

連続斜張橋の座屈固有値解析による破壊プロセスの検討

阪神高速道路 正会員 ○安積 恭子 正会員 篠原 聖二 正会員 杉山 裕樹
大日本コンサルタント 正会員 吉澤 努 正会員 平山 博

1. はじめに

一般的な桁橋は変形特性や振動モードが明確であり、損傷を許容する部位が道路橋示方書等にて示されている。現在計画中の4本主塔を有する連続斜張橋では、設計地震動を超える超過外力に対しても冗長性の高い構造を目指しているが、連続斜張橋は同種の橋梁が極めて少なく、構造特性も不明瞭であり、どのような損傷が致命的かを他事例などから把握することが困難である。そこで本検討では、連続斜張橋の構造特性を把握する観点も含めて、まず損傷が生じると橋梁全体系として不安定になる箇所を特定する。それらの箇所の特定結果を踏まえて部材の損傷が生じる順番等を踏まえた避けるべき破壊プロセスおよび望ましい破壊プロセスを設定する。その設定は今後、超過外力を入力した破壊プロセスの検討を行う際に活用することを考えている。

2. 対象橋梁

本検討の対象構造物は4本の主塔を有する連続斜張橋とした。図-1に対象橋梁の側面図と図-2に主塔の一般図を示す。主塔は橋軸方向にA型の鋼製主塔、主桁は鋼製の上下線分離桁、橋脚は鋼製ラーメン橋脚とした。支承条件は表-1のとおりであり、主塔位置および中間橋脚位置の支承は機能分離型支承とし、水平方向支持には免震ゴムバッファを想定している。主塔の部位名称が解析結果を示す際に必要になるため、図-2に示す通り定義する。なお、本検討では現時点の形状・寸法で検討している。

3. 検討方法

(1) 解析手法

本検討では、地震時に橋に生じた損傷を取り込んだモデルを設定してE_f法を用いた弾性座屈固有値解析¹⁾を行うことで、斜張橋の構造安定性にとって致命的となる破壊モードを特定する。対象とする損傷は、部材の曲げ破壊等により部材の曲げ剛性が低下し塑性ヒンジ化することおよび、水平支承が破断することを想定する。座屈固有値解析の初期状態は、完成時の死荷重（ケーブルのプレストレスを含む）が作用する状況の発生断面力を入力する。

(2) 評価方法

座屈固有値解析の基礎方程式は、式(1)のとおりとし、固有値問題として本式を満たす固有値 λ と固有ベクトル φ_i を算出する。座屈固有値 λ が1未満となると入力で想定した断面力に至る前に座屈が生じる、すなわち作用荷重に対して構造が不安定な状態に至ると評価する。

$$([K_L]-\lambda\times[K_G])\varphi_i=0$$

(1)

ここで、 $[K_L]$: 剛性マトリクス、 λ : 固有値、 $[K_G]$: 断面力（軸力）による幾何剛性マトリクス、 φ_i : 固有ベクトル

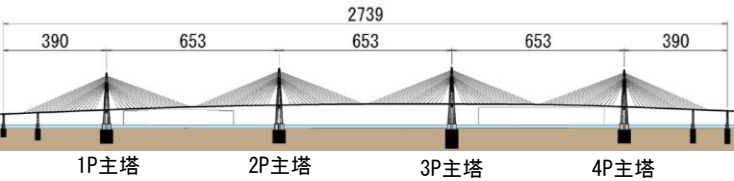


図-1 連続斜張橋 側面図（単位：m）

表-1 支承条件

	端橋脚	中間橋脚	側主塔	中央主塔	中央主塔	側主塔	中間橋脚	端橋脚
橋軸	可動	免震	免震	免震	免震	免震	免震	可動
橋軸直角	固定	免震	免震	免震	免震	免震	免震	固定

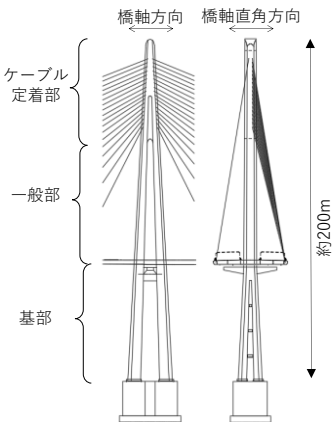


図-2 連続斜張橋 主塔側面図

キーワード 連続斜張橋，座屈固有値解析，橋軸A型主塔，破壊プロセス，塑性ヒンジ

連絡先 〒650-0023 神戸市中央区栄町通 1-2-10 読売神戸ビル
阪神高速道路株式会社 神戸建設部 TEL 078-331-9820（代表）

4. 座屈固有値解析

図-1 の連続斜張橋において部材毎に損傷を設けた座屈固有値解析を実施する。本稿では紙面の関係上、橋軸方向に着目した解析結果の代表ケースを表-2 に示す。表-2 の赤い丸はヒンジを導入した箇所である。なお、ここで $\lambda \equiv 0$ としているのは、解析開始時点で不安定と判断され、解析が収束しなかったケースである。

