

衝撃波に対する構造物の応答の実験的研究

(第2報, 純鉄骨造1層1スパンラーメンの場合)

森 高 勇
武 田 寿 一

概 要

本報告は, 純鉄骨造ラーメン供試体の慣性力による衝撃破壊実験に関するもので, 別に行なった静荷重試験とも比較検討し, 塑性にわたる動的応答性状を解析したものである。弾性範囲内では, 動的結果と静的結果とはほぼ一致するけれども, 弾塑性域から塑性域に至ると合致せず, 動的耐力が静的耐力を上まわるという結果を得たが, この点については今後とも検討するつもりである。

1. 序

従来, 構造物試験といえば静的加力による場合を一般に意味し, 動的試験についてみると, 微小変形の場合とか, 塑性の場合には小さい供試体によるなど, いまだ, 動的破壊実験データは不十分なものである。

本報告は, 衝撃試験装置⁽¹⁾⁽²⁾による純鉄骨造1層1スパンラーメンの衝撃破壊実験に関するものである。供試体基礎に1波の入力加速度を与えて, 付加質量を持つ供試体を慣性力によって破壊させ, その過程での加速度, たわみ, 歪などを観測し, また別に行なった静荷重試験との比較検討などから, 塑性にわたる動的応答性状の解析を試みた。

本実験はかなり基本的なものではあるが, 構造設計のすう勢は塑性設計にあり, これに必要な動的塑性応答および変形限界(エネルギー吸収能)などに関する基礎的な一資料になれば幸いである。

2. 供試体

供試体は SI-1, 2, 3, 4, S の計5体で, 全溶接による純鉄骨造(柱, 梁はH型鋼, 繫梁は built up) 4本柱の1層1スパンラーメンである。SI-1 以外は, 全て同一供試体で図-1に示す。SI-1のみ他の供試体より階高のみが30mm高くなっている。柱降伏型を採用したため, 柱に比し梁の断面が非常に大きい。桁行方向の剛性および耐力を補うため, 桁行方向にはブレースを入れ, 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。

なお, 供試体SI-1~4は衝撃試験に, SI-Sは静荷重試験に供した。材質はSS-41鋼で, 引張試験片の引張試験結果を表-1に示す。

降伏応力度 σ_y t/cm ²	引張強度 σ_{max} t/cm ²	ヤング率 E t/cm ²	伸び率 %
3.09	4.78	2.1×10^8	28.

表-1 材料諸元

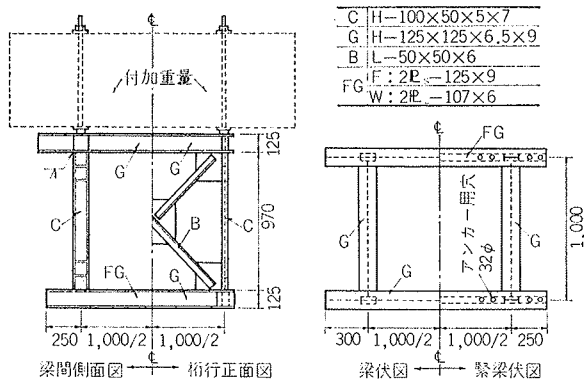


図-1 供試体

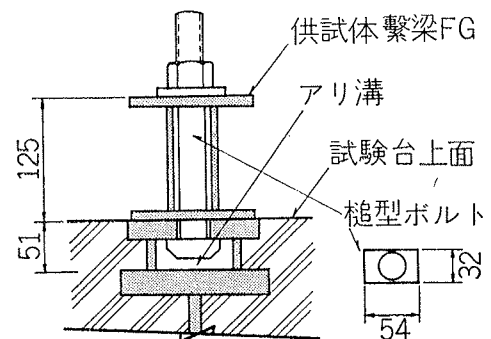


図-2 榫型ボルトによるアンカー

3. 実験方法

3.1. 静荷重試験

静荷重試験も衝撃台を利用した。

3.1.1. 供試体のセット 図-2に示すように、試験台のアリ溝上に供試体の緊梁を乗せ、緊梁のアンカー用穴 32φを通して、榫型ボルト (W1¹/₈) にて締めつけ固定する。この榫型ボルトは計16本使用し、供試体の引抜反力と水平反力とを負担させた。

