

I - 32

P C斜張形式歩道橋「清雲橋」の振動試験と固有振動解析

ドーピー建設工業(株) 正員 立神 久雄
北海道大学 正員 林川 俊郎

1. はじめに

札幌市は、昭和47年に政令指定都市となり、当時106万人の人口も平成2年には、165万人を越え年々増加の傾向にある。その南部に位置する清田地区も市街化の影響を受け、宅地化が進んでいる。

この住宅地域は清田南公園内と園内の河谷によって分断されており、周辺住民は公園を通過できる道路を切望していた。この要望に沿って計画、架設された2径間連続P C斜張橋が清雲橋である。

斜張橋は、桁・主塔・斜材から構成されており、それぞれが固有振動を有していることから、橋梁全体として複雑な振動特性を示すという一般的な特徴がある。また、歩道橋の場合には、歩行者の振動感覚すなわち振動使用性が特に要求される。そこで本橋の完成に際して、以下の項目を検討・確認するために、平成2年3月に現地にて各種の振動試験を実施した。

(1) 固有振動数・振動モード・減衰定数を実測することより、本橋の固有振動特性を確認すると共に、構造解析の妥当性を検証する。

(2) 歩行者によって生じる振動の特性と、振動感覚の確認を行う。

本文は、清雲橋の振動試験の結果について報告するものである。

2. 数 値 解 析

2-1. 解析概要

振動試験にあたり固有値解析を行った。

構造物を3次元骨組み要素にモデル化し、この系の形状・材料特性から剛性マトリックスを作成し質量マトリックスを格点の持つ自由度に集中質量として入力することにより、この系を多質点系弾性振動モデルとして計算する。以下に示す3タイプの解析モデルを設定し解析を行う。

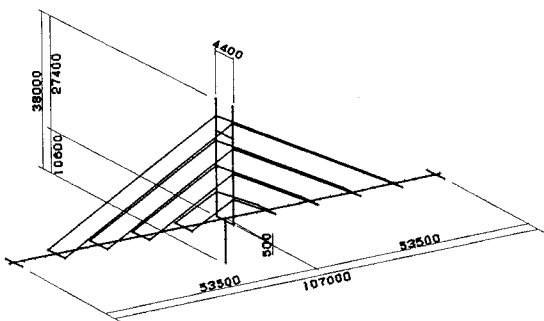


図2-1

TYPE-1	
1	主桁は、主桁のみの剛性
2	斜材は、曲げ剛性のない部材
3	斜材は、鋼棒のみの部材
4	斜材の初期張力を考慮
TYPE-2	
1	主桁は、主桁のみの剛性
2	斜材は、曲げ剛性のない部材
3	斜材は、鋼棒、グラウト、防護管の剛性を考慮
4	斜材の初期張力を考慮
TYPE-3	
1	主桁は、主桁のみの剛性
2	斜材は、曲げ剛性のない部材
3	斜材は、鋼棒、グラウト、防護管の剛性を考慮
4	斜材の初期張力を考慮
5	端支点は、ゴム沓のせん断抵抗を考慮して動的水平バネを付ける

表2-1

2-2. 斜材初期張力

斜材の初期張力を考慮することによって、より実物に近いモデルで解析を行った。尚、初期張力は静的解析に用いた値を用いた。

2-3. バネ要素

本橋は、A1・A2に可動ゴム沓を用いている。

振動試験の時の起振力は、実際の地震の振動に比べはるかに小さいエネルギーである。この起振に際しては、橋脚部の杭の影響よりA1・A2ゴム沓のせん断抵抗の方がより顕著に影響すると思われる。

よって、A1・A2支点のX方向に動的水平バネ定数をもうけることとした。

2-4. 解析結果

解析結果を表2-2と図2-2に示す。

TYPE-1					
MODE	周期 (sec)	固有振動数 (cyc/sec)	固有振動数 (rad/sec)	有効質量 (%)	Σ有効質量 (%)
1	1.20381	0.83070	5.21943	0.83	0.83
2	0.64026	1.56187	9.81352	15.29	16.12
面外1	0.60555	1.65138	10.37596	4.59	20.71
3	0.40527	2.46747	15.50355	0.53	21.24
4	0.37139	2.69257	16.91789	0.74	21.98
面外2	0.29164	3.42885	21.54413	0.04	22.02
5	0.27161	3.68170	23.13283	11.64	33.66
面外3	0.22817	4.38272	27.53746	16.63	50.29
6	0.21516	4.64775	29.20268	0.72	51.01
7	0.20973	4.76799	29.95817	2.05	53.06

