

1. はじめに

近年、鋼斜張橋の発展は目覚しく、本州四国連絡橋公団による世界最長の支間長を誇る多々羅大橋 (890m) は記憶に新しく、その支間長は 1000m に達しようとしている。ところで斜張橋の設計において主桁の安定照査法は明確にされていないのが現状である。斜張橋全体系の耐荷力照査を種々の方法で行われている耐荷力計算は、弾塑性有限変位解析法¹⁾ (以下、厳密解法) が最も厳密な評価法と考えられる。しかしながら、計算時間や費用の問題により、計画段階から積極的に利用する上では、制約が生じる。そのため、より簡単に精度よく斜張橋の耐荷力を評価できる簡易解析法である有効接線弾性係数法²⁾ (以下、 E_f 法) が提案されているが、その有効性について定量的に検討した研究は少ない。ここでは E_f 法の結果を厳密解法と比較することにより明らかにする。また道路橋示方書³⁾ (以下、道示) による安全性照査法はその適用支間長を 200m までとしそれを超えるものについては、道示に準じて各公団、自治体が独自の設計基準に基づいて設計が行われている。そこでこれまでに提案されている、より合理的な安全性照査法について現行照査式と比較検討した。

2. 耐荷力解析

簡易解析法の一つである E_f 法は、非弾性の影響を柱の基準耐荷力曲線により得られる見かけの弾性係数を用いた固有値解析から全体系の耐荷力を評価する解析法であり、解析手順は以下の通りである。

1. 初期条件に基づき、微小変位解析により断面力を算出し、幾何剛性行列 $\mathbf{K}_G$ を作成する。
2. $|\mathbf{K}_E(E_{fi}) + \kappa \mathbf{K}_G(N)| = 0$ から最小固有値 κ を求める。
3. 2 で求まった κ から座屈荷重 $N_{cri} = \kappa N_i^0$ を算出し、有効座屈長 $l_{ei} = \pi \sqrt{E_{fi} I_i / N_{cri}}$ 、換算細長比 $\lambda_i = 1/\pi \sqrt{\sigma_y/E} l_{ei}/r_i$ を求め、基準耐荷力曲線から終局強度 σ_{ui} を求める。
4. 座屈応力 σ_{cri} と終局強度 σ_{ui} を用いて $E'_{fi} = \sigma_{ui}/\sigma_{cri} E_{fi}$ から E_f を算出し、収束するまで繰り返し計算を行う。一方、厳密解法は、構造物の耐荷力を最も精度良く評価できる解析法である¹⁾。この解析法は、幾何学的非線形性と共に材料非線形性を考慮した複合非線形問題として定式化し、塑性域においては Prandtl-Reuss のひずみ増分理論と von Mises の降伏条件を用いている。また数値計算法には、Newton-Raphson 法 と組み合わせて求める変位増分法を用いた。なお、局部座屈の影響は考慮していない。

3. 安全性照査法の提案

$$\sigma_c + \frac{\sigma_{bcx}}{\left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eax}}\right)} + \frac{\sigma_{bcy}}{\left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eay}}\right)} \leq \sigma_{cal} \quad \dots\dots\dots (1-a)$$

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{caz}} + \frac{\sigma_{bcx}}{\sigma_{bax} \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eax}}\right)} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{bay} \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eay}}\right)} \leq 1 \quad (1-b)$$

$$\sigma_c + \sigma_{bx} + \sigma_{by} \leq \sigma_{cal} \quad \dots\dots\dots (2-a)$$

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{caz}} + \frac{\sigma_{bx}}{\sigma_{bax}} + \frac{\sigma_{by}}{\sigma_{bay}} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (2-b)$$

$$\kappa \frac{\sigma_{cal}}{\sigma_{cao}} \geq \nu \quad \dots\dots\dots (2-c)$$

式 (1) は、道路橋示方書 (以下、道示) で定義されている安全性照査式であり、応力度照査式 (1-a)、安定照査式 (1-b) ともに作用軸圧縮応力度を微小変位解析で求めるため、分母の付加曲げモーメントの影響項により幾何学的非線形性を考慮している。それに対して、今回提案する応力度照査式 (2-a)、安定照査式 (2-b) においては、有限変位解析の実施を前提としているため、付加曲げモーメントの影響項を省略している。また、式 (2-c) は、 E_f 法の固有値 κ が斜張橋全体系の耐荷力を表わす指標と考え安全率 $\nu (= 1.7)$ を満足するかによって安定照査する式である。

4. 解析モデル

今回対象とした中央径間 600, 1000, 1400m のマルチファンタイプ鋼斜張橋である。図 1 の中央径間 1000m のモデルを示す。桁幅は 600m モデルのみ 20m とし、桁高 H を 0.6 ~ 3.0m と変化させた。その他のモデルでは桁幅を 30m とし

