

ストームレスキャットウォーク構造の振動対策に関する実験的研究

Experimental Study on Countermeasure for Man-Induced Vibrations of Catwalk without Storm System

北條哲男^{*}・山崎伸介^{**}・山口宏樹^{***}

Testuo Hojo, Shinsuke Yamazaki and Hiroki Yamaguchi

^{*} 新日本製鐵(株) 橋梁構造部開発Gr. 部長代理 (〒229 神奈川県相模原市西橋本5-9-1)^{**} 工修 新日本製鐵(株) 橋梁構造部開発Gr. (同上)^{***} 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科 (〒338 埼玉県浦和市下大久保255)

A countermeasure for man-induced vibrations of catwalk without storm system is discussed in the present study. We propose a new-type passive control measure consisting of rope system, which is economical and easy to handle. The vibration test was first carried out using one-tenth scaled catwalk model. It is found out from the experiment that this new device increases the damping of the catwalk system, and that the countermeasure is effective not only for a single mode but also for multiple modes. The mechanism of suppression is also investigated not only by applying TMD theory to the present problem but also by conducting the experiment with simplified model.

Key Words : cable structure, catwalk, crossing rope, passive vibration control

1. まえがき

吊橋ケーブル工事においては、主にケーブルストランドを架設するための空中作業足場であるキャットウォーク(以降CW)は必要不可欠な構造物である。CWは架設構造物であるが、その構造がケーブル架設作業や完成形状に与える影響が大きく、架設性を考慮した設計が必要である。一方、近年、吊橋が長大化するにしがたい、工期の制約、経済性の観点からその合理化も強く要望されている。従来のCWはストームシステムを用いて、剛性を向上させ、安定したストランド架設を可能としていたが、反面、このストームシステムの架設、撤去のためには、それ相応の資材や工期が必要となる。また吊橋支間長の増大にしがたい、CW自重の増大、航路限界等によるストームロープにおけるライズ比の減少等、経済性、構造的要因からストームシステムの効果も低下していくと考えられる。

以上から、著者らはストームシステムを省略した新形式CWの考案を前提に、まず、このストームシステムを省略した場合の技術課題を検討抽出した。その結果、特に作業者の歩行による床組の振動問題がその一つに挙げられることが判った。そこで本研究においては、この人の歩行による床組の振動対策に関する研究を行った。これまで、CWの振動特性については、主に自然風中での応答¹⁾や主塔との連成振動²⁾について研究したものがあ

り、人の歩行による振動に着目したものは少ない。一方、人の歩行による橋梁の振動については、これまで種々の研究^{3) 4)}がなされている。また、ケーブル構造の振動対策としては、ケーブル相互を連結してエネルギーを分散させる方法^{5) 6)}、ケーブル端部にダンパーを設置して減衰を向上させる方法⁷⁾、などが検討されている。本研究ではこれらを参考とし、経済性、施工性等を考慮して、二連のCWをロープで相互に連結する簡便な連結ロープ方式を提案し、その有効性を実験的に示す。研究手順としては、まずその制振特性について把握するためCW模型実験を実施し考察を加え、次にTMD理論の適用および簡易模型を用いた基礎実験を通して、制振メカニズムについて理論的な検討を加えた。

2. CW模型振動実験

2-1 実験模型

CWは、塔頂と塔頂あるいは塔頂と橋台間に、吊橋ケーブル架空予定位置直下に懸架した数本のロープと、その上に横梁で固定した金網とで構成され、適当な間隔でクロスブリッジと称する歩行用トラス桁で2連のCWを繋いだものである。本研究においては、架設作業によるCW床組振動がクロスブリッジを節としてその間で発生するという現場報告に基づき、クロスブリッジ間の部分模型にて実験を行った。模型は、スパン1000m級の実橋

表-1 CW模型諸元 (S=1/10)

	縮尺率	実 橋	模 型
キャットウォーク支間長 (m)	S	160	16.0
キャットウォーク間隔 (m)	S	27	2.7
キャットウォークロープ構成 (EA)	S ³	φ42 (123264ton) 構造用SAFワイヤロープ	φ1.0 (125.664ton) ビ7/線
トラムウェイサポートロープ (EA)	S ³	φ47.5 (15680ton) IWRC	φ1.0 (15.708ton) ビ7/線
ハンドロープ構成 (EA) 上 段	S ³	φ20 (2925ton)	φ0.40 (2.513ton) ビ7/線
ハンドロープ構成 (EA) 中・下 段	S ³	φ16 (1875ton)	φ0.35 (1.924ton) ビ7/線
CWサグ (m) ※	S	1.907	0.215
模型重量 (kgf/m) ※	S ²	235.5	2.298
水平張力 (tonf) ※	S ³	395.3	0.342
対象振動数 (Hz)	1/√S	1.5~2.3	4.7~7.3

