

標準設計横断歩道橋の振動測定と模型振動実験

Dynamic Properties and Model Shaking-Table Tests of Standardized Pedestrian Overbridges

久保 慶三郎*・片山 恒雄*

Keizaburo KUBO and Tsuneo KATAYAMA

1. ま え が き

東京のような都市が強い地震動に襲われた場合を考えると、震災直後の住民避難・消火などの緊急活動に関連して、道路網が果たす役割は極めて大きい。ネットワークとしての都市内道路網において、道路構造の一部をなす一般橋梁と道路上を横断して架設されている歩道橋の耐震安全性が問題となる。一般橋梁の落橋とともに、横断歩道橋の倒壊もまた道路交通の円滑な流れを阻害することになる。例えば、東京都内だけでも約800橋の歩道橋があるが、一部ではこれらの耐震性が疑問視されている。

横断歩道橋の設置および設計は「立体横断施設設置要領(案)」および「横断歩道橋設計指針」(ともに日本道路協会)によっている。前者は横断歩道橋を含む立体横断施設の設置基準・位置および型式の選定・維持管理などに対して合理的根拠あるいは統一的指針を明らかにすることを目的としており、後者は横断歩道橋が十分に安全でかつ歩行者が利用しやすい構造として設計されることを目的としている。

歩道橋の設計における地震の影響は死荷重と100kg/m²の活荷重を受けた状態で考慮され、水平方向0.2および鉛直方向0.1の設計震度を標準とするが、地域・地盤などの状態により水平震度は0.1まで低減できる。通常の鋼道路橋では地震時には活荷重の影響を考慮しないが、横断歩道橋は混雑するところに設けられることが多いので、安全を考えて活荷重の一部を受ける状態で地震の影響を考慮している。また、風荷重は活荷重を載荷しない状態で考慮し、その大きさは

風上側上部工の有効鉛直投影面に対して 200kg/m²

風下側上部工の有効鉛直投影面に対して 100kg/m²と規定されている。鋼材およびコンクリートの許容応力度は荷重の組合せに応じて関連示方書(鋼道路橋設計示方書、鉄筋コンクリート道路橋設計示方書など)に規定された主荷重に対する許容応力度を割増して適用できるようになっており、割増し係数は風荷重に対して1.35、主荷重と地震荷重の組合せに対して鋼材(PC鋼材と鉄筋をのぞく)で1.70、コンクリートお

よび鉄筋で1.50である。

横断歩道橋は一般に上部工の死荷重が小さく、高欄・階段などがあって支間の割合に風を受ける面積が大きいことにより、横荷重に対する強度は風荷重に支配されている。すなわち、主桁の支柱断面のように水平力で決定される部分は風荷重によって定まっており、支間20m程度の歩道橋は実際にはほぼ0.4相当の水平震度で設計されていることになる。

歩道橋のうちで最も代表的な幅員1.5mの鋼製歩道橋については、建設省が「横断歩道橋設計指針」に準拠して支間12mから30mの標準設計(「土木構造物標準設計V(横断歩道橋)」,日本道路協会)を示しているが、東京都内などに見られる鋼製歩道橋の大部分はこの標準設計に準拠して架設されたものである。

筆者らはかねてから、横断歩道橋の耐震性問題に注目し、すでにいくつかの実橋の振動測定¹⁾や鋼製ラーメン構造の耐震強度の模型実験²⁾などを実施してきたが、最近、東京都内の歩道橋10橋の常時微小振動測定による動特性の推定および取付け細部までをできるだけ忠実に再現した1/5模型による振動台実験を実施したので、それらの結果の一部を報告する。

2. 実橋の常時微小振動測定

今回測定を実施した歩道橋は東京都の港区、目黒区、渋谷区にある10橋であったが、以前に実測した5橋の結果をこれらに加え、橋軸方向および橋軸直交方向(図1参照)の卓越振動数を一覧表にして表1に示す。実測した15橋は、若干の修正はあるにせよ基本的には標準設計に準拠した歩道橋であり、支間長は12.1m~33.2mにわたる。今回の10橋の実測には、固有周期2秒の速度型換振器を用い、夜間の交通によって生じている橋軸方向・橋軸直交方向および上下方向の微小振動を支間中央・支柱直上および地盤上で同時測定しデータレコーダに収録した。これらの記録の約5分30秒の区間を時間間隔0.02秒でサンプリングし、実時間相関分析器で算出した自己相関曲線にフーリエ変換を施してパワースペクトル図を求めた。これに対し、神奈川県下の歩道橋5橋の測定結果は、支間中央に設置した小型起振器による小振幅強制振動実験によるものである。図2には、今回の実測による巴町歩道橋の橋軸方向(支間

