

長大吊橋複合主塔の橋軸方向面内の終局強度特性

首都大学東京大学院 学生会員 ○関 裕太

首都大学東京大学院 フェロー会員 野上 邦榮

首都大学東京大学院 正会員 岸 祐介

1. 目的

わが国では本州四国連絡橋プロジェクト終焉後、吊橋を中心として、大規模海峡横断橋プロジェクトが検討されてきた。海外では、本四高速の技術提供による韓国のウルサンハーバー橋建設(2015 年完成)や、ベトナムのビンカイン橋建設など長大橋プロジェクトが進行し、今後さらなる長スパン化、経済性、施工の合理性が要求される。特に、吊橋の主要な構成部材の一つである主塔は、吊橋全体のコストやデザインに大きな影響を与えるため、長大化に対して、安全性、耐久性、経済性の立場から、新構造および新材料に関する研究を進める必要がある。

吊橋主塔は、明石海峡大橋および瀬戸大橋で代表されるわが国の長大橋や米国の多くの長大橋において鋼材が用いられている。一方、欧州のグレートベルトイースト橋やハンバー橋などではコンクリートが採用されている。これまで日本で鋼製主塔のみが用いられたのは、地震が多発し、地盤が比較的弱い場所での建設が多いため軽量の主塔が望ましく、さらに米国の架橋技術の伝統を継承したことによる。

近年、鋼とコンクリートの双方の特長を生かした複合構造が高速道路の橋脚等に採用されている。複合構造の代表であるコンクリート充填鋼管(CFT)はコンクリートを充填することで鋼管の座屈を遅らせ強度が向上し、コンクリートの型枠が不要なため、施工の合理化、コスト削減につながるという報告がある。また、複合構造を吊橋や斜張橋の主塔に用いられた実績はないが、構造的にも経済的にも実現可能であるという報告がある¹⁾。したがって、吊橋主塔への選択肢の一つとして複合主塔が考えられる。

このような背景から、本研究では 3 径間吊橋を対象に、その主塔に複合構造を採用した際の橋軸方向面内における弾塑性挙動および終局強度特性を数値解析によって明らかにし、複合主塔の有効性について検討する。特に合成断面では、鋼とコンクリートとの間のすべりおよび剥離挙動を起こすことがわかっており、これらの挙動を考慮したモデル化と耐荷力への影響について検討する。

2. 対象吊橋

今回対象とする吊橋は、本四高速の設計要領により応力度照査および座屈安定度照査を満足するように設計された断面を用いた²⁾。図.1 に示すように中央径間 1500m、側径間 500m、径間比 1:3:1 の 3 径間 2 ヒンジ吊橋である。複合主塔の断面は、図.2 のように鋼製型枠の中にコンクリートを充填したサンドウィッチ構造の合成箱型断面である。壁厚は 1m と均一であるが、塔頂部に向かって断面寸法が減少していく中空変断面である。また、鋼材は SM490Y、コンクリートは設計基準強度が 58.8kN/mm^2 のものを用いるものとする。主塔の断面諸元を表.1 にまとめる。主塔構造は図.3 のように塔高 212m の塔柱を有する 5 層ラーメン形式であり、塔柱間隔は塔基部で 28m、塔頂部で 26m である。

3. 解析手法

吊橋には、死荷重、活荷重、風荷重、地震荷重が作用する。これらの組み合わせ荷重により主塔はケーブルか

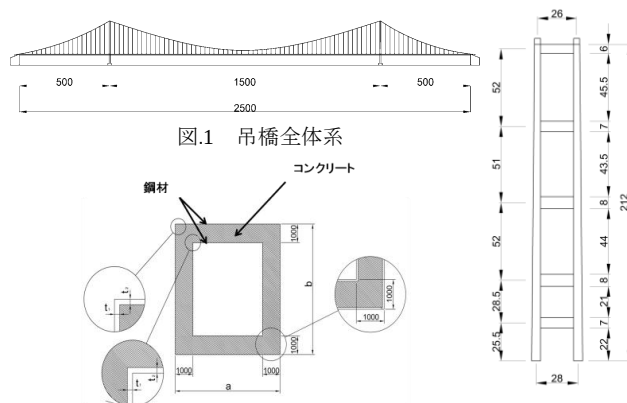


図.2 複合主塔断面図(単位:mm)

図.3 主塔全体図
(単位:m)

表.1 主塔断面諸元

塔柱位置	板厚		断面寸法		断面積		
	ウェブ板厚 $t_1(\text{mm})$	フランジ板厚 $t_2(\text{mm})$	橋軸直角 $a(\text{mm})$	橋軸平行 $b(\text{mm})$	鋼材(mm^2)	コンクリート (mm^2)	合計(mm^2)
塔頂部	9	9	4000	5000	252000	13748000	14000000
①	9	9	4274	5274	271728	14824272	15096000
②	9	9	4760	5760	306720	16733280	17040000
③	12	12	5245	6245	455520	18524480	18980000
④	12	12	5625	6625	492000	20008000	20500000
⑤	16	16	5880	6880	688640	20831360	21520000
塔基部	16	16	6000	7000	704000	21296000	22000000

