第26回橋梁等の耐震設計シンポジウム
講演論文集（2023年7月）

漸増動的解析（IDA）による 1主塔長大斜張橋の破壊プロセスの検証

篠田　隆作[1]・杉山　裕樹[1]・篠原　聖二[1]
鈴木　俊洋[2]・深谷　茂広[2]・　舘　　浩司[2]

[1]正会員　阪神高速道路株式会社　建設事業本部　神戸建設部（〒650-0023　神戸市中央区栄町通1-2-10）
[2]正会員　株式会社長大（〒550-0013　大阪市西区新町2-20-6）

1. はじめに

設計地震動について，道路橋示方書[1)]（以下，「道示」という．）では，発生することは極めて稀ではあるが橋に及ぼす影響が甚大な地震動としてレベル2地震動が定められている．レベル2地震動が作用した状況における橋梁の要求性能を設定し，要求性能を満足させるように設計することがことが基本的な耐震設計であるが，道路の耐災害性や危機耐性[2)]の観点から，レベル2地震動以上の外力が支配的な状況下においても，橋梁全体系でじん性の高い望ましい破壊プロセスに誘導することが求められている．

レベル2地震動以上の外力が支配的な状況で，橋梁全体系をじん性の高い望ましい破壊プロセスに誘導するためには，橋梁全体系としての冗長性を定量的に評価し，損傷を許容する部位と損傷を制御する部位を設定し，部位毎に確実な耐力の階層化を実現する必要がある．変形特性や振動モードが明確である一般的な桁橋は，損傷を許容する部位が道示に示されている．一方で，斜張橋等の高次不静定構造物は，作用に対しての損傷順序と橋が致命的な状態に至るまでの破壊プロセスが複雑であり，その特定方法も一般化されていないことが課題であった．

そこで，筆者らは文献3）で，1主塔長大斜張橋を対象に座屈固有値解析を用いた構造安定性の定量評価を行い，望ましい破壊プロセスを把握する手法を示した．耐震戦略の立案にあたって，簡易的に塑性ヒンジを想定する部位や副次的な塑性化を許容する部位を設定した座屈固有値解析を行い，構造安定性を定量的に算出したうえで望ましい破壊プロセスを求めた．一方で，文献3）では耐震戦略に基づき設計した橋梁について，レベル2地震動以上の外力を動的に作用させた際の破壊プロセスを確認するには至っていない．動的作用の応答を確認するためには時刻歴応答解析を行うことが一般的であるが，入力した地震動に対して最大応答値と制限値を比較する照査を目的としたものであり，破壊プロセスを確認することは難しい．そこで，本研究では入力地震動の加振倍率を漸増させながら時刻歴応答解析を行い，加振倍率と応答値の関係から構造物の耐震性を評価する漸増動的解析（以下，「IDA(Incremental Dynamic Analysis)」という．）により，橋梁全体系の破壊プロセスを検証する．

本稿では望ましい破壊プロセスを実現するように設計した1本主塔の長大斜張橋を対象に，IDAで設定する部材毎の損傷開始点及び終局状態の目安を提案し，IDAにより想定外の破壊プロセスが生じないことを検証した．さらに，IDAの結果を座屈固有値解析や漸増静的解析（以下，「Pushover解析」という．）の結果と比較し，IDAの特徴を述べる．

