

長大吊橋主塔の橋軸方向面内における弾塑性挙動と耐荷力

東京都
首都大学東京
鹿島建設（株）

○正会員
正会員
正会員

古澤 智章
野上 邦栄
山沢 哲也

1. はじめに

現在、わが国では吊橋を中心とした海峡横断プロジェクトが計画されているが、その実現のためには建設コストの低減や工期の短縮が命題となっており、特に吊橋主塔においては、安全性、耐久性、経済性の立場から、新形式、新断面形状、および新構造材料に関する研究開発が必要不可欠となる。そこで、吊橋主塔の構造形式に着目すると、これまで、わが国では長大吊橋の主塔は全て鋼製が採用されてきた。一方、欧州では世界を代表する吊橋を中心にコンクリート主塔が多く建設されている。わが国でこれまでコンクリート主塔（以後、RC主塔と呼ぶ）が建設されなかった最大の理由として自然条件の厳しさが挙げられ、フレキシブルで軽量の鋼製主塔に比べ質量の非常に大きなRC主塔では、設計が非常に困難であったためである。しかし、コンクリート材料に着目すると、現在その強度の向上は著しく、わが国の厳しい設計条件をクリアすることも可能である。さらに、鋼製主塔に比べ施工期間が短く工費も低減可能であるとの報告¹⁾もあり、RC主塔もこれらの面で競争可能であると考えられる。また、これらの主塔とは別にそれぞれの構造材料の特性を生かした鋼・コンクリート複合構造の主塔も有望な形式であると考えられる。したがって、本研究では長大吊橋の主塔として鋼構造、RC構造、および複合構造に着目し、主塔単独モデルの橋軸方向面内の弾塑性挙動、および耐荷力について数値解析により比較検討することを目的としている。

2. 解析モデル

解析モデルは、中央径間長 1500m の 3 径間 2 ヒンジ吊橋における図-1 のような 4 層ラーメン形式の主塔であり、塔高 200m を有する。鋼製主塔は板厚 42~44mm のモノセル鋼断面で鋼材には SM570 材を、RC主塔は塔基部で充実断面、塔中間部において中空断面でコンクリートの圧縮強度は $\sigma_{ck} = 58.8\text{N/mm}^2$ 、鉄筋には SD345 (D51) を、複合主塔はサンドウィッチ構造の合成箱型断面（中空断面）でコンクリートの圧縮強度は $\sigma_{ck} = 58.8\text{N/mm}^2$ 、鋼材には SM490Y 材を用いている。

3. 主塔のモデル化と解析条件

主塔は、図-2 のようにケーブル架設前（フリースタANDING状態）とケーブル架設後（完成系状態）を対象とし、一端固定多端自由のフリースタANDING状態とケーブルを極めて長いトラス要素と仮定した完成系状態としてモデル化している。図中の V_{cmax} はケーブルの最大鉛直反力、 g は塔の自重、 W_q は風荷重である。構成する各要素の構成則は、鋼材にはバイリニア型、コンクリートには圧縮域が非線形曲線、引張域が軟化領域を持つ弾塑性型、鉄筋には完全弾塑性型、ケーブルとサドルには弾性体と仮定した。また、鋼部材はシェル要素、コンクリート部材はソリット要素、鉄筋はその配置方向のみの材料特性を与えた直交異方性をもつシェル要素としてモデル化している。初期たわみは、塔全体に塔高 h の 1/200, 1/1000, 1/5000 の最大変位 δ_0 を持つ 1/4 正弦波を導入している。以上のモデル化のもと、表-1 のような荷重の組み合わせについて弾塑性有限変位解析を行った。表中の α は荷重倍率である。

4. 弾塑性挙動と耐荷力

ここでは、完成系において最も厳しい荷重条件である $\alpha(V_{cmax} + g + W_q)$ について 3 主塔の解析結果を図-3 から 5 および表-2 に示す。鋼製主塔についての解析結果を示したのが、図-3 である。(a)は着目部（最大水平変位発生位置）水平変位と荷重倍率の関係であり、荷重倍率 1 倍程度とかなり早い段階から非線形性を示し、その後、徐々に非線形性が増し終局に至ることがわかる。(b), (c)は荷重を漸増載荷させた場合の主塔に作用する軸力と曲げモー