* 東京大学生産技術研究所 第5部

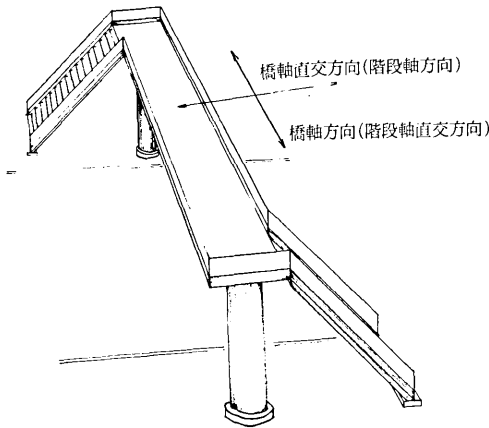


図1 典型的な横断歩道橋の構成

表1 標準設計にほぼ準拠した横断歩道橋の実測卓越振動数

歩道橋名	所在地	支間 (m)	卓越振動数 (Hz)		
			橋軸 方向	橋軸直交方向	
				支間中央	支柱上
麻布古川橋	港区	33.2	2.4	3.2, 4.8	11.0, 14.0
中目黒1丁目	目黒区	30.8	3.2	5.9, 3.4, 11.2	10.0, 11.4
二本榎	港区	30.7	3.0	3.2	9.6, 12.2, 5.4
子母口*	川崎市	29.0	2.7		—
旭町	川崎市	27.7	4.1	5.1	—
平台**	川崎市	24.4	6.7	3.8	—
南麻布5丁目	港区	21.7	4.4	8.4, 3.6	13.4, 16.0, 19.0
巴町	港区	20.4	3.8	3.9, 9.8, 7.5	12.0, 8.5
八幡町	港区	20.4	4.0	5.4, 7.9	12.8, 10.2, 7.8
湘光***	神奈川県足柄上郡	20.0	7.3	3.1	—
愛宕下通り	港区	18.7	4.2	9.9, 13.5	****
目黒2丁目	目黒区	17.0	4.4	11.0, 9.5	10.9, 15.8, 9.5
下目黒2丁目	目黒区	17.0	3.8	9.0, 3.8, 12.0	12.0, 8.3
広尾中前	渋谷区	15.4	4.3	9.4	11.0, 9.3, 15.5
岸	神奈川県足柄上郡	12.1	5.4	12.8	—

* 階段は両方とも橋軸45°方向に付いている。
 ** 階段の一方が橋軸方向に付いている。
 *** 階段は両方とも橋軸方向に付いている。
 **** パワースペクトル図に明瞭なピークなし。

中央)・橋軸直交方向(支間中央および支柱上)の振動のパワースペクトル図を示した。

現存する歩道橋の大部分は、設置位置の条件により、階段が歩道橋の橋軸に直交して付けられている(図1参照)。したがって、橋軸方向の動的特性には階段剛性の影響は小さく、主として桁部分の集中質量と支柱部分のばねからなる1自由度振動系としての挙動が卓越する。この傾向は実測結果に顕著に現われており、橋軸方向振動のパワースペクトル図には、支間中央・支柱上を問わず単一の鋭いピークが見られる(例えば、図2(a)参照)。標準設計と言っても、階段の型式などは数種類あり、現場の状況によって使いわけるようになっているので、支間長と橋軸方向の卓越振動数の関係は必ずしも単純ではないが、大勢としては、支間10m程度の標準設計歩道橋で5.5Hz、支間20m程度のもので約4Hz、支間30m程度のもので2.5~3.0Hzの値を示している。

これに対し、橋軸直交方向(一般に階段軸方向)の振動性状は立体骨組としての特性を強く表わしており、かなり複雑である。図2(b),(c)の巴町歩道橋の例にも典型的に現われているが、パワースペクトル図には複数個の卓越振動数が見られ、支間中央と支柱上におけるパワースペクトル図も一般に異なった形状を示す。支間中央における測定結果には、主桁そのものの水平方向たわみ振動に対応する比較的低い3~5Hzの振動数成分が卓越して現われているものもあるが、立体骨組系としての振動特性を顕著に表わしていると考え