2. 耐震戦略に基づく破壊プロセスの検証

図-1に破壊プロセスの検証の全体フローを示す．耐震戦略として望ましい破壊プロセスと避けるべき

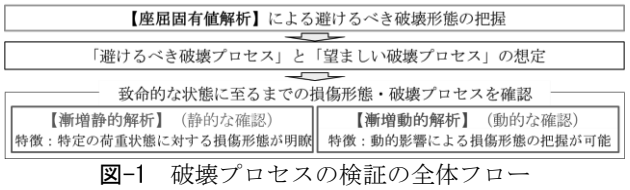
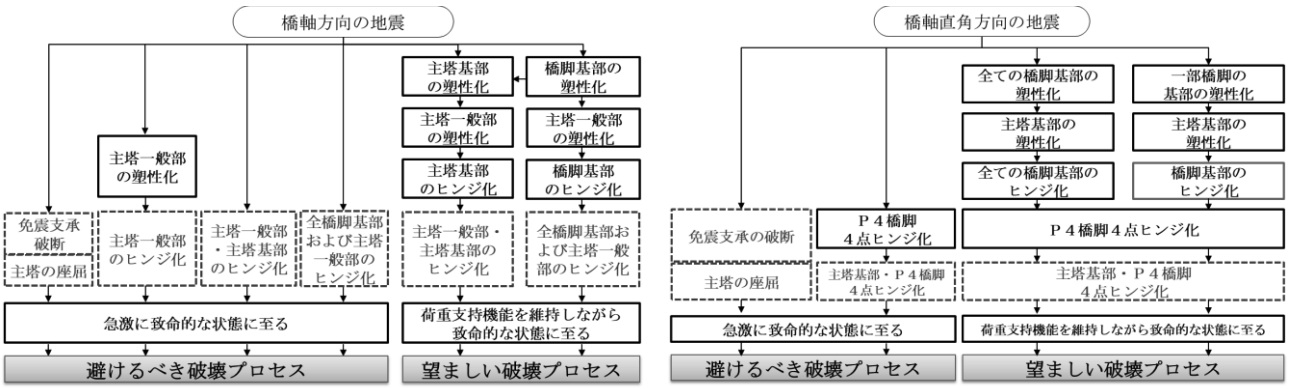
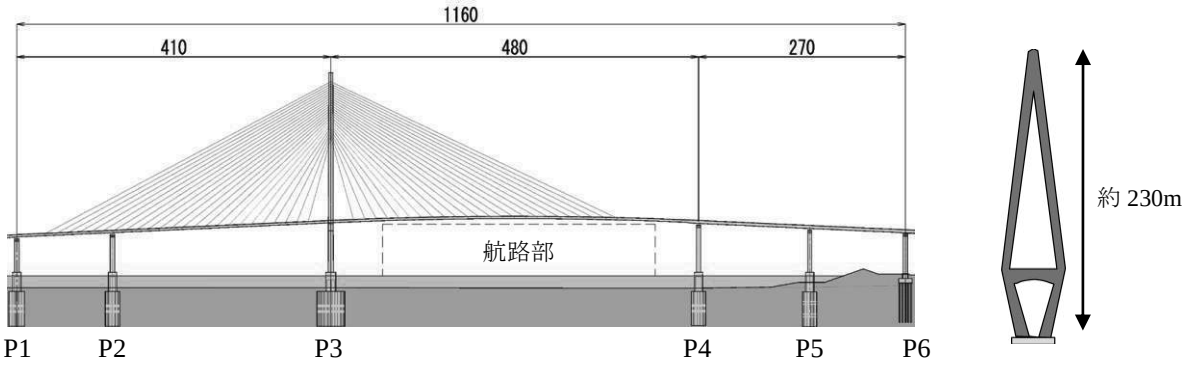


図-1　破壊プロセスの検証の全体フロー



(a) 橋軸方向　　(b) 橋軸直角方向

図-2 避けるべき破壊プロセスと望ましい破壊プロセス （点線：構造不安定となるイベント）



(a) 側面図（単位：m）　　(b) 主塔一般図（橋軸直角方向）

図-3 対象橋梁

破壊プロセスを把握するため，座屈固有値解析を行った．その後，橋梁全体系の破壊プロセスを確認するためにPushover解析およびIDAを行う．

(1) 耐震戦略の設定

座屈固有値解析等により検討した避けるべき破壊プロセスと望ましい破壊プロセスを**図-2**に示す[3,4]．

避けるべき破壊プロセスは座屈固有値による構造安定性が低下するもの，一部材の損傷により致命的な状態に至るものを設定する．橋軸方向と橋軸直角方向において，主塔の全体座屈に進展するゴムダンパーの破断を避けるべき破壊プロセスに設定した．

