

横断歩道橋模型の振動台実験

東京大学生産技術研究所 正員 久保慶三郎 ○片山恒雄
近畿日本鉄道(株) 正員 和田林道宜

1. まえがき 標準設計の横断歩道橋は比較的単純な構造系であるにもかかわらず、各種の取付部の耐震強度などに関して実験的な検証が行なわれた例がない。本報告は、取付部の詳細までをできるだけ再現した1/5の模型歩道橋の各種振動実験の結果を述べるものである。

2. 模型の製作 対象とした実物はスパン約12mの下路式I型の標準設計歩道橋である。階段は踊場支柱のない直線形状の溶接I型断面桁・鋼床版構造(SE階段)を対象とし、主桁両端の支柱は各1本(PⅢ型)で、階段は両側とも橋軸直角方向に付いていて平面形状がコの字型になるものを考えた。模型の一般図を図-1に示す。また、対象とした実橋、理想的な1/5模型および実際に用いた模型の諸元の比較を表-1に示す。模型は鋼製で、振動台の大きさから考えて、基本的な縮尺率を1/5としたが、種々の事情により実験模型は理想的1/5模型とはなっていない。実験の主目的は橋軸方向の耐震強度、特に各種接合部の安全性の検証である。実在歩道橋の微小振動測定によれば、橋軸方向振動は主桁を集中質量として持つほとんど純粋な1自由度系であり(久保・片山、生産研究、28-3、1976年3月)、主桁の曲げ剛性は重要な因子ではない。なお、理想的な1/5模型であれば、振動数は実物の $\sqrt{5}$ 倍になる。

支柱および各種接合部は6組の模型を作製し、次節に述べる6種類の実験ケースごとに取り替えて使用した。

3. 実験の方法 実験には、東京大学生産技術研究所千葉実験所にある振動台を用いた。テーブルの大きさ1.5×2.0m、最大出力4.7t、無負荷時(テーブル重量3.1t)の最大加速度1500ガルであり、入力波の加速度による制御が可能である。

実験は階段の有無、主桁と階段の接合方向および加振方向の違いを組合せた6つのケースについて行なった(表-2)。ケース2および5における主桁-階段の接合法が標準設計のものであり、ケース3および6ではこの部分を剛結した場合の効果を検討した。これらのケースのそれぞれについて以下の実験を行なった：(i)主桁の応答加速度をほぼ一定の130ガルとした各種入力振動数による正弦波加振実験、(ii)エルセントロ波の継続時間を1/2(15秒)および1/4(7.5秒)に圧縮した入力波形によるランダム波加振実験—入力最大加速度を変化させてそれぞれ平均7回、(iii)破壊を目的とした正弦波加振実験。ランダム波加振の最大加速度は約0.1gから1.5gである。実験(iii)は共振状態で加振を続け

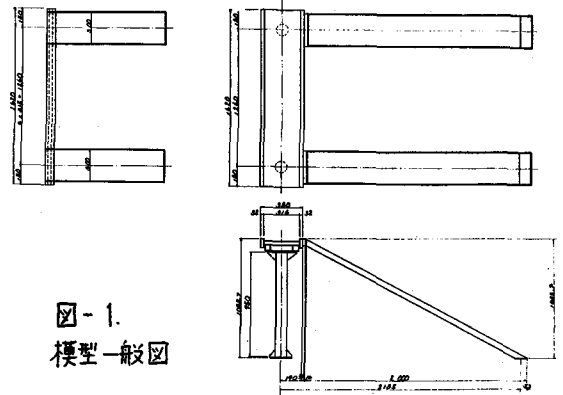


図-1.
模型一般図

表-1. 対象とした実物と作製した模型の諸元。

歩道橋の部分		支間12mの標準設計	理想的な1/5模型	実際に作製した模型	備考
主桁	支間 (m)	12.0	2.4	1.26	支間とIは相似
	I (cm ⁴)	118,800	190	328	相似と無視、模型
	重さ (t)	約9	0.36	0.31	模型は小さめ
階段 (片側)	水平長さ (m)	10.9	2.18	2.00	模型重量は
	水平面の I (cm ⁴)	1,055,000	1690	1660	かなり小さいので
	重さ (t)	約4.5	0.18	0.1	ある。
支柱	長さ (m)	4.96	0.99	0.95	模型の直径
	直径 (mm)	609.6	121.9	101.6	は小さく、
	板厚 (mm)	9.5	1.9	4.0	板厚はすく
	I (cm ⁴)	80,600	129	146	大きい。
	A (cm ²)	179.1	7.16	12.26	
主桁・支柱、主桁・階段の接合部、支柱上下端の詳細など。		主桁と支柱の間にある横桁、主桁と階段の間の接合部、支柱上下端の詳細はほぼ完全な1/5縮尺。実橋では横桁がラテラル部材で補強されており、支柱下端ボルトは保護コンクリート内で貫通して固定されているが、模型にはラテラル部材、保護コンクリートはない。			

