

# 衝撃波に対する構造物の応答の実験的研究 (第4報)

## —純鉄骨2層1スパンラーメンの場合—

武田 寿一  
森 高 勇  
吉岡 研三  
表 佑太郎

### 概 要

純鉄骨2層1スパンラーメンについて、衝撃装置による衝撃破壊実験と静荷重実験とを行ない、弾塑性にわたる動的応答性状を解析したものである。

### 1. 序

衝撃試験装置を利用した基礎的実験として、すでに第2報で純鉄骨1層1スパンラーメンの場合について報告したが、本報告は2層1スパンラーメンの場合について引き続き行なった実験に関する報告である。

2層の梁上に付加重量をもつ試験体基礎に1波の衝

撃加速度を加え、その時発生する試験体の応答慣性力によって試験体を破壊させた。なお静荷重試験も同時に行ない、静、動両者の比較も行なった。

### 2. 試験体

試験体は図一1に示すように、全溶接による純鉄骨造(柱、梁はH型鋼、緊梁はビルトアップ)4本柱の2層1スパンラーメンで、2体とも同じ形状である。

柱降伏型のため梁よりも柱の断面が小さい。桁行方向の剛性、耐力を補うため、この方向に鉄筋のブレースを入れ、またそのガセットプレートによって柱の横座屈を防止した。

試験体 S II-1 は衝撃実験のみに、S II-2 は衝撃及び静荷重両実験に交互に供した。

鉄骨の材質は SS-41 鋼で、H 形鋼から採取した試験片の引張試験結果を表一1に示す。

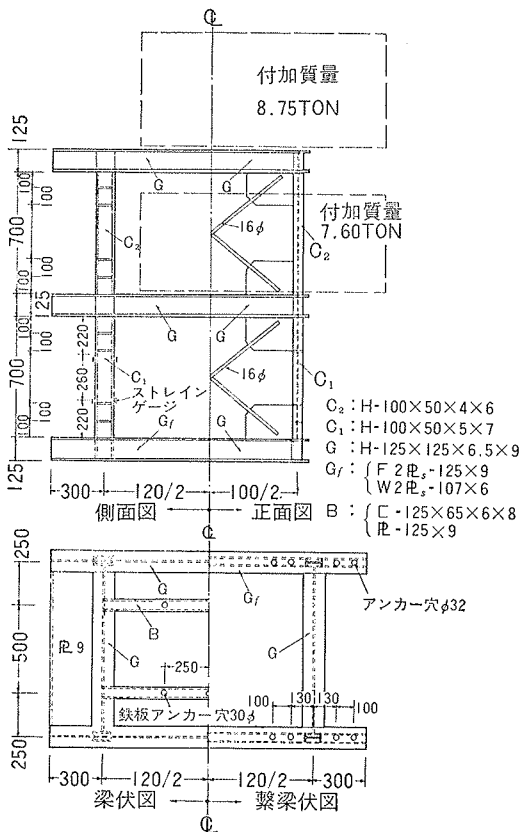
$\sigma_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E \frac{1}{4}$ (10 <sup>6</sup> kg/cm <sup>2</sup> )	のび率 (%)
2920	4530	2.06	25.5

表一1 材料試験結果

### 3. 実験方法

**試験体のセット：** 試験体を衝撃台のアリ溝にツチ型ボルトで固定し、付加重量鉄板を 2FL, RFL の加力方向と直行する大梁に取りつく2本の小梁上にワッシャーを介してのせ、ボルトに固定した。付加重量は R.F.L. で 8.75 t, 2F.L. で 7.37 t である。(図一1)