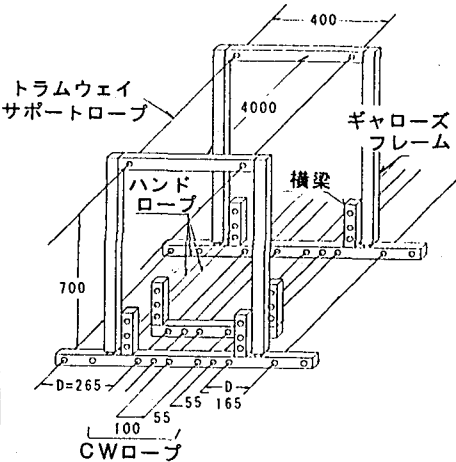
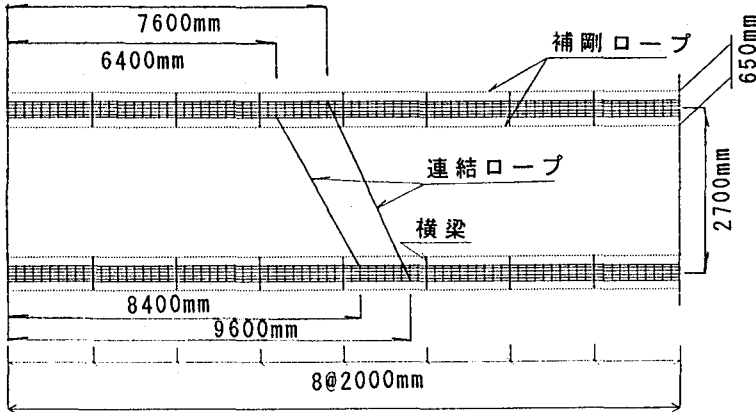


図-1 模型立体図

※ トラムウェイサポートロープを入れた重量



クロスブリッジ間 16000mm

図-2 連結ロープ取付一般図

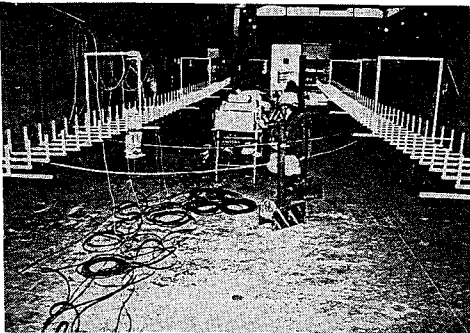


写真-1 実験状況

表-2 連結ロープ諸元 CW全重量(36.765kgf)

		連結ロープ'1 (フェ-1)	連結ロープ'2 (フェ-2)	連結ロープ'3 (ビ'7/線)	TMD ※※
サグ(mm)		215	215	約200	
分布質量 (Kg _f /cm)		3.31×10^{-4}	6.29×10^{-4}	1.82×10^{-4}	0.266kg _f
重量比	長 短 計	0.0033	0.0062	0.0018	0.0072
		0.0028	0.0054	0.0015	
		0.0061	0.0116	0.0033	
ロープ減衰δ ※	水平	0.0207	0.0275	0.0328	0.2160 (0.083)
	鉛直	0.0100	0.0158	0.0335	

※ ロープ類は水平・鉛直方向について、1次モードの初期形状となるように手で持ち上げて測定した。
※※CW水平5次モードに対し振動数比1.00で調律、かつこ内は小振幅の対数減衰率

を想定して、クロスブリッジ間160m相当のものとし、縮尺1/10として、主に重量、伸び剛性に着目して相似則に従って各諸元を算出した。また、ストランド引き出しのためのホーリングロープを曳索するギャローズフレーム、およびそれを固定するためのトラムウェイサポートロープも設置している。模型材料としては、CWロープ、トラムウェイサポートロープ等、ロープ類はすべてピアノ線を使用し、アルミ製の角材で横梁、ギャローズフレーム等を製作し、実構造をできるだけ忠実に再現した。なお、CW模型は外部からの振動、風の影響がなるべく少なくなるように、新日本製鐵(株)相模原技術センター実験棟内の反力床に遮風壁を設けて設置した。模型諸元を表-1に、模型立体図を図-1に示す。

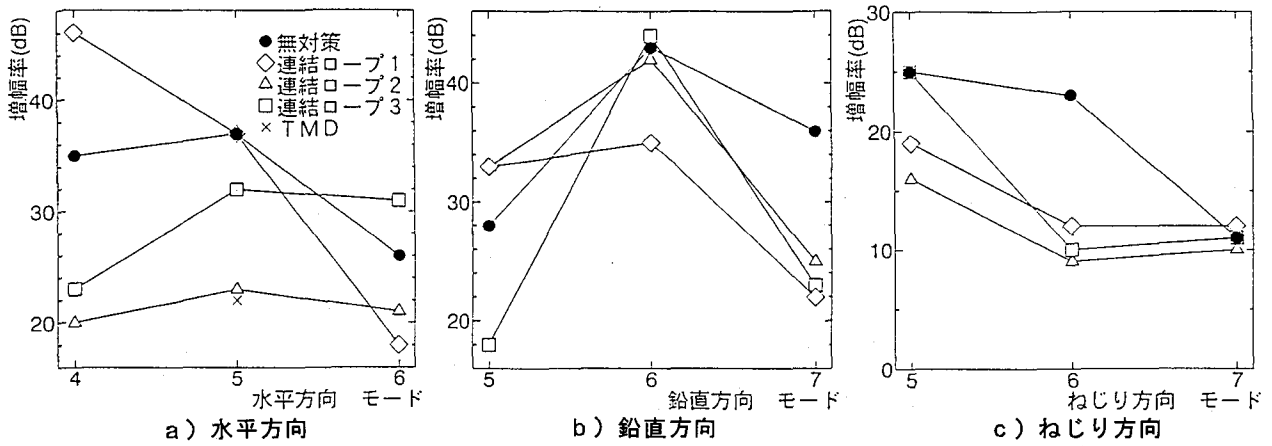


図-3 伝達関数の変化

2-2 制振方法

本研究で提案する連結ロープによる制振対策は、クロスブリッジ間の一連CW総重量の約1%弱程度の重量を持ったロープで2連のCWを連結するものである。その特徴としては、

