

大地震時における鋼斜張橋タワーの 免震効果について

林川俊郎¹ 箭原大祐² Shehata E. Abd El-Raheem³

¹F 会員 工博 北海道大学助教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西9丁目)

²学生会員 北海道大学大学院修士課程 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

³学生会員 北海道大学大学院博士課程 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

本研究では、兵庫県南部地震のような大地震への耐震設計として、構造物全体の剛性を向上させ地震力に抵抗するのではなく、構造物の固有周期を伸長し減衰性能を付加させる免震の概念を採用した。免震対策を施すことにより、構造上致命的となるような部位での損傷を防ぐことを目的としている。

解析対象としたのは斜張橋鋼製タワーである。具体的な方法としては、水平梁に免震装置を挿入して、3次元非線形動的応答解析を行い、免震装置を用いないタイプのタワーと比較して動的挙動の変化について考察を行った。その結果、免震装置を導入することで応答変位は増大することになるが、免震装置の特性として適切な値を選択することにより、地震力を軽減することが可能であることを提案する。

Key Words: Cable-stayed bridge, non-linear behavior, dynamic analysis, isolation system

1. まえがき

兵庫県南部地震では、想定外の地震動が構造物に働き甚大な被害が発生することとなった。この震災を契機として耐震設計の見直しが行われ、道路橋示方書V耐震設計編の改定が行われた。改定された示方書によれば、耐震設計法として、中小支間長の橋梁を対象として、震度法や地震時保有水平耐力法の適用が明記されている。しかし、吊橋や斜張橋などのような地震時の挙動が複雑な橋梁では動的応答解析により照査を行うよう規定されている。

大規模の地震動が作用する場合、構造物の剛性を増すことのみで地震に抵抗することには限界があるといえる。そのため、構造物のエネルギー吸収性能を増すことで、構造部材が非線形領域に入っても損傷を最小限にとどめ、構造物全体の安定性を保つことが重要であると考えられる。また、固有周期を伸長させることによる慣性力の低減も耐震設計には重要であると考えられる。近年、このような免震の概念を橋梁構造物にも取り入れようとする動きがあり¹⁾、免震支承を採用している免震橋が増加してきてい

る。実際の免震橋においても地震記録が観測され、その有用性が検証されつつある²⁾。

そこで、本研究では免震性能を持つ部材を鋼製斜張橋の水平梁の一部に用いることで斜張橋鋼製タワーの免震性能の向上、地震力の軽減、損傷の発生部位を限定することが可能かどうかについて、時刻歴3次元非線形応答解析を行い考察を加える。

2. 解析方法

本研究で用いた解析手法として、固有値解析にはHouseholder法を用いた。弾塑性有限変位動的応答解析法については、鋼材の降伏および幾何学的非線形性の影響を考慮した、はり柱要素の有限要素法(変位法)とNewmark β 法($\beta=0.25$)および修正Newton-Raphson法を採用した。このとき、部材の面内と面外曲げ変形については材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した接線剛性マトリックスを用い、ねじり変形は線形であるとした立体骨組構造の時刻歴応答解析を行った。弾塑性有限変位解析に際しては、鋼材の応力-ひずみ曲線はバイリ

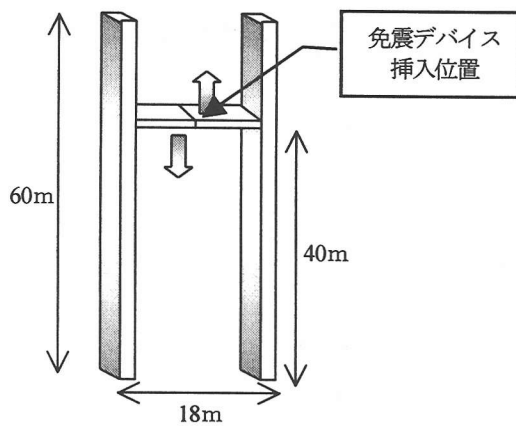


図-1 斜張橋のタワー形状

表-1 鋼材の特性

鋼材のヤング率 (MN/m)	2.0×10^5
ひずみ硬化係数	0.01
降伏応力度 (MN/m ²)	235.2

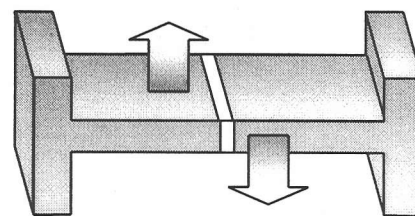
ニア型にモデル化し、構造減衰として Rayleigh 減衰を用いた。また、入力地震波として兵庫県南部地震時の JR 鷹取駅観測の 3 成分地震波を水平 2 方向、上下方向に作用させて応答解析を行った。

