

(11) 十勝大橋施工時の動的特性と強震観測について

北海道開発局 開発土木研究所	佐藤昌志
北海道開発局 帯広道路事務所	神山 繁
鹿島建設(株) 技術研究所	正会員 ○竹田哲夫
鹿島・日本高圧・ドーピーJV	正会員 山村正人

1. はじめに

我国のように地震の多い地域では、土木構造物の建設に際して耐震設計すなわち耐震安全性を確保することが重要な位置を占める。特に、長大プレストレストコンクリート斜張橋（以下、長大PC斜張橋）は、重量が大きいため地震時荷重が大きく、かつ自由度の多い柔構造物であるため、その地震時挙動は極めて複雑なものとなる。完成系の長大PC斜張橋では、耐震設計の段階においていくつかの入力波形を仮定して時刻歴応答解析を行うことが一般的である。しかし、強震観測などによって、耐震設計と実際の地震時挙動の整合性が確認された例はほとんどなく、青森ベイブリッジ¹⁾等わずかである。一方、施工時における長大PC斜張橋については、施工期間が短いことから、詳細な耐震設計が行われることはほとんどなく、また地震観測が実施された例はない。張出し施工中のPC斜張橋は、片持ち梁に近い状態となり、完成系とはかなり異なった振動特性を持つ。特に地震の多い地域では、たとえ施工期間が短いとはいえ、施工期間中に比較的大きな地震を経験する可能性もあることから、長大PC斜張橋の施工時における地震時挙動を把握することは、耐震設計の合理化を図る上で十分に意義のあることである。

そこで、本研究では現在張出し施工中の十勝大橋の動的特性について、完成系と比較しながら検討を行ったので報告する。また、実橋において、張出し施工時の強震観測を実施しており、その観測システムならびに観測されたデータについても紹介をする。なお、今回は橋軸方向の応答にのみ着目する。

2. 十勝大橋の概要

十勝大橋は、地震の多発地帯である北海道に建設される中央径間251mのPC斜張橋である。十勝大橋の一般図を図-1に示す。構造形式の選定については、強震地域ながらも、経済性および積雪寒冷地における冬季間の車道への落雪の問題を考慮して、斜材形式として一面吊りを採用し、主塔形状は独立一本柱とした。また、長大斜張橋の耐震安全性を議論する上では、斜材形状と主桁の支持形式が重要であるが、斜材形状については動的解析から耐震性に優れたセミハープ形式とし、主桁の橋軸方向の支持形

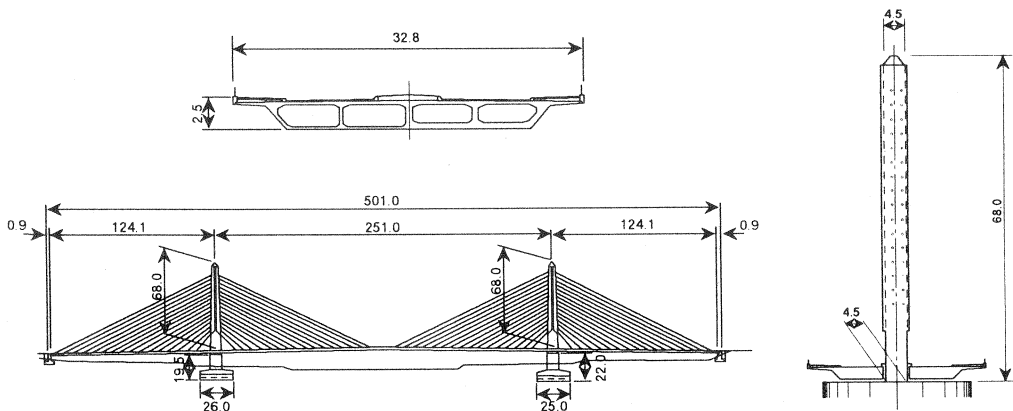


図-1 十勝大橋の一般図

式はすべて可動としている²⁾。ただし、主桁張出し施工時においては、施工性の点から主桁は柱頭部において仮固定ブロックによって橋脚上に固定されている。仮固定ブロックは、主桁と橋脚の間に仮沓コンクリートを置き、PC鋼棒で締めることによって固定している。仮固定ブロックの状況を図-2に示す。

