

構造安全性及び破壊プロセスの評価における座屈固有値解析の有効性

長大 正会員 ○鈴木 俊洋 正会員 深谷 茂広 正会員 館 浩司
 阪神高速道路 正会員 杉山 裕樹 正会員 篠原 聖二 正会員 河野 晴彦

1. 背景

橋梁に対して性能照査型設計を行うにあたり、近年では想定外の外乱に対して危機耐性の観点から、直ちに脆性的な破壊に至らず、粘り強い破壊プロセスとなるような崩壊制御設計が求められている。

この崩壊制御設計の実現に向けては、橋に損傷が生じた場合に対する構造安全性の定量評価を行うとともに、橋全体の中で損傷（塑性化）を許容できる部位および損傷を抑制する必要がある部位を特定し、耐力階層化を図るキャパシティデザインを行う必要がある。

ただし、一般に道路橋示方書で示される橋の構造安全性については、各構造部材に対して部材の限界状態（終局状態）に至らないことで、橋全体の構造安全性が確保されるとしており、どの部材の終局状態が橋全体の終局状態に至らしめるかは必ずしも明らかにされておらず、橋全体の構造安全性の合理的定量評価に至っていない。

またキャパシティデザインを行うにあたり、一般的な桁橋であれば変形特性や振動モードが比較的明確であり損傷を許容する部位も標準化されている。一方で斜張橋やアーチ橋などの高次不静定構造物では、特定の荷重作用に対してどの部位の損傷が大規模崩壊や望ましくない崩壊形態を引き起こすかについては十分解明されておらず、その特定方法も一般化されていない。

そこで本稿では、橋の構造安全性を直接的に定量評価でき、望ましい破壊プロセスを簡易に評価できる手法として、座屈固有値解析手法を提案する。

2. 構造安全性と座屈固有値解析（Ef法）

耐震工学の分野では、構造安全性の評価に Pushover 解析が用いられることが多い。Pushover 解析は、幾何学非線形及び材料非線形を組み込んだ解析モデルに対して静的に荷重（変位）を漸増することで、非線形現象に対する不安定化現象を間接的に把握する手法である。

ただし、Pushover 解析では荷重—変位関係が発散する過程で不安定現象の確認を行うため、部材のどの箇所の損傷が不安定化現象に対して主たる要因になったかを確認するのは必ずしも容易でない。また、部材が破断・衝突するなどの構造系が不連続化する飛び移り現象（図-1(c)）などに対しては、荷重作用の設定が必ずしも一般化されておらず、解の収束性も悪化するなどの課題が残る。

一方、座屈固有値解析は不安定現象としての座屈現象を変形後の釣り合い条件から橋全体系の分岐座屈強度を求める解析手法であり、直接的に座屈荷重 P_{cr} および座屈モードを確認できる。また、座屈固有値解析は耐震工学で用いられる固有値解析と同程度の計算時間および入出力様式となるため、部材破断による飛び移り現象や部材損傷を考慮した塑性座屈解析を行うことが容易であり、望ましい破壊プロセスを早期に確認できる。

さらに、柱の初期不整や断面の降伏に起因する屈曲現象（図-1(b)）に対しては、接線有効弾性係数法（Ef法）を用い、オイラー座屈強度から耐荷力曲線に基づく座屈強度に補正することで、評価可能となる。