TYPE-2					
MODE	周期 (sec)	固有振動数 (cyc/sec)	固有振動数 (rad/sec)	有効質量 (%)	Σ有効質量 (%)
1	1.06732	0.93692	5.88687	1.44	1.44
面外1	0.60547	1.65162	10.37744	7.23	8.67
2	0.50807	1.96822	12.36670	11.86	20.53
3	0.36777	2.71911	17.08469	10.55	31.08
4	0.29741	3.36241	21.12662	1.09	32.17
5	0.28734	3.48021	21.86682	19.94	52.11
面外2	0.27854	3.59016	22.55751	0.04	52.15
面外3	0.21779	4.59152	28.84935	17.08	69.23
6	0.18008	5.55311	34.89122	0.43	69.66
7	0.17148	5.83166	36.64137	1.19	70.85

TYPE-3					
MODE	周期 (sec)	固有振動数 (cyc/sec)	固有振動数 (rad/sec)	有効質量 (%)	Σ有効質量 (%)
1	1.04831	0.95391	5.99361	0.30	0.30
面外1	0.60546	1.65163	10.37751	7.86	8.16
2	0.50964	1.96217	12.32870	10.99	19.15
3	0.34851	2.86937	18.02879	3.03	22.18
4	0.29747	3.36163	21.12175	0.56	22.74
面外2	0.27833	3.59281	22.57426	0.04	22.78
5	0.25579	3.90951	24.56419	23.49	46.27
面外3	0.21768	4.59389	28.86427	17.09	63.36
6	0.17812	5.61415	35.27474	0.52	63.88
7	0.14707	6.85987	43.81866	1.84	65.72