次に、図-3に示す付加重量用鉄板36枚 (16.6ton) を、柱心上のワッシャーを介して井型に積み重ねた。

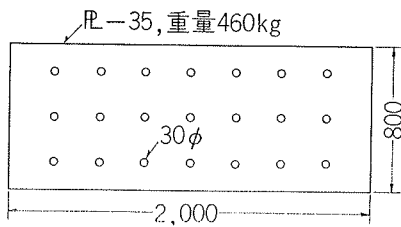


図-3 付加重量用鉄板

3.1.2. 加力方法 供試体の前後に、反力トラスを固定し、30tonジャッキにて、単純梁を介して2本の梁端部に加力した。荷重はロードセルによってコントロールし、正負の繰返しを数回行なった。

試験方法	供試体	試験装置			
		付加重量 ton	バンパー 列 × 組	振り重量 ton	振り落下高 cm
衝撃	SI-1	16.6	5 × 7	15	50, 150,
	SI-2	16.6	5 × 7	15	10, 50, 150,
	SI-3	16.6	5 × 2	15	2, 21, 66, 150
	SI-4	21.1	5 × 2	15	2, 66, 150
静	SI-S	16.6			

表-2 実験条件

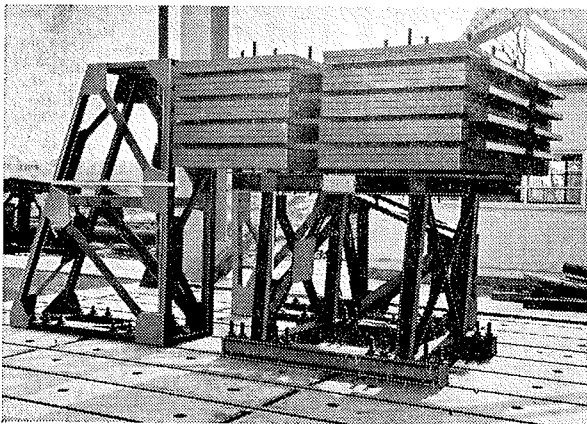


図-4 供試体と不動点トラス

3.1.3. 測定方法 (i) …… 1/100mm ダイヤルゲージにて、おのおの2本の梁および緊梁端部の計4点の水平移動を測定した。(ii) 歪度 W.S.G.によった。

3.2. 衝撃試験

3.2.1. 供試体のセット 静荷重試験の場合と同様に榫型ボルトにて供試体を試験台に固定し、供試体柱心上の梁上端に溶接された 4-25φ ボルトを、図-3の付加重量用鉄板の穴に通し、ワッシャーを介して鉄板を井桁に積み重ねて供試体に固定する。表-2に、各供試体の付加重量を示す。

3.2.2. 加力方法 衝撃試験装置の 15ton 振子を所定の高さから落下させ、試験台バンパーに衝突させる。この時、試験台本体に1波の加速度が発生する。(1) 各供試体とも、最初は弾性内に収まるように振子の落下高を低くとり、次第に落下高を高くして行なった。したがって、前回の残留たわみの存在する状態で、次の衝撃波を加えることになる。なお、振子の衝突する台のバンパーのバネ定数も供試体によって変えてみた。

これらの衝撃実験条件を表-2に示す。

3.2.3. 測定方法 (i) 変位 試験台上に固定した2体の不動点トラス (図-4) と供試体との相対変位を、供試体の両側面で計2点測定した。1つは、供試体の梁と不動点トラスとの間にセットした巻線抵抗型のポテンシオメーター (ストローク 15cm) によって、その抵抗変化を直接ビジグラフに記録させた。もう1つは、記録紙を貼りつけた回転ドラム (直径 185mm, 4回転/分) を不動点トラスに固定し、付加重量鉄板の裏面に取っつけたペンで、直接ドラム上に記録させた。

