

(I-89) 簡易ばね系モデルを用いた吊橋主塔の耐荷力挙動と精度

東京都立大学 学生員 西出 大
東京都立大学 正会員 野上 邦栄

1. はじめに

現在計画されている海峡横断プロジェクトでは、経済性および耐久性を追及した、さらに景観に配慮した合理的設計法の開発が望まれている。このような設計法の確立のためには、本四架橋などの実績の基、鋼上部設計基準¹⁾および主塔設計要領²⁾などの設計法の見直しを行ない、より自由度の高い設計を追求する必要がある。このような状況において、性能設計への動きを考える時、吊橋全体系および構成要素の耐荷力挙動を明確にしておくことは極めて重要である。ところで、野上³⁾は吊橋主塔の耐荷力解析法として、塔柱単体としての剛体ばねモデルによる耐荷力評価法(以下、簡易解法)を提案し、その終局強度特性を明らかにしている。しかし、この簡易解法の解の信頼性については、これまで不明であった。そこで、本研究では超長大吊橋主塔を対象にして、より厳密な弾塑性有限変位理論(以下、厳密解法)に基づく骨組構造解析との精度比較を行い、簡易解法の有効性を明らかにする。さらに、橋軸方向および橋軸直角方向の耐荷力挙動、橋軸方向と橋軸直角方向の連成挙動について解析的検討を行う。

2. 解析方法

簡易解法は、要素間にばねを配置し要素を剛体と見なすもので、ばねにより変形を受け持たせた弾塑性有限変位解析法である。そのばね定数は、鋼材の完全弾塑性体としての応力・ひずみ関係から決定している。9セルの塔断面は、断面積、断面2次モーメントなどが等価な1セルの矩形断面に置き換えている。初期たわみとして $u_0/h = 1/2000$ の正弦半波モードを導入し、残留応力は溶接形直線分布で $\sigma_{rc} = 0.5\sigma_y$ とした。橋軸方向の主塔は、ケーブルを介して塔頂部に鉛直反力と水平変位を生じ、同時にケーブルにより水平変位が強制され水平反力を生じることから、塔柱単体モデルである簡易解法の橋軸方向モデルでは図1のように、ばねを介して水平方向強制変位を受ける関係で与えられ、橋軸方向にはケーブル剛性をばね k で置き換えてモデル化している⁴⁾。橋軸直角方向については、水平材を曲げばね K_b 、 K_t でモデル化し(図2)、立体解析の際には2軸曲げを受けるはり一柱としてモデル化する。

厳密解法は、閉断面はり要素と柔ケーブル要素からなる弾塑性有限変位理論⁵⁾により定式化された骨組構造解析法である。塑性域の進展は、部材を多数のセグメントに分割し、各セグメントの弾塑性状態によって要素の剛性を評価する手法を用いている。各構成要素の構成則は、塔・桁については完全弾塑性体、ケーブルは弾性体と仮定している。また初期不整などは考慮していない。

3. 解析モデル

解析対象とした超長大吊橋は、中央径間長3000mの3径間連続補剛吊橋であり、主桁は桁高7mの1室流線型箱桁で断面積 $1.49m^2$ 、断面2次モーメント $14.5m^4$ 、主塔は9セルの箱型断面で、主塔高さ350mを有する6層ラーメン形式である。主塔塔柱の断面諸元は、断面積が $3.846m^2 \sim 8.776m^2$ 、断面2次モーメントが $50.7m^4 \sim 121.423m^4$ である。図3にモデル図を示す。使用鋼材は、桁にSS400、塔柱にSM570、塔水平材にSM490Yを用いた。荷重条件は、死荷重および活荷重の全径間満載荷重であり、その大きさは死荷重が220.6kN/m、活荷重が26.5kN/mである。

4. 解析結果

橋軸方向の解析では、ケーブルを介して塔頂部に鉛直反力 P と水平変位 δ を生じ、同時に水平反力 $F = k(\delta - \delta_0)$ を生じる。この P - δ 関係を全体系解析した結果が図4であり、図中の曲線(1)は弾塑性有限変位解析、曲線(2)は弾性有限変位解析である。 P - δ 関係を満足するように F - δ 関係を解析したのが図5である。これより、 P - δ 関係は、変位の2次関数で表され、 F 値も正から負までの値を取ることが分った。また、厳密解法による P - δ 曲線を用いて F - δ 関係を簡易解法で解析した曲線は、厳密解法の曲線に良く一致し、簡易解法の精度が確認できた。さらに、ここでは紙面の都合で省略したが、曲げモーメント分布や断面の塑性化の進展なども明らかにした。