表2-2

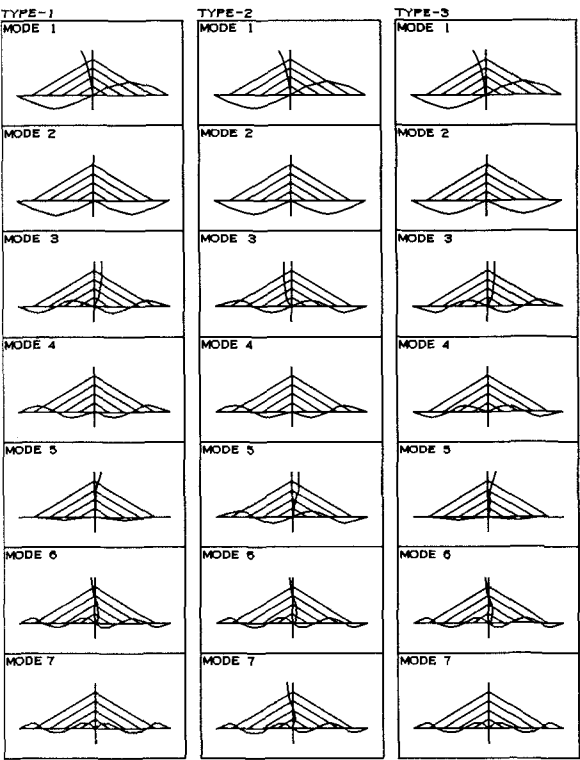


図2-2

3. 振動試験

3-1 振動試験の種類

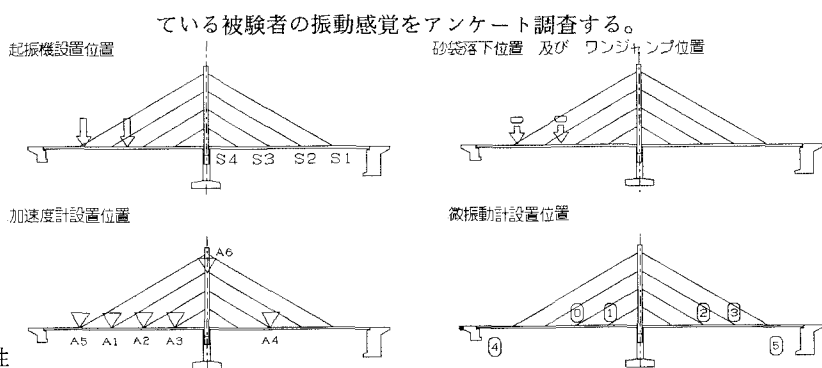
一般に橋梁の振動特性とは、固有振動数・振動モード及び構造減衰を言う。これらを測定する試験方法はいくつかの種類があるがそれぞれに長所短所があり、試験の目的および現地状況に応じて適切な方法を選択する必要がある。今回の試験では、本橋の固有振動特性を得ることと、歩道橋としての振動使用性を確認することを目的としたことから、次のような種類の振動試験を実施した。尚、本試験では橋梁の面内振動のみを対象とした。

(A) 橋梁の固有振動特性

- 1) 起振機試験.....起振機法により橋梁を正弦波加振し、応答の共振曲線より振動特性を得る。
- 2) 衝撃加振試験.....人力加振法および砂袋落下法により橋梁に衝撃力を与え応答の自由減衰振動データより振動特性を得る。
- 3) 常時微動測定.....常時微動法により橋梁の常時微動を測定し、その振動データより振動特性を得る。
- 4) 歩行振動試験.....人力加振法（歩行・走行）により橋梁を加振し、その振動データより振動特性を得る。
- 5) 斜材の振動試験.....橋梁全体の振動特性と斜材自身の振動特性を判別するために行う。

(B) 振動使用性

- 1) 歩行者振動試験.....各種パターンで歩行者が橋梁上を歩行あるいは走行する。
- 2) 振動感覚アンケート調査.....歩行者の歩行あるいは走行時に、橋梁上の歩行者および各位置に立っ



3-2 固有振動特性

本橋の固有振動特性を求めるために、起振機試験・衝撃加振試験・常時微動試験・歩行者による振動試験及び斜材の振動試験を実施した。その結果、1次～6次までの固有振動が得られた。各振動試験により得られた橋梁の固有振動特性をまとめて表3-1に示す。

また、各振動モード図を図3-1に示す。起振機試験及び衝撃加振試験より得られたモード形状は、2つの試験結果の測定点A4の振幅を一致させて相対振幅として比較すると非常によく一致しているので、この図では相対振幅の実測値を黒丸で示し、推定される全体のモード形状の概略を破線で示してある。尚、2次モードの測定点A1でのみ2つの試験結果の振幅に大きな差があるので、2つの黒丸で表示した。起振機試験ではこの測定点（A1）の近くに起振機を設置して加振したことから、振幅が大きくなったものと考えられる。

表3-1及び図3-1より、次のことが言える。

- 1) 1次・2次・4次～6次については、固有振動数・減衰定数とも4種類の試験結果がよく一致している。
- 2) 3次固有振動数については、起振機試験で2つの卓越振動数がみられ、他の振動試験ではこのうちどちらかの振動数と一致した値が得られた。起振機試験の共振曲線及び斜材の振動試験結果から判断すると、起振機試験の（ ）内の値 及び常時微動試験さらに歩行者による振動試験の値は、斜材の固有振動に伴うもので、橋梁全体としての固有振動数は衝撃加振試験で得られた2.76Hzと考えられる。
- 3) 1次～6次の固有振動数・減衰定数・振動モードとも、特に起振機試験と衝撃加振試験の結果は良く一致しており、共振振幅及びフーリエ振幅から判断すると、振動振幅としては本橋は1次と2次の固有振動が卓越していると考えられる。

- 4) 各次数の減衰定数の値は、0.005～0.012程度であり、比較的小振幅での振動試験結果であることを考えると、ほぼ妥当な値であると考えられる。ただし、3次固有振動の減衰定数は、斜材の固有振動に伴う振動とが接近して得られたため、比較的大きな値となったものと考えられる。
- 5) 斜材自身の固有振動数は、表3-2に示したようにS1～S4斜材について、1次から2次ないし6次までの値が得られた。

