

# 長大斜張橋の強風時の横ねじり座屈安定性に及ぼすケーブルの弛緩の影響

## Lateral-Torsional Buckling Stability of a Long-Span Cable-Stayed Bridge with Flexible Cables under Wind Action

○中村 一史\*・前田 研一\*・紺野 誠\*\*・林 正\*\*\*・成田 信之\*

Hitoshi NAKAMURA, Ken-ichi MAEDA, Makoto KONNO, Masa HAYASHI and Nobuyuki NARITA

**ABSTRACT** In long-span cable-stayed bridges with span greater than 1,000m, the wind-induced static instability becomes an important subject which depends their realization. This paper deals with finite displacement analyses under three components of static aerodynamic forces as a function of the angle of attack, using a trial-design model with span of 1,000 m. From the results of analyses, the authors investigate characteristics of the lateral-torsional buckling under wind action, and to propose the use of new auxiliary cables, named "lacing cables", which control the flexibility of stay cables.

**Keywords:** 長大斜張橋, 横ねじり座屈安定性, 弾性有限変位解析, 静的空気力  
*long-span cable-stayed bridge, lateral-torsional buckling stability, elastic finite displacement analysis, static aerodynamic force*

### 1. 緒 言

日本の新国土軸を展開するプロジェクトとして, 各地の湾口・海峡部における連絡橋構想が活性化しつつある昨今であるが, それを取り巻く設計・環境条件はより厳しく, しかも経済性をも同時に追求<sup>1)</sup>することが不可欠とされ, 吊形式橋梁にとって克服すべき技術的課題は未だ多く残されている。強風時の静的不安定問題もこれらの構想の実現可能性を左右する重要な課題の1つである。

我が国の海洋型大規模吊形式橋梁の耐風設計指針として位置づけられる本州四国連絡橋公団の基準類<sup>2)~4)</sup>では, 風荷重による静的不安定現象が生じないように十分留意するものと規定し, 一般にねじり発散現象 (divergence) よりも横ねじり座屈現象 (lateral-torsional buckling) の方が支配的で, より詳細な検討のためには, 風洞試験により求めた静的空気力係数を用い, 幾何学的非線形性を考慮した3次元弾性解析等の方法によって横ねじり座屈に対する安全性の確認を行うことが望ましいと解説している。ただし, 照査法や照査例に関する具体的な記述はみられない。

この横ねじり座屈に対する吊形式橋梁の安全性の照査法として, 文献5), 6)では, 斜張橋を対象に, 主桁断面模型の風洞実験から得られる迎角に依存する静的空気力係数を用いて横ねじり座屈解析を行う方法を, ULD法(Updated Lagrangian法)による有限変位理論に基づく増分型の釣り合い方程式の形で具体的に示すとともに, 限界となる風速を効率的に求める手法を提案している。さらに, 中央径間長1,000mの試設計例の完成系, および, 架設系を対象として安定解析を実施し, 長大斜張橋における風荷重による静的不安定現象について, 多くの新しい知見を与えている。

一方, 斜張橋では斜ケーブルの自重によるサグの問題があり, 上述の文献5), 6)においては, 死荷重時の張力を用いて Ernstの修正弾性係数を各斜ケーブルに適用している。また, 文献7)においては, サグの影響に加えて, 風荷重の作用による斜ケーブルの任意方向の弛緩の影響を考慮するために, 柔ケーブル部材の剛性方程式を組み込んだULD法による増分型の有限変位方程式を用いた

---

\* 東京都立大学工学部土木工学科 (〒192-03 東京都八王子市南大沢1-1)  
\*\* 東京都立大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒192-03 東京都八王子市南大沢1-1)  
\*\*\* 長岡技術科学大学環境・建設系 (〒940-21 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