表-2. 測定ケースの概要と測定ケース別の振動特性

測定 ケース	加振方向	階段の 有無	主桁・階段 の接合	応答加速度100-150ガル ² の正弦波加振実験		加速度応答倍率(ランダム入力加速度10ガル)	
				固有振動数(Hz)	減衰定数(%)	範囲	平均
1	橋軸方向	なし	-----	7.3	1.8	2.6 - 5.4	3.8
2		有	ピン結合*	10.1	1.6	2.0 - 3.4	2.6
3		有	剛結	11.6	1.2	1.7 - 4.0	2.4
4	橋軸直角 方向	なし	-----	8.5	1.6	5.5 - 8.0	6.6
5		有	ピン結合*	30以上	6 - 8	1.4 - 2.8**	1.8
6		有	剛結			1.2 - 1.4	1.3

* 標準設計準拠

** 階段の衝突が明らかなデータとのぞく。

て模型を破壊させることを意図した実験であったが、それまでの実験状況から破壊しないことが明らかであつた。ケース5および6では実施していない。

4. 実験の結果 今回の実験で対象としたコの字型の平面形状を有する標準設計橋脚歩道橋では、階段剛性の効果があり現われぬ橋軸方向(階段軸直角方向)の耐震性が最も重要である。したがつて、ここではケース2(主桁と階段が標準設計に準拠したピン結合で、橋軸方向に加振した場合)を中心に実験結果を検討する。

4.1. 固有振動数および減衰 表-2に共振曲線から求めた各測定ケースの固有振動数と減衰定数をまとめて示した。共振実験は主桁の応答加速度が110~150ガルの範囲におさまるように台加速度を加減して実施しており、共振点付近での入力加速度は10ガル程度以下である。ケース5および6においては測定方向の剛性が極めて高く、自由振動の波形が之れれていて、確実な値は求められていないが、少なくとも30Hz以上と判断された。

図-2に、13橋の実在歩道橋の振動測定から得られた橋軸方向固有振動数を示したが、支間12m程度では5Hz前後となつてゐる。模型が理想的に1/5縮尺であれば振動数は5倍になるはずである。実際の模型が完全な縮尺模型ではないことを考慮し、主桁・階段の重量および支柱の剛性に対して補正すると、ケース2の実験結果10.1Hzは実物に換算して約3.7Hzとなり、支間12m程度の実在歩道橋の振動数よりもかなり低い。これは模型の取付架台の性質により、支柱下端でベースプレートが回転したためである。主桁の応答加速度が100~150ガルのときの模型の減衰定数は橋軸方向振動では1~2%であり、実橋の微小振動測定による値1~3%とよく一致している(和田林, 東京大学修士論文, 1976年3月)。階段が付いた場合の橋軸直角方向振動(ケース5および6)の減衰定数は6~8%で、橋軸方向振動の値にくらべて大きい。

4.2. ランダム波実験による加速度応答倍率 ランダム波加振実験における加速度応答倍率(主桁の最大応答加速度と最大入力加速度の比)と最大入力加速度の関係は橋軸方向加振の場合について図-3に示す。実験に用いた入力加速度の範囲では支柱に塑性ひずみは発生しておらず、加速度応答倍率はほぼ一定で加速度の増大に伴

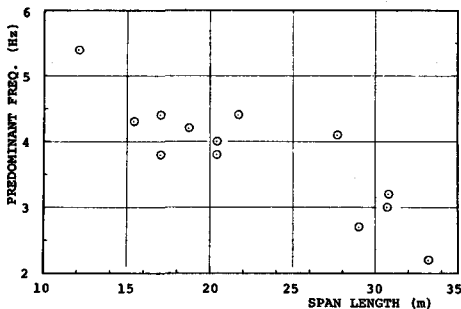


図-2. コの字型平面形状を有する実在の標準設計橋脚歩道橋の橋軸方向固有振動数

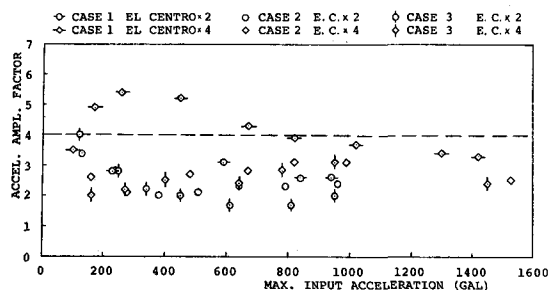


図-3. 最大入力加速度と加速度応答倍率
(橋軸方向ランダム加振)