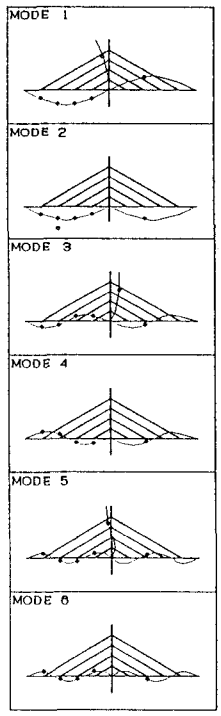
MODE	加振方法	固有振動数 (Hz)	減衰定数	MODE	加振方法	固有振動数 (Hz)	減衰定数
1	起振機	1.022	0.012	4	起振機	3.808	0.007
	衝撃	1.02	0.011		衝撃	3.84	0.005
	常時	1.03	0.007		常時	3.73	0.009
	歩行者	1.02	0.012		歩行者	3.84	0.008
2	起振機	2.382	0.006	5	起振機	-	-
	自由減衰	-	0.006		衝撃	6.06	0.007
	衝撃	2.39	-		常時	5.93	0.003
	歩行者	2.4	0.004		歩行者	6.06	0.007
3	起振機	2.756 (2.839)	0.018 (0.007)	6	起振機	-	-
	衝撃	2.76	0.015		衝撃	6.28	0.010
	常時	2.84	0.005		常時	6.25	0.005
	歩行者	2.83	0.014		歩行者	6.25	0.005

表3-1

MODE	固有振動数 (Hz)			
	S1斜材	S2斜材	S3斜材	S4斜材
1	1.34	1.82	2.82	7.01
2	2.61	3.65	5.86	16.06
3	4.00	5.67	9.41	-
4	5.46	7.87	-	-
5	7.04	-	-	-
6	8.74	-	-	-

表3-2

図3-1



3-3 振動使用性

本橋の振動使用性を確認するために、各種のパターンで歩行者が橋梁上を歩行あるいは走行する歩行者による振動試験を実施し、同時に歩行者および橋梁上に立っている人（静止被験者）に対して振動感覚のアンケート調査を行った。その結果は表3-3に示す。この結果に基づき振動使用性を検討した。

表3-4に示した各測定ケースにおける5ヶ所の測定点（A1～A5）での試験中の振動速度の最大実効値を図3-2に示す。この図には過去の研究において振動じょう限の基準値として提案されている「歩行中に明らかに振動を感じる50%値」（0.85 cm/s）及び「少し歩きにくい50%値」（1.70 cm/s）を同時に示してある。ちなみに「大いに歩きにくい50%値」は2.70 cm/sである。この図と表3-3から、次のことが読み取れる。

- 1) 歩行者がランダムに歩く場合には、10人が歩いてもたかだか0.5 cm/sであり、歩行中に明らかに振動を感じる50%値」大きく下回っている。
- 2) 歩行者が2 Hzで歩調を合わせて歩く場合でも、10人が歩いてもたかだか「歩行中に明らかに振動を感じる50%値」の0.85 cm/s程度である。
- 3) 歩行者がランダムに歩いたり、2 Hzで歩調を合わせて歩く場合には、10人が2 Hzで歩調を合わせて歩く場合を除いて、アンケートでは歩行者も立っている者も振動を感じないという結果となっている。これは、振動速度の実効値が0.5 cm/s以下であることから、妥当な評価であることがわかる。
- 4) 10人が2 Hzで歩調を合わせて歩く場合には、振動速度の実効値が0.4～0.8 cm/s程度であ

り、アンケートで歩行者は振動を感じず、立っている人が少し感じると答えていることも、妥当な評価である。

5) 5人が全力で走る測定ケースは非常に特殊なケースである。この場合でも振動速度の実効値は0.7～1.8 cm/s程度で、1つの測定点で「少し歩みにくい50%値」をわずかに越えただけである。この時のアンケートで、走っている者には振動はわからず、立っている人の大部分がはっきり振動を感じている。これも振動振幅から考えればば妥当な評価であろう。