構造解析法<sup>8)</sup>を適用して、中央径間長1,400mの試設計例を対象に同様の安定解析を実施し、静的不安定性に及ぼす主桁幅の影響について検討している。しかしながら、これらの文献においては、斜ケーブルの弛緩が静的不安定性に及ぼす影響の度合いや、その要因となる弛緩の考慮の有無による変形挙動の差異などについての検討はみられない。

本研究は、作用空気力の成分を変えた風荷重の各ケースについて静的安定解析を行って、不安定現象の照査荷重の位置付けを設計風荷重との関連を含めて明確にするとともに、斜ケーブルの弛緩を考慮した解析と同時にそれを無視した解析も実施して、ねじり発散現象、および、横ねじり座屈現象における斜ケーブルの弛緩の影響度を把握することを目的としたものである。

さらに、斜ケーブルの弛緩の影響を軽減することによって安定性の向上を図ることを目的として、面外方向の弛緩を抑制することを提案し、各段の2面の斜ケーブルを相互に連結する補助ケーブルシステムを用いて、横ねじり座屈現象における効果の検証とメカニズムの解明を試みたものである。

## 2. 静的不安定問題の解析法

風洞試験によって得られる迎角 $\alpha$ に依存する抗力係数 $C_D$ 、揚力係数 $C_L$ 、ピッチングモーメント係数 $C_M$ を用いて、単位長さ当たりの静的空気力の3成分は、風軸に関して次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} D(\alpha) &= \frac{1}{2} \rho U_z^2 A_n C_D(\alpha) \\ L(\alpha) &= \frac{1}{2} \rho U_z^2 B C_L(\alpha) \\ M(\alpha) &= \frac{1}{2} \rho U_z^2 B^2 C_M(\alpha) \end{aligned} \right\} (1) \quad \begin{aligned} U_z &= U_{10} (Z/10)^{1/7} & (2) \\ \alpha &= \alpha_0 + \theta_x = \theta_x & (3) \end{aligned}$$

ここに、 $\rho$ は空気密度(=0.000125 t・s<sup>2</sup>/m<sup>4</sup>)、 $A_n$ は主桁の鉛直投影面積、 $B$ は桁幅であり、風速 $U_z$ は、基準高度 $Z$ における設計風速に対応するもので、 $U_{10}$ を基本風速として式(2)で与えられる。

ここでは、限界風速の値そのものよりも、斜ケーブルの弛緩が及ぼす影響の度合いを把握することを第一の目的として、風軸を水平にとり初期迎角 $\alpha_0$ は零とするものとした。従って、迎角 $\alpha$ は、式(3)で表され、風荷重によって生じるねじり角 $\theta_x$ と一致することになる。

このような迎角 $\alpha$ に依存して主桁に作用する静的空気力の風荷重としての取扱いについては、文献5)、6)における安定解析の方法に準じるものとし、構造解析法としては、移動座標系に剛体回転させた無応力形状を基準とした総ひずみによって剛性方程式が定式化されるAUL方法(Approximate Updated Lagrangian法)<sup>10)</sup>による弾性有限変位解析法を適用した。

本構造解析法では、数値解法として反復法と荷重増分法を組合わせた混合法を用いており、風荷重が依存する迎角 $\alpha$ すなわちねじり角 $\theta_x$ を適切な許容誤差で収束させるだけでなく、それらが収束に至る各段階での非線形剛性方程式の解についても十分な精度で収束させ、基本風速 $U_{10}$ の設定値の増加に伴い変形が大きくなって解の収束性が悪化した際には、風荷重を分割して載荷した。

また、斜張橋特有の設計条件を厳密に考慮した形状決定<sup>10) 11)</sup>を行え、それによって求められる主桁、主塔の無応力形状、および、斜ケーブルの無応力長を用いて、所定の完成形状で斜ケーブルがプレストレスを含む完成時設計張力となる(死荷重+プレストレス)時の平衡状態をコンピュータ上で創出し、この平衡状態に風荷重をさらに載荷した。