**加力方法：** 衝撃実験の場合は、15 t 振子を所定の高さHより落下させ、試験台のバンパーに衝突させる。この時試験台には1波の加速度が発生する。振子の落



図一1 S II-1, S II-2 試験体

下高は順次高くして、両試験体とも4回づつの衝撃試験を行なった。S II-2 はその間に静加力試験も行なった。表-2 にその実験順序を示す。

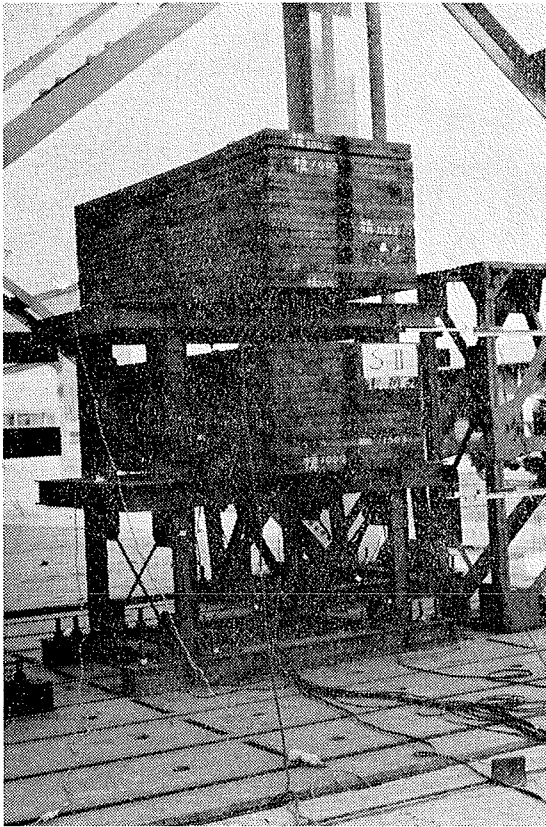


図-2 実験状況

試験順序	試験月日	最大水平力が最大加速度	備考
動 第1回	43.12.3	m <sub>2</sub> 0.55G m <sub>1</sub> 0.31	振り落下高 2.4cm
静 0-1回	43.12.4	RFL 0 2FL 6 t	2FLのみ加力
静 0-2回	"	RFL 5 t 2FL 0	RFLのみ加力
静 第1回	"	RFL 6 t 2FL 3 t	R.F.L.P 2FL 0.5P加力
動 第2回	43.12.6	m <sub>2</sub> 0.97G m <sub>1</sub> 0.54	振り落下高 9.9cm
動 第3回	"	m <sub>2</sub> 1.56G m <sub>1</sub> 0.97	振り落下高 40cm
静 第2回	43.12.7	RFL 11 t 2FL 5.5 t	RFL.P 2FL.0.5P加力
動 第4回	"	-	振り落下高 150cm

表-2 S II-2 実験順序

静試験の場合は、試験体の後方に反力用の柱を固定し、30 t 油圧ジャッキにて、2 F.L. および R.F.L. の梁にそれぞれ 0.5, 1.0 の割合で水平力を加力した。

測定方法： 衝撃実験の場合、変位は試験体の両側面で 2 F.L. 及び R.F.L. の梁の位置で相対変位を測定した。一側面ではポテンシオメーターを、他側面で

は回転ドラムを用いた。加速度は、試験台の上面、下面、試験体 R.F.L. 及び 2 F.L. の梁と付加鉄板の最上部にて測定した。歪度は W.S.G. により、1 階および 2 階の柱について測定した。

静試験の場合、変位は試験体両側面の 2 F.L. 及び R.F.L. の梁の中心位置の台との相対変位を 1/100mm D.G.にて測定した。歪度は、衝撃試験の場合と同じゲージを用いた。

#### 4. 衝撃試験

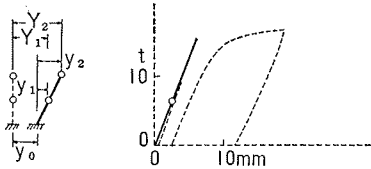
##### 4.1. 固有周期と減衰

表-3 に各試験時の固有周期を示したが、微振動は衝撃試験前に台に微振動を与えた時の自由振動周期で他は衝撃入力後の自由振動時のものである。いずれも歪の記録曲線より得た。1 次周期についてみれば微振動時の周期が最も短く、試験体が降伏するまでは徐々に周期が伸びているが、降伏時の一次周期の伸びは微振動時に比べ 4 ~ 5 % 程度と僅かである。降伏以後は一次周期は殆んど一定である。2 次周期については各衝撃時のものがすべて検出されていないので確かではないが、2 次周期の伸びはなかったようである。

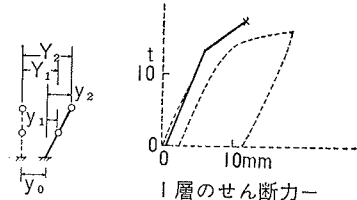
供試体	振子の落下高 (cm)	実 験 値			固有周期計算値 T (sec)			
		固有周期 T (sec)		減衰定数 h	○ 3質点系		○ 2質点系	
		1次	2次	1次	1次	2次	1次	2次
S II-1	微振動	0.182	-	-	0.167	0.062	0.183	0.063
	2.4	.184	0.075	0.0018				
	9.9	.186	.075	.0046				
	60.	.189	-	.0057				
	150.	.191	-	.0081				
S II-2	微振動	.181	-	-	0.175	0.062		
	2.4	.186	-	0.0017	0.181	0.075		
	9.9	.188	-	.0045				
	40.	.190	0.075	.0081				
	150.	.190	.075	.0086				

