

I-63

鋼製橋脚を用いた実規模二径間連続桁橋模型の加振実験

(株)日本製鋼所	○正員	小枝 日出夫
開発土木研究所	正員	佐藤 昌志
北海道開発技術センター	フェロー	吉田 紘一
(株)日本製鋼所	正員	小野 信市
室蘭工業大学	正員	岸 徳光

1. はじめに

兵庫県南部地震では、比較的靱性が高いと考えられていた鋼製橋脚にも多くの損傷が生じた。損傷の原因は、上部工の自重による軸力と水平地震動による上部工の慣性力に起因する弾塑性座屈によるとの見解が大勢を占めている。このような内陸型大地震に対する耐震性を向上させるため、近年鋼製橋脚をモデル化した鋼管柱の繰り返し弾塑性挙動に関する実験的研究^{1),2)}が数多く行なわれている。しかしながら、これらの実験はスケールダウンされた試験体を用いて、静的荷重下で行なわれている場合が多い。また、上部工の影響も考慮されていないようである。そのため、地震時における橋脚の実際の動的挙動との対応は必ずしも明らかではない。

また、鋼製橋脚の断面形状に着目すると、円形断面橋脚(以下、鋼管橋脚)は矩形断面橋脚に比べ単位重量当たりの強度が大きい³⁾ため、力学的に有利と考えられる。さらに、鋼管橋脚では、径厚比を適切に選択すれば補剛材の必要性が無くなることから、部材数および溶接箇所が減少し、施工性や経済性の面からも有利となる。

以上のような観点から本研究では、地震による鋼管橋脚の動的応答特性を把握する目的で、実橋規模の二径間連続桁と鋼管橋脚試験体を用いた動的載荷実験を行なった。この動的載荷実験により、鋼管橋脚の耐震設計に必要な基礎データが得られるものと考えられる。なお、本実験では、道路橋示方書(V 耐震設計編)⁴⁾に規定されているタイプⅡの地震動を対象にしている。

2. 実験の概要

2.1 橋脚試験体

試験体は、以下の指針の基に設計した。

- 1) 経済性と強度を考慮し断面形状は円形とする。
- 2) コスト低減のため既製鋼管を使用し、上下固定部以外では補剛材を使用しない。
- 3) タイプⅡの地震動を考慮し、約1Gの応答加速度まで橋脚基部が弾性範囲内にあるようにする。

既製の鋼管を使用する場合、道路橋示方書の規定(Ⅱ 鋼橋編)により鋼種はSTK400とSTK490に限定される。本研究では使用実績を考慮し、鋼管の鋼種をSTK400とした。また、鋼管以外の板材は溶接性を考慮しすべてSM400とした。道路橋示方書の規定では、鋼管材STK400の基準降伏応力は 24kgf/mm^2 である。しかし、実験の精度を考慮し、本研究では引張試験から得られた降伏応力 26.4kgf/mm^2 を用いている。引張試験から得られた使用鋼管の機械的性質を表-1に、また応力-ひずみ関係を図-1に示す。

設計においては、橋脚試験体を鉛直荷重と水平荷重を同時に受ける片持ち鋼管柱でモデル化し、試験体基部が約1Gの応答加速度で降伏するように断面寸法を決定した。本実験で用いた橋脚試験体の形状および寸法を図-2に、また橋脚試験体の諸元を表-2にまとめて示す。

Shaking Tests for Steel Bridge Piers Using The Actual Scale 2-spans Continuous Beam.

by Hideo KOEDA, Toshimitsu TANIMOTO, Koichi YOSHIDA, Shin-ichi ONO and Norimitu KISHI

表-1 使用鋼管の機械的性質

鋼 種	降伏応力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)
STK400	26.4	46.2	35.4