3. 解析モデル

本研究で解析対象とした斜張橋鋼製タワーの概略を図-1 および表-1 に示す。タワーの高さは 60m、幅は 18m、水平梁の高さは 40m とした。タワー断面は 2.4m × 3.5m、板厚 25mm の長方形断面としタワー基部から頂部まで等断面とした。基部は地盤に固定されているものとする。斜張橋の補剛桁、ケーブルの影響を考慮するため、ケーブルを水平ばね要素でモデル化し、ケーブル定着部に補剛桁の自重を鉛直下向きに作用させた。ケーブルは両側合計 8 本とし、ばね定数は、一般的なケーブルの断面、ケーブル応力、サグのある場合の弾性係数などを考慮して概算した。死荷重は全長 800m と想定した斜張橋から算定し、荷重 2450kN をケーブル定着部 8 ヶ所に作用させた。動的解析において、ケーブル 1 本あたりのばね定数として 29.4 MN/m と設定した。

4. 免震デバイスについて

本研究では地震力の軽減対策として免震性能を持つ部材(これ以降免震デバイスと呼ぶ)を水平梁の中央部に用いることを考える。免震デバイスとは、部分的に構造系



鉛直方向のみ変形する
水平 2 方向・回転 3 方向は剛結

図-2 免震デバイスのモデル図

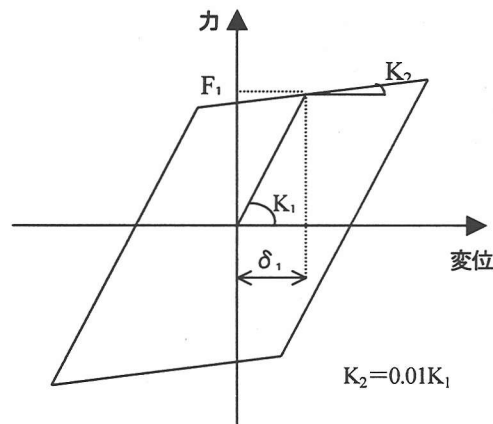


図-3 免震デバイスの履歴

表-2 免震デバイスの特性

K_1 (kN/m)	K_2 (kN/m)	δ_1 (m)	F_1 (kN)
24500	245	0.145	3552

の剛性を低下させることによる構造系の長周期化、および免震デバイスにエネルギー吸収性能を持たせることで構造系全体のエネルギー吸収性能の向上、の 2 つを目的とした装置である。ここで用いる免震デバイスの特徴として、鉛直方向にのみ変形が可能とし、他の水平 2 方向、回転 3 方向については剛結条件を仮定している(図-2 参照)。免震デバイスは図-3 のようにバイリニア型にモデル化し、二次剛性の値は初期剛性の 1% の値を使用することとする。免震デバイスの代表的な値について表-2 に示す。

5. 解析結果

(1) 固有値解析結果

免震デバイスの特性をパラメータとし、固有値解析を行った。図-4 は初期剛性を変化させたときの橋軸直角方向の固有周期の変化を示している。図中点線で示しているのは免震デバイスを用いていないモデル(これ以降基

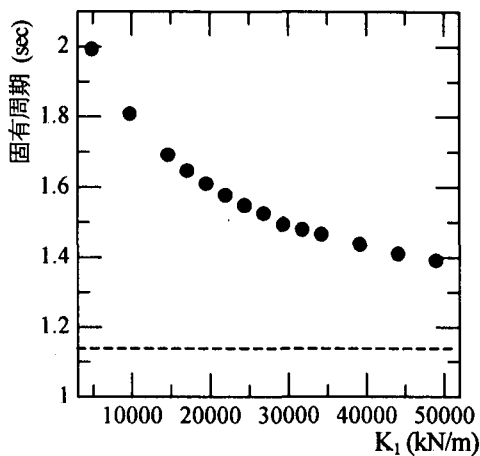


図-4 初期剛性と固有周期(橋軸直角方向)の関係

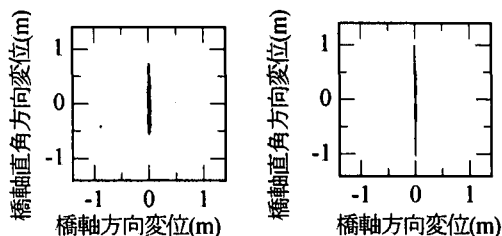


図-5 タワー頂部の軌跡
(基本タワー)