十勝大橋建設地点の地盤は道路橋示方書のⅡ種地盤に相当する。橋梁基礎はニューマチックケーソン工法による直接基礎であり、完成系の耐震設計においては、道路橋示方書に従い、地盤反力係数を算出して、せん断ならびに回転ばねとして地盤の影響を評価している。橋軸方向の地盤のばね定数を表-1に示す。

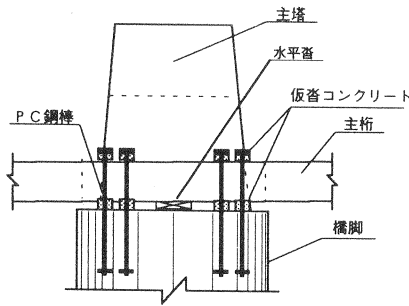


図-2 仮固定ブロック概略図

表-1 完成系の耐震設計に用いた橋軸方向の地盤のばね定数

せん断ばね定数	734,000 tf/m
回転ばね定数	124,000,000 tf m

3. 完成系および施工系のPC斜張橋の動的特性

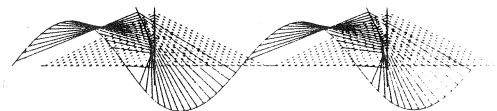
3-1 完成系の固有振動特性

十勝大橋の完成系の橋軸方向の振動モードの固有周期、刺激係数、有効質量比を表-2に、また、1次と3次の振動モード形状を図-3に示す。完成系の橋軸方向の振動モードでは、刺激係数からわかるように1次モードと3次モードの寄与が大きい。主桁が橋軸方向には可動となっていることから、1次モードは主桁が橋軸方向にいわゆる遊動円木的な振動をするモードであり、3次モードは逆対称1次モードである。橋軸方向の水平地震動の入力によって、主桁の応答に対しては1次モードが、また主塔・橋脚の応答に対しては3次モードの寄与が大きく、これら2つのモードを考慮すれば地震時の応答はある程度把握することが可能である。

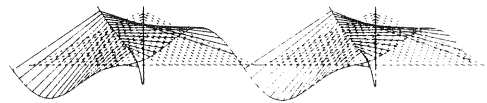
斜張橋は主塔と主桁がケーブルを介して連結されているため、主桁の橋軸方向の振動は大きな鉛直振動を伴うことになるが、鉛直地震動の入力によって1次モードや3次モードが励起されることはなく、完成系の耐震設計に際して鉛直入力は考慮されていない。

表-2 完成系の振動モード諸元

モード	固有周期 (sec)	振動数 (Hz)	橋軸方向		鉛直方向	
			刺激係数	有効質量比(%)	刺激係数	有効質量比(%)
1	3.67	0.273	0.817	24.7	0.005	0.0
2	2.90	0.345	0.008	0.0	0.499	6.2
3	1.68	0.595	1.185	30.4	-0.043	0.1
4	1.44	0.694	0.068	0.0	1.191	42.8
5	1.21	0.829	0.015	0.0	0.001	0.0



1次モード (T=3.67秒)



3次モード (T=1.68秒)

図-3 完成系の振動モード

表-3 施工系の振動モード諸元

モード	固有周期 (sec)	振動数 (Hz)	橋軸方向		鉛直方向	
			刺激係数	有効質量比(%)	刺激係数	有効質量比(%)
1	3.31	0.302	0.282	0.7	-0.021	0.0
2	1.77	0.565	0.006	0.0	1.537	16.7
3	0.92	1.09	-0.82	6.8	0.034	0.0
4	0.79	1.27	0.044	0.0	0.897	11.1
5	0.64	1.57	-1.44	79.8	0.004	0.0

3-2 施工系の固有振動特性

施工系の橋軸方向の振動モードの固有周期, 刺激係数, 有効質量比を表-3に, 各振動モード形状を図-4に示す. 張出し長は106mで, 斜材は全16段中13段を施工した状態であり, ワーゲンの重量 ($W=265\text{tf}$) も考慮している. この施工状態は, 1994年7月1日における状態を表したものである. 橋軸方向の振動モードで代表的なものは, 1次, 3次, 5次モードである. 1次モードは主桁の変形は小さく全体がヤジロベエのような振動をするモードであり, 3次モードは逆対称1次モード, 5次モードは基礎の並進を含むモードである. 鉛直方向の振動モードで代表的なものは2次モードと4次モードであり, それぞれ対称1次モードと対称2次モードである. 刺激係数から, 1次モードの応答は小さく, 2次以上のモードが卓越することがわかる.