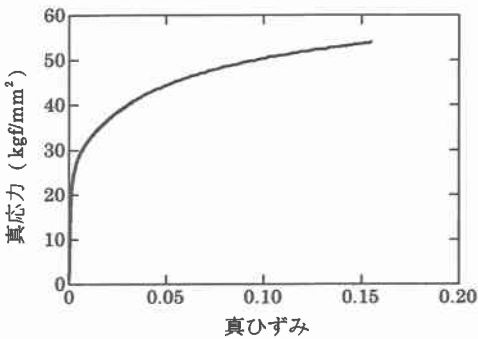


図-1 応力-ひずみ線図

2.2 実験装置

実験装置の全体図を図-3に示す。実験装置は、上部工、橋台(2基)、支承部(ピン支承2基)、橋脚試験体(2基)、下部工(走行架台)、エアベアリング、反力壁および基礎からなっている。下部工はワイヤーロープで重錘に接続されており、この重錘を落下させることにより、実験装置可動部が移動し反力壁に衝突する。この衝突により、橋脚試験体に衝撃的な加速度を与えることができる。実験装置可動部の総重量は341.2tonであり、この重量が反力壁に衝突することになる。上部工は、2径間連続桁橋(支間割:15.0m×2、主桁間隔:1.8m、H形鋼2主桁)であり、両方の桁端は橋台上に各2個のローラーで可動支持されている。また、中間支点は、2基の橋脚試験体上にピン支承で支持されている。上部工の重量は104.6tonであり、支間が均等であることから中間支点が受け持つ死荷重は全体の5/8の65.4tonとなる。

2.3 試験体の固定および載荷方法

本実験では、試験体の設置剛性(走行架台への固定部の剛性)が実験結果に大きく影響するものと思われる。そこで、高さ400mmのI型鋼(H400×B150mm、t1=12.5mm、t2=25mm)を試験体の下部に溶接で取りつけ、さらに試験体基部から下の領域を高強度コン

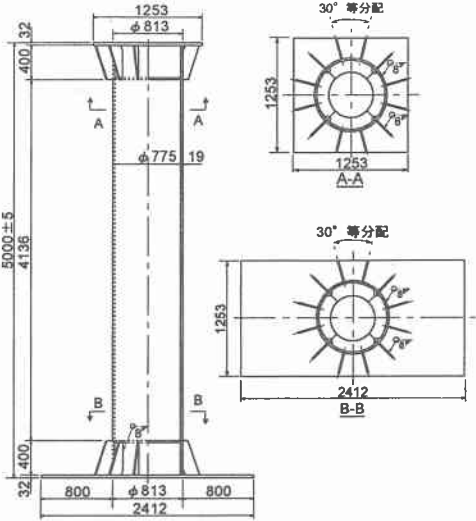


図-2 橋脚試験体の形状および寸法

表-2 橋脚試験体の諸元

項目	記号	数値	単位
上部工の曲げ剛性	k	0.22	tonf/mm
上部工重量	W	104.6	ton
橋脚1基当たりの負担重量(水平方向)	W _V	52.3	ton
橋脚1基当たりの負担重量(鉛直方向)	W _H	32.7	ton
降伏応力	σ_y	26.37	kgf/mm ²
弾性係数	E	21000	kgf/mm ²
ポアソン比	ν	0.3	
外 径	d ₂	812.0	mm
板 厚	t	18.5	mm
内 径	d ₁	775.0	mm
板厚中心半径	R	396.8	mm
基部～荷重点高さ	L	4718.0	mm
断面積	S	46118	mm ²
断面2次モーメント	I	3.63E+9	mm ⁴
断面2次半径	r	280.6	mm
細長比	L/R	11.9	
	$\bar{\lambda}$	0.379	
径厚比	R/t	21.4	
	R _t	0.044	
軸 力	P	32.7	tonf
	P/P _y	0.027	
降伏水平荷重	H _y	50.0	tonf
降伏水平変位	δ_y	22.9	mm
降伏水平荷重時の上部工加速度	a _y	0.96	G
曲げ剛性	k _b	2.18	tonf/mm
軸剛性	k _a	205.27	tonf/mm
固有振動数(曲げ)	f _b	3.22	Hz
固有振動数(軸方向)	f _a	39.50	Hz

動的载荷は、橋脚試験体を固定した下部工を重錘の落下により走行させ、反力壁に衝突させる方法で行なった。この時、下部工の走行距離とEPS(緩衝材)の厚さを変化させることにより、所定の入力加速度を下部工に与えた。実験は、橋脚試験体に降伏が生じない弾性領域での応答実験と降伏が生じる塑性領域での応答実験の2種類とし、各9ケースづつ行なった。実験における計測は、衝突荷重、ひずみ、変位、速度および加速度について行なった。これらの計測データは、すべて1kHzの速度でサンプリングしデータレコーダに記録した。