(ii) 加速度 試験台および供試体の梁と付加鉄板にそれぞれ1ヶずつ取りつけた計3ヶの検出器 (190 c/s) によって、ビジグラフに記録した。

(iii) 歪度 W.S.G.によりオシログラフに記録した。

4. 実験結果とその考察

4.1. 静荷重試験

供試体 SI-S の荷重-たわみ曲線を図-5に示す。理論剛性 13.7t/cmに対して、実験初期剛性は12.5t/cmであった。理論剛性は、各部材を部材心に位置する曲げ線材に置換し、軸方向変形を無視したものである。図-5では、理論最大耐力 14.9 ton (σ_{max} 矩形分布) 以上でも、ゆるやかな正の勾配をもち、実験最大耐力は15.9ton 以上である。実験最終時においても局所的な破壊は全然見られず、最大たわみ角は約1/10であった。

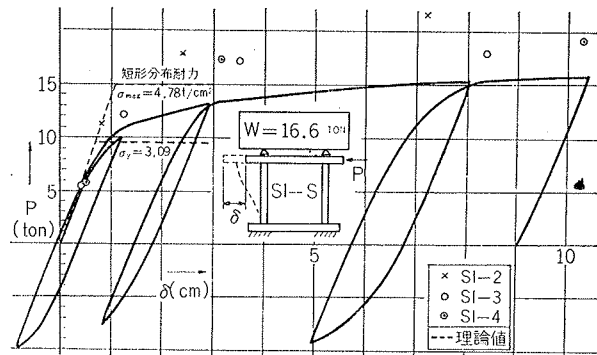
なお、塑性域での繰返し荷重時の剛性低下率を、図

—5の直線部分の勾配から求めたのを図—7に示す。変形の増大とともに低下率も増大するが、それも10%前後のものである。

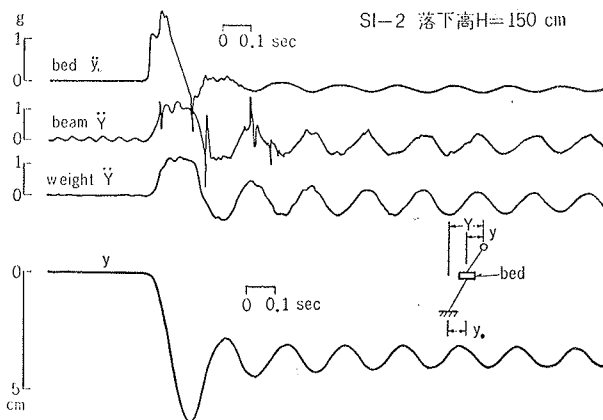
4.2. 衝撃試験

図—6に、供試体SI-2の振り落下高 $H=150\text{cm}$ の場合の加速度とたわみとの記録曲線を一例としてあげておく。

4.2.1. 固有周期と減衰 表—3に、衝撃実験前に行なった微振動時の周期と、衝撃入力後の自由振動周期とを示す。周期は残留たわみの増大とともに伸び、この周期の伸びを剛性低下のみに置換してみると、その低下率は図—7のようになる。ところで、本供試体を質点系に置換すると、図—8に示すような場合が考えられる。図—8の K_b とは、試験台自体が振子であるから、その等価バネ定数を示す、ここでは、これは無視できる程小さいから、図—8の2質点系と考えてもよい。さらに、 $W_m/W_b \ll 1$ のときには図—8の1質点系とすることもできる。表—3には、これらの固有周期計算値（静実験初期剛性を k_m と仮定）も表示してある。当然ながら、2質点系と仮定した方が実験値によく合致するが、これは図—8の原系では、2次周期に相当するものである。