- ① TMD効果を狙い、CWクロスブリッジ間の固有振動数と同調させるために、CWクロスブリッジ間と同程度のサグを有するように連結ロープを設置すること
- ② 一方のCWで発生した振動が他方のCWに伝播し振動する際に、相互の振動モードを相殺させることを狙って、橋軸直角方向に対してある程度の角度をもって設置すること

にある。

今回は、CW制振対象モードが次に述べるように、4～7次であり、その振動の腹を押さえないこと、また、一方のCW振動がもう一方のCWに伝達する際に、床組の振動方向を連える目的で、連結ロープは2本とし、また取付点をCW内側および外側どうし互いに連えた。連結ロープ取り付け一般図および写真を図-2、写真-1に示す。

2-3 実験方法

実験はまずCW模型の常時微動を測定し、水平・鉛直・ねじれ方向の固有振動数を算出した。次に人の歩行により発生する振動は実橋で1.5～2.3Hz⁴⁾程度と想定し、模型での対象振動数を4.7～7.3Hz程度として、制振対象とするCWの振動モードを4次～7次に決定した。この4次～7次の振動モードについて自由減衰試験を行い、その対数減衰率を算出して連結ロープによる制振性の効果を見た。また比較のため、連結ロープは3種類用意し、同時に、CW水平方向5次モードの固有振動数に同調させた板バネ式TMDをCW中央に設置したものについても同様にして実験を行った(表-2)。なお、模型は支持台に設置した加振器によって外部から加振し、加振器と模型を繋ぐ針金をカッターで切断して、減衰自由振動を発生させた。

3. 連結ロープの制振効果

3-1 常時微動測定結果からの考察(伝達関数の変化)

常時微動観測データはFFTによって解析し、ペンレコーダーでデシベル単位を使用し記録した。デシベル単位においては、2つの値の差は倍率となることより、CWの常時微動が定着構造物底面からの振動を起因としているとすれば、1次振動数以下の低振動数域と卓越振動との差は、振動の増幅率(伝達関数)と一致する。この方法によって求めた伝達関数は底面入力波の固有特性の影響、測定周波数刻みの限界等誤差が大きいと考えられるが、今回の制振対策の効果を相対的に比較する上で有効であると考へ記録結果より読みとった。その結果を図-3, a), b), c)に示す。図-3, a), b)では無対策と比べると所々伝達関数が大きくなっているのが見受けられるが、概ね低下しており、図-3, c)ではほとんどすべてのモードで低下している。また全体を通して連結ロープ2によるものが、特にその中でも水平方向モードが、伝達関数を比較する上では、最も制振効果が大きいことが判る。

3-2 モード減衰の増大

表-3に減衰自由振動測定における加振モードおよびその対数減衰率の測定結果を示す。また図-4に無対策と連結ロープ2を設置したものの水平方向5次モード加振時の減衰自由振動波形を示す。ここで模型は常時微動結果より得られた固有振動数で加振したが、かならずしもすべてのモードでははっきりとした振動が得られたわけではなく、特に水平方向とねじり方向が連成したものが多かった。この理由として、両者の固有振動数が近いこと、さらに本模型ではトラムウェイサポートロープがギャローズフレームを介してCW床組と一体となっており、CW回転中心が床組より上方にあり、水平振動とねじれ振動の区別がつきにくいことが挙げられる。

表-3よりすべての連結ロープで減衰性の向上が認められ、特に水平方向についてはその効果が大きいことが判る(図-4)。また重量比の一番大きい連結ロープ2が最も

表-3 キャットウォーク加振モードおよび対数減衰率(δ)

連結ロープ 種類	水平		鉛直		ねじり	
	MODE	δ	MODE	δ	MODE	δ
連結ロープ 設置前	4次(5.13)	0.0036	5次(5.63)	0.0036	5次(6.08)	0.0048
	5次(6.10)	0.0045	6次(6.65)	0.0035	6次(7.15)	0.0045
	6次(7.15)	0.0030	7次(7.55)	0.0042	7次(8.20)	0.0043
連結ロープ1	4次(5.10)	0.0128	5次(5.60)	0.0079	5次(6.05)	0.0095
	5次(6.03)	0.0107	6次(6.55)	0.0044	6次(7.13)	0.0107
	6次(7.13)	0.0136	7次(7.55)	0.0052	7次(8.10)	0.0271
連結ロープ2	4次(5.08)	0.0075	5次(5.55)	0.0062	5次(6.10)	0.0138
	5次(5.88)	0.0289	6次(6.65)	0.0108	6次(7.05)	0.0119
	6次(7.10)	0.0107	7次(7.43)	0.0096	7次(8.13)	0.0072
連結ロープ3	4次(5.13)	0.0067	5次(5.65)	0.0039	5次(6.58)	0.0058
	5次(6.10)	0.0188	6次(6.65)	0.0116	6次(7.15)	0.0082
	6次(7.15)	0.0101	7次(7.55)	0.0045	7次(8.15)	0.0043
TMD	4次(5.10)	0.0118				
	5次(6.10)	0.0196				
	6次(7.13)	0.0048				