文献11)には、各斜ケーブルを複数の軸力部材に分割しリンク構造として取扱う場合の形状決定の手法も提案されており、ここでは、リンク構造(リンクケーブル)にモデル化することによって、斜ケーブルの弛緩の影響を考慮した解析を行うものとした。同時に、各斜ケーブルを単一の軸力部材(直線ケーブル)とする通常モデル化によって、その影響を無視した解析を行うものとした。

さらに、斜ケーブルの弛緩が及ぼす影響を軽減して安定性を向上させることを考え、面外方向の弛緩を抑制することを提案するが、その効果の検証のために用いる補助ケーブルについては、解析の便宜上、死荷重を無視し、(死荷重+プレストレス)時の平衡状態で無応力状態となるように無応力長を調整するとともに、非抗圧部材とはせず、仮に圧縮にも抵抗できるものとした。

## 3. 解析モデルと安定化策

図-1に一般図を、表-1に断面諸元を示す文献5)、6)におけるものと同じ中央径間長1,000mの試設計例<sup>9)</sup>を解析対象として、立体骨組構造にモデル化し、まず、直線ケーブルモデルを作成した。

次に、斜ケーブルの弛緩を考慮した解析を行うために、全ての斜ケーブルを4軸力部材に等分割してリンク構造にモデル化し、リンクケーブルモデルを作成した。形状決定された(死荷重+プレストレス)時の平衡状態でのリンクケーブルモデルのスケルトンを図-2に示す。ここに、総節点数、総部材数は、直線ケーブルモデルで705, 896, リンクケーブルモデルで1,281, 1,604であった。

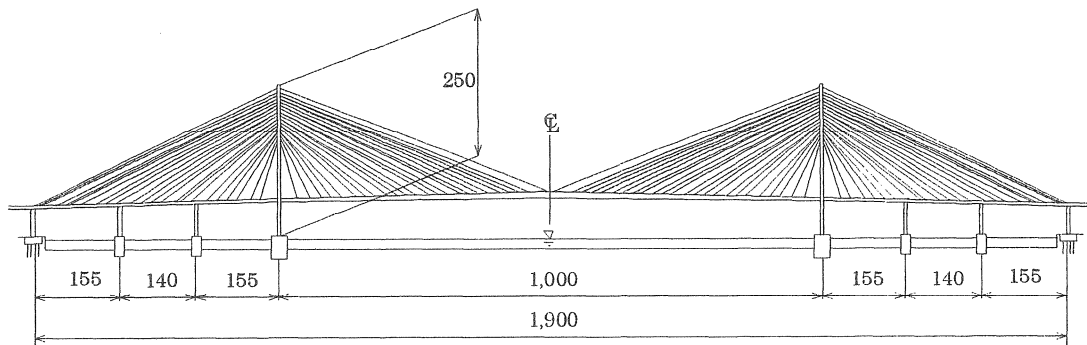


図-1 試設計モデルの一般図

表-1 断面諸元

	主桁	主塔
$A(m^2)$	1.58	1.24~3.30
$J(m^4)$	6.4	12.0~20.0
$I_y(m^4)$	150	10.20~24.40
$I_z(m^4)$	2.66	11.99~45.22
$E(t/m^2)$	21000000	21000000
$G(t/m^2)$	8100000	8100000
ケーブル		
$A(m^2)$	0.006278~0.01343	
$E(t/m^2)$	20000000	

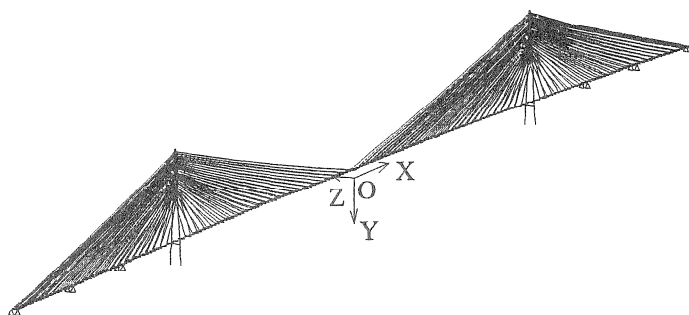


図-2 立体有限変位解析モデル(リンクケーブルモデル)

