

大 阪 市 立 大 学 工 学 部 正 員 中 井 博 大 阪 市 立 大 学 工 学 部 正 員 北 田 俊 行
(株)綜合技術コンサルタント 正 員 宮 花 邦 弘 日 本 電 子 計 算(株) 正 員 田 中 克 弘
大 阪 市 立 大 学 工 学 部 学 生 員 ○ 長 谷 川 朋 広

1. まえがき 現在、吊橋主塔の座屈設計法に関しては、未解決の課題が山積みされており、まだ検討すべき処が多々あるのが現状である。ここでは、このような現状を踏まえ、できるだけ実際の長大吊橋を対象として、その終局限界状態に至るまでの挙動、および終局強度特性について検討し、主塔の合理的な座屈設計法を探るための参考資料を提供することを目的として、研究を行っている。

2.1 解析モデル 対象とする橋梁は、中央支間長が1,000m級の長大吊橋である。本研究では、①主塔のみを取り出し骨組構造でモデル化した主塔単独解析モデルを用いた解析、および、その妥当性を調べるための②対象橋梁全体を骨組構造でモデル化した全橋解析モデルを用いた解析、の2種類の解析¹⁾を行った。以下には、それらの解析モデルの特徴を示す。

(1)主塔単独解析モデル(図-1 参照):座屈の影響が少ない塔頂部の塔柱部材は、有限変位挙動のみが考慮できる弾性梁・柱要素でモデル化した。また、その他の部材は、すべて弾塑性有限変位挙動が考慮できる箱形断面梁・柱要素でモデル化した。

(2)全橋解析モデル(図-2 参照):主塔は上述した主塔単独解析モデルと同様にモデル化し、補剛桁は弾性梁要素、主ケーブル、およびハンガーは弾塑性挙動が考慮できるロッド要素でモデル化した。また、補剛桁の横梁は剛体としてモデル化し、その弾性剛性は中心となる梁要素に与えた。

2.2 解析対象荷重 表-1 には、本研究で対象とした荷重の組合せケースを示す。なお、文献 2) では、主塔単独解析モデルを用い、荷重ケース $\alpha(D+L)+T_{30}+S_D+E$ に対する解析を行っている。この解析では、残留応力を考慮した場合、降伏・終局荷重パラメーターとも、道路橋示方書が期待する安全率 1.7 を下回るという結果を与えていた。そこで、本研究では、セットバック量、および支点移動の影響を検討するため、それらを死荷重、および活荷重とともに漸増載荷することとした。また、全橋解析モデルによる解析でも、主塔単独解析モデルの妥当性を調べるために同じ荷重ケースを設定した。しかし、セットバック量の影響を漸増する簡便な方法が見いだせなかったため、荷重ケース 3、および荷重ケース 4 は、解析の対象外とした。

2.3 荷重載荷方法

(1)主塔単独解析モデル：文献 2)によると、吊構造系から主塔へ作用する荷重、および拘束水平変位と荷重パラメータ α との関係は、表-2に示す計算結果として得られている。本解析における荷重ケース3、および荷重ケース4の場合で、セットバック量の影響を考慮する

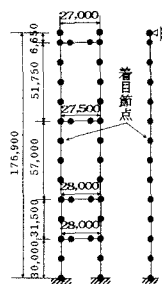


図-1 主塔単独解析
モデル(寸法単位: mm)

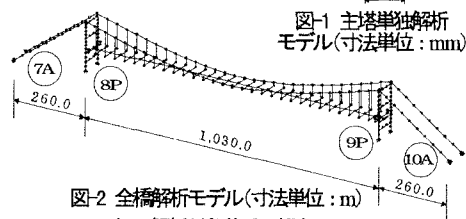


図-2 全橋解析モデル(寸法単位:m)