らの鉛直圧縮力 V および橋軸強制変位 δ_0 を受けるはり-柱部材として、図.4 に示すようなばねで置き換えたケーブルと塔柱からなる完成状態の主塔ばねモデルにより再現した。このモデルによる解析手順を図.5 に示す。主塔ばねモデルの解析条件として、主塔に作用する荷重条件 V - δ_0 曲線(図-9)およびケーブルのばね定数 k については、骨組要素による吊橋全体系モデルの弾性有限変位解析により算出し、主塔ばねモデルを構成し、弾塑性有限変位解析を実行することで終局強度およびすべり、剥離の影響を検討する。鋼材、コンクリートの構成則は図.6、図.7 のように近似した。活荷重の荷重条件については、既存の研究成果から死荷重を載荷した状態で主塔の応力状態が厳しくなる活荷重を全径間に載荷したパターンと活荷重を中央径間および側径間に載荷したパターンの2種類の荷重ケースを設定した。鋼とコンクリートとの境界部の挙動は、すべり、剥離を考慮した interface 要素によるモデル化を行う。interface 要素の構成則は図.8 に示すように既存の研究を参考に定義、導入した³⁾。

4. 終局強度特性

鋼とコンクリートの境界部については、すべり、剥離を考慮した interface 要素とそれらを見做した共有節点モデルとの比較を行う。図.9 に示すように両ケースとも終局強度/設計荷重は2.7倍以上確保されており、十分な安全性が確認できた。しかし、interface 要素モデルの耐力力は共有節点モデルのそれに比して25%低下している。interface 要素モデルの終局時の状態としては、図.10 および図.11 から明らかなように塔基部から2/3付近の引張領域で鋼とコンクリートが剥離を起こし、曲げモーメントが卓越して、コンクリートは弾性限界を迎えている。また最も厳しい荷重パターンでは、塔高150m付近でひずみ軟化を起こしていることが確認できた。

5. 結論

今回の試設計では、最も厳しいケースでも十分な安全性が確保されており、コンクリートの破壊により終局を迎えていることが確認できた。合成断面の FEM でのモデル化では、すべりを考慮したモデル化の方がより耐力力が低下することを確認できた。

参考文献

- 1) 中村：鋼・コンクリート合成主塔の長大橋への適用 構造工学論文集 Vol.46A, 2000
- 2) 神, 津村, 高尾：長大吊橋における複合構造主塔の試設計 土木学会全国大会 2000
- 3) 小林, 角掛, 大内：大幅厚比角形コンクリート充填鋼管部材の力学性状に関する研究 コンクリート工学年次論文集 2007

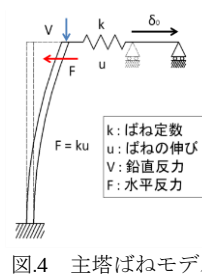


図.4 主塔ばねモデル

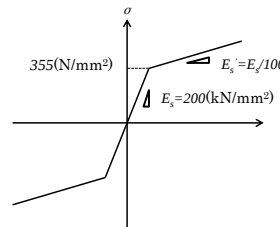


図.6 構成則 (SM490Y)

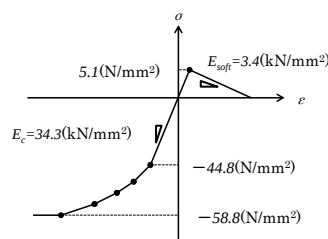


図.7 構成則 (コンクリート)

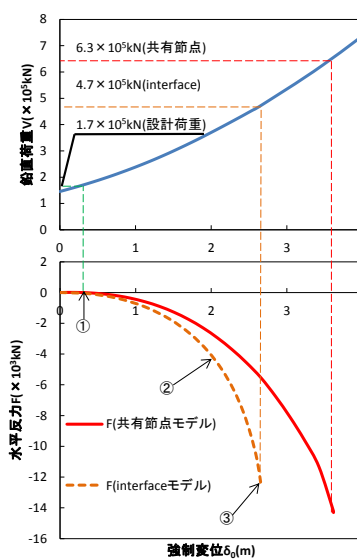


図.9 複合主塔終局強度特性

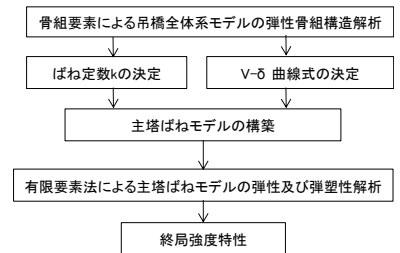


図.5 解析フロー

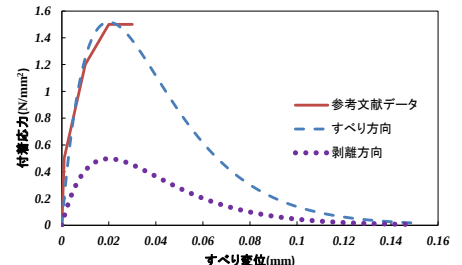


図.8 構成則 (interface 要素)

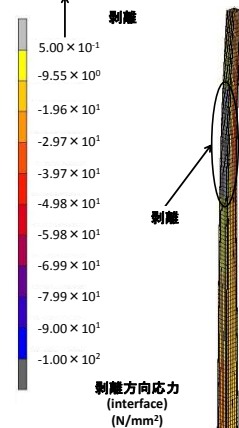


図.10 終局時剥離分布図

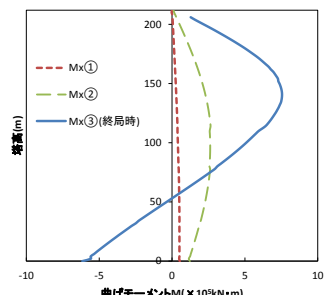


図.11 曲げモーメント分布