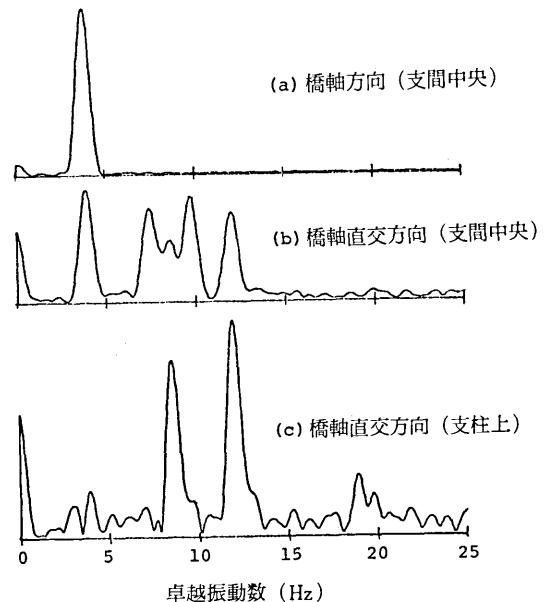


図2 巴町歩道橋のパワースペクトル図

られる支柱直上のパワースペクトル図では支間長にかかわらず10Hz程度以上の高い振動数が卓越する。

上に述べた実測結果から総合的に判断すると、標準設計横断歩道橋は一般に階段軸方向（普通は橋軸直交方向にあたる）には高い剛性を持ち、現行の震度法による設計がほぼ妥当な構造系であり、立体骨組としての構造系が保持されている限りは耐震性の高い構造と考えられる。他方、階段軸直交方向（普通は橋軸方向にあたる）には、主桁による集中質量が支柱（一般に2本のものが多い）で支えられたほとんど純粋に1自由度系の動特性を示し、卓越振動数も2.5~5.5Hz程度で、大きさの割合にたわみやすい構造系を有する。通常の強震動の周波数特性を勘案すれば、橋軸方向の地震時安全性に関しては、動的特性がかなり重要な要素となりうる構造系であると言える。今回測定した10橋については解析が完了していないが、先に測定した5橋の結果によれば、階段軸直交方向振動の減衰定数は1~2%程度と小さい。

3. 模型歩道橋の振動台実験

標準設計横断歩道橋の耐震強度に関する情報を得るために、約1/5の鋼製模型を用いた振動台実験を実施した。実験結果の大部分は現在解析中であり、以下に示す結果の一部は現時点では十分な検討を加えたものではないことに注意されたい。

模型は実物歩道橋の約1/5とし、特に主桁一支柱、主桁一階段、支柱下端の接合部については、できる限り実際の標準設計の1/5縮尺となるように努力した。写真1は模型支柱を示したものである。支柱および階段の剛性もほぼ1/5縮尺を満たすものとしたが、振動台の大きさの制限から、主桁剛性および支間長は相似率

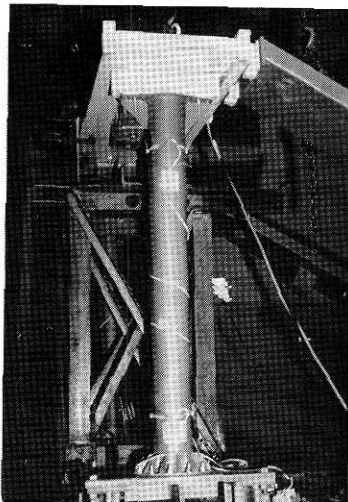


写真1 模型歩道橋の支柱（各接合部は実物のほぼ1/5縮尺としてある）

を満たしていない。すなわち、対象とした実物は支間長約20mの歩道橋であるが、主桁はほぼ完全な剛体とみなせる厚い鋼板とし、主桁重量のみが相似則を満たすように設計した。最終的に実験した模型歩道橋は、支柱高95cm、支間長126cmで、おもりを付加することにより主桁の全重量を約320kgとした。写真2は振動台上に組立てた模型の一例である。

模型は主桁・支柱・階段および各種接合部を別々に作成し、それらの組合せと加振方向を変えることにより表2に示す6つの場合について実験した。それぞれの場合に対しては次のような測定を実施した。

