

地震時における吊橋のRC主塔の応答性状について

九州大学大学院工学府
九州大学大学院工学研究院
住友重機械工業株式会社

学生員 ○崔 準 祐
フェロー 大 塚 久 哲
正会員 吉 田 達 矢

1. はじめに

吊橋の主塔に関しては、自重が重いことによる耐震性や施工上の問題等から日本では鋼製主塔が主流になっている。しかし、吊橋の主塔には鉛直力が支配的に作用するため、主塔の材料として圧縮力を容易に伝達できるコンクリートも適切な材料であり、世界の長大吊橋でグレートベルト橋、青馬大橋などはRC主塔を採用している。また、近年高強度コンクリートや高強度鉄筋の開発、ならびに新たな施工法の開発がされつつあり、吊橋にも大地震に対応できるRC主塔の採用が可能であると考えられる。

そこで本研究では、支間長1400m級の長大吊橋に対してRC主塔の試設計を行い、主塔単体での非線形動的応答解析を行い、その耐震性について検討を行った。

2. RC主塔の試設計

試設計に用いた主塔の全体図面を図-1に示す。高さ216m、3段の水平梁を有する上層2層ラーメン形式とした。塔柱間隔は、塔頂部で22.5m、塔基部で28mの斜塔形式を採用し、塔柱寸法は基部では8.0m×6.0m、塔頂部では6.0m×6.0mとなるように主塔高さ方向について断面を漸減している。

本主塔の塔柱と水平材に対し、平成14年道路示方書V耐震設計編を参考にして断面の試設計を行い、それぞれの断面を図-2、図-3に示す。コンクリートは設計基準強度が 60N/mm^2 の高強度材料、鉄筋は降伏強度が 490N/mm^2 のSD490Aを使用した。主塔自重の軽減を図るため、水平梁とも鉛直柱の塔基部は全区間に対し中空断面とした。なお、帯鉄筋は軸方向鉄筋と同一の材料(SD490A)を使用し、15cm間隔で配筋した。また、帯鉄筋の効果を高めるため、断面の外側と内側に配筋される軸方向鉄筋と帯鉄筋を取り囲むように中間帯鉄筋を配置するものとした。

3. 解析手法および解析条件の設定

対象RC主塔に対し、3次元骨組みモデルを用いてモデル化を行った。地盤はI種地盤を想定しているため、主塔基部の境界条件を固定とした。塔柱と水平材の結合部に対しては固結とした。また、RC主塔の非線形復元力特性は、トリリニア型武田モデルを採用した。なお、本主塔の構造的特长として、スレンダーな構造であることから大きな可撓性を持つことが挙げられ、大地震時には変形による幾何学的非線形性を考慮する必要がある。そこで、本解析では、材料非線形性および幾何学的非線形性を考慮した複合非線形性による非線形地震応答解析を行うことにした。

入力地震動は、タイプI・タイプIIの道路橋示方書の標準波を用いた。解析手法は、直接積分法のNewmark β 法($\beta=0.25$)を用い、解析時間間隔は0.005秒である。減衰はRayleigh減衰であり、橋軸方向には1次と3次、橋軸直角方向には2次、5次を使用した。

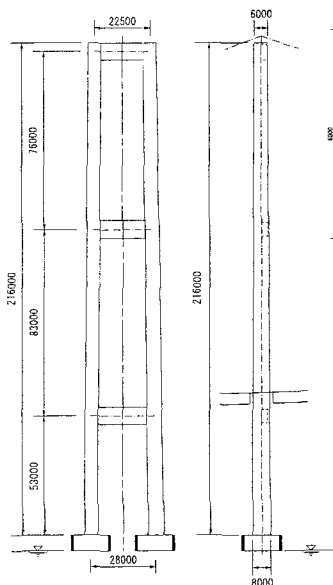


図-1 主塔の全体図

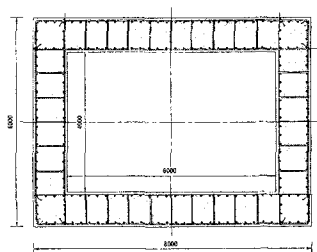


図-2 塔柱基部の断面

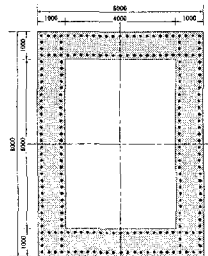


図-3 下端水平材の断面

4. 解析結果

(1) 固有値解析の結果

対象主塔に対し固有値解析を行い、主要変形モードを表-1に示す。面外変形1次モードが9.99秒、面内変形1次モードが2.79秒であるなど、本主塔は長周期域で変形が卓越しており、長周期波の影響が大きいと予想される。