表-3 固有周期と減衰定数

固有周期の計算は、3 case 行なったが、case 1 は基礎固定とし、公称の断面 2 次モーメントを用いて 3 質点系、2 質点系の場合について計算し、S II-1 の欄に示した。S II-2 の場合は R.F.L. 及び 2 F.L. に個別に水平力を加えた静 0-1, 静 0-2 の結果より得た変位マトリックスから算出した周期 (case 2) と、静第 1 回の除荷曲線から  $K_1=25 \text{ t/cm}$ ,  $K_2=19 \text{ t/cm}$  を仮定し、試験体をせん断置換して得た変位マトリックスから計算した値 (case 3) とを示した。case 3 の場合が最も実験値に近い。同表中に示した減衰定数は衝撃波入力後の自由振動時の振幅比から算出した。残留変形の増大と共に減衰定数は大きくなるが、破壊時 (振子の落下高  $H=150 \text{ cm}$ ) の場合でも一次の減衰定数は 0.81 ~ 0.86% であった。



1層のせん断力-たわみ特性(Linear)の仮定



1層のせん断力-たわみ特性(Bi-linear)の仮定

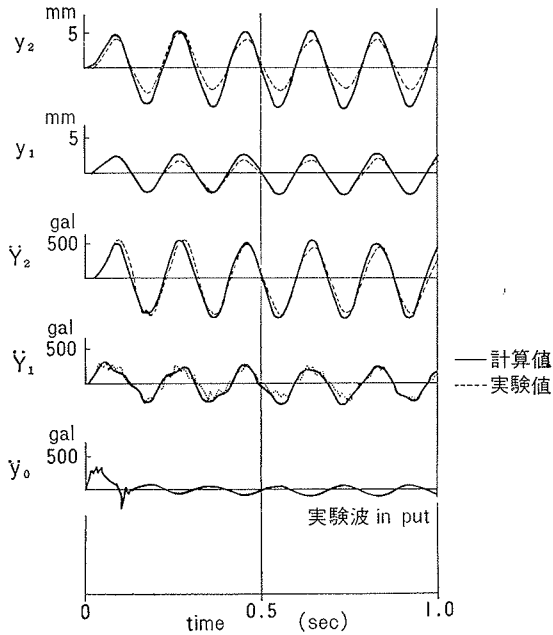


図-3(a) S II-2, D 1 応答解析(H=2.4cm)

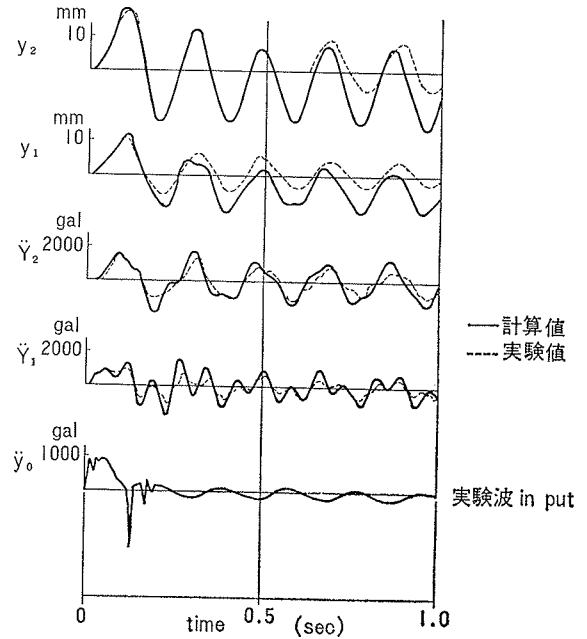
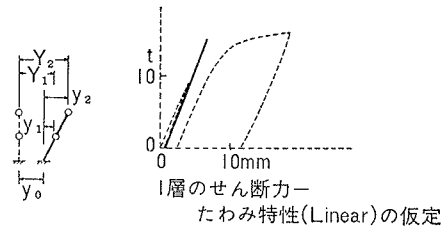
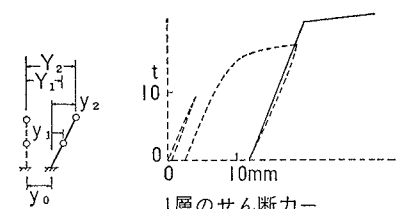