望ましい破壊プロセスは損傷が多層化しており，損傷の発生が同時多発的ではなく，致命的な状態に至る損傷が終盤に発生するものを設定した．致命的な状態に至る部材の損傷が生じるまでに，損傷を許容する他部材を塑性化させてエネルギー吸収を行い，橋梁全体系としてのエネルギー吸収性能を向上させ，じん性の高い構造になることを狙ったものである．

(2) 破壊プロセスの検証

破壊プロセスを検証するため，Pushover解析とIDAにより検証を行う．

Pushover解析は代表的な損傷モードに対して，動的解析で得られた慣性力（着目損傷部材の最大ひずみ時）を抽出し，その損傷モードに対する破壊プロセスを確認する[4]．部材の状態から耐力の階層を確認するものであり，同一ステップの同時性が確保されるために終局状態が把握しやすい解析手法である．

IDAは部材ごとの要求性能と応答値を比較し，橋梁全体系としての破壊プロセスを検証する．具体的には，座屈固有値解析やPushover解析により想定した破壊プロセスを経過すること，想定していない破壊プロセスが生じないことを確認する．さらに，IDAの結果を座屈固有値解析やPushover解析の結果と比較し，解析結果の対応とIDAの適用上の留意点を述べる．なお，Pushover解析の解析手法，解析方法および解析結果は文献4）を参照する．

3. 解析モデル

本検討の対象構造物は1主塔長大斜張橋とした．**図-3**に対象橋梁の側面図と主塔一般図を示す．主塔は鋼製ダイヤ型，主桁は鋼床版一箱桁，橋脚は鋼製ラーメン橋脚とした．対象橋梁は道示のレベル2地

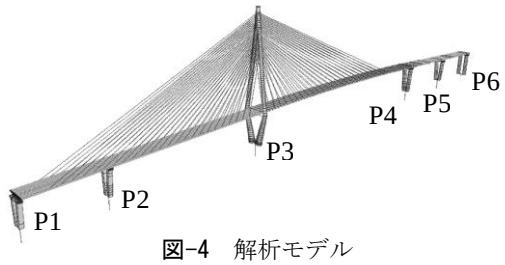
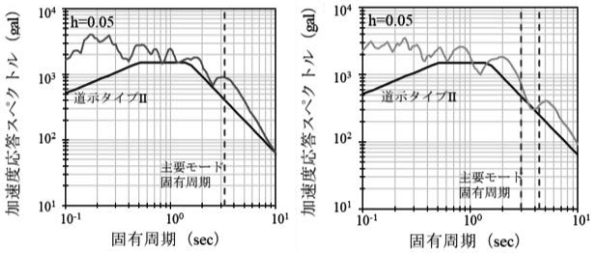


図-4 解析モデル

表-1 支承条件

	端橋脚 P1	中間橋脚 P2	主塔 P3	中間橋脚 P4	中間橋脚 P5	端橋脚 P6
橋軸方向	免震	免震	免震	免震	免震	可動
直角方向	固定	免震	免震	免震	免震	固定



(a) 橋軸方向　　(b) 橋軸直角方向

図-5 シナリオ地震動の加速度応答スペクトル

表-2 部材毎の損傷開始点と終局状態の目安

部材		損傷開始点	終局状態の目安	終局状態の目安の設定根拠
主塔	ケーブル定着部 一般部 基部	1 εy (降伏ひずみ)	Pue (最大荷重点)	徳永らの耐力照査法[6]
主桁		1 εy	2 εy	主桁の座屈固有値解析より安全側として構造安全性が保障されるひずみ
橋脚		1 εy	7 εy	道路橋示方書V編[1]
ケーブル	最大張力	Py (降伏荷重)	Pue (終局耐力)	Pue＝3.4Py
	最小張力	Pmin = 0	–	張力抜けの対策を行うことで終局状態には至らない
ゴムダンパー		γ = 250%	γ = 300%	破断ひずみの目安
ストッパー		Py (降伏荷重)	Pue (終局耐力)	Pue＝3.2Py
主塔基礎		My (降伏曲げモーメント)	Mue (終局曲げモーメント)	橋　　軸：Mue=2.9My 橋軸直角：Mue=3.7My

