

幾何学的非線形を考慮した鋼吊橋の耐震性検討

九州大学大学院 学生員 ○楠 田 広 和
九州大学大学院 フェロー 大 塚 久 哲
中電技術コンサルタント(株) 正員 石 崎 善 敬
中電技術コンサルタント(株) 正員 小 嶋 竜 智

1. はじめに

長周期構造物である吊橋は、そのたわみやすさから耐震指標として応答変位を正確に予測することが重要である。精度のよい予測を行うには、逐次変形後の釣り合い位置を求める幾何学的非線形を考慮した解析を行うことが望ましい。また、橋全体の剛性に対してケーブルの果たす役割が大きいため、ケーブルの挙動を正確に取り扱うことが不可欠である。現状では、ケーブルを軸力のみ受け持つトラス要素として簡易的にモデル化することが一般的であり、ケーブルのモデル化が吊橋全体系の応答評価に与える影響を検討した事例は少ない。

ここでは、橋長1000 mクラスの吊橋全体モデルを対象に、複数ケースについて幾何学的非線形地震応答解析により耐震性評価を行い、併せて微小変形理論との比較を行った。

2. 解析概要

対象橋梁は図-1に示す鋼3径間2ヒンジ補剛桁桁吊橋である。主塔基礎形式が直接基礎(2P主塔)、杭基礎(3P主塔)と異なり、中央径間に対して側径間が短い非対称な構造形式となっている。また、中央支間長750 mに対して桁幅19 mであり、スレンダーで可撓性の高い構造である。

図-2は解析モデルの概要である。「幾何学的非線形の影響」、「ケーブルの非抗圧縮性の影響」、初期応力状態を厳密に評価した「初期形状の影響」を検討するため、表-1に示す4ケースについて入力地震波を変えて地震応答解析を行い、これらの影響を検討した。

幾何学的非線形解析にはUpdate Lagrange法¹⁾を用いた。ケーブルの非抗圧縮性を考慮する場合、幾何学的非線形を考慮し、逐次外力との釣り合いをとる必要があるため、微小変形解析についてはケースから除外した。また、ここで用いたケーブル要素では、導入張力の加減で節点が移動し、その都度釣り合いをとることが可能であるため、導入張力により初期形状を正確に定義することが可能である。死荷重下で主塔、主桁にほぼ曲げ応力が作用しない吊橋の特性を表現できるモデルであり、最も厳密なケースと言える。その他のケースでは初期応力状態を無視した解析を行った。

表-1 解析ケース

| 解析ケース名 (○-考慮) | トラス (微小変形) | トラス (大变形) | ケーブル (大变形) | ケーブル (初期形状考慮) |
|------------------|---------------|--------------|---------------|------------------|
| 非抗圧縮性の考慮 | × | × | ○ | ○ |
| 幾何学的非線形形の考慮 | × | ○ | ○ | ○ |
| 初期形状の考慮 | × | × | × | ○ |

表-2 入力地震波

| | 最大加速度(gal) | 備考 |
|---------|------------|--------------------|
| wave1 | 135.0 | 釜底地震観測波1 |
| wave2 | 425.0 | 釜底地震観測波2 |
| Type111 | 318.8 | 標準地震波 タイプ I-I 種地盤 |
| Type211 | 786.0 | 標準地震波 タイプ II-I 種地盤 |
| TCU068 | 501.6 | 台湾集集地震観測波 |
| TCU084 | 989.2 | 台湾集集地震観測波 |

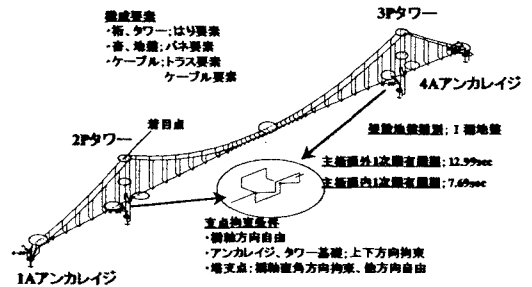


図-2 解析モデル概要

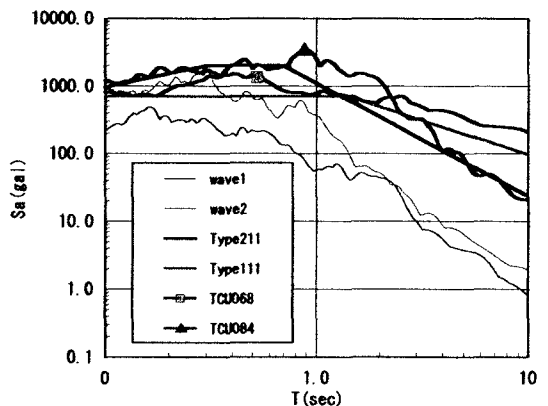


図-3 入力地震波 加速度応答スペクトル

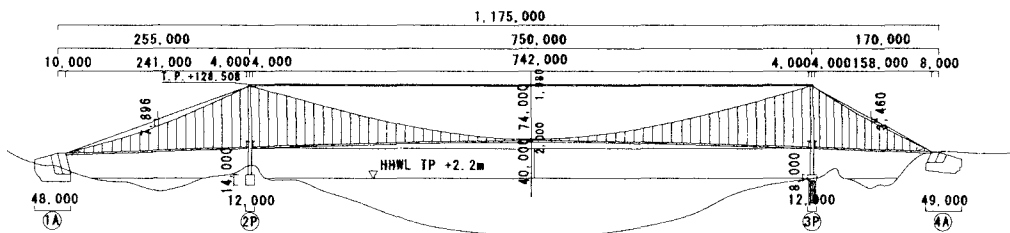


図-1 解析対象橋梁

入力地震波として、表-2に示す6波を用いた。図-3は入力地震波の加速度応答スペクトルである。TCU068、TCU084は台湾で発生した集集地震時に断層変位近傍の硬質地盤で観測された長周期成分が卓越した地震波形²⁾である。減衰にはレーリー減衰を用い、ケーブル以外は線形部材とした。