図—5 荷重・たわみ曲線



図—6 記録曲線

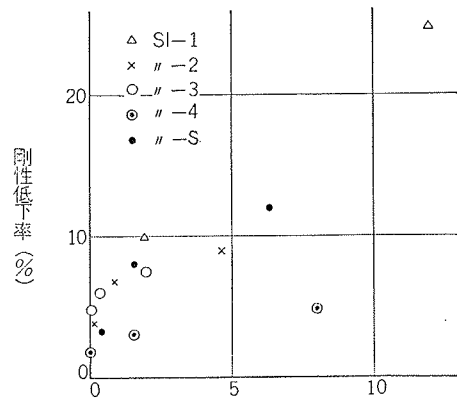
なお、表—3には、自由振動時の振幅比から求めた見かけの減衰定数 h をも表示してある。残留たわみの増大とともに増大するが、その値は小さく1%前後のものである。厳密には、指数関数的な減衰ではなく、履歴減衰なども含んでいよう。

4.2.2. 加速度 表—4に、試験台の入力加速度とその衝撃時間および供試体の最大応答加速度を示す。

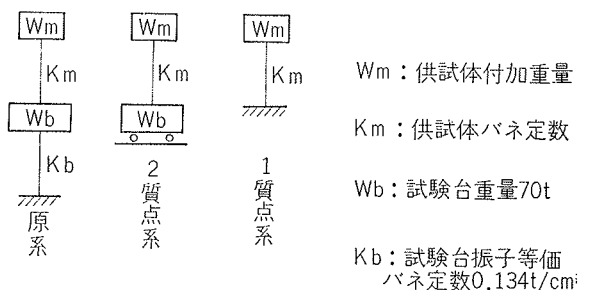
1質点系と仮定して、表—3の計算周期と表—4の衝撃時間とから、純粋な $\sin t$ 波に対する応答倍率 $\ddot{y}_{max}/\ddot{y}_{o,max}$ を計算すると、弾性時非減衰ではSI-2, 3, 4について、それぞれ1.73, 1.44, 1.33となる。一方、実験では入力加速度の小さい時でも、応答倍率はSI-2, 3, 4について、それぞれ $0.76/0.47=1.62$, $0.33/0.28=1.18$, $0.27/0.26=1.04$ となり、計算値よりも小さい。これは実状では、2質点系であることおよび入力加速度が純粋な \sin 波ではないことなどが原因していよう。

また、入力加速度が大きくなると、応答倍率は次第に小さくなり、応答加速度は頭うちの現象を呈す。これは、明らかに供試体の降伏を示している。

なお、表—4にはSI-2の場合の応答加速度の計算値も表示してある。これは後でも説明するように、試験



図—7 剛性低下率



図—8 仮定質点系

供試体	振子の落下高	実験値		固有周期計算値	
		自由振動時		2質点系	1質点系
		固有周期	減衰定数		
cm	sec	sec	sec	sec	
SI-1	微振動	0.220	—		
	50	.232			
	150	.254			
SI-2	微振動	.203	—	0.208	0.231
	10	.207	0.008		
	50	.210	.014		
SI-3	微振動	.200	—	0.208	0.231
	2	.205	.006		
	21	.206	.009		
SI-4	微振動	.228	—	0.228	0.260
	2	.230	.005		
	66	.231	.005		
	150	.234	.016		

表-3 固有周期と減衰

供試体	振子の落下高	試験台		供試体		応答解C 供試体の加速度
		衝撃時間	加速度	加速度		
				梁	付加重量	
cm	sec	g	g	g	g	
SI-1	50					
	100					
SI-2	10	0.15	0.47	0.59	0.76	0.605(1)
	50	.14	0.92	1.07	1.07	0.805(2)
	150	.15	1.64	1.24	1.34	0.993(3)
SI-3	2	.098	.28	0.32	0.33	註 (1)(2)(3) は 図9参照
	21	.095	.86	0.86	0.60	
	66	.094	1.63		1.03	
	150	.084	3.20		1.08	
SI-4	2	.098	.26	0.27	0.27	
	66	.100	1.67		0.82	
	150	.080	3.22		0.91	