震動が作用する状況において，主塔，主桁，橋脚，ケーブルは弾性状態となるように設計した．支承はゴムダンパーを使用し，せん断ひずみが250%以内に留まるように設計した．

解析モデルを**図-4**に，支承条件を**表-1**に示す．解析は3次元複合非線形モデルを用い，汎用解析プログラムSeanFEMで実施した．レベル2地震動を超える作用に対しては部材のエネルギー吸収能を期待するため，主塔，主桁および橋脚は塑性化を考慮できる弾塑性梁（ファイバー）要素でモデル化した．なお，材料構成則は2次勾配をE/100とするバイリニアモデルで表現した．ゴムダンパーをハードニングを考慮したトリリニア要素，鉛直滑り支承をバイリニア要素とした．ケーブルは塑性化を想定していないために非抗圧ケーブル要素を用いた．基礎は線形ばね要素とした．減衰マトリクスは要素別剛性比例減衰を用いた．

4. 漸増動的解析による評価

(1) 解析手法

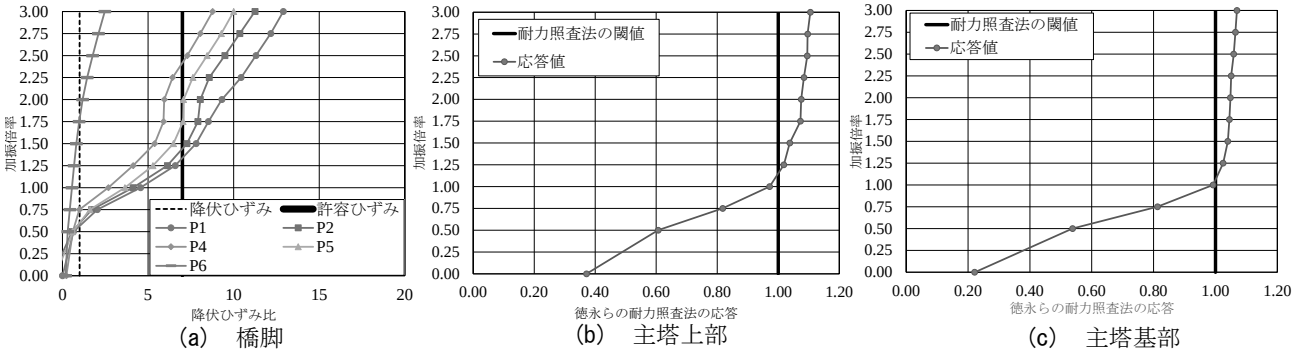
IDAは入力地震動の加振倍率を漸増させながら非線形時刻歴応答解析を繰り返し行った結果に基づき，加振倍率と応答値の関係から構造物の耐震性を評価する手法[5]である．本稿の加振倍率は0.25毎に漸増させた値（0.5~3.0）とし，最大応答値と目標限界値を整理した．入力地震動に加振倍率を線形に乗じたものについて，加振倍率の小さいものから順次入力し，時刻歴応答解析を行う．加振倍率毎に着目する部材の工学的指標に対して，最大応答値を確認し，IDA曲線を作成することや，加振倍率と損傷イベントの関係を整理することができる．

本検討で加振倍率1.0と設定する地震動は，仮想的なシナリオ地震動を設定する．**図-5**にシナリオ地震動の加速度応答スペクトルを示す．本橋の設計は，道示のレベル2地震動で弾性状態となるように設計しており，シナリオ地震動は設計で設定した以上の外力といえる．地震動の加振方向は損傷形態の評価を行うため，橋軸方向と橋軸直角方向に入力する．