3. 解析結果および考察

(1) 耐震性の検討

図-2に示すモデルに対して、幾何学的非線形地震応答解析を行った。橋軸方向にレベル2相当地震が作用した場合、変位を拘束する全てのステイクケーブルで破断張力を超える応答張力が発生した。主桁の橋軸方向変位が設計移動量を超えるため、桁端、主塔位置で伸縮装置が破損する。また、主塔と桁間を抑えているウインド杓（水平支承）が橋軸直角方向作用時に降伏応力を超えることがわかった。

TCU068入力時は、橋軸直角方向に作用した場合に主桁の面外応答変位が大きく、中央径間で降伏耐力を超える応答が発生した。同様に、TCU084では側径間で降伏耐力を超える応答が発生した。

(2) 幾何学的非線形性の影響

wave1、wave2クラスの地震動に対しては、応答値に差異はなく、ほぼ微小変形理論で応答を評価できた。それ以外の地震波に対しては、幾何学的非線形の影響が見られた。ここでは、タイプI地震入力時の結果を示す。図-4はモデルケースごとに、応答変位を比較したものである。非抗圧縮性を考慮した場合、中央径間と側径間の応答変位分布の傾向に変化が見られる。これは、吊橋が鉛直変位を許容した構造であるため、変位によりケーブルがたわみ、付加張力が初期導入張力を超えて圧縮域に入るケーブルが存在し、主桁の拘束が小さくなるためと考えられる。また、初期形状が応答変位評価へ与える影響は小さいことがわかった。

図-5は各地震波に対して幾何学的非線形の有無による主桁応答変位の予測誤差を検討したものである。レベル2地震に対してはトラス要素として解析すると、相対誤差は5%程度と幾何学的非線形の影響は小さく、長周期成分が卓越した地震波ほど誤差が大きい傾向がある。

図-6はケーブルの非抗圧縮性の考慮が、主桁の応答変位に与える影響を検討したものである。ケーブルに非抗圧縮性を考慮した場合、微小変形理論との差が大きく、特に径間長が短い4A側の桁端では最大125%の誤差がある。

(3) ステイクケーブル損傷後の挙動評価

レベル2地震クラスに対してはステイクケーブルが破断する可能性が高い。実際は破断しているはずのステイクを線形要素として取り扱っていると、解析結果から得られる応答変位はかなり安全側の評価であると考えられる。ここでは、簡単のためステイクケーブルを取り外した系に対して地震応答解析を行い、その応答変位を検討した。図-7はタイプI地震入力時のステイクの有無による応答変位の比較である。ステイクを

取り外した場合の応答変位は桁端で最大8倍大きく、ステイクケーブルによる全体系応答変位の抑制効果が大きいことが確認できた。また、幾何学的非線形の考慮の有無で応答評価に86%の誤差が生じた。

4. まとめ

対象橋梁にレベル2相当の地震動が作用した場合、ステイクケーブルが破断し、伸縮装置が破損する可能性が高い。ステイク破断後の応答変位が耐震性の指標となる吊橋については、幾何学的非線形を考慮した解析が不可欠である。

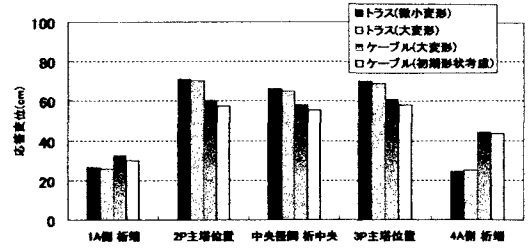


図-4 解析ケースによる主桁応答変位比較

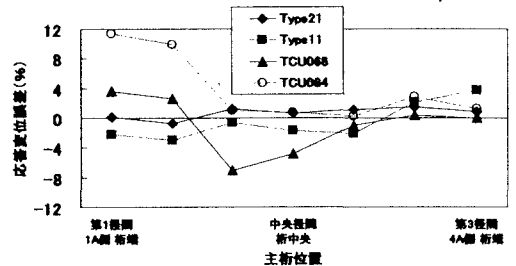


図-5 最大応答変位誤差(幾何学的非線形無視時)

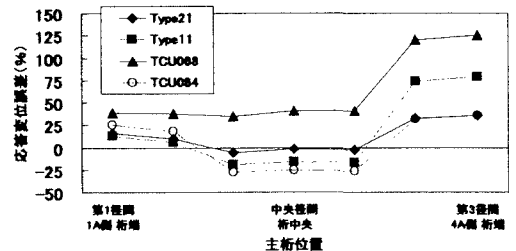


図-6 最大応答変位誤差(非抗圧縮性無視時)

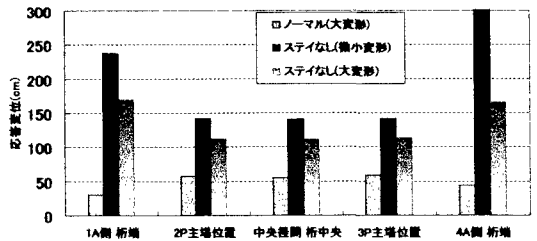


図-7 ステイクの有無による応答変位比較

参考文献：1) 土木学会：ケーブル・スペース構造の基礎と応用，1999.10
2) 研究室報告 大塚 他：921 集集地震(台湾)被害調査報告書，2000.2