振動計測から推定される斜張橋ケーブルの振動特性

中央大学　○学生員　矢口　繁　　中央大学　正会員　佐藤　尚次
中央大学　正会員　平野　廣和

１．はじめに

斜張橋のケーブルは，その構造減衰が小さいことからわずかな風速で渦励振，レインバイブレーション，ウェイクギャロッピング等の空力振動現象が発現し，条件次第ではかなりの大きさの振動に発展することが知られている．斜張橋のケーブルは，構造系を成立させるための主要な構造要素であり，ケーブルに生じる振動は利用者に対して不安を与える問題も含め，橋としての使用性の低下や，構造の安全性に関わる本質的な問題をも生じさせる可能性が指摘されている[1)]．そこで本研究では多摩市役所の協力の元に多摩市永山3丁目にある斜張橋(さんかく橋)においてケーブルの振動を測定し，減衰率を把握することで風によるケーブルに生ずる諸振動の可能性を検討するものである．

２．さんかく橋概要

写真-1 に示すさんかく橋は，昭和52年10月に竣工された，PC2 径間連続斜張橋の人道橋である．橋長：72.0m，幅員：6.0m，面積：495.0m^2 であり，旧住宅整備公団の標準的な PC 斜張橋である．本橋は，多摩ニュータウン内において最も主要な道路である鎌倉街道にかかる橋であり，常に多くの人の目に触れる．そのため視覚的に好ましいようなモニュメンタルなデザインの歩専橋である．**図-1** に一般図を示す．

本橋は，現在の管理者である多摩市により5年毎点検・補修が行われ，平成22年度に点検が行われる予定である．なお，平成10年度には落橋防止装置などの追加が行われている．

３．計測の概要

片側5本ずつ，全10本のケーブルを対象として，このケーブルに3軸加速度計を設置して人力によって加振して振動を計測し，固有振動数と減衰率を把握する．**図-1** に示すようにケーブルに番号を付ける．計測機器は**写真-2** に示す様に3軸加速度計と記録部分が一体化されたもの（KRA-20C)を用いる．設置方法は，加速度計を木の板に固定し，それをアルミ管の上に**写真-3** に示す様にラチェット式バンドによって固定する．設置する場所は，ケーブル定着部から3.8mの位置とする．

４．計測結果

表-1 に得られた加速度データより求めたそれぞれのケーブルの固有振動数を示す．固有振動数に関しては主塔に近づくにつれて振動数が高くなっていることがわかる．また，主塔を軸にて対照的な値となっていることがわかる．ただし⑤，⑥のケーブルにおいてはケーブル長が短く，また人力により振動させたということもあり１次モードの固有振動数のみが観測された．その他のケーブルに関しては，複数の振動モードで振

写真-1　さんかく橋全体図

写真-2　3軸加速度計

写真-3　加速度計設置状況

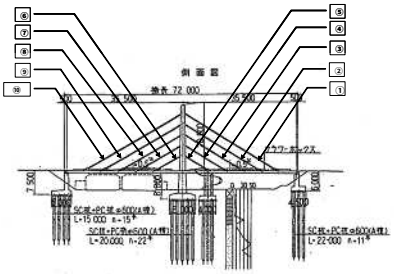

図-1　さんかく橋一般図及びケーブル番号

表-1　各ケーブルの固有振動数

ケーブル番号	計測回数	固有振動数(Hz) 1次モード	2次モード	3次モード	4次モード
①	1回目	2.06	4.20	6.57	9.25
	2回目	2.05	4.19	6.56	9.25
	3回目	2.05	4.19	6.54	9.22
②	1回目	2.45	5.09	8.18	
	2回目	2.45	5.09	8.18	
③	1回目	3.36	7.24		
④	1回目	5.46	12.68		
⑤	1回目	15.72			
⑥	1回目	15.44			
⑦	1回目	5.33	12.08		
⑧	1回目	3.37	7.31	12.33	
⑨	1回目	2.44	5.12	8.26	
	2回目	2.44	5.12	8.26	12.08
⑩	1回目	2.01	4.11	6.53	9.27
	2回目	2.01	4.13	6.53	9.27
	3回目	2.01	4.11	6.51	9.27