(2) 部材毎の終局状態の目安の設定

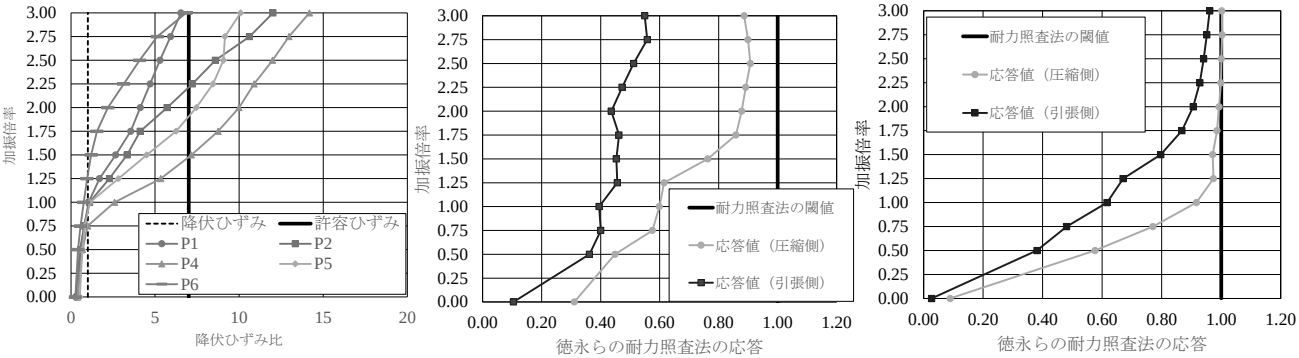
IDAは各部材に対して終局状態の目安を設定し，着目部材の最大応答値が限界状態を超過する加振倍率を確認する[5]．**表-2**に部材毎の損傷開始点，終局状態の目安および終局状態の目安の設定根拠を示す．

ここで示す終局状態の目安は，部材として終局状態に至ると想定される値を設定している．主塔は強い変断面性を有した曲げおよび圧縮が作用する構造特性であることを考慮し，道示の橋脚に準じたひずみ照査でなく，文献6）に示される最大耐力点相当の終局耐力（*Pue*）を設定した．主桁は偏平な鋼床版1箱桁で，正負交番載荷試験等による最大耐力点が求められていないため，座屈固有値解析により桁全長の剛性低下で不安定化しない剛性低下率（0.2*EI*）に対応するひずみ2*εy*を終局状態の目安に



(a) 橋脚　(b) 主塔上部　(c) 主塔基部

図-6 IDA 曲線（橋軸方向）



(a) 橋脚　(b) 主塔上部　(c) 主塔基部

図-7 IDA 曲線（橋軸直角方向）

設定した．橋脚は道示に基づく限界ひずみ$\varepsilon a=7\varepsilon y$を設定した．ケーブルは破断相当の引張荷重（*Pue*）を，ストッパーは最大強度点（*Pue*）を設定した．ただし，ケーブル，ストッパーは弾性部材でモデル化しているため，エネルギー一定則により近似評価した．主塔基礎は終局曲げモーメントをエネルギー一定則により評価した．ゴムダンパーは破断ひずみの目安として$\gamma=300\%$を設定した．

このように，各部材の終局状態の目安は部材毎に異なる工学的指標を設定しているため，部材の終局状態の目安と橋梁全体の終局状態が必ずしも対応していないことに留意が必要である．部材の終局状態の目安と橋梁全体系の終局状態が異なる影響については，**5. 検討結果**で考察を行う．

5. 検討結果

(1) IDA曲線

a) 橋軸方向

図-6(a)に橋脚のIDA曲線を示す．IDA曲線は各加振倍率で着目する応答値の最大応答を包括する曲線である．**図-6**(a)より，橋脚は加振倍率1.25～2.5倍程度で終局状態の目安（降伏ひずみの7倍）に至る．