※ () 内は振動数

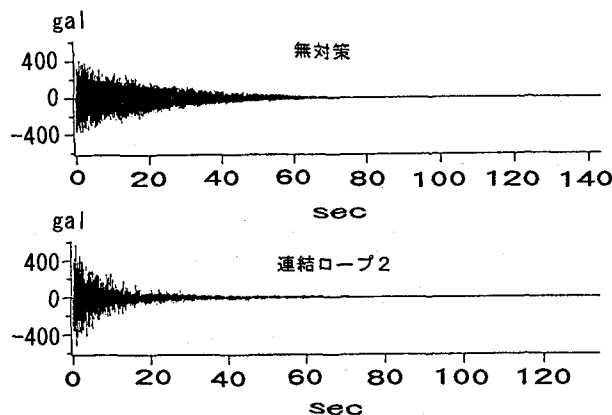


図-4 水平方向5次モード自由減衰振動波形

制振効果が大きく、水平方向5次モードについてTMDと連結ロープ3がほぼ等しい対数減衰率を得ている。さらに、複数のモードについて減衰が向上していることから、本制振方法は、1つのモードだけでなく数種のモードに対する制振に効果があり、振動領域に幅を持つようなケーブル系の制振対策に有効であると思われる。

4. 連結ロープの振動性状

連結ロープの振動性状について、連結ロープに取り付けた水平、鉛直方向の加速度計から減衰自由振動時の振動性状を分析した。ただし、ロープは振動中ねじれたりしている可能性もあり、かならずしも正確に初期の取付方向を向いているとは限らない。また加速度計は、ロープ支間を1.14 : 2.51で分割した点に設置した。

図-5に連結ロープ2設置時の水平方向5次モード減衰自由振動測定時における、減衰開始約1.5秒後における同時刻のモード図および長短連結ロープの減衰開始6秒間におけるオービット図を示す。モード図a)よりCWは、加振器に近い腹の方が大きな加速度を示しているものの、ほ

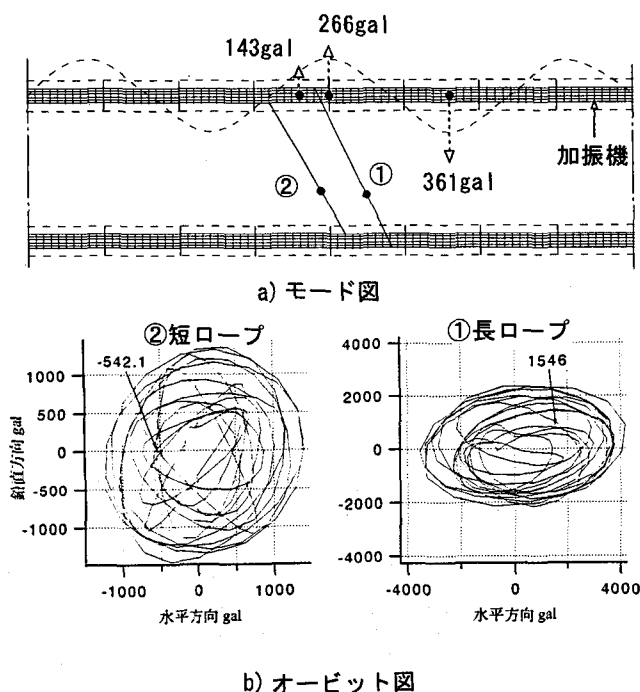


図-5 連結ロープ2の水平方向5次モードにおける
a) モード図及びb) オービット図

ぼ水平5次モードで振動しており、またオービット図b)、c)より、腹に近い長ロープがCW本体の約10倍~20倍近い大きな加速度で振動していることが判る。ただし振動の節位置となるはずの短ロープも大きな振動をしており、他の振動モードが連成している様子がうかがえる。

図-6には同じく連結ロープ2設置時の、水平方向5次モード減衰自由振動測定時において、減衰開始20秒間の平均スペクトルを、長短連結ロープの鉛直・水平方向、およびCW本体の5次モード(加振器側から数えて2番目腹位置)水平方向について示したものである。このグラフより、CW本体は加振周波数(5.88Hz)から多少変化して、6.1Hzでピーク振動となっているものの、他の水平方向振動も発生している。また、長短連結ロープについては鉛直・水平それぞれほぼ等しいスペクトル形状で、CW本体振動と同様な振動数で振動していることが判り、連結ロープのサグをCW本体のサグと等しくし、固有振動数を同調させたことの効果がうかがえる。図-7、図-8には連結ロープ1,2およびTMDを施した場合の各減衰振動モードについて、加振周波数におけるロープの平均振幅とCWの平均振幅との比、およびすべての周波数に含まれている連結ロープの0~20秒間の最大振幅とCWの加振周波数における平均振幅の比について、それぞれ長短よく揺れた連結ロープについてグラフにしたものを示す。図-7より、加振周波数における連結ロープの振幅が大きいほどCWの減衰効果は大きく、また図-8より、連結ロー