3-3 完成系と施工系の地震時断面力の比較

完成系と施工系の地震時の断面力の比較を応答スペクトル法を用いて行った. 施工時の耐震性の評価に際しては, 入力地震動を低減するという方法を用いることがあるが, ここでは完成系, 施工系とも道路橋示方書のⅡ種地盤の標準加速度応答スペクトルを橋軸方向に入力した. 応答スペクトル法で求めた断面力(曲げモーメント)を表-4に示す. いずれも, 施工系の方が完成系よりも断面力が小さくなっている. これは, 張出し長が106mと最大張出し長よりも短いこと, 施工系は主桁が柱頭部で仮固定されているために, 主桁の橋軸方向の変位が小さく, したがって主塔の変形も小さくなること等によるものと思われる. 橋脚基部の曲げモーメントは, 主桁が仮固定されると, 主桁の地震時の慣性力が柱頭部に作用するため, 完成系よりも断面力が大きくなることが考えられる. しかし, 十勝大橋では橋脚高さが低いために, 橋脚頂部に主桁の慣性力が作用しても結果的に施工系における橋脚基部の曲げモーメントが大きくならなかったものと思われる.

4. 強震観測システムの概要

現在十勝大橋で行われている張出し施工時の強震観測について述べる. 本橋における強震観測システムは北海道開発局開発土木研究所の強震記録自動計測システム仕様に従ったものを基本としている. 強震観測はP1主塔側で実施されており, 強震計は全部で20成分(地中6成分, 橋脚9成分, 主桁内部4成分, 主塔1成分)設置されている. 強震計の設置位置を図-5に示す. なお, 基本的には強震観測であるが, PC斜張橋の張出し施工時の応答をみるために, トリガーの設定値を低くし, 地震観測として行っている.

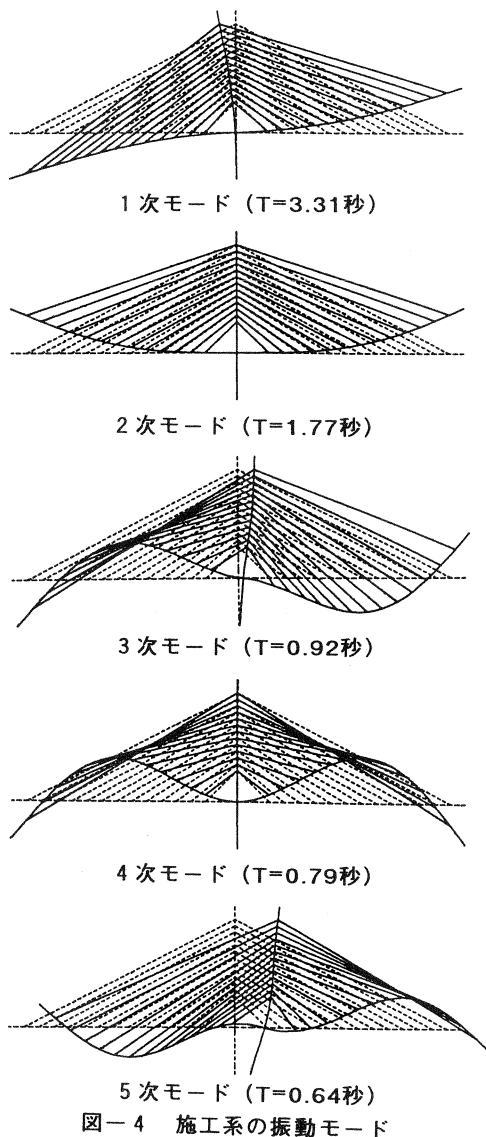


図-4 施工系の振動モード

表-4 応答スペクトル法により求めた完成系/施工系の地震時の断面力

	完成系	施工系	施工系/完成系
主桁の最大	12767 tfm	7583 tfm	0.59
主塔基部	71690 tfm	18945 tfm	0.26
橋脚壁下端	107596 tfm	50300 tfm	0.47