図-6(b)に主塔上部のIDA曲線を，**図-6**(c)に主塔基部のIDA曲線を示す．主塔上部及び主塔基部は加振倍率1~1.25倍で部材の終局状態の目安に至る．また，主塔上部および主塔基部は加振倍率を漸増させた場合においても，終局状態の目安に到達した後では一定以上の応答が生じない結果となった．これは，ある部材が終局状態の目安に到達するとその部材がヒンジ化し，最大荷重が頭打ちとなり，別部材に荷重が再配分されることが原因と考えられる．

b) 橋軸直角方向

図-7(a)に橋脚のIDA曲線を示す．**図-7**(a)より，橋脚は加振倍率1.5～2.25倍程度で終局状態の目安（降伏ひずみの7倍）に至る．端橋脚であるP1,P6は終局状態の目安に到達しなかった．

図-7(b)に主塔上部のIDA曲線を，**図-7**(c)に主塔基部のIDA曲線を示す．橋軸直角方向について，ラーメン構造の2柱の片方は引張側となり，もう片方は圧縮となるため，それぞれの挙動を確認するために2つの曲線を示す．主塔上部は引張・圧縮で終局状態の目安には至らないことがわかった．一方で，主塔基部は圧縮の挙動において，加振倍率2.25倍で部材の終局状態の目安に至ることがわかる．橋軸方向の終局状態の目安に至る加振倍率と比較して，橋軸直角方向の加振倍率は大きいことがわかった．橋軸直角方向はラーメン構造で抵抗するため，橋軸方向よりもじん性が高く，冗長性のある構造といえる．