図-6 タワー頂部の軌跡
(免震デバイス使用)

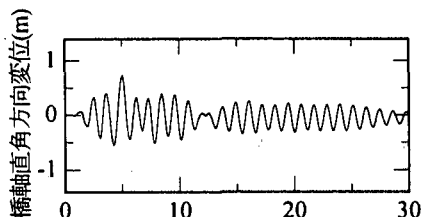


図-7 タワー頂部時刻歴応答(基本タワー)

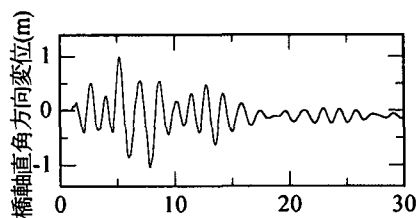


図-8 タワー頂部時刻歴応答(免震デバイス使用)

本タワーモデルと呼ぶ)の固有周期の値である。免震デバイスには鉛直方向にのみ変形を許すため、橋軸直角方向の固有振動モードに対して長周期化の効果がみられる。初期剛性を小さく設定した場合には、基本タワーモデルの固有周期と比較して約2倍の値となることが確認できる。それに対し、初期剛性を大きくすると徐々に固有周期は減少し、基本タワーモデルの値に近づく傾向が見られる。また、橋軸方向の固有周期については免震デバイスの有無や初期剛性の違いによる影響が見られず、解析

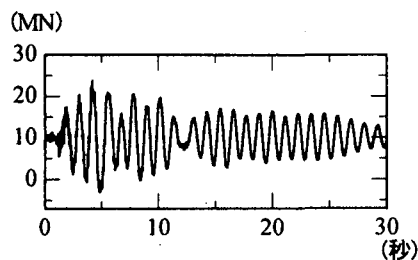


図-9 タワー基部軸力(基本タワー)

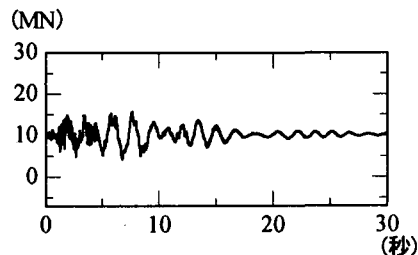


図-10 タワー基部軸力(免震デバイス使用)

したすべてのモデルで基本タワーモデルの値と等しくなった。この原因については免震デバイスの結合条件に起因するものと考えられる。

(2) タワー頂部の時刻歴応答変位

タワー頂部の応答変位の軌跡を図-5, 6に、橋軸直角方向の時刻歴応答変位を図-7, 8に示す。基本タワーモデルおよび免震デバイスを用いたモデル、両方とも橋軸方向の応答変位より橋軸直角方向の変位の方が大きな値を示すことがわかる。この原因としてはケーブルを水平ばね要素でモデル化したため、水平ばねによる拘束力が働くためと考えられる。橋軸直角方向に関して、基本タワーモデルでは最大値は約0.7mを示しており、12秒付近で応答変位が一時的に小さくなるが、再び0.4mほどの値になり、それ以降は徐々に減少していく。図-8では免震デバイスを用いたことにより水平梁の剛性は低下しているため変位の最大値は基本タワーモデルよりも大きくなるが、最大値を示した後はタワーの揺れが速やかに収まっていることが分かる。

(3) タワー基部の軸力

タワー基部に発生する軸力の時刻歴応答を図-9, 10に示す。基本タワーモデルでは10MNの死荷重が作用しており、これを中心として軸力が変動していることが認められる。最大で25MNの軸圧縮力が加わり、また負反力も生じている。それに対し、免震デバイスを用いると荷重の変動量が大幅に減少しており、負反力の発生も防いでいることが分かる。この原因としては、水平梁によって伝達されるせん断力や曲げモーメントが免震デバイス

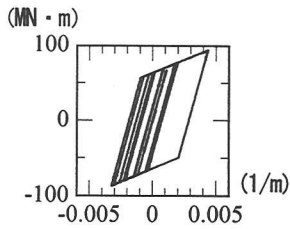


図-11 タワー基部 M-φ 関係
(基本タワー)