表-2　各ケーブルの対数減衰率

ケーブル番号	計測回数	対数減衰率 1次モード	2次モード	3次モード	4次モード
①	1回目		0.0054	0.0054	0.0066
	2回目		0.0049	0.0066	0.0076
	3回目	0.0044	0.0102	0.0096	0.0076
②	1回目	0.0067	0.0085	0.0122	
	2回目	0.0061	0.0075	0.0099	
③	1回目	0.0071	0.0094		
④	1回目	0.0137	0.0159		
⑤	1回目	0.0162			
⑥	1回目	0.0163			
⑦	1回目	0.0135	0.0159		
⑧	1回目	0.0080	0.0088	0.0112	
⑨	1回目	0.0058	0.0080	0.0094	
	2回目	0.0046	0.0076	0.0102	0.0130
⑩	1回目		0.0067	0.0062	0.0079
	2回目	0.0040	0.0062	0.0068	0.0082
	3回目		0.0050	0.0066	0.0077

・薄い網掛け：渦励振，レインバイブレーションの両方
・濃い網掛け：渦励振のみ

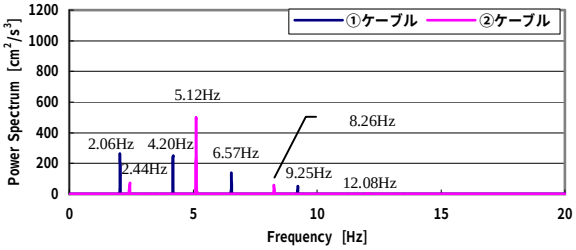

図-2　FFT 解析結果の比較

キーワード　：振動，斜張橋ケーブル，渦励振，耐風
連絡先　：　〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27　TEL 03-3817-1816

動していることがわかり，これは実際に計測を行っている時にも確認できた．**図-2** に①ケーブルと⑨ケーブルの FFT 解析結果を示す．これより，複数のモードで振動していることが分かる．また①ケーブルでは 1 次モードの時が卓越振動数であるのに対し，⑨ケーブルでは 2 次モードの時が卓越振動数となっている．これは，人力による加振を行ったため加振力が一定ではなかったことと，加速度計の設置位置がケーブル定着部から 3.8m の所としたことが原因と思われる．

表-2 に得られた加速度データより求めたそれぞれのケーブルの対数減衰率を示す．ここで，対数減衰率は加速度データに固有振動数の±20%でバンドパスをかけて算出した加速度波形を，式(1)を用いてシンプレックス法による非線形最適化により算出した．

$$\eta(t) = Ae^{-\varpi_0 ht}\cos(\varpi_q t - \theta_0) \quad ・・・(1)$$

ただし，ω_q は減衰各固有振動数，h は減衰定数，A は振幅，θ_0 は位相差，ω_0 は固有角振動数である．これより，高次のモードになるにつれて，また，主塔に近づくにつれて減衰が良くなっていることがわかる．**図-3** に①ケーブルの 1 次モード，①ケーブルの 4 次モード，⑥ケーブルの 1 次モードの加速度波形を示す．①ケーブルの 1 次モードの加速度波形は計測開始から 80 秒経過した時点においてもほとんど減衰していないのに対し，①ケーブルの 4 次モードの加速度波形は計測開始から約 50 秒で，また⑥ケーブルの 1 次モードの加速度波形に関しては約 20 秒で制振している．

5．耐風性に関する検討

(1)発生する可能性が考えられる現象

実施した計測から，耐風性に関しての検討を行う．

一般に風によるケーブル振動の発生に関しては，渦励振，レインバイブレーション，ウェイクギャロッピングの 3 つがある．ウェイクギャロピングに関しては，並行ケーブル特有の現象であるため本橋では考慮する必要はないので，他の 2 つの振動について検討を行う．

表-3 に渦励振とレインバイブレーションの発現条件を示す[1]．これより，本橋で考えられる風によるケーブル振動は，①，⑩ケーブルの 2 次モード以上と③，⑧ケーブルにおいては渦励振(**表-2** の濃い網掛けの部分)，①，⑩ケーブルの 1 次モードにおいて渦励振とレインバイブレーション(**表-2** の薄い網掛けの部分)が発生する可能性が考えられる．**表-4** に渦励振の発現の可能性があるケーブルの渦励振発現風速(**表-4** の網掛けの部分)を示す．渦励振発現風速は式(2)のストローハル数の関係式を用いて算出した．

$$V = \frac{f_S d}{S_t} \quad ・・・(2)$$

ここで，ストローハル数：S_t=0.2，各振動モードの固有振動数：fs，代表径：d=0.20m とする．**表-4** より，風速が約 2m/s～9m/s の時，渦励振が発現する可能性がある．しかし，ケーブルに発生する渦励振はケーブルの 1 次固有振動モードであることは少なく，一般に高次のモードである場合が多いため，風速が高くなるほど渦励振の発現の可能性が高くなる．