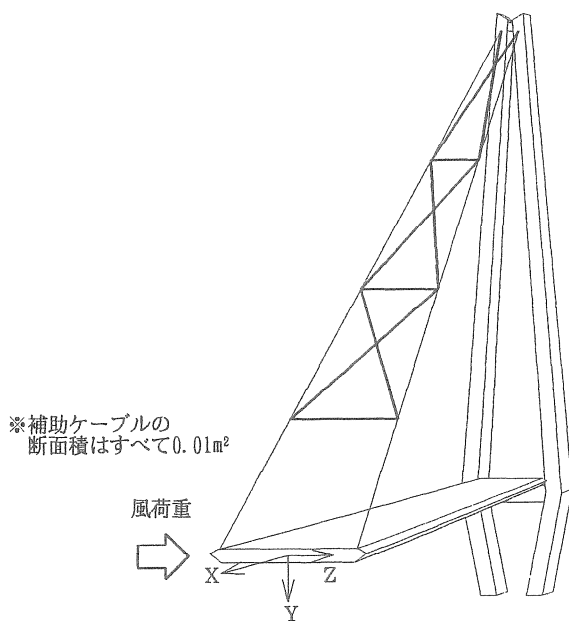


図-3 面外方向の弛緩の抑制

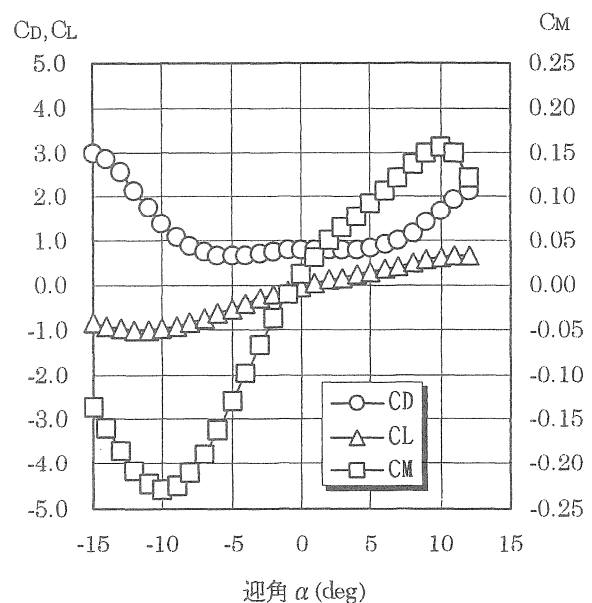


図-4 対象とした3分力係数

さらに、静的不安定現象の安定化の一方策として、斜ケーブルの面外方向の弛緩を抑制することを提案し、その効果の検証のため、図-3に示すような各段の2面の斜ケーブルを互いに綾状に連結する補助ケーブルシステムを、リンクケーブルモデルに付加した解析モデルも作成した。この補

助ケーブルをレーシングケーブル (lacing cable), それを付加した解析モデルをレーシングケーブルモデルとここでは呼ぶこととし, 面外方向の弛緩を抑制する斜ケーブルの段数による効果の差異についても検討するために, 補助ケーブルの設置段数を変えた複数のモデルを作成した。

#### 4. 風荷重の載荷ケースと解析要領

風荷重を算定するための静的空気力係数は名港大橋の風洞実験データ (図-4 参照) を適用して, 主桁の平均高度は56m, 桁幅はフェアリング幅を加えた39.8m, 鉛直投影面積は3m<sup>2</sup>とする<sup>5), 6)</sup> こととし, 載荷ケースは式(1) に示した静的空気力の3成分を全て作用させるケースを含む次のようなCASE-1~CASE-3の3ケースとした。

