実験結果からわかるように、柱断面と柱に作用する重量の関係だけで求められる初期軸圧比という指標は、中間階の崩壊位置を特定する上で有用であると言える。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 阪神・淡路大震災と今後のRC構造設計—特徴的被害の原因と設計への提案—, 1998. 10
- 2) 高田直俊: 「突き上げるような上下動」はどこへいった、土と基礎, pp. 13~15, 1996. 3
- 3) 園田恵一郎、小林治俊、長野圭: 兵庫県南部地震—初期上下動の証言について、大阪市立大学工学部、紀要特別号, pp. 187~278, 1997. 1
- 4) 那谷晴一郎: 阪神大震災の調査報告、大阪市立大学工学部、紀要特別号, pp. 67~81, 1997. 1