

東京大学 学生員 垂水 祐二
 東京大学 正員 長谷川彰夫
 東京大学 Taweep Chaisomphob

1. まえがき 現行の吊橋主塔の設計要領¹⁾は部材照査を基本的には道路橋示方書に従っている。しかし計画中の明石海峡大橋は過去に例を見ない規模の長大吊橋であり、今までの設計要領がそのまま適用できるかどうかは検討の余地がある。一方、吊橋主塔の厳密な非弾性有限変位解析に関する報告はほとんどない。そこで、ここでは非弾性有限変位解析により、試算設計（中央スパン 2000 m、塔柱高 320 m 案）²⁾での明石海峡大橋主塔の橋軸直角方向の耐荷力解析を行ない、骨組が有効に設計されているかどうかを検討した。さらに、風および地震荷重を想定し、水平荷重の影響と腹材の効果を調べた。

2. 計算仮定と解析方法 主塔の非弾性有限変位解析を梁-柱の剛性行列とNewton-Raphson法を組み合わせた有限要素法によって行なった。材料は完全弾塑性体とし、ひずみの逆転は考慮しない。残留応力は矩形分布を与え、 $|\sigma_r| = 0.5 \sigma_y$ とした。部材の連結はすべて剛結とした。

常時荷重は塔自重とケーブルからの塔頂鉛直反力を考え、風荷重は塔柱両側ともに台形分布として載荷し、その他にもケーブルおよび補剛トラスによる水平反力およびモーメントを考慮した。これらは試算設計の計算値に従った。さらに地震荷重型の荷重を考え、震度法を用いた。この場合、塔自重による地震力の他参考のため、塔頂鉛直反力の9割が死荷重であると仮定し、それに震度を乗じた水平力を塔頂に作用させる場合を考えた（塔頂水平力）。塔自重に対する地震力は台形分布となる。塔自重を除くこれらの荷重載荷を含む解析対称図をFig. 1に示す。解析方法としては、塔頂鉛直反力のみを変化させ、他の荷重はあらかじめ与えた。ただし地震荷重を考える場合の塔頂水平力は鉛直反力に対する比例荷重とした。荷重は塔頂鉛直力(P)と設計最大塔頂鉛直反力(V_{cmax})の比をとり、変位は塔頂変位(w)と塔柱高(L)の比をとって表わす。耐荷力は(P_{max}/V_{cmax})で表わす。

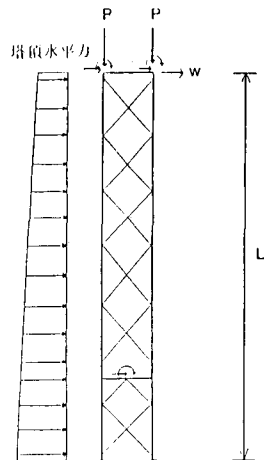


Fig. 1 解析対象図

3. 数値解析結果

(1) 荷重と変位の関係: 常時荷重での解析にあたっては $V_{cmax}/1000$ の水平力を塔頂に作用させた。常時荷重での荷重-変位曲線をFig. 2に示す。実質安全率を示す耐荷力(P_{max}/V_{cmax})は2.1となり、これは名目安全率1.7を上回った。残留応力を考慮した場合、 $P/V_{cmax} = 1.3 \sim 1.5$ にかけて剛性が小さくなり、1.5 ~ 1.9にかけては剛性が大きくなっている。これは1.3 ~ 1.5にかけて塔柱断面の一部が降伏し、その分の応力は他の塔柱断面が受け持ってきたのだが、1.5 ~ 1.9にかけては斜材が有効に応力を受け持ち、全体の剛性が増加したためと思われる。残留応力を無視した結果に比較し、剛性低下は大きいものの、耐荷力自体はさほど変わらない。最高荷重時では塔柱上部が崩壊した。

設計風荷重時での荷重-変位曲線をFig. 3に示す。実質安全率は1.6となり、これは $1.7/1.5=1.13$ を大きく上回った。また最高荷重時には塔柱基部が崩壊した。

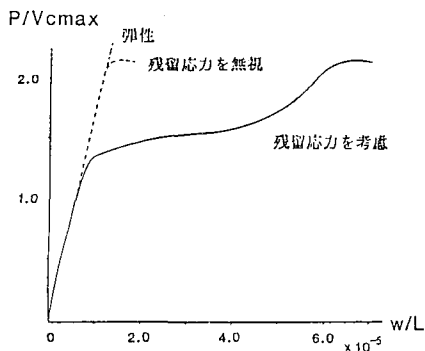


Fig. 2 荷重-変位曲線 (常時荷重)