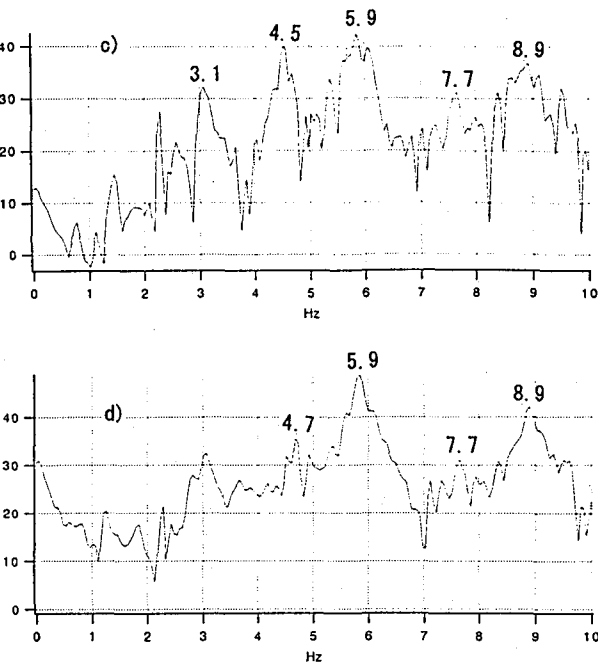
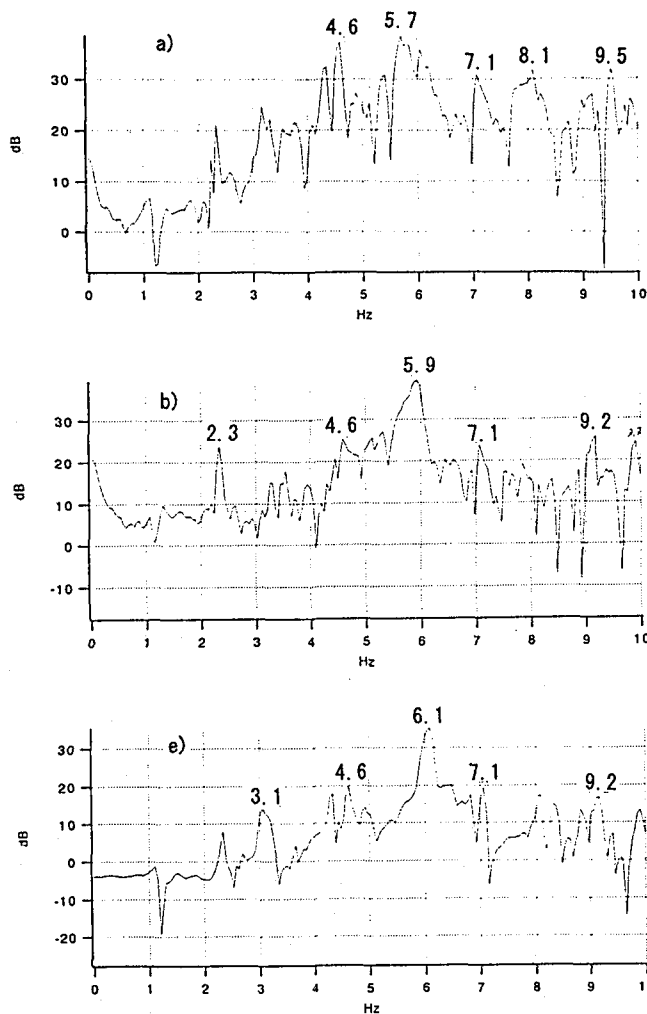


図-6 連結ロープ2・水平方向5次モードにおける
減衰開始20秒間の平均スペクトル

- a), b) 短ロープ, 鉛直, 水平方向
c), d) 長ロープ, 鉛直, 水平方向
e) CW5次モード (加振機側から数えて2番目の腹)
位置水平方向

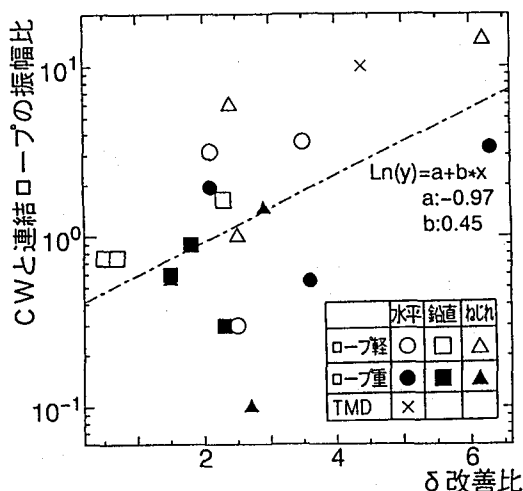


図-7 δ 改善比とCWと連結ロープの振幅比
(加振周波数における)

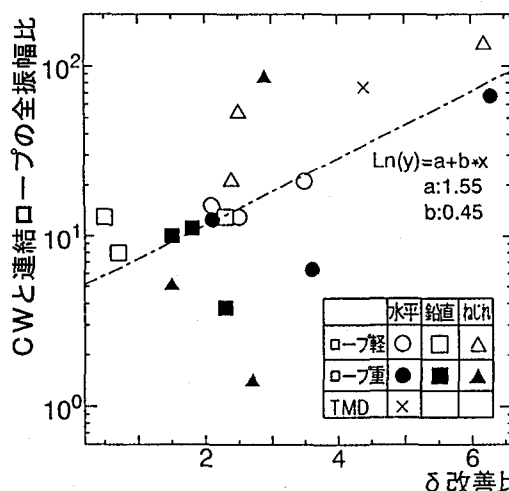


図-8 δ 改善比とCWと連結ロープの振幅比
(すべての振動スペクトルを含む)