表-1 解析対象荷重の組合せ

荷重状態	荷重の組み合わせ
荷重ケース1 常時 (δ max時)	$\alpha(D+L)+S_D+E+T_{30}+S_B$
荷重ケース2 常時 (δ max時)	$\alpha(D+L+S_D)+T_{30}+S_B+E$
荷重ケース3 常時 (δ max時)	$\alpha(D+L+S_B)+T_{30}+S_D+E$
荷重ケース4 常時 (δ max時)	$\alpha(D+L+S_D+S_B)+T_{30}+E$

α : 荷重パラメーター (設計荷重倍率)
 D : 死荷重
 L : 活荷重
 T_{30} : 温度変化の影響
 S_D : アンカレッジ、および主塔基礎の移動の影響
 E : 主塔、およびケーブルの製作・架設誤差の影響(初期たわみ)
 S_B : セットバックによる影響

表-2 吊構造系からの反力、および変位量

	αD に対して	$\alpha(D+L)$ に対して
V_C	$15,580\alpha^{0.882} \sim 3,350$ (1)	$17,430\alpha^{0.882} \sim 3,340$ (5)
V_{GC}	$280\alpha^{1.12} \sim 190$ (2)	$330\alpha^{1.12} \sim 200$ (6)
V_{GS}	250α (3)	460α (7)
$\bar{\delta}_H$	$1,506\alpha^{0.780} \sim 1,506$ (4)	$1,686\alpha^{0.775} \sim 1,520$ (8)

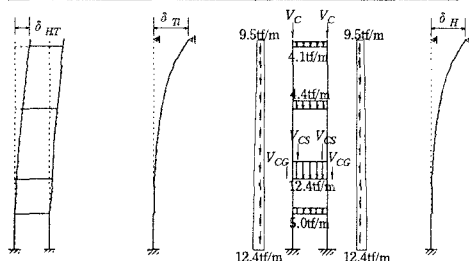


図-3 主塔への載荷荷重

際には、 $\alpha > 1$ の載荷状態で、 D による塔頂水平変位をゼロとするために、表-2 中の式(8)から式(4)を差し引いた $\delta_H = 1686 \alpha^{0.75} - 1506 \alpha^{0.8} - 0.014$ によって表される変位 δ_H を塔頂水平変位で与えている。また、温度変化の影響、支点移動の影響、製作 および吊環誤差の影響に対しては、等価な塔頂水平変位で与えるものとした。

(2) 全橋解析モデル：主塔単独解析モデルとは異なり、図-4 に示すとおり、支点移動の影響を入力した。製作架設誤差の影響は、塔頂における初期たわみとして導入した。そして、温度変化の影響に対しては、前処理解析を行って、主塔に初期応力、また補剛桁に初期断面力として、それらの影響を導入した。

3. 解析結果とその考察 各解析モデル・各荷重ケースにおける降伏・終局荷重パラメータを表-3、および図-5～図-7 に示す。

(1) 降伏強度 上表中に示す α_{12} は、圧縮残留応力 σ_{rc} を考慮して低減した見かけの降伏点 $\sigma_Y^* (= \sigma_Y - \sigma_{rc})$ を用い、弾性有限変位解析により評価した降伏荷重パラメータである。文献3)では、実際に建設されたラーメン橋脚2例、バランスド・アーチ橋2例、ニールセン橋3例、および斜張橋2例に対して α_{12} を計算し、これらの橋梁構造物で $\alpha_{12} \cong 1.7$ となることを明らかにしている。対象とした吊橋主塔では、全荷重ケースとも $\alpha_{12} = 1.7$ を下回り、その他の橋梁構造物に比べて、かなり小さな値となっていることがわかる。また、残留応力を無視した場合、主塔単独解析モデルではセットバック量の影響を考慮した荷重ケース3、および荷重ケース4で、また全橋解析モデルでは荷重ケース1、および荷重ケース2で、道路橋示方書が期待する安全率1.7を上回った。