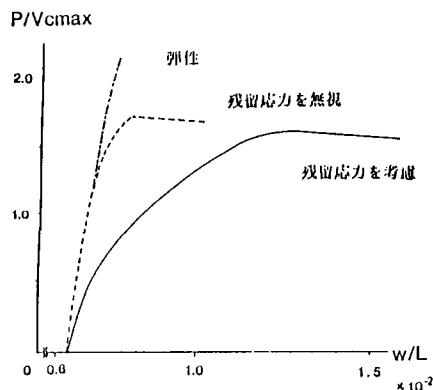


Fig. 3 荷重-変位曲線 (設計風荷重)

水平震度0.2 で、塔頂水平力を考慮した場合の荷重－変位曲線をFig. 4 に示す。たわみ性の大きなケーブルにより伝達される死荷重がそのまま地震力として塔頂水平力となることは実際にはあり得ず、この結果はあくまで比較のものである。

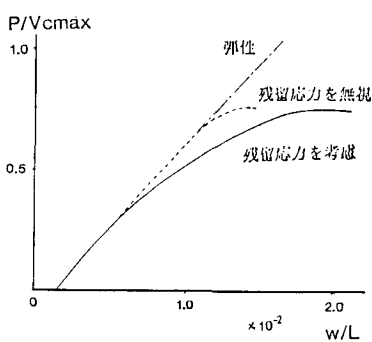


Fig. 4 荷重－変位曲線 (地震荷重 0.2)

(2) 耐荷力と風荷重の関係：風荷重の大きさを変えて解析した結果をもとに得られた風荷重時の耐荷力曲線をFig. 5 に示す。風荷重の強さが0のときは常時荷重を、1のときは設計風荷重を示す。設計風荷重付近においてはグラフの傾きが大きくなっており、設計値の微妙な違いが耐荷力に大きな影響をおよぼす。

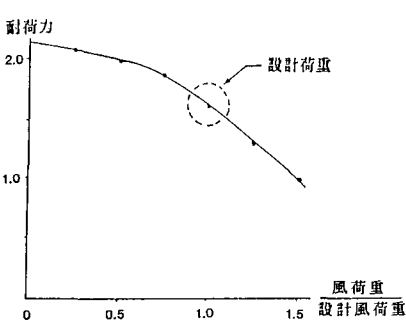


Fig. 5 耐荷力曲線 (風荷重)

(3) 耐荷力と地震荷重の関係：水平震度の値を変えて解析した結果をもとに得られた地震荷重時の耐荷力曲線をFig. 6 に示す。塔頂水平力を考慮した場合、耐荷力は大きく減少するものの、塔頂水平力を考慮しない場合の耐荷力は震度の値にかかわらず常時荷重時の耐荷力とほとんど変わらなかった。塔頂水平力を無視するのが現実に近いことを考えるとFig. 5, 6 より風荷重が設計で支配的となることがわかる。

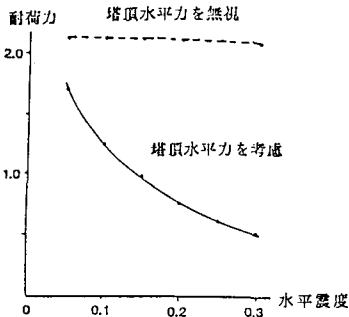


Fig. 6 耐荷力曲線 (地震荷重)

(4) 腹材の影響：試算設計の他Fig. 7 (b) ～(d) のモデルで常時荷重及び塔頂鉛直力を無視した地震荷重で震度が0.1, 0.2 の場合において耐荷力を求め、その結果をTable 1 に示す。試算設計でのトラス腹材では地震力も含め十分な耐荷力を保つが、ほぼ部分トラス(d)、ラーメン(c)、無補強(b)の順に急激に耐荷力が低下する。このことは試算設計のようなトラス腹材の採用が好ましいことを実証する。

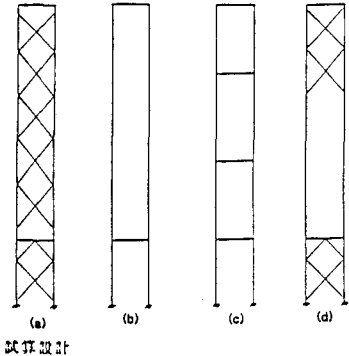


Fig. 7 腹材の比較モデル

Table 1 耐荷力に及ぼす腹材の影響

	常時荷重	地震力 (0.1)	地震力 (0.2)
(a)	2.13	2.13	2.10
(b)	0.63	0.21	0
(c)	1.53	0.83	0.37
(d)	1.39	1.06	0.78

4. まとめ 明石橋主塔の試算設計書をもとに橋軸直角方向の耐荷力解析を非弾性有限変位解析により行なった。水平荷重としては地震荷重より風荷重が設計に支配的となる。ただし、地震力として塔頂水平力が生起される場合、その影響は大きく注意する必要がある。さらに腹材の効果について検討を行ない、トラス補強の優位性を確かめた。

参考文献 1) 土木学会・本州四国連絡橋綱上部構造研究小委員会：主塔設計方法に関する検討、昭和55年
2) 海洋架橋調査会：明石海峡大橋限界状態設計法に関する調査委員会提出資料、昭和59年