6) 10人がランダムに走る場合には、振動速度の実効値は0.8～1.4 cm/s程度で5人が全力で走った場合よりも小さく、「少し歩みにくい50%値」を下回っているこの時のアンケートで、走っている者には振動はわからず、立っている人の半数程度がはっきり振動を感じている。これも振動振幅から考えればば妥当な評価であろう。但し、この場合の不快を感じる程度の結果は振動を感じる程度の結果と少し矛盾している。

以上のことから、本橋を歩行者が通常の歩行をした場合には、ほとんど振動を感じることもなく、5人が全力で走るという非常に特殊な場合でも、歩行している人はたかだか「少し歩みにくい」と感じる程度である。したがって、前述した本橋の固有振動数には「立体横断施設技術基準」で問題としている固有振動数の範囲(1.5～2.3 Hz)にはいるものもなく、また、振動振幅については「少し歩みにくい50%値」(振動速度の実効値で1.70 cm/s)が一応の目安と言われていることから、本橋は振動使用性の面で問題は無いと判断できる。このことは、振動試験時にも感じられたことであるが、測定によって振動速度の実効値で数値的にも証明されたと言えるよう。

CASE	振動を感じる程度				不快を感じる程度			
	歩行者被験者		歩行者被験者		歩行者被験者		歩行者被験者	
5人 ランダム 歩行	感じない	1	10	不快でない	1	11		
	少し感じる	0	1	少し不快である	0	0		
	はっきり感じる	0	0	大変不快である	0	0		
	強く感じる	0	0					
	合計	1	11	合計	1	11		
10人 ランダム 歩行	感じない	8	6	不快でない	8	6		
	少し感じる	0	0	少し不快である	0	0		
	はっきり感じる	0	0	大変不快である	0	0		
	強く感じる	0	0					
	合計	8	6	合計	8	6		
1人 2Hz 歩行	感じない	1	10	不快でない	1	8		
	少し感じる	0	0	少し不快である	0	0		
	はっきり感じる	0	0	大変不快である	0	0		
	強く感じる	0	0					
	合計	1	10	合計	1	8		
2人 2Hz 歩行	感じない	1	8	不快でない	1	8		
	少し感じる	0	0	少し不快である	0	0		
	はっきり感じる	0	0	大変不快である	0	0		
	強く感じる	0	0					
	合計	1	8	合計	1	8		
5人 2Hz 歩行	感じない	5	9	不快でない	5	9		
	少し感じる	0	0	少し不快である	0	0		
	はっきり感じる	0	0	大変不快である	0	0		
	強く感じる	0	0					
	合計	5	9	合計	5	9		
10人 2Hz 歩行	感じない	10	0	不快でない	10	4		
	少し感じる	0	4	少し不快である	0	0		
	はっきり感じる	0	0	大変不快である	0	0		
	強く感じる	0	0					
	合計	10	4	合計	10	4		
5人 全力走行	感じない	10	0	不快でない	10	11		
	少し感じる	0	3	少し不快である	0	6		
	はっきり感じる	0	13	大変不快である	0	1		
	強く感じる	0	2					
	合計	10	18	合計	10	18		
10人 ランダム 走行	感じない	10	0	不快でない	10	1		
	少し感じる	0	2	少し不快である	0	4		
	はっきり感じる	0	2	大変不快である	0	0		
	強く感じる	0	1					
	合計	10	5	合計	10	5		

表3-3

CASE	測定点	速度 実効値 (cm/s)	CASE	測定点	速度 実効値 (cm/s)
5人 ランダム 歩行	A1	0.32	5人 2Hz 歩行	A1	0.31
	A2	0.25		A2	0.27
	A3	0.15		A3	0.11
	A4	0.16		A4	0.28
	A5	0.31		A5	0.22
10人 ランダム 歩行	A1	0.51	10人 2Hz 歩行	A1	0.83
	A2	0.29		A2	0.67
	A3	0.19		A3	0.41
	A4	0.34		A4	0.76
	A5	0.39		A5	0.75
1人 2Hz 歩行	A1	0.18	5人 全力走行	A1	0.66
	A2	0.12		A2	1.80
	A3	0.06		A3	1.21
	A4	0.12		A4	1.31
	A5	0.14		A5	1.33
2人 2Hz 歩行	A1	0.19	10人 ランダム 走行	A1	1.38
	A2	0.18		A2	1.03
	A3	0.10		A3	0.83
	A4	0.19		A4	1.02
	A5	0.16		A5	0.91