ブの最大振幅の大きいものほどCWの減衰効果は大きい。これらのことは、連結ロープのよく揺れるものほどCWの制振効果は大きいことを表している。また同図より、水平、ねじれ方向加振のほうが鉛直方向加振よりよく揺れており、したがって減衰効果の大きいことが判る。

5. 連結ロープの制振メカニズム

5-1 連結ロープのTMD効果

4. の振動性状についてさらに実験を観察した結果、サグを持った連結ロープを取り付けることにより、片方のCWで発生した振動が他方のCWに伝播してはいくが、連結ロープの大きな振動、つまりそれ自身のサグの変動によりかなりの振動エネルギーを吸収している様子が判り、連結ロープ自体が一種のTMD的な役割を果たしていると思われる。実際、連結ロープのサグをCWのサグと一致させることにより、両者の固有振動数を高次の多数モードについて等しくさせることができ、CWの振動に対して連結ロープを常に共振させることができる。このことは図-6の説明でも述べた。このことについて、常時微動記録からTMD独特の効果（ピークスペクトルが2つの山に割れる）ものを選び出し、それらについて、TMD理論から計算したものと比較してみた。例として、水平方向5次モード近傍中心において、無対策時とTMDおよび連結ロープ2設置時の常時微動スペクトルを重ね描きしたものをそれぞれ図-10a), b)に示し、TMD理論を用いて計算した結果をそれぞれ図-10c), d)に示す。ここで用いたTMD理論は、図-9に示す2自由度系解析モデルに対し、振動体が周期外力 $P e^{i\omega t}$ を受ける場合のものである。このとき振動体の動的応答倍率 M は次式で与えられる⁸⁾。

$$M = \sqrt{\frac{(f^2 - g^2)^2 + 4h_2^2 f^2 g^2}{A}} \quad \text{--- (1)}$$

$$A = [(1 - g^2)(f^2 - g^2) - (\mu f + 4h_1 h_2) f g^2]^2 + 4\{(h_2 + h_1 f) f - [h_1 + (1 + \mu) h_2 f] g^2\}^2 g^2 \quad \text{--- (2)}$$

ただし、各パラメータは以下のとおりである。

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} \quad (\text{固有振動数})$$

$$h_1 = \frac{C_1}{2\sqrt{m_1 k_1}}, \quad h_2 = \frac{C_2}{2\sqrt{m_2 k_2}} \quad (\text{減衰比})$$

$$\text{質量比 } \mu = \frac{m_2}{m_1}, \quad \text{同調比 } f = \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

$$\text{外力振動数比 } g = \frac{\omega}{\omega_1}$$

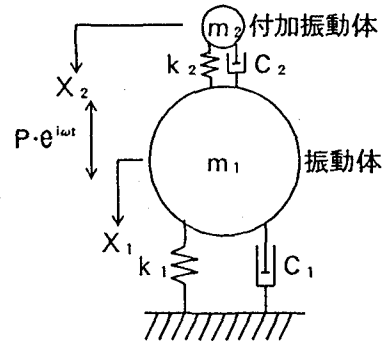


図-9 TMD理論

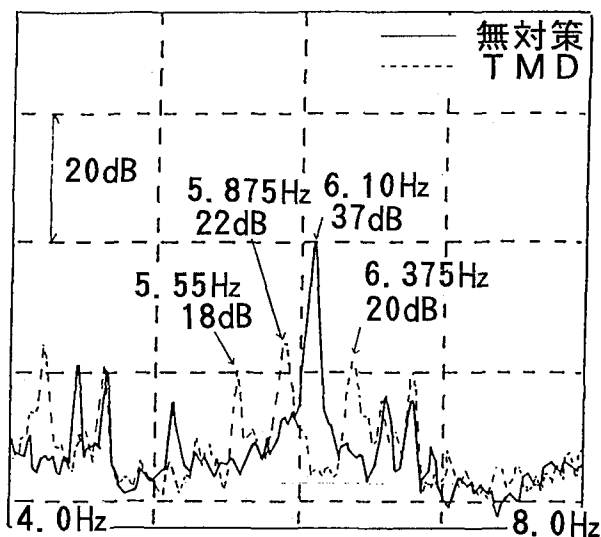
図-10a), c)からわかるように、TMDを設置したものは、表-2より得られた中振幅の対数減衰率を用いることにより、微動記録波形とほとんど一致した結果がTMD理論の適用により得られている。これは当然のこととして、連結ロープを設置したものについても（図-10b), d)）、かなり微動記録波形と似通った結果がTMD理論によって得られており、連結ロープによるTMD効果がある程度衰えけられたものとなっている。

5-2 簡易模型による制振メカニズム確認実験

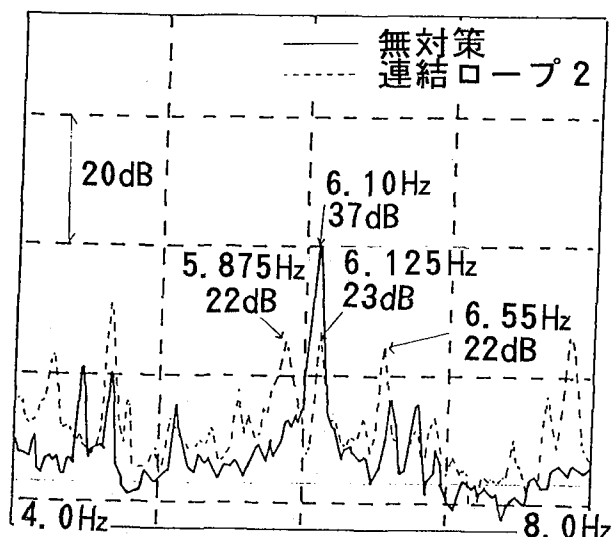
連結ロープのTMD効果を確認し、その制振メカニズムを探る目的で、簡易模型を用いた強制加振実験を行った。模型は、図-11に示すように、1連のCWをケーブル1本でモデル化し、連結ロープ1本をCW模型ケーブルに直角に連結したものである。CWおよび連結ロープの質量、サグ等は図中の表に示すとおりである。