表-4 加速度

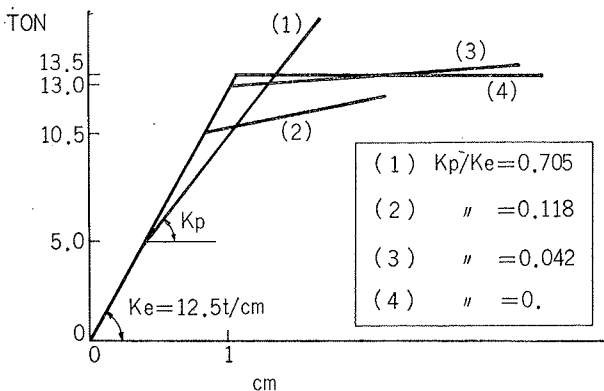


図-9 仮定復元力特性

台の加速度記録波そのものを入力波とし、復元力特性を静荷重試験結果に似せたbi-linear型(図-9)とし、減衰を $h=0.01$ とした場合の1質点系の応答加速度である。これと実験値とを比較してみると、落下高 $H=10\text{cm}$ の場合以外では、いずれも実験値の方が計算値よりも大きい。ただ、応答解では復元力特性の仮定によっては、特に応答加速度は大きく左右されるから、降伏点をもう少し高く仮定すれば、実験値に近づくであろう。

4.2.3. 変形 表-5に、供試体の最大応答たわみと残留たわみとを示す。表-5には、種々の仮定によって求めた計算値も表示してある。力積解とは、入力加速度を純粋なsin波とし、これをImpulse I_0 と仮定して、これによって質点が初速 $v_0=I_0/m$ を持つとしてエネルギー解析したものである。この時の復元力特性は図-9の(4)のように elasto-plastic と仮定した。応答解Aは、復元力特性が力積解の場合と同じ elasto-plastic で、純粋な sin 波に対する応答値である。応答解Bは、復元力特性を bi-linear と仮定し、純粋な sin 波に対する応答値である。応答解Cは、復元力特性を応答解Bと同じ bi-linear とし、入力波に試験台の記録波を採用した場合である。なお、応答解は全て減衰定数 $h=0.01$ と仮定し、復元力特性は全て静荷重試験結果に似せてある。

表-5によると、実験値は計算値のいずれよりも小さい。応答解C以外は、入力波を純粋な sin 波と仮定したことも原因しているようだが、応答解Cになると、かなり実験値に近い値になっている。特に、力積解は衝撃時間と供試体の周期からいって、弾性では応答解Aよりも大きくなる。

なお、最大たわみ角は約1/10以上はあり、本供試体は延性に富む。

4.2.4. 実験終了時の状態 各供試体とも肉眼でも明瞭な残留たわみを起していたが、なお自立状態にあった。SI-1以外は、全て局部的な破壊箇所も外見上は全然見られなかった。SI-1のみは、柱と梁との溶接部である柱頭柱脚部の引張側が完全に切断したが、これは溶け込み不足による溶接不良のためであった。

4.2.5. 静荷重試験結果との比較 前記表-4の供試体加速度に付加重量を乗じた慣性力と表-5のたわみとから、衝撃試験結果を図-5の静荷重たわみ曲線の中に、プロットしてみた。たわみの小さい弾性内では、ほぼ静荷重曲線上に乗るけれども、たわみの大きい塑性時には、衝撃試験結果は静試験結果よりも上にプロットされた。