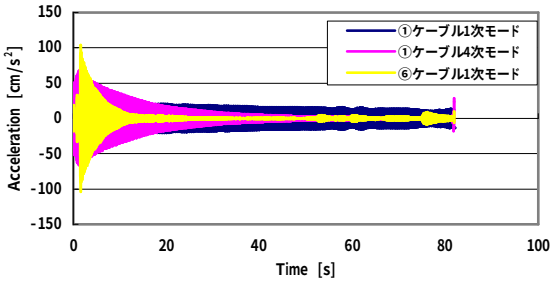

図-3　加速度応答波形(バンドパスフィルター)の比較

表-3　ケーブル振動の発現条件

風による振動	発現条件
渦励振	対数減衰率が0.010～0.015以上あれば発現しない。(減衰定数0.159～0.239以上)
レイン バイブレーション	・対数減衰率が0.02～0.03以上あれば発現しない。(減衰定数0.318～0.478以上) ・振動数が3Hz以上あれば発現しない。

表-4　渦励振発現風速の推定値

ケーブル番号	計測回数	渦励振発現風速(m/s) 1次モード	2次モード	3次モード	4次モード
①	1回目		4.2	6.6	9.3
	2回目		4.2	6.6	9.3
	3回目	2.1	4.2	6.5	9.2
②	1回目	2.5	5.1	8.2	
	2回目	2.5	5.1	8.2	
③	1回目	3.4	7.2		
④	1回目	5.5	12.7		
⑤	1回目	15.7			
⑥	1回目	15.4			
⑦	1回目	5.3	12.1		
⑧	1回目	3.4	7.3	12.3	
⑨	1回目	2.4	5.1	8.3	
	2回目	2.4	5.1	8.3	12.1
⑩	1回目		4.1	6.5	9.3
	2回目	2.0	4.1	6.5	9.3
	3回目		4.1	6.5	9.3

・薄い網掛け：渦励振，レインバイブレーションの両方
・濃い網掛け：渦励振のみ

(2) 現実との対応

一般に渦励振を制振するための諸条件として，(ⅰ)変動空気力係数 C_F が小さいこと，(ⅱ)物体の固有振動数が大きいこと，(ⅲ)構造減衰定数 h が大きいこと，(ⅳ)物体の質量 m が大きいことなどが挙げられる．まず(ⅰ)においては架橋位置が市街地であることから，C_F が大きい可能性が高い．さらに(ⅱ)，(ⅲ)に関しては，計測結果から固有振動数は低くかつ減衰率も小さいので，これらの諸条件には合致しない．しかしながら，本橋においては今までケーブル振動の発生が確認されていないことから，(ⅳ)の条件を満たしている可能性が高い．本橋のケーブル構造は，6 本の鋼より線をアルミ製外装材で被覆し，この間の空隙をグラウト材充填した構造なので，93.3kg/m の重量を有している．このため最近の PE 管構造のケーブルに比べ(ⅳ)の制振効果を得るのに必要な重量と剛性を有していると推定される．なお，ケーブル長が長いケーブル程渦励振の可能性が予想されているが，単位重量と剛性が高いことが寄与して，渦励振振動などの発現が無かったものと考えられる．

6．おわりに

ケーブルの振動を測定し，減衰率を把握することで風によるケーブルに生ずる諸振動の可能性を検討してきた．その結果，当初は渦励振振動などの発生も考えられたが，ケーブル構造を検討することにより，本橋でのケーブルは，最近のケーブル構造とは異なり，材質的に大きな重量と剛性を有していることが，制振効果となっていると推定された．今後は，構造解析などの面からこの推定の検証を行う予定である．

参考文献
1)若原敏裕，嶋田健司，大場義人，内田秀樹，大野浩：PC 斜張橋の風によるケーブル振動とその制振対策，清水建設研究報告第 70 号 平成 11 年 10 月