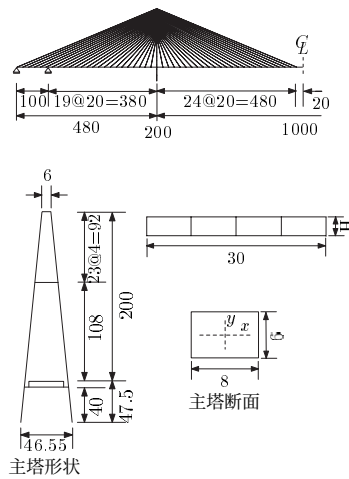


図-1 1000m モデル

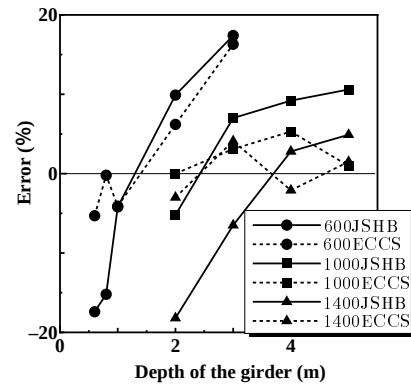


図-2 E_f 法の精度

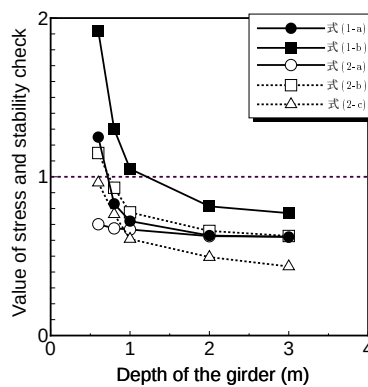


図-3 600m モデル

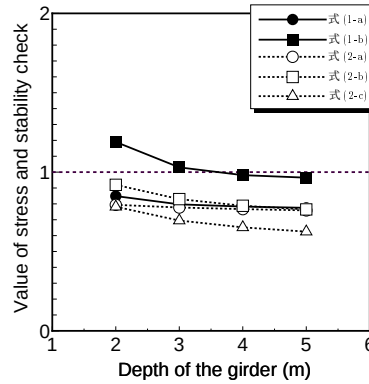


図-4 1000m モデル

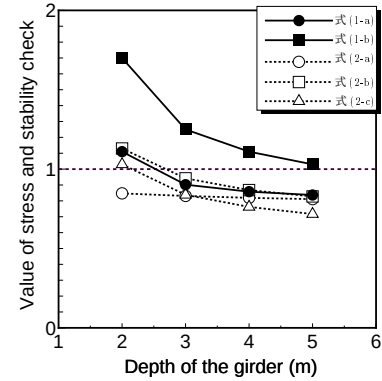


図-5 1400m モデル

桁高 H を 2.0 ～ 5.0m と変化させた。1000, 1400m モデルに関しては、中間橋脚をそれぞれ 1, 3 基設置している。使用鋼材は、600, 1000m モデルで SM490Y を用い、1400m モデルのみ SM570 を用いた。荷重は、全モデルで死荷重と活荷重を満載した。なお活荷重については本州四国連絡橋公団²⁾により定められる等価 L 荷重を用いて算出した。

5. 解析結果とまとめ

図 2 は E_f 法で得られた座屈固有値 κ と厳密解法で得られた終局荷重倍率 β を比較したものである。図中、横軸に桁高、縦軸に誤差 $error = (\kappa - \beta) / \beta \times 100$ をとったものである。図中の実線は、 E_f 法の基準耐力曲線に JSHB 曲線を用いた時の誤差を、破線は、基準耐力曲線に ECCS 曲線を用いた時の誤差を示している。 E_f 法は、各モデルの桁高の低い範囲では厳密解法よりも低めの耐力力評価を、桁高の高い範囲では高めの耐力力評価をする傾向が明らかになった。これは E_f 法が、耐力に影響する非線形性を E_f により近似した固有値問題としていることによる。しかし超長大領域の実用的な桁高の範囲においては、誤差は 10% の範囲であり良い一致を見た。また、基準耐力曲線に ECCS 曲線を用いた場合、更なる精度の向上が見られた。

次に最も条件が厳しい塔位置主桁の安全性照査の結果についてまとめたのが図 3 ～ 図 5 であり、図中の横軸に各桁高を、縦軸に照査値を取ったものである。提案式である式 (2) の許容軸圧縮応力度は、厳密解法と良い一致を見た E_f 法により算出した値を用いている。全照査結果とも道示の照査式では安定照査式 (1-b) が最も大きな値をとり支配的であった。また提案式においても安定照査式 (2-b) が支配的であった。両式による最大照査値を比較すると全ての結果において道示の安定照査値よりも提案式の安定照査値が小さな値を示しており、より合理的な設計ができる可能性が示せた。

以上により、 E_f 法の終局強度評価は、厳密解法と比較して、実用的な桁高である 3 ～ 5m において、その誤差は 10% の範囲であり良い一致が見られ、 E_f 法の有効性を明らかにできた。また、今回提案した安全性照査式は現在用いられている道示の照査式よりも合理的であることを示した。

参考文献

- 1) 謝 旭・長井正嗣・山口宏樹: 長大斜張橋の終局挙動解析と挙動に関する一考察, 土木学会論文集, No.598/I-44, pp.171-181, 1998.
- 2) 本州四国連絡橋公団: 吊橋主塔設計要領 (案)・同解説, 1989.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編, II 鋼橋編, 1996.