ここに, 斜ケーブル (抗力係数0.70) と主塔の塔柱 (抗力係数1.20) には抗力を作用させ, 主桁にも同様に迎角 $\alpha$ に依存しない抗力 (抗力係数0.80: 図-4の迎角 $\alpha=0$ での値) のみを作用させる載荷ケースがCASE-1, これに対して, 主桁には迎角 $\alpha$ に依存するピッチングモーメントのみを作用させる載荷ケースがCASE-2, および, 主桁には迎角 $\alpha$ に依存する静的空気力の3成分を全て作用させる載荷ケースがCASE-3である。

すなわち, 耐風設計基準類における設計風荷重の概念に対応するものがCASE-1であり, CASE-2は静的不安定現象の照査におけるねじり発散解析 (divergence analysis) に, CASE-3は横ねじり座屈解析 (lateral-torsional buckling analysis) にそれぞれ対応するものである。

解析は, 基本風速 $U_{10}$ の設定値を40m/secから10m/secピッチで増加させ, 迎角 $\alpha$ すなわちねじり角 $\theta_x$ (deg.) が収束せずに発散するまで行うことを原則とした。ただし, 発散し不安定となる付近では, 限界となる風速を正確に求めるために1m/secピッチで変化させた。なお, 収束を判定するための許容誤差として, 空気力係数のユークリッドノルム (Euclidean Norm) を5%以下とした。

#### 5. 解析結果とその考察

解析結果の一部として, 図-5, 図-6, および, 図-7に, 中央径間中央部の主桁のねじり角, 面外の水平変位, および, 面内の鉛直変位を示す。また, 図-8には, 主塔位置での主桁の軸力を, 図-9には, 最上段斜ケーブルの張力 (凡例中, Uは風上側, Dは風下側を表す) を示す。

これらの図より, 風荷重の載荷ケース, および, ケーブルのモデル化の相違によって限界風速に顕著な差異が現れ, CASE-3におけるリンクケーブルモデルの場合, 斜ケーブルの弛緩の影響を大きく受けて, 風速82m/secで不安定となり, 直線ケーブルモデルの限界風速108m/secに比べてかなり低下しクリティカルとなることが解る。また, リンクケーブルモデルの各載荷ケースにおける限界風速を比較すると, CASE-2は108m/secで, CASE-3は上述のように82m/secで不安定となるのに対して, CASE-1では150m/secに至っても変形は大きくなるものの安定を保っており, ねじり発散現象よりも横ねじり座屈現象が支配的であること, および, 設計風荷重との対比は困難であることが解る。

リンクケーブルモデルと直線ケーブルモデルの変形の差異に着目すると, 全ての載荷ケースにおいて, 主桁のねじり角, および, 鉛直変位は当初から顕著な差異を生じるのに対して, 面外変位はかなり高風速になるまではほとんど差異を生じないことが解る。このような両モデルの主桁のねじり角, および, 鉛直変位の差異は, 後で変形状態を図-10に示すように, 斜ケーブルの面外方向の弛緩によって, 各段の2面の斜ケーブルが接近してねじり抵抗力が損なわれたこと, および, 主桁が斜ケーブル軸方向に引込まれたことによるものとそれぞれ考えられる。

断面力の変化については, 斜ケーブルの弛緩の考慮の有無による差異は小さく, 主桁の軸力 (圧縮力) はCASE-1, CASE-2ではほとんど変化ないが, CASE-3では限界風速に近づいて変形が大きくなるにしたがってかなり減少すること, および, 斜ケーブルの張力は全載荷ケースで風上側が減少し風下側が増加するが, CASE-1, CASE-2, CASE-3の順により大きく変化することが解る。

