

I - A 38

材料強度・構造形状等の不確実性を考慮した吊橋主ケーブルの安全性の一考察

大日本コンサルタント(株)	正員	浅野 恵哉
関東学院大学	フェロー	倉西 茂
筑波大学	正員	佐藤 尚次

1.はじめに

日本の橋梁技術は、高度性は認められているものの、あまりに高品質の施工精度等を要求するため、コストの面で諸外国と比較すると高価なものになっている。国際競争力という点でも問題を残し、今後の超長大吊橋プロジェクトに関して、事業採算性のネックとなる可能性も考えられる。このような状況の中で、吊橋の主ケーブルに注目してみる。吊橋の主ケーブルは単価が高く、また作用荷重の変動性の小ささや材料品質の信頼性の高さも特徴的である。安全率の設定がコストに及ぼす影響も大きく、合理化の効果も大きい。そこで、本論文では、現在計画段階の東京湾口道路を取り上げその試設計の諸元に対し、施工誤差や地震の影響で形状に不確実性がある場合について、主ケーブルにどのような影響を及ぼすかシミュレーションを行った。また、ケーブル自体の限界状態に至る過程を降伏による応力再配分という点を考慮に入れシミュレーションし、コスト削減の方策の一つとして吊橋主ケーブルの安全性の考察を進めていく。

2.施工精度等の不確実性を考慮した引張力の変動のシミュレーション

設計上ケーブル軸力に占める割合の90%以上は死荷重であり、残りの活荷重、風荷重、温度変化の変動性を考慮しても、その影響は大きいとは言えない。そこで今回は、兵庫県南部地震時に見られた明石海峡大橋の基礎の移動のような、吊橋の形状自体の変動性に着目し、その影響を評価することを試みる。

①中央径間長 L のみをばらつかせるケース

これは、吊橋が完成後、被るであろう地震の影響を想定したものであり、基礎の移動により塔間隔が変化する事態を想定している。パラメータを決める根拠が十分あるわけではないので、明石の移動量と同オーダーの標準偏差を与えることとし、変動係数 0.1%を与え、正規分布に従う乱数で L をばらつかせる。平均値は、東京湾口道路の 2250m である。他の諸元は同橋と同じにとり、たわみ理論でケーブル軸力を求めた。

②サグ f のみをばらつかせるケース

現状の、吊橋の施工誤差要求を大幅に緩和した事態を想定したものであり、変動係数 1%を与え、 f をばらつかせる。

③中央径間長 L とサグ f が同時に変化したケース

これは、①を詳細に検討するものである。塔頂でケーブルが滑らないとすると、 L の拡大に伴ってケーブルは持ち上げられ、サグ f が小さくなる。ケーブルを放物線と考え、ケーブル長を一定値としてサグの値を求め、これを用いる。

3.素線強度のばらつきを考慮したシミュレーション

各素線強度について降伏後 $D=E/10$ の傾きを持つバイリニアモデルを想定した。破断応力と降伏応力が完全に独立している場合について、降伏による応力再配分という点を考慮に入れケーブルが破壊に至るまでの過程を追う。

3.1 破断応力 σ_B と降伏応力 σ_Y のモデル

一様乱数(r)をワイブル分布に変換することにより破断応力と降伏応力は式(1)のように表わすことができ、破断ひずみ ϵ_B は式(2)となる。ここで、分布パラメータ k 、 u については、明石海峡大橋の素線のデータから求める。

キーワード：ケーブル，信頼性，形状変化，材料強度

連絡先：〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1 筑波大学構造工学系 Tel/Fax 0298-53-5269

$$\sigma_{Bi} = u_B \cdot [-\ln(1 - r_{2i})]^{1/k_B} \quad \sigma_{Yi} = u_Y \cdot [-\ln(1 - r_{1i})]^{1/k_Y} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{Bi} = \left(\frac{1}{E} - \frac{1}{D} \right) \cdot \sigma_{Yi} + \frac{1}{D} \cdot \sigma_{Bi} \quad (2)$$