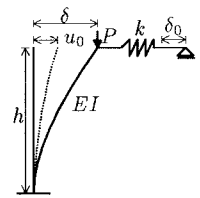


図-1 橋軸方向主塔モデル

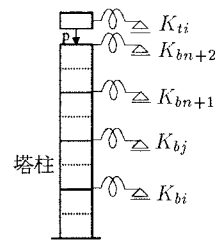


図-2 橋軸直角方向主塔モデル

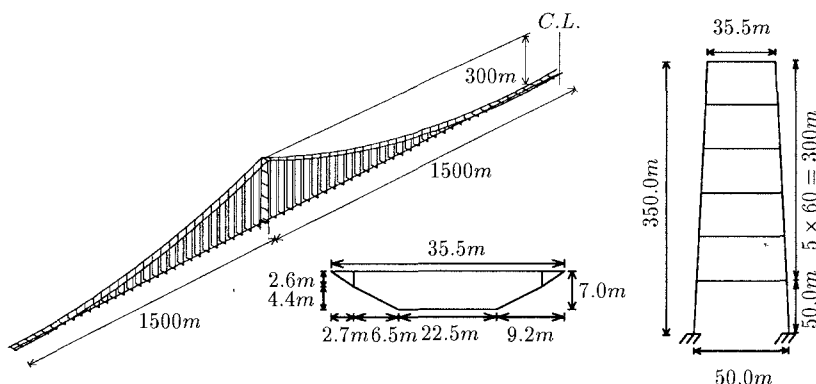


図-3 解析モデル

橋軸直角方向の解析は、水平材剛性を設計水平材剛性で割った ($f = EI/EI_0$) 水平材剛性比をパラメーターにして解析を行った。その結果を図6の破線に示す。これより、 f を0.1程度にまで低下させても、耐力に影響を与えず、逆に必要以上に水平材の剛性を高くしても耐力は上がらないことが分かった。

橋軸方向と橋軸直角方向の連成の影響は、厳密解法における吊橋全体系の立体解析による終局強度が、橋軸方向のみに注目した平面解析による終局強度を下回るかどうかで評価できる。水平材剛性比をパラメータにした厳密解法による解析では、水平材剛性比0.1以下において連成の影響が発生した。簡易解法での解析結果は図6に示す通りであるが、水平材剛性比が大きい時は橋軸方向の耐力が支配的であるが、水平材剛性比が0.1付近から立体解析の値が橋軸方向の耐力を下回り始め、橋軸直角方向の耐力に近づいていく。このことから、対象としたモデルでは橋軸方向と橋軸直角方向の連成は水平材剛性比0.1付近から始まり、独立した平面として扱える水平材剛性比は0.1程度までであるといえる。また、簡易解法と厳密解法の立体解析の結果より、ここでも簡易解法の精度を確認することができた。

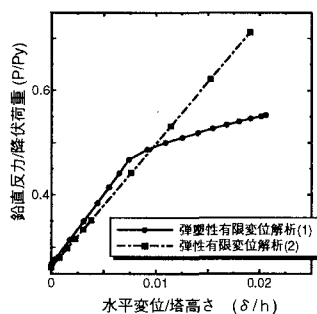


図-4 $P-\delta$ 関係のグラフ

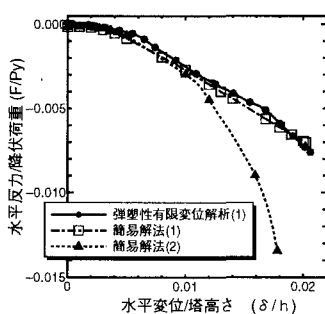


図-5 $F-\delta$ 関係のグラフ

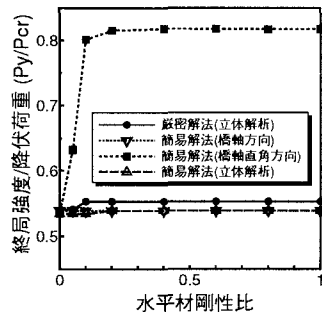


図-6 連成の影響

以上、本研究により得られた成果をまとめると、まず、橋軸方向の耐力挙動を明らかにすることができ、さらに、簡易解法の精度確認ができた。また、水平材剛性比を変化させた橋軸直角方向の耐力解析では、水平材剛性を設計値の0.1倍程度に低下させても、橋軸直角方向の耐力にあまり影響を与えないことが分かった。また橋軸方向と橋軸直角方向の連成作用による耐力への影響は、橋軸方向の耐力が支配的であるため、水平材剛性が設計値の0.1倍程度まで発生しなかった。このように、現行設計法は橋軸直角方向の剛性を必要以上に大きくする設計になっており、より合理化できる余地が残されていることも明らかになった。

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋上部構造設計基準・同解説、1995
- 2) 本州四国連絡橋公団：吊橋主塔設計要領(案)・同解説、1989.
- 3) 伊藤文人・野上邦栄・田中充夫：ラーメン形式吊橋主塔の耐力解析，構造工学論文集，Vol.34A，pp.131-144，1988
- 4) 野上邦栄・西出 大・成田信之：超長大吊橋主塔の橋軸方向面内の耐力特性，鋼構造年次論文報告集，第6巻，1998.
- 5) 謝旭：長大斜張橋の複合非線形性と安定性に関する解析的研究，埼玉大学博士論文，1996.