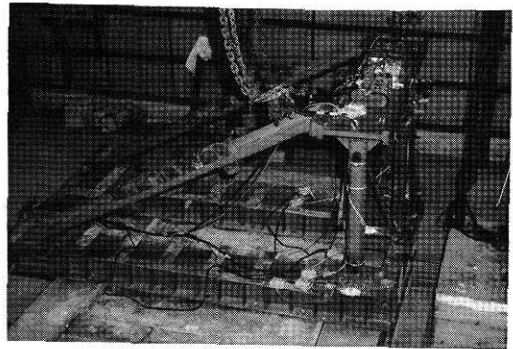


写真2 模型歩道橋全景

表2 模型歩道橋実験の概要

記号	加振方向	階段の有無	主桁・階段の接合	備考
I	橋軸方向	無	—	主桁と支柱（2本）のみ
II		有	ピン結合	標準設計準拠
III		有	剛結	
IV	橋軸直交方向	無	—	主桁と支柱（2本）のみ
V		有	ピン結合	標準設計準拠
VI		有	剛結	

- (i) 主桁の応答加速度をほぼ一定の100ガルとした正弦波加振実験。
- (ii) エルセントロ波の継続時間を1/2に圧縮した波形（継続時間15秒）によるランダム波加振実験——振動台の最大加速度約0.1g~0.95gの範囲で平均7回。
- (iii) エルセントロ波の継続時間を1/4に圧縮した波形（継続時間7.5秒）によるランダム波加振実験——振動台の最大加速度約0.15g~1.5gの範囲で平均7回。
- (iv) 上記(i)の繰返し。
- (v) 共振振動数付近で振動台加速度を漸増させた正弦波加振実験。

(vi) 上記各段階中適宜に主桁打撃による自由振動実験。

ランダム波加振には継続時間を1/2または1/4に圧縮したエルセントロ波を用いたが、採用した相似率の関係から、模型の固有振動数は実物の $1/\sqrt{5}$ (ほぼ1/2.24) になっているので、実物に対して通常の実地震動の周波数域が有している関係が模型と加振ランダム波の間にもほぼ成立する範囲で実験したことになる。また、ランダム波の最大加速度は振動台の最大許容変位に対する保安回路の作動によって決っている。

実験結果は現在整理・解析中であるが、以下の諸点が注目される。

- (i) 階段のある模型については、台加速度1.5g程度(主桁の応答加速度3g程度)のランダム波加振では全く損傷が認められなかった。
- (ii) 階段のある模型については、振動台上で0.4g程度(主桁の応答加速度3g程度)の最大加速度により共振振動数付近で正弦波加振を続けても目に見える損傷は発生しなかった。
- (iii) 最も興味のある橋軸方向振動の固有振動数は、階段なしで7.5Hz、階段ピン結合で10.4Hz、階段剛結で12Hzであり、減衰定数は微小振幅の範囲で1~2%、大振幅で5%位と推定された。ピン結合の場合の固有振動数10.4Hzは実物にして4.5Hz程度に対応し、支間20m弱の実物歩道橋の振動数にあたっており、採用した相似率による模型作成が大体満足できるものであったことを示した。
- (iv) ランダム波加振実験による主桁上での加速度応

答倍率は前述の加振最大加速度の範囲で1.5~3.0の間にあった。

- (v) 主桁と階段をピンで結合した模型では、入力加速度が大きくなってピン部分の摩擦が切れると、階段部分の振動によって衝撃的な力が接合部に作用する可能性があることがわかった。

4. あとがき

本報告で述べた内容の一部はさらに整理・検討する必要がある、速断は避けたいが、実験経過の視察と現在までの解析から判断して、少くとも標準設計横断歩道橋本体は耐震性の高い構造物であると思われる。しかし、実際の歩道橋は地表層中に基礎を有する点が今回の模型実験の状態とは大きく異なることに注意すべきである。

実測・実験および解析にあたっては、本所第5部佐藤暢彦・伊藤邦興・増井由春、委託研究員栗山道夫、大学院学生和田林道宜・原田隆典、中央大学大学院学生佐藤正義、同土木工学科学生諏訪和弘、土屋俊宏、山崎行雄の諸氏に御協力をいただいた。特に模型実験の実施および、実験結果の整理は和田林・山崎に負うところが多く、記して謝意にかえる。

(1976年1月7日受理)

引用文献

- 1) 久保慶三郎・片山恒雄・佐藤暢彦;「歩道橋の振動性状と耐震性」,土木学会第28回年次学術講演会, 1973.
- 2) 久保慶三郎・片山恒雄・久岡勉;「単純鋼ラーメン模型の非線形動的挙動に関する実験的研究」,第13回地震工学研究発表会, 1974.