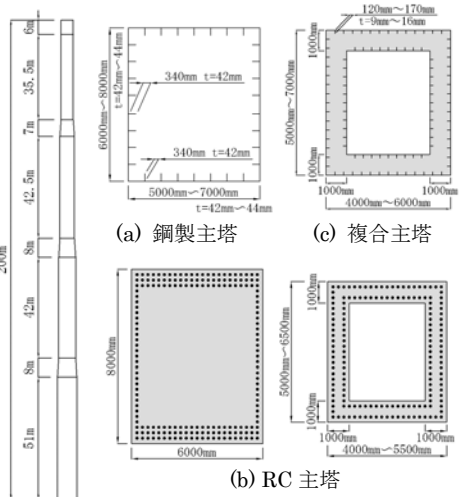


図-1 主塔構造及び断面形状

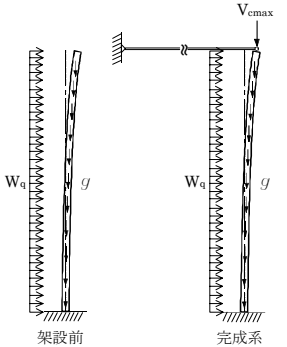


図-2 主塔のモデル化

表-1 荷重条件

ケーブルの状態	荷重条件
架設前	αg
	$\alpha W_q + g$
架設後	$\alpha(V_{cmax} + g)$
	$\alpha W_q + (V_{cmax} + g)$
	$\alpha(V_{cmax} + g) + W_q$
	$\alpha(V_{cmax} + g + W_q)$

Keyword: 長大吊橋、複合主塔、終局強度、弾塑性有限変位解析

〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 TEL.(0426)-77-1111 FAX.(0426)-77-2772

メントの分布であり、横軸はそれぞれを降伏軸力、降伏モーメントで割って無次元化している。終局時 ($\alpha=1.91$) には軸力、曲げモーメント共に塔基部から 3/4 付近で最大値を示している。なお、終局状態において塔基部、基部から 1/2, および 3/4 付近で座屈が発生している。次に、RC 主塔について解析結果を示したのが、図-4 である。(a)より荷重変位曲線は荷重倍率 2.7 程度から急激に非線形性が増し終局を迎えることがわかる。また、(b), (c)より断面力の最大値は RC 主塔の場合も塔基部から 3/4 付近で示し、さらにこの部分における亀裂が進展することで終局状態を迎えている。なお、終局状態では塔基部から 3/4 付近および塔基部付近を中心に非弾性領域が進展している。最後に複合主塔についての解析結果を示したのが、図-5 である。