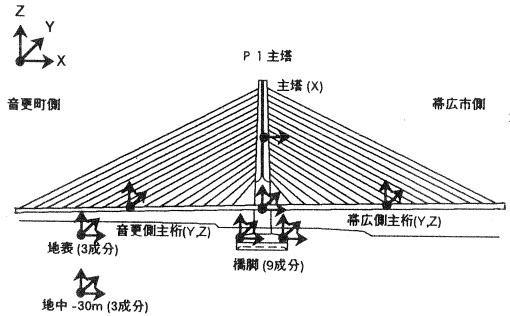


図-5 地震計設置位置

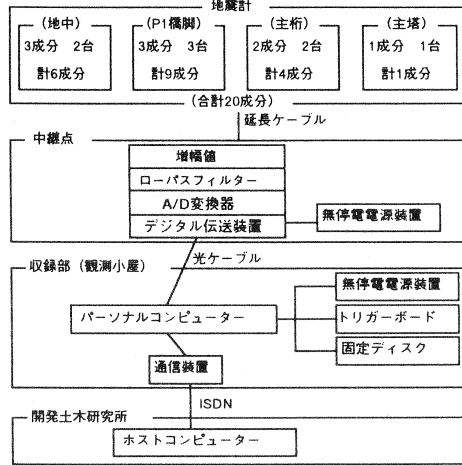


図-6 地震観測システム

本観測システムは、P1橋脚近くの主桁内部の中継点、観測小屋内の収録部、および開発土木研究所内のホストコンピュータからなる。観測データの回収には、デジタル電話回線 (NTT-ISDN) を用いている。本システムの構成を図-6に示す。

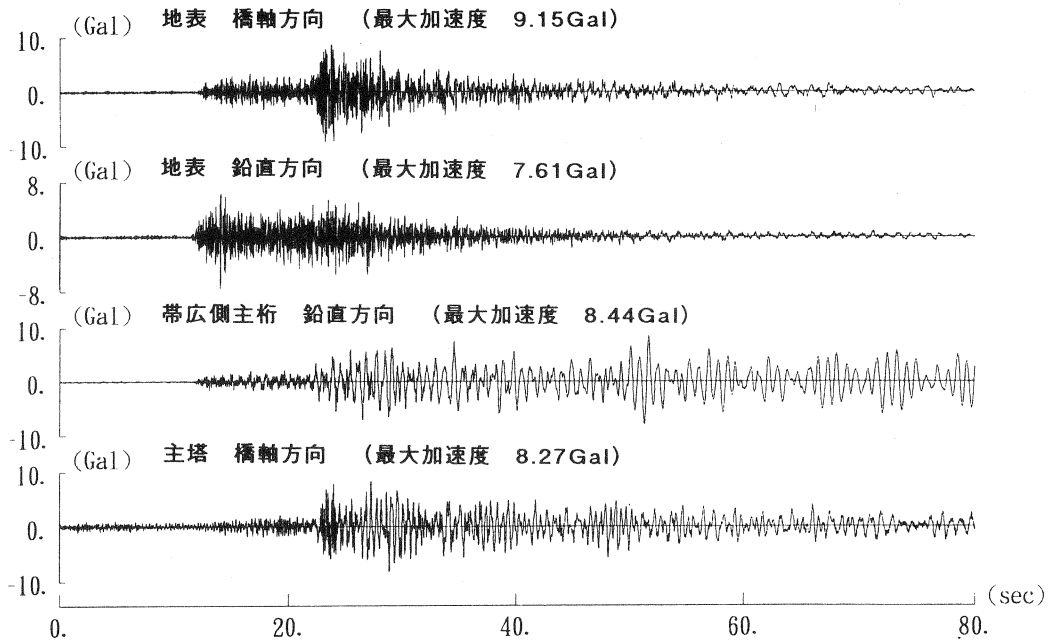
5. 施工時の強震観測データ (1994年7月1日の地震について)