う著しい低下は見られない。最大入力加速度1g以下の場合の加速度応答倍率の範囲と平均値を測定ケース別に表-2に示した。標準設計準拠の主桁-階段ピン結合に注目すると、橋軸方向(ケース2)で2.6、橋軸直角方向(ケース5)で1.8程度の平均値となっている。ケース5では、最大入力加速度が700ガル程度以上になると、主桁-階段接合部のピンの摩耗が切れて衝撃的な力が階段から主桁に作用する可能性があることがわかった。

4.3. 支柱ひずみ 橋軸方向ランダム加振の場合について、最大入力加速度と支柱下端ひずみの関係を図-4に示す。ここに示さなか、たが、ケース2とケース5の結果の比較によれば橋軸直角方向加振の場合の支柱ひずみは橋軸方向加振の値の $1/2$ 以下であった。橋軸方向加振においては、支柱の上・下端付近のひずみは同符号で、前者が後者の約 $1/10$ となっており、歩道橋はこの方向にはほとんど上端にヒンジの骨組系として応答している。上端ヒンジと仮定すれば、模型重量のどれだけが支柱によつて受けもたれているかが推定できる。橋軸方向加振のケースについて支柱によつて受けもたれる重量の主桁重量に対する比と最大入力加速度を横軸にとつて図-5に示した。階段のあるケース2および3では加速度が小さいうちは重量の一部が階段によつて負担されている。入力加速度が700ガル程度以上になると、支柱1本で受けもたれる重量はほぼ一定となり、主桁重量のほぼ $1/2$ に近づく。ケース2の値がケース1より大きいのは、階段重量が付加されるためであり、ケース2とケース3との比較から階段を主桁に剛結することの効果がかがわかる。

4.4. 固有振動数と減衰の加速度レベルによる変化

主桁の最大応答加速度の増大とともに卓越振動数が低下するようすとケース2について図-6に示した。主桁の応答加速度が約1gを越えると、振動数が小振幅時の少なくとも0.85~0.9倍程度に減少している。また、図-7によれば、この状態での減衰定数は5%以上で、主桁応答加速度が0.15g程度の正弦波加振実験から得られた値の約3倍である。

4.5. 共振破壊実験の結果 橋軸方向加振のケース1, 2, 3では、振動台の出力を維持したまま模型の共振振動数に入力振動数を追従させた正弦波加振により模型を破壊させることを目的とした実験を行なつた。この結果、損傷が見られたのは階段のないケース1(主桁応答加速度約3.8g)のみであり、階段のあるケース2および3では主桁の応答加速度

2.5~3.5gで20分間程度加振を続けたが、まったく損傷が認められなかつた。ケース1における破壊は、主桁と支柱をつなぐ横桁のフランジに発生し、また支柱下端のベースプレートに若干の塑性変形と亀裂が観察された。最終の共振状態における共振振動数はケース1で4.7Hz、ケース2で6.5Hz、ケース3で7.1Hzであり、いずれの場合もそれぞれ初期の固有振動数(表-2参照)の約60%に低下していた。共振時の支柱下端付近のひずみはいずれの場合も降伏ひずみに達しておらず、主桁-階段ピン結合のケース2で約 840×10^{-6} 、主桁-階段剛結のケース3で約 550×10^{-6} であった。ケース1の破壊は主桁の応答加速度3.8g程度で20分近く加振した結果生じたもので、繰返し数にして5000回以上に達していたものと思われる。