図-3(c) S II-2, D 3 応答解析(H=40cm)



1層のせん断力-たわみ特性(Linear)の仮定



1層のせん断力-たわみ特性(Bi-linear)の仮定

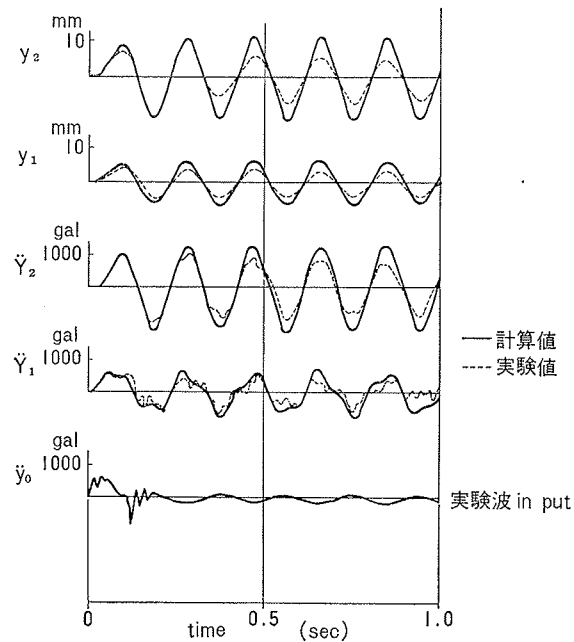


図-3(b) S II-2, D 2 応答解析(H=9.9cm)

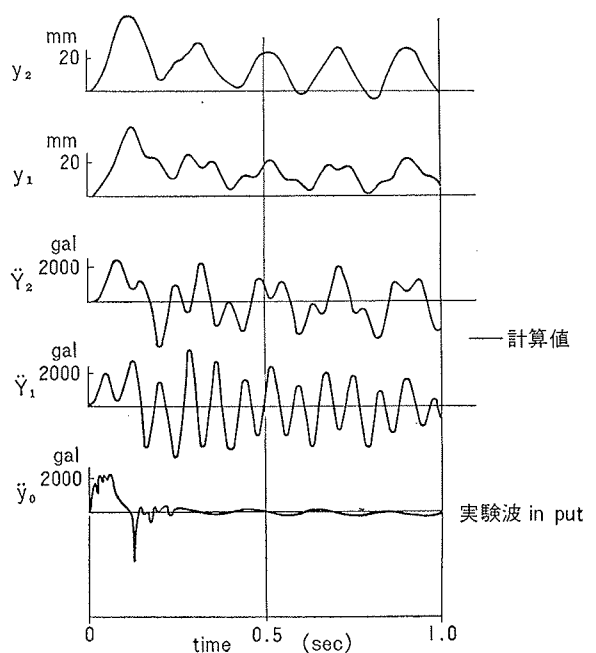


図-3(d) S II-2, D 4 応答解析(H=150cm)

4.2. 加速度

表一4 に試験台の最大入力加速度とその時間、および試験体の最大応答加速度を示す。試験台の上面、下面の加速度は10%程度の差があるが、衝撃時間はほとんど同じである。2 F.L. (m<sub>1</sub>) のカッコ内の加速度は R.F.L. (m<sub>2</sub>) と同時刻の加速度である。

供試体	振子の 落下高 (cm)	試 験 台				供 試 体				計 算 値	
		上 面		下 面		m <sub>1</sub>		m <sub>2</sub>		m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>
		t <sub>0</sub> (sec)	y <sub>max</sub> (G)	t <sub>0</sub>	y <sub>max</sub> (G)	梁(G)	付加鉄板 (G)	梁(G)	付加鉄板 (G)		
S II-1	2.4	.090	0.30	.090	0.27	0.28 (0.21)	0.37 (.21)	0.45	0.58		
	9.9	.103	0.57	.107	0.50	.48 (.44)	.60 (.39)	.80	.97		
	60.										
	150.										
S II-2	2.4	.098	0.26	.096	0.27	0.28 (.21)	0.31 (.18)	0.46	0.55	0.3 (0.16)	0.50
	9.9	.112	0.49	.110	0.55	.51 (.46)	.54 (.44)	.83	.97	0.53 (0.43)	0.92
	40.	.115	0.96	.118	0.93	.89 (.75)	.97 (.70)	1.37	1.56	0.94 (0.53)	1.47
	150.	.113	2.34	.113	2.13						