音更町側の側径間中央の計測点に強震計が設置可能となった段階から、P1側において施工時の地震観測を開始した。7月15日現在、11個の地震が観測されている。観測された地震の概要を表-5に示す。11個の観測データのうち、比較的規模の大きい1994年7月1日の地震について、観測データの紹介を行う。

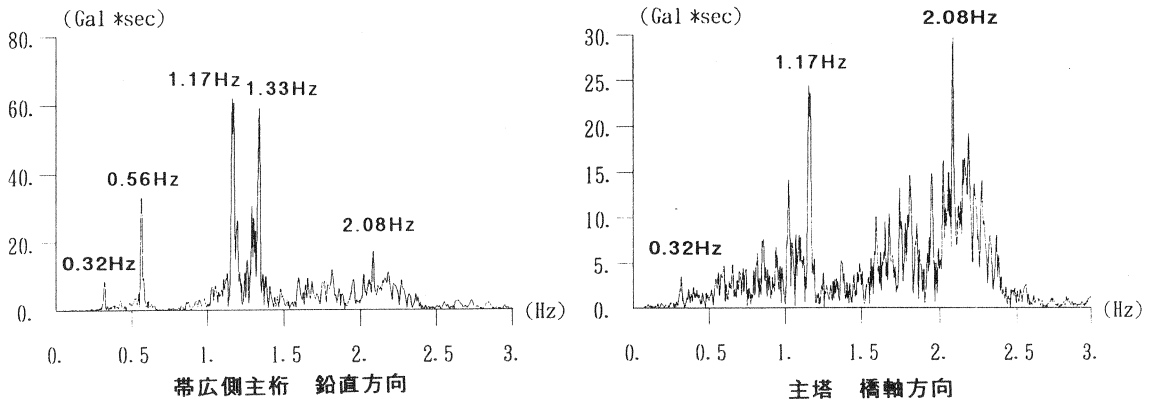
7月1日の施工状況は、先にも述べたように張出し長106m、斜材13段を施工した状態である。地表の橋軸方向と鉛直方向の地盤加速度波形と、帯広側主桁の鉛直方向ならびに主塔の橋軸方向の応答加速度波形を図-7に示す。主桁と主塔の地震計設置位置での応答加速度の最大値は8Gal程度であった。加速度波形から、地震の主要動がおさまった後にも、主桁や主塔ではかなり長時間にわたって振動が継続しており、張出し施工時のPC斜張橋の持つ減衰が小さいことが予想される。

表-5 観測された地震の概要 (1994年7月15日現在)

	発生日時	震央 (N, E)	深さ(km)	規模(M)	震度
1	3月18日 7時10分	41° 50' 142° 40'	70	4.8	Ⅲ: 浦河, Ⅰ: 帯広
2	3月18日 14時56分	42° 40' 143° 26'	96	4.3	Ⅱ: 帯広, Ⅰ: 広尾
3	4月 1日 19時39分	42° 39' 143° 38'	72	-	Ⅱ: 広尾
4	4月 8日 10時10分	40° 32' 143° 58'	9	6.6	Ⅱ: 浦河, Ⅰ: 帯広
5	4月 29日 22時38分	42° 59' 142° 52'	128	5	Ⅱ: 釧路, Ⅰ: 帯広
6	5月 5日 20時30分	42° 45' 143° 26'	98	3.9	Ⅰ: 帯広
7	5月 28日 10時21分	42° 03' 142° 35'	63	4.8	Ⅰ: 帯広
8	6月 3日 0時29分	42° 20' 142° 46'	59	4.4	Ⅰ: 帯広
9	7月 1日 14時14分	42° 15' 143° 05'	67	5.3	Ⅱ: 帯広
10	7月 2日 7時43分	42° 08' 142° 58'	64	4.9	Ⅱ: 帯広
11	7月 6日 1時27分	42° 45' 143° 58'	107	4.8	Ⅱ: 帯広