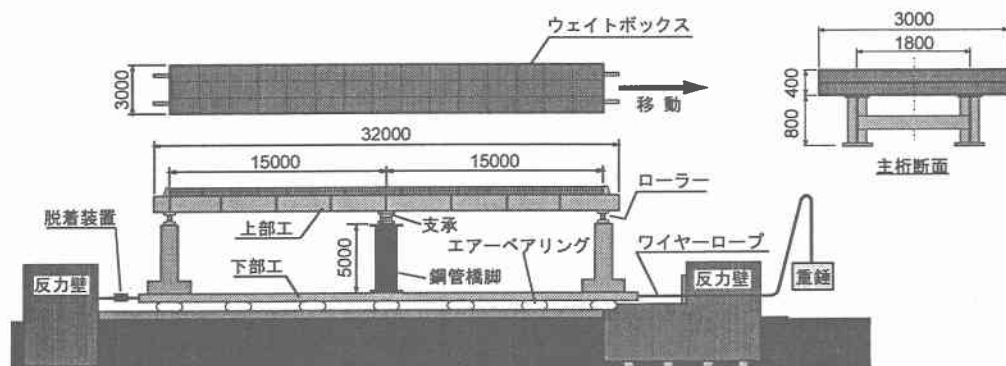


図-3 実験装置全体図



a) 基部補強状況

b) 試験体取付け状況

図-4 基部の補強および試験体取付け状況

3. 実験結果および考察

3.1 動的応答特性

実験から得られた衝突速度、最大入力加速度、最大応答加速度等をまとめて表-3に示す。ここで、入力および応答加速度はそれぞれ下部工および上部工の加速度と定義している。図-5に入力および応答加速度波形の一例として、衝突速度が最大である実験No.18より得られた加速度波形を示す。入力波形は約0.1秒の短いパルス状となっており、衝撃的な荷重が作用していることがわかる。

図-6に実験から得られた最大入力加速度と応答倍率の関係を示す。応答倍率は、最大入力加速度の増加に対しほぼ線形に減少しており、入力加速度が約0.6G以上となると1.0以下の値となっている。これは3.2項で述べるように、最大入力加速度が約0.5Gを越えると橋脚試験体の基部が降伏し始めることと対応していると考えられる。図-7および図-8に最大入力加速度と減衰定数および固有振動数の関係を示す。ここで、減衰定数および固有振動数は最大応答加速度波形から求めたが、実験ケースNo.1～3については

表-3 実験結果

実験No.	実験領域	衝突速度 cm/sec	最大入力加速度 G	最大応答加速度 G	応答倍率	荷 重 tonf	減衰定数	固有振動数 Hz
1	弾性領域	37.7	0.054	0.068	1.26	3.6	—	—
2		39.4	0.061	0.071	1.16	3.7	—	—
3		65.3	0.127	0.139	1.09	7.3	—	—
4		78.4	0.268	0.304	1.13	15.9	0.139	2.11
5		85.9	0.355	0.386	1.09	20.2	0.127	2.07
6		78.9	0.253	0.285	1.13	14.9	0.118	2.05
7		72.2	0.184	0.208	1.13	10.9	0.126	2.07
8		76.6	0.259	0.302	1.17	15.8	0.118	2.08
9		88.3	0.408	0.442	1.08	23.1	0.120	2.07
10	塑性領域	92.3	0.513	0.530	1.03	27.7	0.119	2.04
11		101.3	0.545	0.562	1.03	29.4	0.122	2.02
12		96.0	0.570	0.590	1.04	30.9	0.115	1.96
13		103.7	0.602	0.607	1.01	31.7	0.117	1.96
14		105.3	0.657	0.644	0.98	33.7	0.116	1.95
15		110.3	0.689	0.683	0.99	35.7	0.120	1.93
16		109.1	0.853	0.734	0.86	38.4	0.131	1.85
17		126.4	1.039	0.834	0.80	43.6	0.150	1.96
18		141.5	1.165	0.935	0.80	48.9	0.166	1.79