表一4 加速度

試験台の加速度記録を基礎の入力波とし、2質点系として、1階柱の復元力特性を linear 型、あるいは bi-linear 型に、2階柱の復元力特性は linear に仮定して、S II-2について応答計算した結果を図一3 a)~図一3 d)に示す。図中の点線は実験値である。動第1回(D1)の場合、2 F.L. および R.F.L. の加速度は実験値と計算値は非常によく一致している。動第2回(D

2) 動第3回(D3)~の場合も実験値と計算値は比較的良好に一致している。動第4回(D4)の場合は記録波はとれていない。

4.3. 変位

表一5 に試験体の最大たわみと残留たわみを示す。振子の落下高が小さく、試験体が弾性範囲内であれば試験体の両側で測定したポテンシオメーターの値と回転式ドラムによる測定値との差はほとんどないが、試験体の塑性化が進むと両者はやや異なった値を示しており、多少振れの影響があるかも知れない。応答計算による変位の値(初めの半波の頂点の値)をS II-2について同表中に示したが、これは最大たわみに対応する値で、D3までは実験値と一致している。D4の場合は、1階、2階の柱頭、柱脚で完全に降伏しており、このため変位の計算値と実験値とは一致していない。図一3 a)~図一3 d)の応答解析結果と実験値とをみると D1 の場合、2 F.L. の変位は両者ほぼ等しいが、R.F.L. では実験値が時間の経過に伴い計算値より小さくなっている。D2 では 2 F.L. の変位共にその傾向が大きい。更に D3 の場合は、最初の最大値のみがほぼ一致しているがその後は計算値と実験値とはかなりの差がある。

4.4. 層せん断力

1階および2階の歪側定値から、柱の曲げモーメント図を求め、図一4に示した。歪は梁のつけねからS II-1 では 15cm、S II-2 では 22cm 離れた位置で測

供試体	振子の 落下高	実 験 値								計 算 値	
		最大たわみ (mm) (1)				Initialよりの最大たわみ (mm)				実験値(1)欄に対する 計算たわみ(mm)	
		m <sub>1</sub>		m <sub>2</sub>		m <sub>1</sub>		m <sub>2</sub>			
		ドラム	ポテンシオ メーター	ドラム	ポテンシオ メーター	ドラム	ポテンシオ メーター	ドラム	ポテンシオ メーター	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>
S II-1	2.4	2.5		4.6	4.5	2.5		4.6	4.5		
	9.9	5.2	4.3	9.1	8.9	5.2	4.3	9.1	8.9		
	60.	14.8			18.8 (3.4)	14.8			18.8		
	150.	45.7		54.0	47.3 (25.8)	>45.7		>54.0	50.7		
S II-2	2.4	2.5	2.5	4.7	4.2	2.5	2.5	4.7	4.2	2.3	4.7
	9.9	4.5	4.3 (-0.8)	8.9	7.8 (-0.4)	5.1	4.9	9.7	8.6	4.7	9.2
	40.	11.8 (2.3)	10.9 (1.7)	18.9 (2.3)	18.1 (2.3)	12.4	10.7	19.7	18.5	11.7	17.6
	150.	27.5 (16.0)		51.0		39.5		62.9		39.0	