実験は、CW1の模型ケーブル支点近傍を加振器によって水平方向に周期的に加振し、そのときの定常応答を、CW1の水平変位については光学変位計で、連結ロープについてはその鉛直変位をレーザー変位計で、それぞれ測定した。ただし、周期加振といっても、加振器とCW模型ケーブルとはフレキシブルな糸で連結しており、ケーブルを水平方向に周期的に引っ張るような加振となっている。

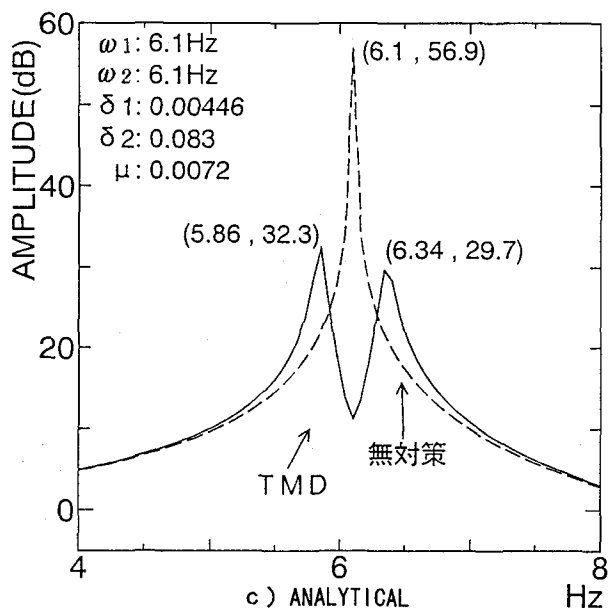
図-12に、CWの3次モードを対象とした加振実験結果を、共振曲線図として示す。図の(a)がCWの水平変位、(b)が連結ロープの鉛直変位であり、CWの応答は連結ロープを付けない場合の単体としての共振曲線(O)と比較して示してある。CWの応答は詳細模型実験での常時微動測定結果（図-10）に類似しており、CWを連結することによって、CW単独の共振ピークがかなり抑えられることが確認できる。これは、CWの共振振動数（7.7Hz）近くで連結ロープの振動が大きくなっており、TMD的な制振効果と考えられるが、共振振動数が連結後もほとんど変わらないことに注意すべきであろう。実験において2本のCW模型の運動を注意深く観察したところ、この共振振動数付近では2本のCWが同位相で水平に3



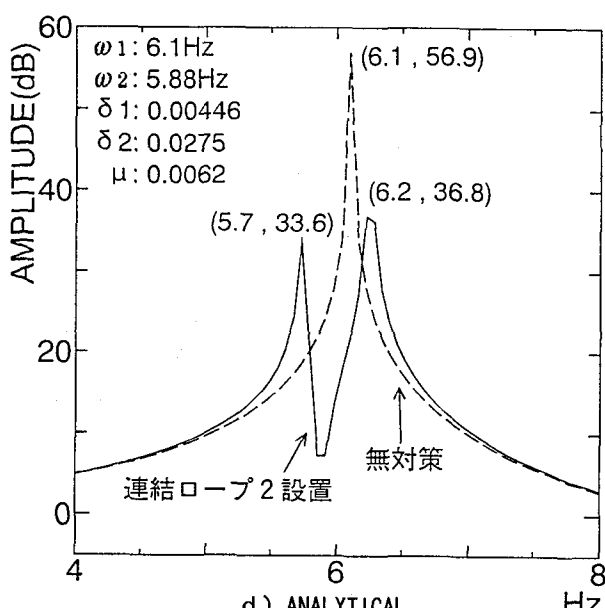
a) EXPERIMENT



b) EXPERIMENT



c) ANALYTICAL
水平5次モードTMD設置



d) ANALYTICAL
水平5次モード連結ロープ2設置

図-10 水平方向5次モード近傍スペクトル応答波形

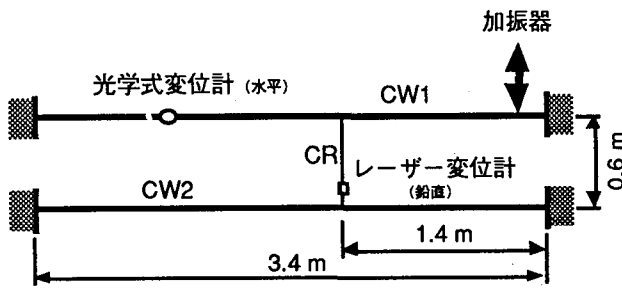
次モードで振動しており、また連結ロープも鉛直に3次モードで振動していることがわかった。2本のCWが同位相で振動することから、連結したことによる固有振動への影響はほとんどなく、共振振動数が連結前後で変化しないが、連結ロープがCWに共振し、連結ロープの減衰によってCWの振動が抑えられるものと理解される。単純なTMDとはやや異なる制振メカニズムであると結論されよう。また、このときの連結ロープの振動は比較的大きく、単純な鉛直方向調和振動とはならず非線形的な挙動が認められている。この非線形挙動も制振メカニズムと深い関連を有すると考えられ、今後の検討課題