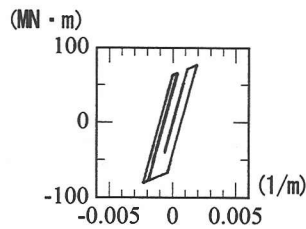


図-12 タワー基部 M-φ 関係
(免震デバイス使用)

の導入により減少したため、タワー間における動的相互作用が低下し、2本のタワーがそれぞれ独立して地震を受ける状態に近づいたことによるものと考えられる。

(4) タワー基部の曲げモーメントと曲率の関係

タワー基部における面内曲げモーメントと曲率との関係について図-11, 12に示す。基本タワーモデルでは非常に大きな塑性変形が発生していることが認められる。免震デバイスを用いたモデルでは塑性変形の度合を小さくとどめることができている。このことは、免震デバイスを水平梁に導入することにより、鋼製タワーの長周期化が図られ、作用する地震力の軽減がなされたものと考えられる。

(5) 構造系での地震エネルギー吸収

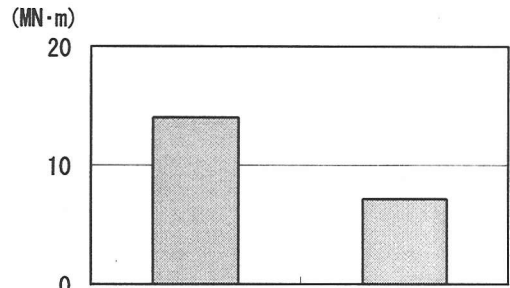
鋼製タワーの損傷の程度を数値で表すことを目的として、入力エネルギー E_I ・構造部材のひずみエネルギー E_S を算出する。各エネルギー量の算出方法は以下のとおりである。

$$E_I = \int \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}}_0 dt \quad (1)$$

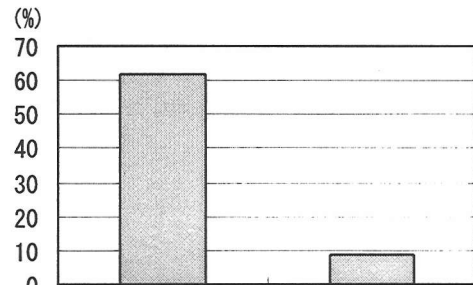
$$E_S = \int \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{K} \mathbf{x} dt \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{M} と \mathbf{K} はそれぞれ質量マトリックスおよび接線剛性マトリックスである。 $\ddot{\mathbf{x}}_0$ は入力地震加速度であり、 $\dot{\mathbf{x}}$ は応答加速度ベクトルである。

図-13は積分範囲を0~30秒に設定して算出した、タワーに入力されるエネルギーを示している。入力エネルギーは構造物の固有周期と入力地震波により大きく異なる。ここで用いた地震波の場合、免震デバイスを用いたモデルでは地震波の卓越周期よりも長周期化することから、基本タワーモデルと比較して約半分程度に入力エネルギーが減少したものと考えられる。図-14では入力エネルギーに対する構造部材のひずみエネルギーの割合を示す。基本タワーモデルでは、入力されたエネルギーのうち60%を超える値が、構造部材によりエネルギー吸収



基本タワーモデル 免震デバイス使用
図-13 タワーに入力されるエネルギー



基本タワーモデル 免震デバイス使用
図-14 入力エネルギーに対するひずみ
エネルギーの割合

しており、基部での塑性変形が大きいことが分かる。残りの40%弱のエネルギーについては減衰によって吸収されている。免震デバイスを用いたモデルにおいてはひずみエネルギーの割合が10%ほどの値を示しており、基部は塑性化を起こすものの免震デバイスを用いることで損傷を軽減することが可能と考えられる。

6. まとめ

免震デバイスを用いることで、剛性の低下によるタワーの変形量は大きくなることが分かった。しかし、軸力の変動量は大幅に低下することになり、負反力も解消された。また、基部の面内曲げによる塑性変形も軽減することが可能となった。本研究で用いた地震波の場合、卓越周期をはずすことが可能となったため、タワーに入力されるエネルギーも軽減することができた。

参考文献

- 1) 道路橋の免震構造システムの開発に関する共同研究報告書、1991.7
- 2) 吉田純司・阿部雅人・藤野陽三：1995年兵庫県南部地震における阪神高速湾岸線松の浜免震橋の地震時挙動と免震効果の検証，土木学会論文集，No.626，pp.37-50，1999.