最も主塔高の高い3P主塔に着目した結果では、想定されるケースを対象とした解析の結果、ケース(d)のように主塔基部下端のみが損傷しても安定しているが、主塔基部下端など4か所が塑性ヒンジ化するケース(c)では不安定になることを確認した。主桁に着目すると、主桁剛性を著しく小さくした場合に、座屈モードの腹に相当する2か所(ケーブル非吊区間)をヒンジ化させて座屈固有値解析を行ったケース(e)では不安定になる。一方、主桁の1P~4P主塔吊区間のうち、主要モードにおいて主桁のたわみが大きくなる箇所に2か所ずつ、計8か所をヒンジ化させるケース(f)では不安定にはならないことを確認した。支承部に着目すると、超過外力により桁が過度に水平移動し、ケース(g)のように機能分離型支承の免震ゴムバッファが破断した場合に座屈固有値解析が著しく減少し1を下回るため不安定となることを確認した。橋脚においては、動的解析により比較的応答の大きい橋脚基部をヒンジ化させた解析の結果、ケース(h)のように端橋脚・中間橋脚をヒンジ化させても不安定にはならなかった。

5. 避けるべき破壊プロセスと望ましい破壊プロセスの設定

座屈固有値解析の結果から推定される橋の崩壊に至るまでの破壊プロセスのフローを図-3 に示す。望ましい破壊プロセスとは、①損傷イベントが多層化している②損傷イベントが同時多発的ではない③致命的な状態に至る損傷イベントが終盤に発生する、等の条件を満たしながら徐々に崩壊していくプロセスを想定している。一方で、避けるべき破壊プロセスは上記の逆で、致命的な状態に至る損傷イベントが最初に生じることや、多数の損傷イベントが同時多発的に生じることなどがあげられる。たとえば、地震による超過外力が生じた際に最初に免震ゴムバッファが損傷することは避けるべき破壊プロセスであるが、主塔基部下端が損傷し塑性化したのちに、上下端が塑性化し、最終的に上下端の塑性ヒンジ化が生じる場合は望ましい破壊プロセスとなる。

6. まとめ

本稿では、座屈固有値解析を用いることで、連続斜張橋に生じる損傷部位による橋梁全体系の安定・不安定を確認した。そのうえで、連続斜張橋における避けるべき破壊プロセスおよび望ましい破壊プロセスを設定した。実際に、対象橋梁が望ましい破壊プロセスとなるかの確認・検討方法は別論文²⁾にて検討をしているため参照されたい。

参考文献

- 1) 野上ら：長大斜張橋主桁の耐荷力評価手法としてのEf法の精度と終局強度照査法，土木学会論文集，2001.1
- 2) 吉澤ら：連続斜張橋のプッシュオーバー解析による破壊プロセスの検討，土木学会第78回年次学術講演会，2023.9 (投稿中)

表-2 座屈固有値解析結果（橋軸方向着目）

橋軸方向	ヒンジ化により不安定化する		ヒンジ化しても不安定化しない	
	(a)	主塔一般部上下端 ($\lambda = 0.77$)	(b)	主塔一般部上端 ($\lambda = 7.38$)
	(c)	主塔基部下端 ($\lambda \equiv 0$)	(d)	主塔基部下端 ($\lambda = 7.29$)
	(e)	主桁 ($\lambda \equiv 0$)	(f)	主桁 ($\lambda = 3.63$)
	(g)	支承破断 ($\lambda = 0.75$)	(h)	橋脚 ($\lambda = 3.69$)

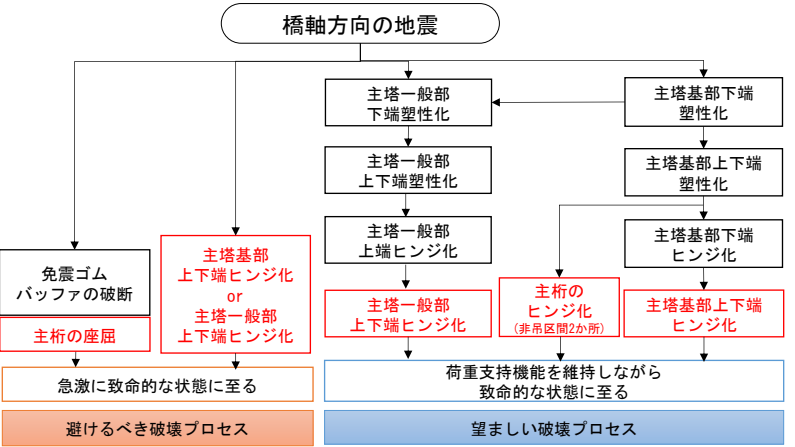


図-3 連続斜張橋の破壊プロセスフロー（橋軸方向着目）