一方, 図-5~9には, 全径間の最上段から8段目までの斜ケーブルに補助ケーブルを設置したモデルのCASE-3における解析結果を併記している。これらより, 斜ケーブルの面外方向の弛緩を抑制することによって, リンクケーブルモデルの限界風速82m/secが97m/secとなって約18%上昇し直線ケーブルモデルの値に近づくこと, および, 同風速時の主桁のねじり角, 面外変位がかなり低減されることが解る。また, 主桁軸力, 斜ケーブル張力の変化も同様にかなり低減されることが解る。

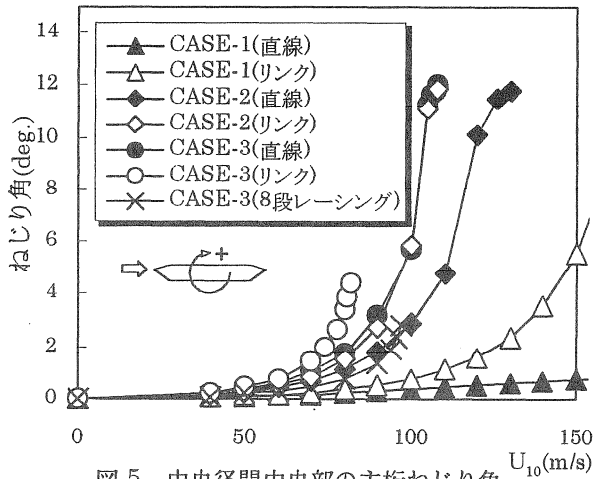


図-5 中央径間中央部の主桁ねじり角  $U_{10}$ (m/s)

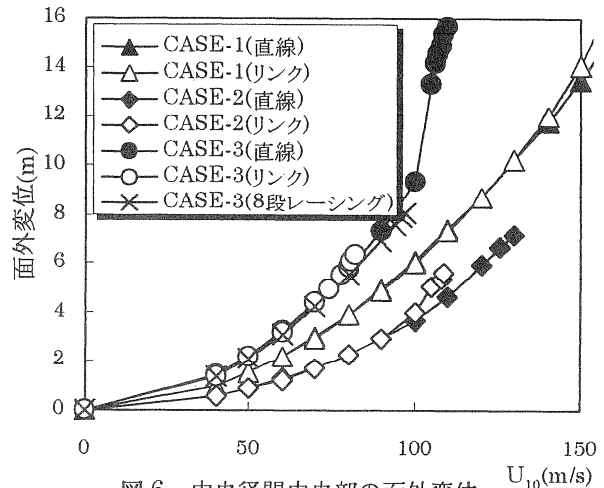


図-6 中央径間中央部の面外変位  $U_{10}$ (m/s)

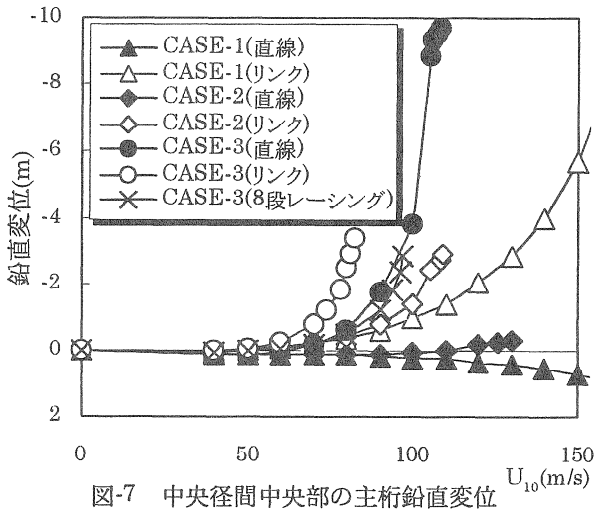


図-7 中央径間中央部の主桁鉛直変位  $U_{10}$ (m/s)