(2) 動的解析の結果

本主塔に対し、複合非線形性を考慮した非線形地震応答解析を行い、塔柱と水平材の最大応答曲げモーメントをそれぞれ図-4、図-5に示す。塔柱の曲げモーメントにおいて入力地震動に対しては、面外ではタイプI、面内ではタイプIIによる影響が大きく、加震方向によって卓越する地震動が異なることが分かる。また、塔柱の曲げモーメントが面外・面内とも一部でひび割れ値を超えているものの、降伏値までは至っていないことも分かる。一方、水平材の面内曲げモーメントに対しては、梁の両端部で降伏値を若干超えていることが確認できた。

また、面外と面内の2方向同時加震によって主塔のねじりモーメントが増加する事があり、それによって曲げモーメントが大きくなることも考えられ、同時加震による影響について検討を行った。図-6は、1方向加震と2方向加震時の水平材の最大応答曲げモーメントを比較したものである。2方向加震時の応答値が水平材の両端部で約35mN-m、中央部付近で最大100mN-mほど大きく評価されており、2方向同時加震による検討が必要である。

なお、幾何学的非線形性の影響を考慮しない解析も行い、幾何学的非線形性の有無による影響について検討を行った。塔柱基部の曲げモーメント・曲率関係において比較を行い、その結果を図-7に示す。ひび割れ値を超えてから幾何学的非線形性を考慮した応答曲げモーメントが大きくなる場所があり、その後応答傾向が異なっていくことが分かる。一方、水平材においては幾何学的非線形性の影響が見られなかった。

5. まとめ

対象主塔に対し複合非線形性を考慮した非線形地震応答解析を行ったところ、水平材の端部で降伏値を超えるものの小さな塑性率であり、主塔全体系では十分な耐震性を有することが確認できた。今後、他の長周期波に対する検討を行うとともに軸力変動や地盤バネを考慮した非線形応答解析を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，平成14年3月
- 2) 大塚久哲・崔準祐：長大吊橋の地震応答特性に関する研究，地震工学論文集，Vol. 27，2003.12

表-1 固有値解析の結果

次数	振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	有効質量比			変形モード
			橋軸	鉛直	直角	
1	0.100	9.991	0.588	0.000	0.000	面外変形1次
2	0.358	2.794	0.000	0.000	0.675	面内変形1次
3	0.652	1.534	0.208	0.000	0.000	面外変形2次
4	0.826	1.211	0.000	0.000	0.000	ねじり1次
5	1.147	0.871	0.000	0.000	0.120	面内変形2次
6	1.813	0.552	0.091	0.000	0.000	面外変形3次
7	2.003	0.499	0.000	0.000	0.142	面内変形3次
8	2.130	0.469	0.000	0.000	0.000	ねじり2次

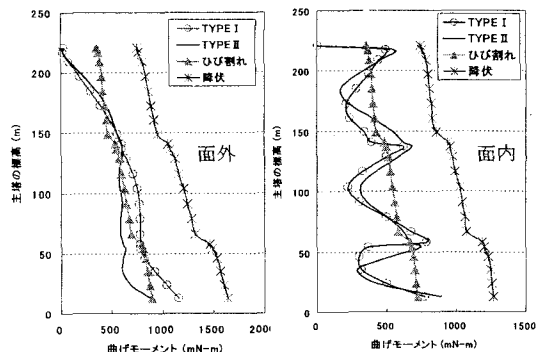


図-4 塔柱の最大応答曲げモーメント

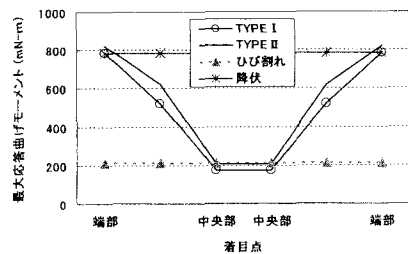


図-5 下段水平材の最大応答曲げモーメント(面内)

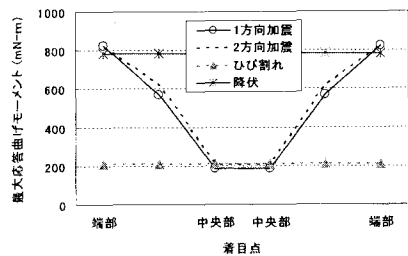


図-6 下段水平材の同時加震による影響(タイプI)

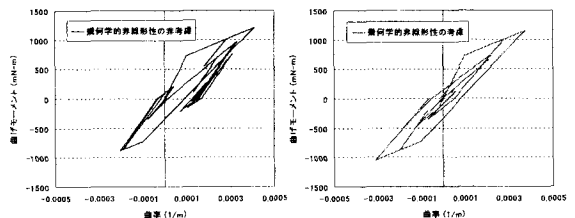


図-7 塔柱基部の曲げ・曲率の関係(タイプI 面外)