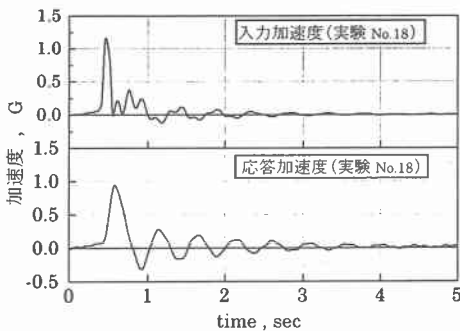


図-5 入力加速度および応答加速度

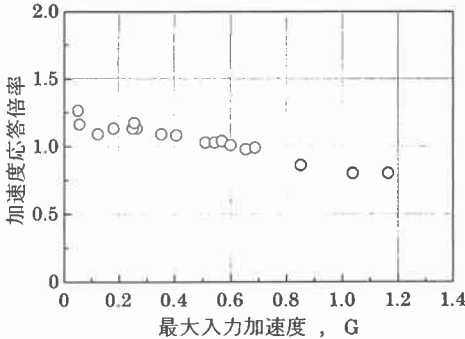


図-6 入力加速度と加速度応答倍率の関係

波形が小さく算出することができなかった。減衰定数は、入力加速度が0.6G以下ではほぼ0.12の一定値を示し、0.6Gを越えると約0.12から0.17まで単調に増加している。これは応答倍率の変化とほぼ対応している。一方、固有振動数は最大入力加速度によらずほぼ2Hzの一定値を示している。しかしながら、はり理論から計算される橋脚試験体の固有振動数は、表一2に示したように3.2Hzであり、実験値と約1.5倍の差が見られる。これは、試験体の固定が完全ではなく基部に剛体変位が生じたためと考えられる。

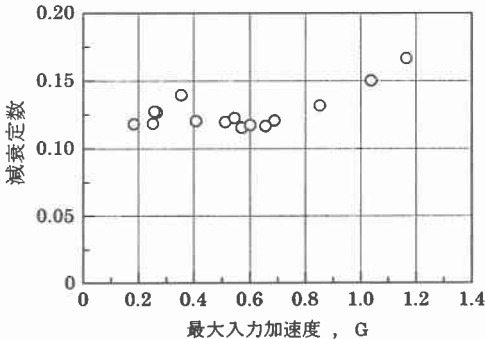
3.2 静的载荷と動的応答特性の比較

本研究では静的载荷実験を行っていないため、ここではFEM解析による計算結果と動的応答実験結果を比較する。FEM解析は、図一2に示した橋脚試験体を対象に汎用構造解析プログラムABAQUSを用いて行なった。モデルの対称性から試験体の1/2について、下端完全固定、上端自由として行なった。上端には上部工の死荷重を模擬した鉛直下向きの一定荷重を定常的に作用させた状態で、水平変位を増分値として静的に与えた。材料定数には図一1に示した真応力－真ひずみ曲線を相当応力－相当ひずみ関係として用い、また硬化則には等方硬化則を用いた。

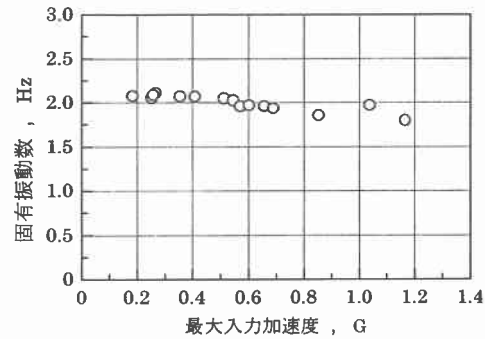
図一9にFEM解析から得られた荷重－変位曲線を示す。同図から分かるように最大荷重は約95tonであり、その時の変位は約330mmである。一方、動的载荷実験において、応答加速度から換算した最大荷重は表一3に示すように48.9tonであり、これは弾性ははり理論から計算される降伏水平荷重 H_y にほぼ等しい。したがって、実験では試験体の最大耐荷力の約1/2までしか载荷できていないことになる。以下では、この実験の範囲内において静的载荷と動的応答特性の比較を行なう。