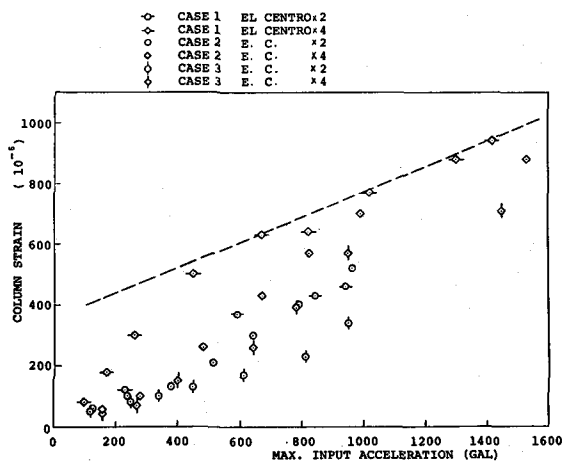


図-4. 最大入力加速度と支柱下端ひずみ
(橋軸方向ランダム波加振)。

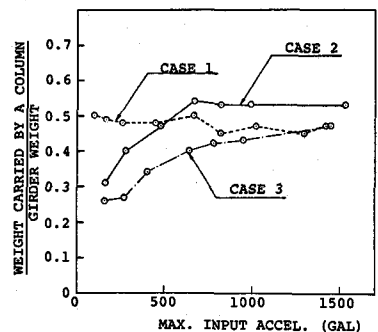


図-5. 支柱が受けもつ重量と最大入力加速度(橋軸方向, EL CENTRO $\times 2$)。

5. 実橋との対応 振動台実験に用いた1940年エルセントロ波形のNS成分は約2~5Hzの振動数成分が卓越した勢力を有しており、これに対し実在の歩道橋の橋軸方向固有振動数は大体3~5Hzの範囲にある。実験ではこの波形の時間軸を1/2および1/4に圧縮しており、卓越振動数成分は4~10Hzおよび8~20Hzとなる。一方、橋軸方向加振のケース1~3の固有振動数は7.3~11.6Hzの範囲にあり、模型の減衰もほぼ実物にみあう大きさである。たことを考えると、実験から得られた加速度応答倍率はほぼ実物でも予想される値と考えられる。また、標準設計ではスパン22mのものまでは同一の支柱が用いられるので、スパンの違いによる重量の差を勘案し、今回の実験結果からスパン22mの実物の耐震性までを論ずる。

安全側をと、てSS41の降伏点ひずみを 1000×10^{-6} とし、図-4から対応する入力最大加速度を推定すると約1500ガルとなる。実験模型が不完全であることを考え、重量、支柱の断面2次モーメントと直径に關して補正をすれば、この値は約840ガルに減少する。スパン22mの歩道橋では主桁重量は約17tになるから、入力最大加速度が約580ガルで支柱下端ひずみが降伏点ひずみに達すると考えられる。また、この程度の最大加速度入力に対する支柱下端アンカーボルトのせん断能力は、地震時の割増しを考へない許容せん断能力の1/2以下の値である。

標準設計に準拠した主桁-階段ピン結合の橋軸方向加振実験(ケース2)の結果によれば、主桁の最大応答加速度3850ガル(=3.9g)ではどの接合部にも異常は認められていない。実験模型は縮尺の割に重量が小さか、たことを考慮すれば、この値は約2900ガル(=3.0g)となる。加速度応答倍率を4とすると(図-3)、スパン12mでは約730ガル、スパン22mでは約500ガルの最大入力加速度までは、これらの部分に異常が発生しないと思われる。ただし、主桁-階段接合部のすみ肉溶接に關しては、模型実験結果から実物の強度を推定することに問題がある。

6. あとがき 模型実験結果の検討から、標準設計横断歩道橋の本体は支間12m程度のもので少なくとも700~800ガル、22m程度のもので500~600ガルの最大加速度を有する地震動に対してはどの部分にも異常が発生しないものと思われる。したがって、この程度の地震動によって上部構造に生ずる慣性力に対して基礎構造が同時の安全性を有しているかが全体系の耐震性を考へる上で極めて重要となる。

実験結果によれば、主桁と階段を剛結することによって、橋軸方向の剛性もかなり増大し、支柱が負担する重量も軽減される。この際、階段下端フーチングと支柱フーチングを地中ばりで連結すれば、これらのフーチングの不等沈下に伴う問題にも対処できる。フーチングを一体化することは地震時に立体骨組としての構造系を保持するためにも有効と思われる。

7. 謝辞 本実験の経費の一部は川崎市防災会議地震専門部会および昭和50年度科学研究費一般B(代表:東京大生産技術研究所 柴田碧)によるものであり、実験の遂行およびデータ解析に際しては伊藤邦興(東大生研)および山崎行雄(加技建(株))に多大の協力を得た。記して深甚なる謝意を表する。

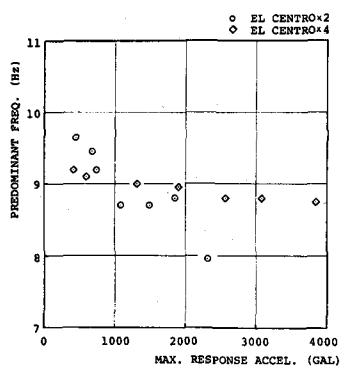


図-6. 加速度レベルの増加による卓越振動数の低下(ケース2)。

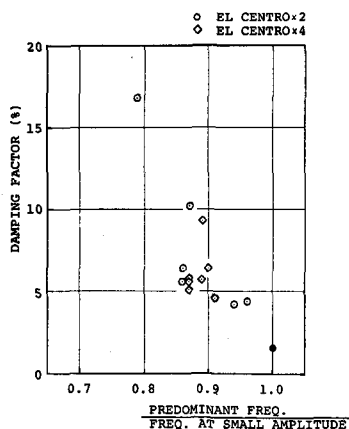


図-7. 卓越振動数の低下に伴う減衰定数の変化(ケース2)。