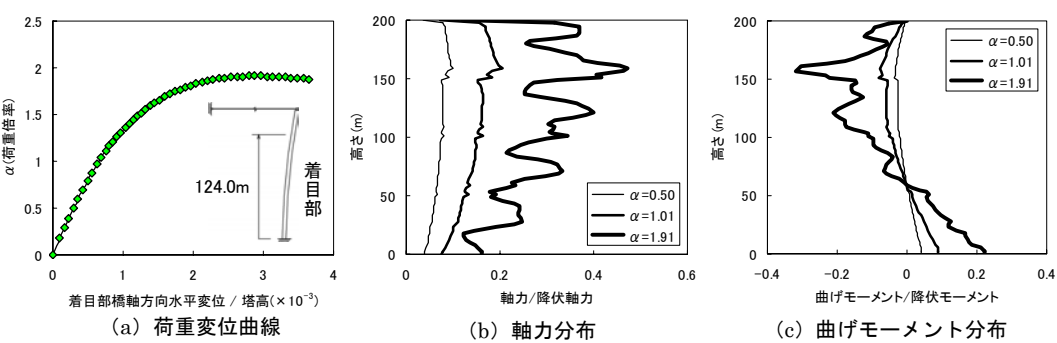


図-3 鋼製主塔の弾塑性挙動と耐荷力 荷重条件: $\alpha (V_{cmax} + g + W_q)$

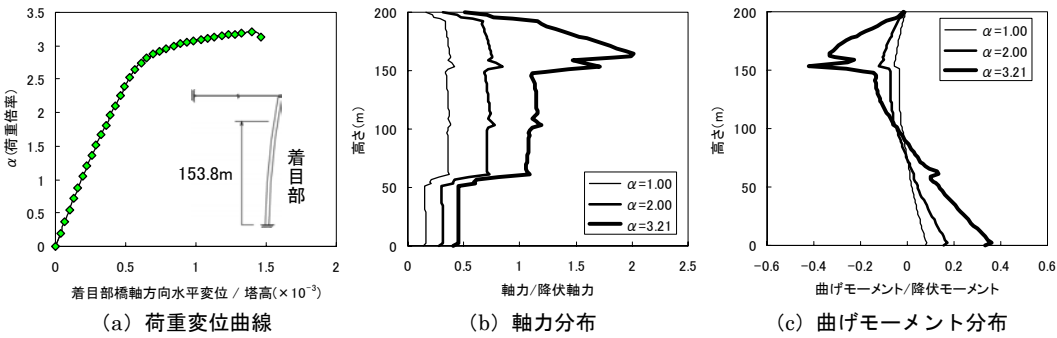


図-4 RC 主塔の弾塑性挙動と耐荷力 荷重条件: $\alpha (V_{cmax} + g + W_q)$

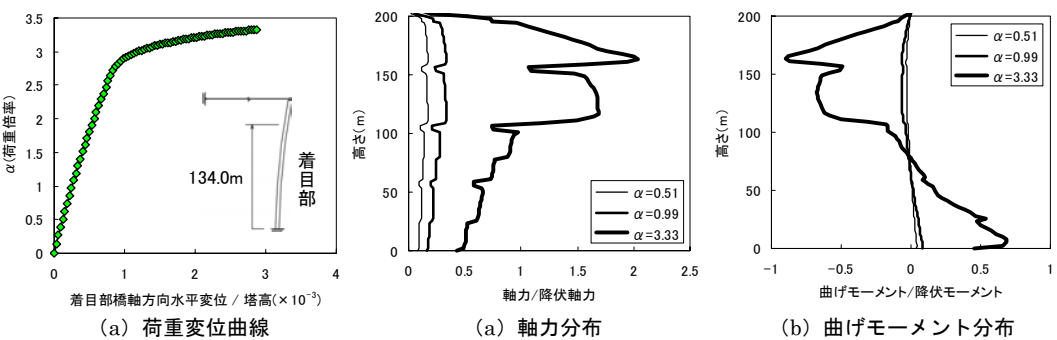


図-5 複合主塔の弾塑性挙動と耐荷力 荷重条件: $\alpha (V_{cmax} + g + W_q)$

(a)より荷重変位曲線は RC 主塔のケースと同様に荷重倍率 2.7 程度から急激に非線形性が増し終局を迎えている。また、(b), (c)より断面力についても同様に塔基部から 3/4 付近で最大値を示し、さらにこの部分における亀裂が進展することで終局状態を迎えている。なお、断面力はコンクリートを基準に無次元化している。終局状態においては塔基部から 3/4 付近および塔基部付近を中心に非弾性領域が進展している。表-2 は 3 主塔の終局時の荷重倍率である。終局時の荷重倍率は架設時では RC 主塔が 1.40 倍と最も低く、完成系ではケーブル最大鉛直反力と風荷重の組み合わせ荷重に対して鋼製主塔が 1.91 倍と最も低い。一方、複合主塔は架設系では鋼製主塔と同等の荷重倍率を有し、完成系では最も高い 3.33 倍となった。

5. まとめ

- 1) 完成系においては主塔の材質に関係なく塔基部から 3/4 付近が終局強度支配しており、鋼製主塔は座屈が、RC 主塔および複合主塔はコンクリートの亀裂が進展することで終局に至る。
- 2) 架設段階において、RC 主塔での荷重倍率が最も低く風荷重による影響が大きい。また、鋼製主塔および複合主塔は 2.5 倍程度と同等の値を持つ。
- 3) 完成系での終局時の最小荷重倍率は鋼製主塔では 1.91 倍と最も低く、複合主塔は 3.33 倍と最も高い。

参考文献

1) 神弘夫・津村直宣・高尾道明：長大橋における複合構造主塔の試設計、土木学会第 54 回年次学術講演会、I-A134、1999

表-2 3 主塔の終局強度

	荷重条件	初期たわみ	荷重倍率		
			鋼製主塔	RC 主塔	複合主塔
架設前	αg	1/200	7.26	8.88	7.74
		1/1000	8.43	10.65	9.12
		1/5000	8.87	11.25	9.62
	$\alpha W_q + g$	0	2.50	1.40	2.49
架設後	$\alpha (V_{cmax} + g)$	1/200	2.15	4.01	3.90
		1/1000	2.20	4.26	3.99
		1/5000	2.21	4.27	4.04
	$\alpha W_q + (V_{cmax} + g)$	0	6.84	6.47	9.45
	$\alpha (V_{cmax} + g) + W_q$	0	2.07	3.52	3.74
	$\alpha (V_{cmax} + g + W_q)$	0	1.91	3.21	3.33