実験では、最大入力加速度が約0.5G以上の载荷(実験No.10～18)において橋脚試験体基部の降伏が観察された。ここで、試験体基部の降伏の判定は、測定されたひずみと降伏ひずみを比較することにより行なった。なお、降伏ひずみは、引張試験より得られた降伏応力 26.4kgf/mm^2 から 1225μ と定義した。

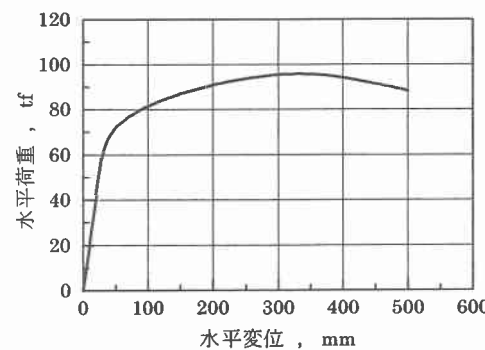
図一10に実験No.9と18について、FEM解析および動的载荷実験から得られた試験体の軸ひずみの分布を比較して示す。実験No.9は弾性領域、No.18は塑性領域における実験である。実験から得られたひずみは、引張側で解析値よりも幾分大きな値を示し



図一7 入力加速度と減衰定数の関係



図一8 入力加速度と固有振動数の関係



図一9 FEM解析による水平変位－水平荷重曲線

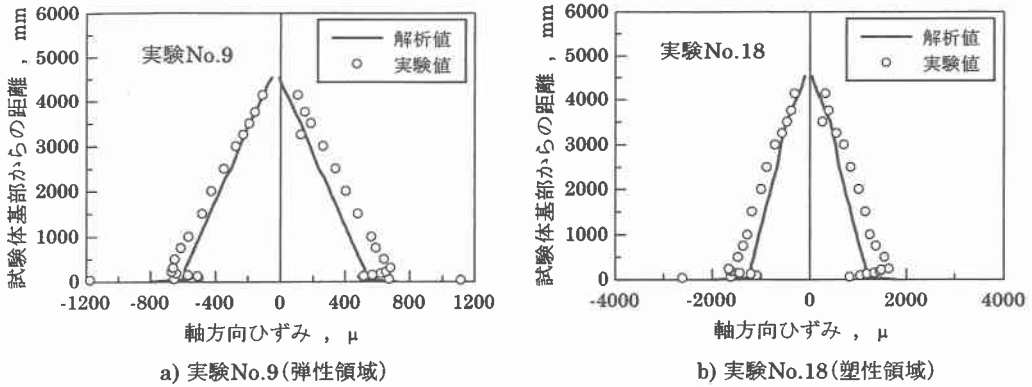


図-10 FEM解析と動的載荷実験における軸ひずみの比較

ているものの、その大きさおよび分布ともFEM解析結果と良く一致している。このことより、本実験の範囲内では、静的載荷と動的載荷でその挙動に大きな差は無いものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、地震による鋼管橋脚の動的応答特性を把握する目的で、実橋規模の二径間連続桁と鋼管橋脚試験体を用いた動的載荷実験を行なった。本研究の範囲内で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 試験体の応答倍率は最大入力加速度の増加に対しほぼ線形に減少し、入力加速度が約0.6Gを越えると試験体基部の降伏に対応し1.0以下の値となった。
- 2) 試験体の減衰定数は応答倍率の変化とほぼ対応し、0.6Gを越えると約0.12から0.17まで単調に増加した。
- 3) 試験体の固有振動数は最大入力加速度によらずほぼ2Hzの一定値を示した。
- 4) 動的実験から得られたひずみは、大きさおよび分布とも静的載荷を模擬したFEM解析結果と良く一致した。

参考文献

- 1) 宇佐美, 葛, 水谷:コンクリートを部分的に充填した無補剛箱形鋼柱の繰返し弾塑性挙動, 構造工学論文集, Vol.39A (1993), pp249-262.
- 2) 小枝, 岸, 佐藤, 小室:軸力と交番曲げを受ける円形鋼管柱の弾塑性挙動, 応用力学論文集, Vol.1 (1998), pp1-10.
- 3) 宇佐美勉, 青木徹彦, 加藤正宏: 鋼管短柱の圧縮および曲げ耐力実験, 土木学会論文集, 第416号 (1990), pp 255-264.
- 4) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (1996)