図一七 地盤の振動波形と上部工の応答波形



図一八 上部工の応答波形の加速度フーリエスペクトル

主桁の鉛直方向ならびに主塔の橋軸方向の応答波形の加速度フーリエスペクトルを図一八に示す。主桁の鉛直方向の応答波形のフーリエスペクトルについては、0.32Hz, 0.59Hz, 1.16Hz, 1.34Hz, 2.09Hz付近にピークがあり、主塔の橋軸方向の応答波形のフーリエスペクトルについては、1.16Hz, 2.09Hz付近にピークがあることがわかる。主桁のフーリエスペクトルは、3次モード (1.16Hz) と4次モード (1.34Hz) のピークが高い。これは、これらのモードでは、主桁の地震計の設置位置付近がちょうどモードの腹になることの影響を受けているものと考えられる。

6. 観測された応答と解析値の比較

観測から得られた張出し施工時の振動特性を検証するために、固有値解析から求めた振動特性との比

較を行う。1994年7月1日の時点における固有振動モードは図-5に示したものである。

解析の1次モード(0.30Hz)は実測値の0.32Hzに、解析の2次モード(0.57Hz)は実測値の0.56Hzに、解析の3次モード(1.09Hz)は実測値の1.16Hzに、解析の4次モード(1.27Hz)は実測値の1.34Hzにそれぞれ対応しており、解析値と観測値が比較的良好に合っている。2次モードと4次モードは、鉛直入力によって励起されるモードであることから、張り出し施工時のPC斜張橋は、鉛直入力の影響を無視できない可能性がある。

張り出し施工時の固有振動数は、その張り出し長に応じて変化する。図-9に張り出し長と解析により求めた固有振動数との関係を示す。また、図中には強震観測から求めたフーリエスペクトルのピークの振動数もあわせて示す。張り出し長が長くなれば、固有周期が長くなることから、観測データからも確かめられる。1次から4次モードについては、解析値と観測値がよく一致している。

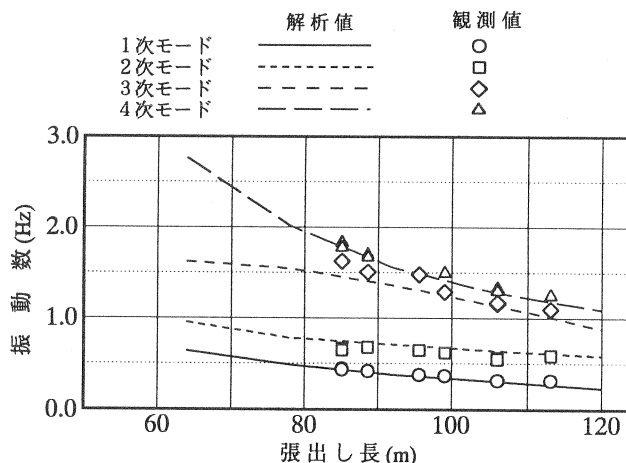


図-9 張り出し長による各振動モードの振動数の変化

7. まとめ

張り出し施工中のPC斜張橋の動的特性を把握するため、現在施工中の十勝大橋について、その振動特性について解析と、実橋での地震観測を行い、以下のような結論を得た。

- ①張り出し施工時の固有振動特性は、完成系のものとはかなり異なる。今回の場合、同じ地震入力に対して応答スペクトル法から求めた施工系の地震時の断面力は、完成系のものよりも小さくなったが、橋脚高さによっては逆に大きくなる可能性もあり、張り出し施工時の耐震性の検討は重要である。
- ②地震時の主桁の応答には、鉛直方向の振動モードの影響が大きい。鉛直入力には、完成系の耐震設計では考慮されないことが多いが、施工系の主桁の応答に対しては、考慮すべきものである。
- ③解析と観測データから、下部・上部工のモデル化は精度良くできていると思われる。

今回は、張り出し施工中の地震観測の結果を中心に報告したが、完成後もさらに強震計を増設して強震観測を継続する予定である。完成後の観測結果と合わせて、長大PC斜張橋の合理的な耐震設計法の検討を進めたいと考えている。

参考文献

- 1) 稲富隆昌, 竹田哲夫, 大保直人, 山野辺慎一; 地震観測に基づくPC斜張橋「青森ベイブリッジ」の地震応答特性について, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.967~978, 1994年3月。
- 2) 佐藤昌志, 葛西泰弘, 花田真吉, 井上雅弘; 十勝大橋, コンクリート工学, Vol.31, No.11, pp.28~32, 1993年11月。