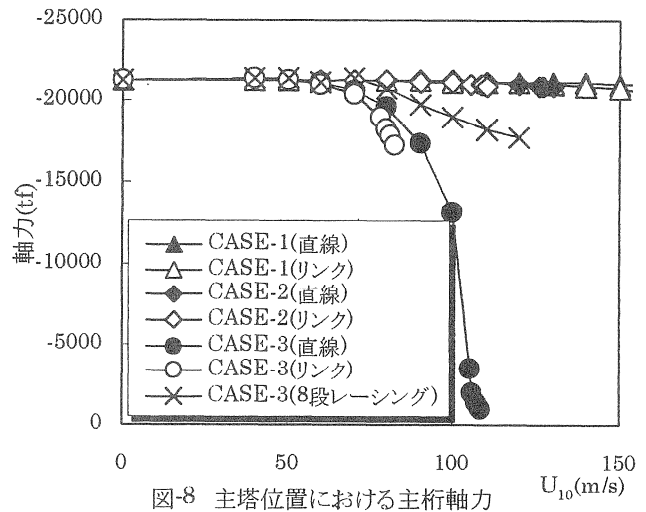


図-8 主塔位置における主桁軸力  $U_{10}$ (m/s)

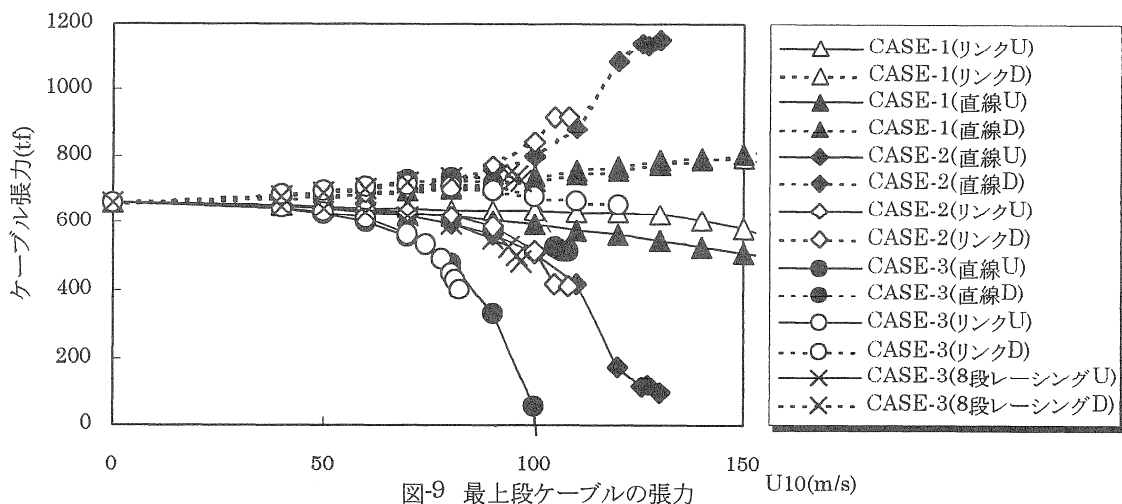


図-9 最上段ケーブルの張力  $U_{10}$ (m/s)

これは、図-10に示す風速80m/sec時の変形状態の差異から、斜ケーブルの面外方向の弛緩の抑制が、主桁のねじり角、および、鉛直変位を低減する効果を及ぼしたことによるものであることが解

る。また、表-2に示す限界風速と、限界風速時、風速80m/sec時の中央径間中央部の主桁の変形から、補助ケーブルの設置段数による効果の差異は最上段から8段までではほとんどなくなり、この程度の段数の斜ケーブルに対して面外方向の弛緩を抑制すれば、十分に効果的であることが解る。

表-2 補助ケーブルの設置段数による効果の差異

設置段数	限界風速時		風速80m/s時		
	限界風速 (m/s)	ねじり角 (deg)	ねじり角 (deg)	面外変位 (m)	面内変位 (m)
0段	82	4.436	3.409	5.871	-2.493
1段	84	4.446	2.475	5.730	-1.779
4段	90	3.603	1.224	5.561	-0.831
8段	97	2.782	0.790	5.495	-0.495
16段	99	2.976	0.789	5.476	-0.492
24段(全段)	99	2.837	0.792	5.467	-0.505