3.2 ケーブルのモデル

破断ひずみを小さい順に並べ替え、以下の式で k を一つずつ増加させ順次比較していく。式(3)は素線が弱い方から k 本切れて、 $k+1$ 番目以上はもっていることを意味する。

$$\varepsilon_{Bi} + \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_{Bi}}{(n-k) \cdot D} \leq \varepsilon_{Bk+1} \quad (3)$$

しかし、残る素線で切れた k 本の素線が分担していた応力をまだ負担できると考える。式(4)は応力増加の限界を示す。ここで、最初に式(4)を満足するときの m の値が限界本数となり、この後は連鎖的に全体破断に至る。最大強度は式(5)より得られる。

$$\varepsilon_{Bk+1} + \frac{\sigma_{Bi}}{(n-i) \cdot D} \leq \varepsilon_{Bm} \quad (4)$$

$$\sigma_{MAX} = \frac{\sum_{k=m+1}^n [\sigma_{Yk} - D \cdot (\varepsilon_{Bk} - \varepsilon_B)]}{n - (m+1)} \quad (5)$$

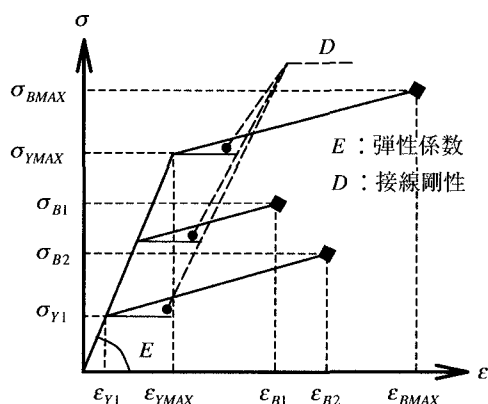


図.1 σ_Y と σ_B が独立している場合の
応力-ひずみ曲線

4. 数値計算結果

施工精度等の不確実性を考慮したシミュレーションと素線強度のばらつきを考慮したシミュレーション各々について、水平張力、最大引張強度についての発生回数をヒストグラムで示す。また適合度検定により有意水準 $\alpha = 5\%$ で対数正規分布に適合することを示すことができる。

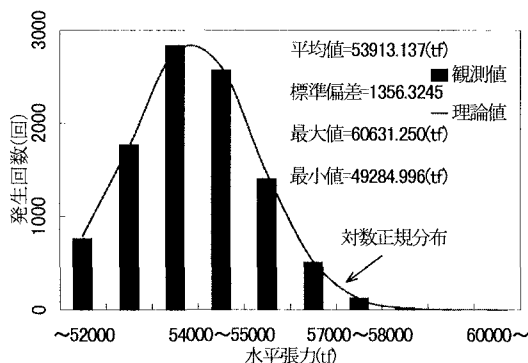


図.2 L と f が関連して変化したケース

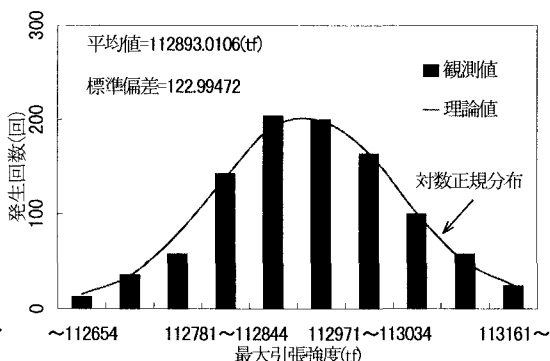


図.3 素線強度のばらつきを考慮したケース

5. まとめ

L と f が関連して変化したケースでは、 f のばらつきの効きも大きく、 L と f の相乗効果により、想定値 (53100(tf)) を上回ることがかなりある。しかし、東京湾口道路で見込む安全率 1.8 をもってすれば十分にカバー可能な数値である。また対数正規分布に対する安全指標 $\beta = \ln(\mu_R / \mu_S) / (\sqrt{V_R^2 + V_S^2})$ は 30 となり、極めて信頼性が高いことを示すことができた。

【参考文献】

- 1) 中井 博・北田 俊行：鋼橋設計の基礎，共立出版，1992。
- 2) 亀田 弘行・池淵 周一・春名 攻：土木学会編 新体系土木工学 2 確率・統計解析，技法堂，1981。