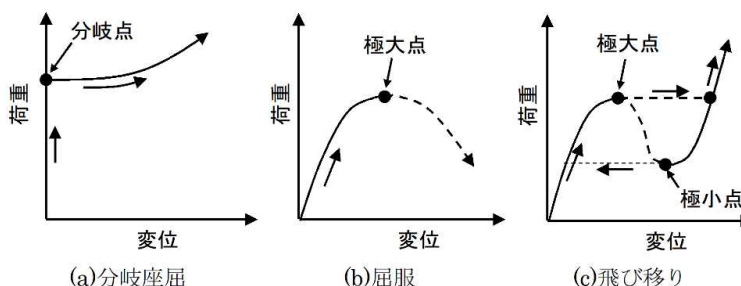


図-1 不安定現象の一覧とその区分¹⁾

キーワード 崩壊制御設計, 構造安全性, 破壊プロセス, 座屈固有値解析, キャパシティデザイン

連絡先 〒550-0013 大阪府大阪市西区新町 2-20-6 株式会社長大 大阪支社 TEL 06-6541-5796

3. 斜張橋に対する破壊プロセスの評価

ここでは具体例として、現在検討中の1主塔斜張橋に対する地震時の破壊プロセスの評価を行う。

地震時の本橋の橋軸方向の損傷機構としては、図-2 に示す①桁の水平変位⇒支承の

損傷，②桁の水平変位⇒ケーブルによる荷重の伝達⇒塔上部の損傷，③桁の水平変位⇒支承による水平力の伝達⇒塔基部・橋脚基部の損傷が主となる。各経路の損傷に対する構造安全性の評価は接線弾性有効係数法 (Ef法)²⁾を用いた座屈固有値解析によって行う。なお、座屈固有値 λ は、 λ 倍の死荷重による軸力が作用したときに系が不安定化するという意味である。

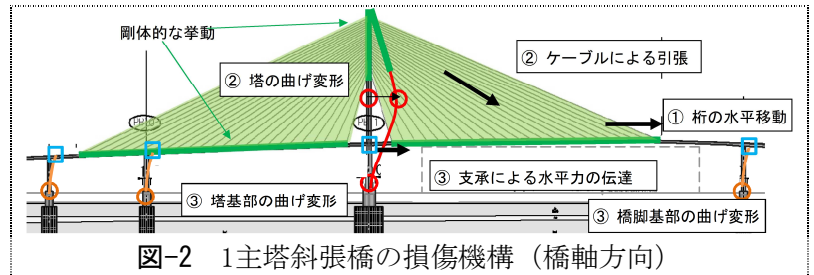


図-2 1主塔斜張橋の損傷機構 (橋軸方向)

3.1 支承破断に対する構造安全性

支承破断に対し、支承条件を可動にモデル化した座屈固有値解析では、無損傷状態の座屈固有値 $\lambda=2.57$ に対して、支承が破断した場合は $\lambda=0.96$ となり、死荷重状態で不安定化することが確認された。従って、損傷機構①の支承破断は避けるべき破壊プロセスであると評価される。

3.2 塔上部の損傷に対する構造安全性

塔上部の損傷をヒンジによってモデル化した座屈固有値解析では、座屈固有値 $\lambda=1.04$ となり、死荷重に対して不安定化する直前の状態であることが確認された。従って、損傷機構②の塔上部の損傷の局所化 (塑性ヒンジ化) も避けるべき破壊プロセスであると評価される。

3.3 塔・橋脚基部の損傷に対する構造安全性

塔基部、橋脚基部をヒンジ化した座屈固有値解析を行った結果、塔基部では $\lambda=2.56$ 、橋脚基部では $\lambda=2.45$ と安定しており、支承破断や塔上部の損傷に比べ冗長性が高い。ただし、塔・橋脚全てがヒンジ化した場合は $\lambda=1.03$ と不安定化直前となるため、塔もしくは橋脚いずれかの損傷を抑える必要がある。

3.4 望ましい耐力階層化

図-2 に示す損傷機構は、各作用が独立に発生せず、橋脚基部や塔上部・塔基部の損傷が並行して生じる。そこで、橋脚基部を主たる損傷と考えヒンジ化し、塔基部と塔上部は副次的な損傷に留まるとして曲げ剛性を初期剛性の0.2倍に低減した解析を行った。その結果、 $\lambda=2.23$ となり安全性が保たれることを確認した。以上より、支承破断や塔上部の損傷を抑え、橋脚基部を主たる損傷とする破壊プロセスが望ましいと評価される。

4. 結論

橋全体の構造安全性を直接評価し、望ましい破壊プロセスの特定を行うという観点で、座屈固有値解析手法は、その手法の簡便性と評価の明快さから有効である。

参考文献 1)土木学会：構造力学公式集 (第2版)，1994年11月

2)野上邦栄：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年1月

表-1 各損傷状態に対する座屈固有値と座屈モード

状態・座屈固有値	座屈モード・損傷位置 (橋軸方向)
0.完成系 (無損傷) $\lambda=2.57$ 安定	
1.支承破断 $\lambda=0.96$ 不安定	
2.塔上部損傷 $\lambda=1.04$ 不安定化直前	
3.塔基部損傷 $\lambda=2.56$ 安定	
4.橋脚基部損傷 $\lambda=2.45$ 安定	
5.塔・橋脚基部損傷 $\lambda=1.03$ 不安定化直前	
6.塔副次的損傷 + 橋脚基部損傷 $\lambda=2.23$ 安定	
凡例	□: 支承破断 ○: ヒンジ ○: 0.2EI