図-10 風速80m/s時の主塔および最上段ケーブルの面外挙動  
 ——— CASE-3(8段レーシング)  
 - - - CASE-3(リンク)

## 6. 結 言

中央径間長1,000mの試設計例の完成系を対象に、斜ケーブルのモデル化を変えた解析モデル、および、作用空気力の成分を変えた風荷重の載荷ケースを組合わせて静的安定解析を行った結果、ねじり発散現象よりも横ねじり座屈現象が支配的であり、設計風荷重との直接的な対比は困難であることが確かめられた。また、斜ケーブルの弛緩の考慮の有無による変形状態の差異から安定性を低下させる要因を指摘でき、その影響によって限界風速がかなり低くなることが明らかになった。

さらに、各段の2面の斜ケーブルを互いに綾状に連結する補助ケーブルシステムを用いて、面外方向の弛緩を抑制することによる効果を検証した結果、弛緩の影響を軽減でき、安定性を大きく向上させて限界風速をかなり高めること、および、最上段から数段程度の比較的長い斜ケーブルの弛緩を抑制しさえすれば、十分に効果的となることなどが明らかになった。

斜張橋スパンがより長大化した場合や狭幅員の場合、および、さらに厳しい環境下などでは、静的不安定現象の限界風速が照査風速を下回り、構造的な対策が必要となることが予想される。そのような場合に、ここで提案した斜ケーブルの面外方向の弛緩を抑制する安定化策は、経済性を大きく損なうことなく付随的な設計変更で対処でき、有効な一方策となり得るものであるといえる。また、架設時に、仮設の安定化策とすることも検討に値する。

近い将来の中央径間長1,000m~1,500m級の長大斜張橋時代の幕開けに向けて、今後、斜ケーブルの弛緩を抑制するためのより適切な構造システムを探究するとともに、その施工性や維持管理の問題についても検討を加えていくことが、実用化の課題であると思われる。

### 【参考文献】

- 1)野村国勝・中崎俊三・成田信之・前田研一・中村一史：長大吊形式橋梁の構造特性と経済性，構造工学論文集，Vol. 41A，1995。
- 2)本州四国連絡橋公社：耐風設計基準・同解説，1976。
- 3)本州四国連絡橋公社：明石海峡大橋耐風設計要領・同解説，平成2年2月。
- 4)本州四国連絡橋公社：尾道・今治ルート耐風設計基準・同解説，平成6年11月。
- 5)V. Boonyapinko, H. Yamada and T. Miyata：NonLinear Buckling Instability Analysis of Long-Span Cable Stayed Bridges under Displacement-Dependent Wind Load, Journal of Structural Engineering, Vol. 39 A, 1993。
- 6)V. Boonyapinko, H. Yamada and T. Miyata：NonLinear Buckling Instability Analysis of Long-Span Cable Stayed Bridges under Gravity and Wind Loads, Journal of Structural Engineering, Vol. 40A, 1994。
- 7)謝 旭・山口宏樹・長井正嗣：長大斜張橋の静的安定性に及ぼす桁幅の影響，構造工学論文集，Vol. 43A, 1997。
- 8)謝 旭・山口宏樹・伊藤 学：長大斜張橋の静的挙動に関する考察，土木学会論文集，No. 537/I-35, 1996。
- 9)星 登正明・宮田利雄：長大斜張橋（支間1,000m）の試設計，橋梁と基礎，建設図書，Vol. 24, No. 2, 1990。
- 10)土木学会：構造工学における計算力学の基礎と応用—応用編，構造工学シリーズ7，1996。
- 11)前田研一・林 正・瀬戸内秀規・中村一史・成田信之：長大斜張橋の立体有限変位解析，構造工学論文集，Vol. 41A, 1995。