註： ( ) 内の数値は残留たわみ

表一5 変 位

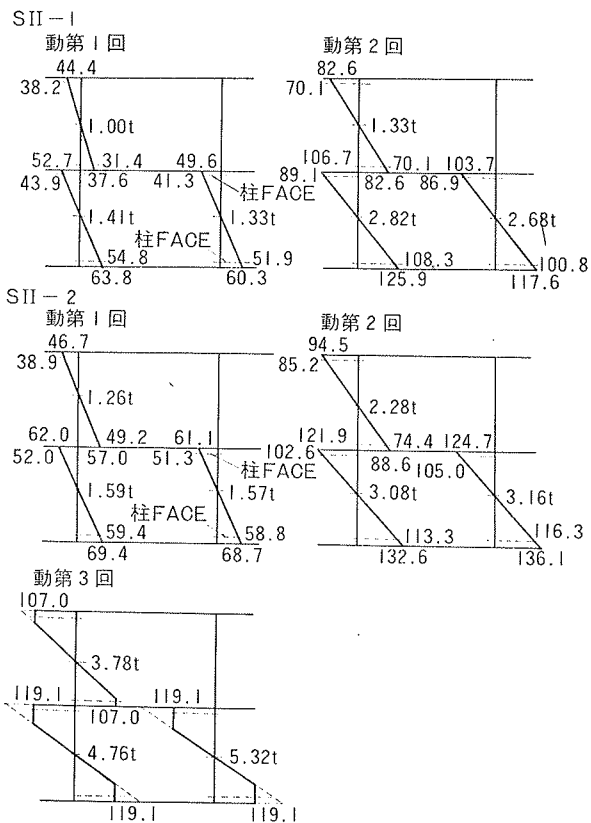


図-4 衝撃試験時曲げモーメント(単位 t·cm)

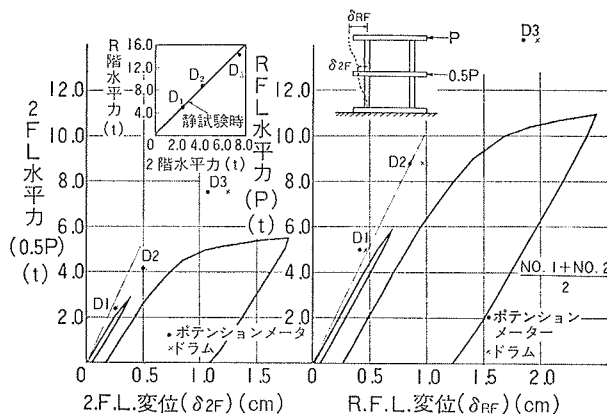


図-5 荷重・変位曲線(S II-2)

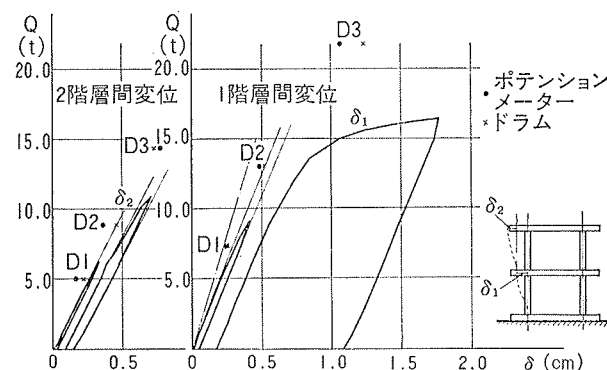


図-6 層剪断力Q~層間変位 delta

定し、柱脚、あるいは柱頭における降伏後もなお測定可能である。

D2 では S II-1,2 とともに1階柱の柱脚つけねにおいて降伏近くに達しているが、なお全断面降伏以前である。同図に示した各柱のせん断力を、2階では4倍、1階では2倍して層せん断力を求め、慣性力から得た層せん断力と共に表-6にした。各階の慣性力はR.F.L. の場合は加速度記録の最大値、1階の場合は R.F.L. の加速度が最大値に達した時刻と同時刻の2F.L. の加速度を用いて算出したもの (case 1) と2F.L. の加速度最大値を用いたもの (case 2) を示した。同表から2階の層せん断力は両者ほとんど差がない。1階の場合、case 1 の層せん断力と歪から得た層せん断力の値とはほぼ等しいが、case 2 の場合は、全般的に歪から得た値の方が小さい。

S II-1	振子落下高 (cm) H=2.4				振子落下高 (cm) H=9.9				S II-2	振子落下高 (cm) H=2.4 H=9.9 H=40						
	階歪から算出し		歪から算出したせん断力(t)		階歪から算出し		歪から算出したせん断力(t)			階歪から算出し		歪から算出したせん断力(t)		慣性力から得たせん断力(t)		
	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
	4.0	5.48	8.0	11.0	4.92	6.32	9.12	12.48	15.12	20.16	4.92	6.32	9.12	12.48	15.12	20.16
	6.95		11.9		6.43		12.29		6.43		12.29		19.93		19.93	
	5.32		8.87		5.03		8.87		5.03		8.87		14.30		14.30	
	8.17		13.5		7.43		13.06		7.43		13.06		21.79		21.79	