の一つである。

なお、7Hz付近の連結ロープの大きな振動は、2本のCWケーブルが逆位相で共振する場合に相当し、支点間距離の周期的な振動によって連結ロープが大きく振動したものである。ただし、このときのCWの振動は小さく、問題とならない。

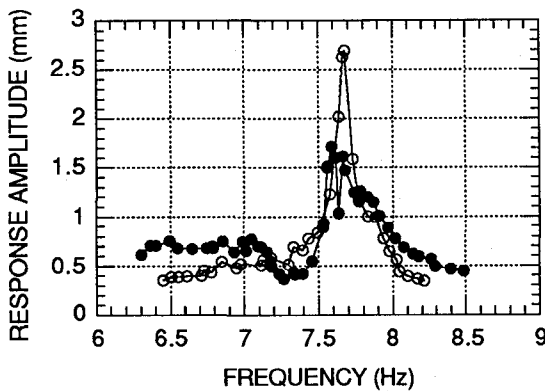
6. 結論

本研究では、ストームレスキャットウォーク構造を対象として、作業人がもたらす振動の制振方法について主

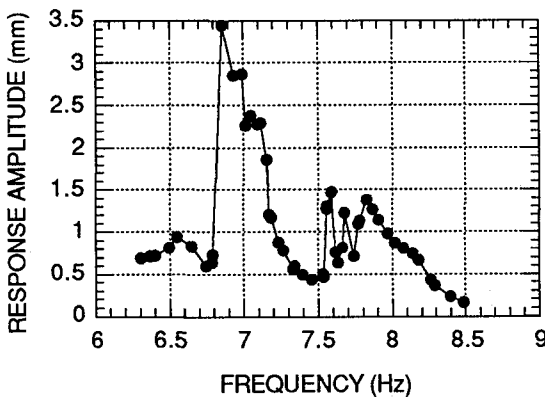


	質量	サグ	サグ比
キャットウォーク (CW1, CW2)	600 g	5 cm	0.015
連結ロープ (CR)	11.5 g	5 cm	0.083

図-11 簡易模型実験の概略



(a) CW1の水平変位応答



(b) 連結ロープの鉛直変位応答

図-12 簡易模型加振実験による共振曲線
○連結ロープなし、●連結ロープあり。

に模型実験から考察を加えた。提案する制振対策は2連のCWをロープで連結するという簡単なものであるが、CWクロスブリッジ間と同程度のサグをもった連結ロープを採用することにより、ストームレスCWの水平・ねじれの複数モードの振動に対して制振効果のあることが実験的に明らかとなった。本研究で得られた主な知見を要約すると以下のようなものである。

- ① 常時微動測定記録から、CWの伝達関数は、連結ロープを設置することにより、数次にわたって小さくなることが判明した。
- ② 減衰自由振動試験によると、連結ロープによりモード減衰が数次にわたって増大する。
- ③ 連結ロープの良く揺れる場合に、CWへの減衰付加が大きい。
- ④ 常時微動測定記録からTMD的現象が読みとれ、TMD理論計算とも似通った結果となった。
- ⑤ 本制振メカニズムとしてはTMD的作用が考えられるが、通常のTMDとやや異なる面を有する。

今回の研究においては、連結ロープの設置の仕方による影響まで考察するに至らなかった。今後はさらに検討を進め、理論的な解明に努めていきたい。

謝辞

簡易模型を用いた加振実験を行うに当たっては、埼玉大学学生、Nakhorn Poovarodom、執行秀忠両氏に協力頂いた。ここに記して謝意の意を表する。

参考文献

- 1) 伊藤学・宮田利雄・杉田卓男・北條哲男：キャットウォークの耐風性に関する研究、第4回風工学シンポジウム、1976、pp231～238
- 2) 並川賢治・佐藤栄作・富永博夫・清田隼次・横尾正幸・今野信一：ケーブル架設時における吊橋主塔の振動特性、土木学会第47回年次学術講演会、pp. 512～513
- 3) Fujino他、SYNCHRONIZATION OF HUMAN WALKING OBSERVED DURING LATERAL VIBRATION OF A CONGESTED PEDESTRIAN BRIDGE, EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, VOL. 22, 741-758 (1993)
- 4) 小堀・梶川：立体横断施設技術基準・同解説
- 5) 山口宏樹：ケーブルシステムの振動減衰の推定、構造工学論文集、Vol. 39A (1993年3月)
- 6) Fazl Ehsan and Robert H. Scanlan: DAMPING STAY CABLES WITH TIES, Proc. 5th US-JAPAN Bridge workshop, pp203-217, Jan. 1990.
- 7) 米田昌弘・前田研一：ケーブル制振用ダンパーの粘性減衰係数設定に関する一考察、土木学会論文集、1989、pp445～458
- 8) 片山恒雄・宮田利雄・国井隆弘：構造物の振動解析、新体系土木工学pp61～pp68、1979

(1994年9月14日受付)