(2) 終局強度 主塔単独解析モデルでは、残留応力を考慮した場合、終局荷重パラメータ α_{w2} がいずれの荷重ケースにおいても、道路橋示方書が期待する安全率1.7を下回っている。また残留応力を無視した場合、 α_{w1} がいずれの荷重ケースにおいても、1.7を上回った。しかし、全橋モデルでは、残留応力を考慮した場合、および無視した場合とも、終局強度は、道路橋示方書が期待する安全率1.7を上回る結果となった。

(3) 両モデルの比較 表3、および図-7を用いて両解析モデルの数値結果を比較すると、全橋モデルで、残留応力を考慮した場合、降伏・終局強度とも19%、残留応力を無視した場合で降伏強度15%、および終局強度10%の上昇がそれぞれ認められた。この表において、 α_{12} および α_{w1} は、それぞれ残留応力を無視した降伏、および終局荷重パラメータである。また、 α_{12} および α_{w2} は、それぞれ残留応力を考慮した降伏・終局荷重パラメータである。

4. まとめ 残留応力を考慮した場合、セットバック量の影響、および支点移動の影響を考慮しても、文献2)の結果と同様に、降伏強度は依然として安全率1.7を下回った。これは、吊橋主塔の断面設計を行う際に、残留応力が考慮されていないためであると考えられる。また、全橋解析モデルと比較すると、主塔単独解析モデルによる解析は、かなり安全側の強度を推定していることがわかった。しかし、全橋解析モデルによる解析は、計算作業の効率化などの面から、現時点において実用的であると言えない。したがって、今後、より精度の高い主塔単独解析モデルを開発する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 北田俊行・大南亮一・丹性光則・田中克弘：ケーブルを用いた鋼橋の耐荷力解析用の汎用プログラム開発、構造工学における数値解析法シンポジウム論文集、日本橋樑造協会、第13巻、pp.89～94、1989年7月
- 2) Miyahara, K., Kitada, T. and Shimoda, K.: Elasto-Plastic Finite Displacement Behavior and Ultimate Strength of Suspension Bridge's Tower, Proceedings of the 3rd East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-3), Seoul, Korea, pp.237～242, September 20～22, 1993
- 3) 関西道路研究会・道路橋調査委員会：長大吊橋の耐荷力解析とコンピューターによる視覚化に関する研究、1993年10月



図-4 支点移動の影響の入力状態

表-3 降伏・終局荷重パラメータ

解析モデル・荷重ケース		荷重パラメータ			
		α_{y1}	α_{y1}	α_{y2}	α_{y2}
主塔単独解析 モデル	CASE1	1.747	1.680	1.582	1.325
	CASE2	1.703	1.630	1.563	1.298
	CASE3	1.913	1.870	1.639	1.425
	CASE4	1.845	1.770	1.614	1.382
全橋解析モデル	CASE1	2.075	2.000	1.825	1.455
	CASE2	2.010	1.940	1.800	1.415

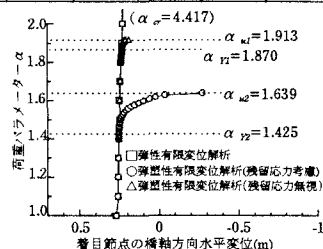


図-5 荷重パラメータ変位曲線 (主塔単独解析モデル、荷重ケース3)

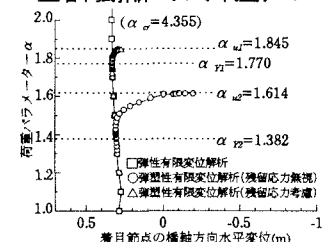


図-6 荷重パラメータ変位曲線 (主塔単独解析モデル、荷重ケース4)

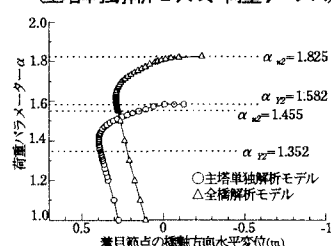


図-7 両モデルの荷重パラメータ変位曲線の比較 (荷重ケース1)