表-6 層せん断力

## 5. 静荷重試験

### 5.1. 荷重~変位曲線

図-5に静試験より得た荷重~変位曲線を、図-6に各階の層間変位と層せん断力との関係を示した。図中の鎖線は弾性剛性である。図-5から2階の最大層間変位は大きくなく (initial より  $R=1/115$  rad)、いまだ flow していないが、1階では完全に flow しており、歪からも柱頭、柱脚で降伏している。

### 5.2. 終局強度

初めの降伏は1階柱の柱脚で起り、次に1階柱の柱頭がヒンジとなり崩壊形となる。表-7に降伏荷重、最大荷重の実験値、計算値等を示すが、ここに計P1は1階柱柱脚の全断面降伏の荷重、計P2は1階柱柱脚をヒンジとし、1階柱柱頭が全断面降伏する時の荷重で

S II-2	実験値		計算値		実/計	
	実P <sub>y</sub> (t)	実P <sub>max</sub> (t)	計P <sub>1</sub> (t)	計P <sub>2</sub> (t)	実P <sub>y</sub> /計P <sub>1</sub>	実P <sub>y</sub> /計P <sub>2</sub>
	*1 10.0	*2 11.0	8.24	8.65	1.21	1.16

\*1 既に試験体が降伏しているため、真の降伏荷重ではない。  
\*2 P11.0tにて載荷を中止したもので実際にはなお荷重上昇はあり得る

表-7 降伏荷重

ある。表中の実 $P_Y$ は、静第2回の $P\sim\delta$ 曲線から得たもので、実際にはD3において、図-3に示したようにすでに降伏しているのでは真の降伏荷重ではない。

また実 $P_{max}$ もこの時に静加力を中止したもので、実際にはなお荷重上昇はあり得る。しかしながら、これらの実験値と比べても計算値は小さい。

## 6. 衝撃試験と静荷重試験の比較

図-5および図-6に衝撃試験時に得られた変位と慣性力との関係をプロットした。

	1) 動 第1回	2) 静 第1回	1) / 2)	3) 動 第2回	4) 静 第1除荷時	3) / 4)	5) 動 第3回	6) 静 第2回	5) / 6)
$Q_1/\delta_1$	t/cm 29.7	t/cm 25.7	1.16	t/cm 29.0	t/cm 24.4	1.19	t/cm 18.45	t/cm 23.3	0.79
$Q_2/\delta_2$	22.9	19.2	1.19	20.2	19.2	1.05	20.1	19.6	1.03

但し  $Q_1, Q_2$  : 1, 2階せん断力  
 $\delta_1, \delta_2$  : 1, 2階層間変位

表-8 衝撃試験時と静試験時の剛性の比較

静荷重試験時と衝撃試験時の剛性を比較すると表-8のようになる。降伏以前においては動的剛性は静的剛性より5%~19%、平均15%程度高い。同表中動第3回の値は1階柱の柱脚・柱頭がヒンデとなり崩壊形となっており、測定された変位の最大値がflowした点でとらえられたためである。耐力については静荷重試験及び衝撃試験共に最大耐力を得ていないので、動第3回と静第2回時における最大荷重を比較するに止めるが、その比は1.3となり約30%程度、動的耐力が大きい。

## 7. まとめ

- 1) 固有周期は静荷重試験より得た変位マトリックスを用いれば、微振動時の周期と良く一致する。1次周期は降伏まで僅かに伸びるが5%程度である。
- 2) 1次の減衰常数は非常に小さく、試験体破壊時において0.8~0.9%程度であった。
- 3) 動的な剛性は静的な剛性に比べ約15%程度大きく、耐力について動的な場合が30%程度高い。
- 4) 各階の最大加速度から算出した層せん断力は、歪測定より得た層せん断力より大きい。2F.L.の加速度としてR.F.L.の加速度最大値と同時刻の応答加速度を用いれば、両者はほぼ一致する。
- 5) 静試験結果からバネ常数を仮定し、基礎の入力波として試験台の記録加速度を用いて応答計算した結果は、応答加速度はほぼ実験値と一致する。変位は、衝撃直後は実験値と一致するが、時間の経過と共に計算値が大きくなる。

## 参考文献

- 1) 武田寿一, 森高勇: 「衝撃試験装置」大林組研究所報 Vol. 1, 1966
- 2) 森高勇, 武田寿一: 「衝撃波に対する構造物の応答の実験的研究」第2報 Vol. 2, 1967