表3-4

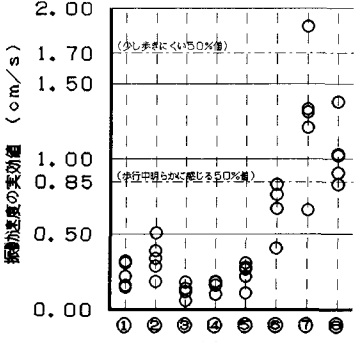


図3-2

4. ま と め

振動試験の固有振動特性については、面内振動の1次～6次の固有振動数・振動モード・減衰定数が得られた。そして、このうち1次と2次の固有振動が特に卓越していることも明らかとなった。各振動試験でこれらの固有振動についてよく一致した結果が得られたが、起振機試験結果と衝撃加振試験結果が橋梁全体としての固有振動特性を最もよく示していると考えられる。また、斜材自身の固有振動数も多く得られたが、この斜材の固有振動に伴って桁も振動することも測定された。

ただし、本振動試験での振動測定点がそれほど多くなく、また限られた時間内で試験を実施したため、ここで得られた1次～6次の固有振動の間に、それほど卓越しない固有振動が存在する可能性は残っている。

振動使用性については、各種の歩行パターンについて振動測定とアンケート調査によって検討を行い、本橋の振動振幅は十分小さく、その振動使用性には問題が無いことが確認された。

また、本橋の規模程度の橋梁において、この振動試験のように各種の振動試験を実施した例は少ない。また、この各振動試験はいずれにおいても良好な結果が得られた。

数値解析で求めた固有振動数と振動試験で実測した固有振動数（起振機試験によるものと衝撃加振試験によるもの）を比較したものを以下に示す。

TYPE-1 (Hz)				TYPE-2 (Hz)			
MODE	数値解析(A)	実測値(B)	A/B	MODE	数値解析(A)	実測値(B)	A/B
1	0.8307	1.022	0.813	1	0.93692	1.022	0.917
2	1.56187	2.382	0.656	2	1.96822	2.382	0.826
3	2.46747	2.756	0.895	3	2.71911	2.756	0.987
4	2.69257	2.803	0.961	4	3.36241	3.803	0.884
5	4.64775	6.06	0.767	5	5.55311	6.06	0.916
6	4.76799	6.28	0.759	6	5.83166	6.28	0.929

TYPE-3 (Hz)			
MODE	数値解析(A)	実測値(B)	A/B
1	0.95391	1.022	0.933
2	1.96217	2.382	0.824
3	2.86937	2.756	1.041
4	3.36163	3.803	0.884
5	5.61415	6.06	0.926
6	5.85987	6.28	0.933

表4-1

数値解析値と実測値を表4-1に示すように比較した結果、TYPE-2とTYPE-3は実測値に近い値を示した。これは、主桁の地覆と舗装・斜材のグラウトと防護管の影響が大きくでていると思われる。また、端支点におけるゴム沓のせん断抵抗を考慮した動的水平バネの影響は、あまり出ていないようである。

振動試験では、振動振幅から見ると振動試験モードの1次と2次が卓越したモードであった。また、振動試験の現場で見ているかぎりでは、特に2次モードの揺れが、顕著であった。

本橋では各種の試験を行ってきたわけだが、今回の起振は全て鉛直方向のみの振動であった。しかし、ねじりの起振・面外方向の起振も行えば、もっとよいデータも得られ、今後の設計・施工に役にたったであろう。

最後に、試験及びデータ解析にご助力、ご助言をいただいた名古屋大学の加藤雅史先生に深く謝意の意を表す次第である。