文献⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾によると、材料の降伏点は高速載荷によ

供試体	振子の 落下高	実 験 値					た わ み 計 算 値				
		た わ み (5)					(6) 塑性率	elasto-plastic (4)		bi-linear	
		最 大	残 留	Initialよりの		入 力 sin波		sin波	記録波		
				最 大	残 留					力積解	応答解A
cm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		
SI-1	50	37.0	19.5	37.0	19.5	3.1					
	150	97.6	>100.5	117.1	>120.	>10.1					
SI-2	10	9.2 8.4	0.5 1.4	9.2 8.4	0.5 1.4	0.8	17.5	10.6	11.8 ⁽¹⁾	9.7 ⁽¹⁾	
	50	—	—	—	—	2.0	45.8	26.6	29.8 ⁽²⁾	27.7 ⁽²⁾	
	150	65.0 63.2	38.4 38.0	— 72.0	— 46.8	6.0	154.	93.8	85.7 ⁽³⁾	65.3 ⁽³⁾	
SI-3	2	4.6 4.6	0.3 0.0	4.6 4.6	0.3 0.0	0.4	6.3	5.2			
	21	12.1 13.7	2.8 3.0	12.4 13.7	3.1 3.0	1.1	21.7	16.8			
	66	30.7 32.2	16.0 17.5	33.8 35.2	19.1 20.5	2.9	62.5				
	150	65.3 —	45.7 45.9	84.4 —	64.8 66.4	7.1	183.	140.5			
	2	5.0 4.9	0.0 —	5.0 4.9	0.0 —	0.4	6.4	5.7			
SI-4	66	33.4 30.0	15.7 15.9	33.4 30.0	15.7 15.9	2.7	92.0				
	150	87.8 —	64.6 —	103.5 —	80.3 —	8.7	212.				

註) (1)~(4): 図9参照, (5): 表中の上の値はドラム下はポテンシオメーターによる測定値
(6): 図4の実験弾性線と理論耐力線との交点でのたわみに対する値

表-5 たわみ

りあがり、破壊強度も歪速度が $10^{-1}/\text{sec}$ 以上では歪速度の増大とともに増大するということが報告されている。

本実験でも、上述のように動的耐力が静的耐力を上まわっている。なお、梁の歪度（弾性内）から逆算した推定せん断力は、SI-2の場合で17.8tonとなり、静耐力を上まわっており、慣性力とほぼ合致している。

5. まとめ

(i) 塑性域にわたる動試験では、静試験の復元力特性および1%程度の減衰をとってもうまく説明しえない。弾性時は合致するが、降伏後は対応せず動的耐力が静的耐力を上まわるようである。

(ii) 応答計算を行なう場合には、静的耐力よりも少し高めの耐力を仮定し、基礎の記録加速度そのものを入力波とすれば、ほぼ実験値に合致するものと思われる。

(iii) 静的にも動的にも本供試体は延性に富み、最終部材角は1/10程度はある。反対に、本装置を用いてかなり破壊的な動実験が可能である。

(iv) 当然のことながら、入力加速度が大きくても供試体の降伏によって、応答加速度には限界がある。

(v) 固有周期は計算でほぼ推定がつくが、変形の

増大とともに微小ながら伸びる。

(vi) 見かけの減衰定数は小さく、1%前後であるが、変形の増大とともに大きくなる。

終りに、本実験にあたり、当技研田辺次長および振動研究室にご協力を得ました。ここに謝意を表す。

参考文献

- (1) 武田寿一、森高勇：「衝撃試験装置」, 大材組研究所報, Vol. 1, 1966
- (2) 武田寿一、森高勇：「衝撃波に対する構造物の応答の実験的研究」第一報, 第二報, 建築学会関東支部研, 第38回, 昭和42年
- (3) 日本金属学会会報, 特集・金属材料の高速変形, 第4巻, 第3号, 1965年3月
- (4) 勝田千利：「高速圧縮に対する軟鋼および軟鋼柱の性質」, 建築学会論報, S.26.2.
- (5) 東大仲研究室：「鉄骨高層建築の構造設計」, 彰国社
- (6) 梅村魁：「爆発圧に対する構造物の応答」, J.S. S. C. 研修会テスト
- (7) 梅村魁, 松島豊：「衝撃波に対する1質点系の線型応答」, 建築学会大会号, S.39.10.