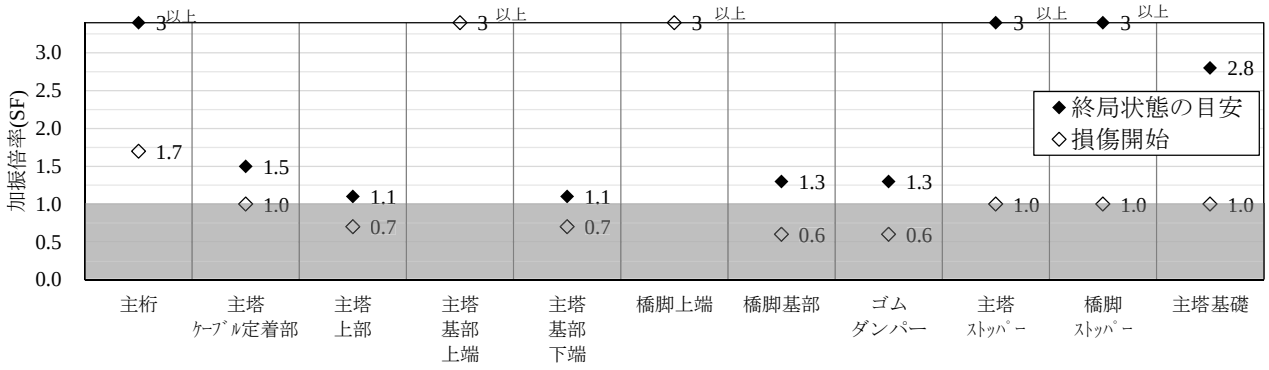


図-8　橋軸方向加振時のシナリオ地震動に対する損傷イベント

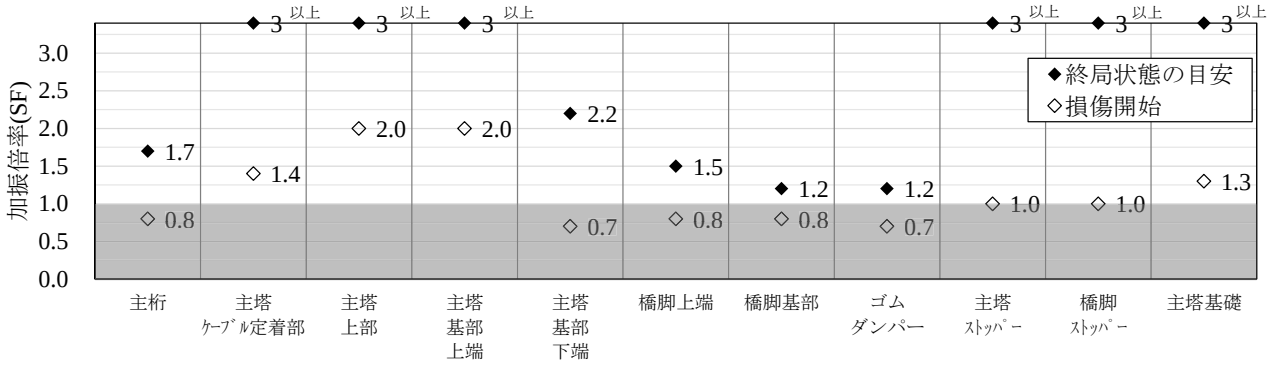


図-9　橋軸直角方向加振時のシナリオ地震動に対する損傷イベント

(2) 橋梁全体系に対する破壊プロセスの検証

a) 橋軸方向

図-8より，全構造部材が終局状態の目安に到達する加振倍率は1.0倍以上であるため，シナリオ地震動が作用した状況において，塑性化等の損傷が生じるものの橋全体系では致命的な状態に至らないことを確認した．耐力の階層化について，加振倍率0.6で橋脚が損傷し始め，加振倍率0.7で主塔基部及び主塔上部が損傷し始める．その後，加振倍率1.1で主塔基部及び主塔上部が終局状態の目安に到達する．損傷イベントが多層化していることや，損傷イベントが同時多発的ではないことから，耐震戦略で設定した望ましい破壊プロセスであることを確認した．なお，ゴムダンパーは加振倍率0.6でせん断ひずみが250%を超過するが，終局状態の目安に到達する加振倍率は1.3倍であるため，ゴムダンパーの破断等の脆性的な破壊には至らないことを確認した．

b) 橋軸直角方向

図-9より，橋軸方向と同様に構造部材のいずれも終局状態の目安に到達する加振倍率は1.0倍以上であるため，シナリオ地震動が作用した状況において，塑性化等の損傷が生じるものの橋全体系では致命的な状態に至らないことを確認した．

橋脚は加振倍率1.2で部材の終局状態に至るが，構造不安定化後の軟化挙動のエネルギー吸収性能の評価及び橋の構造不安定化に至る部材の限界状態の再評価を行うことで，橋が崩壊に至る部材の加振倍率を再評価できる可能性はある．ゴムダンパーは加振倍率1.2程度で破断ひずみの目安であるγ=300%に至るが，支承のせん断変形が小さい段階でストッパーの効果を発揮させるように構造最適化を図ることにより改善することが可能である．

それ以外の部材（主桁，主塔等）は適切にエネルギー吸収性能を図ることで加振倍率1.5以上でも終局状態の目安には至らないことがわかった．従って，シナリオ地震動が支配的な状況においても，想定外の避けるべき破壊プロセスは発現しないことが確認できた．

(3) 座屈固有値解析・Pushover解析との比較検証

代表モードにおけるIDAの結果について，座屈固有値解析およびPushover解析の結果と比較する．

a) 橋軸方向：主塔上部

座屈固有値解析の結果より構造が不安定となる橋軸方向で主塔上部が損傷する振動モードの比較結果を示す．

橋軸方向加振時の主塔一般部損傷モードについて，**図-10(a)**より，Pushover解析は加振倍率が1.02で構造が不安定化に至った．**図-10(b)**より，IDAは加振倍率が1.1で終局状態の目安に到達した．**図-10(c)**

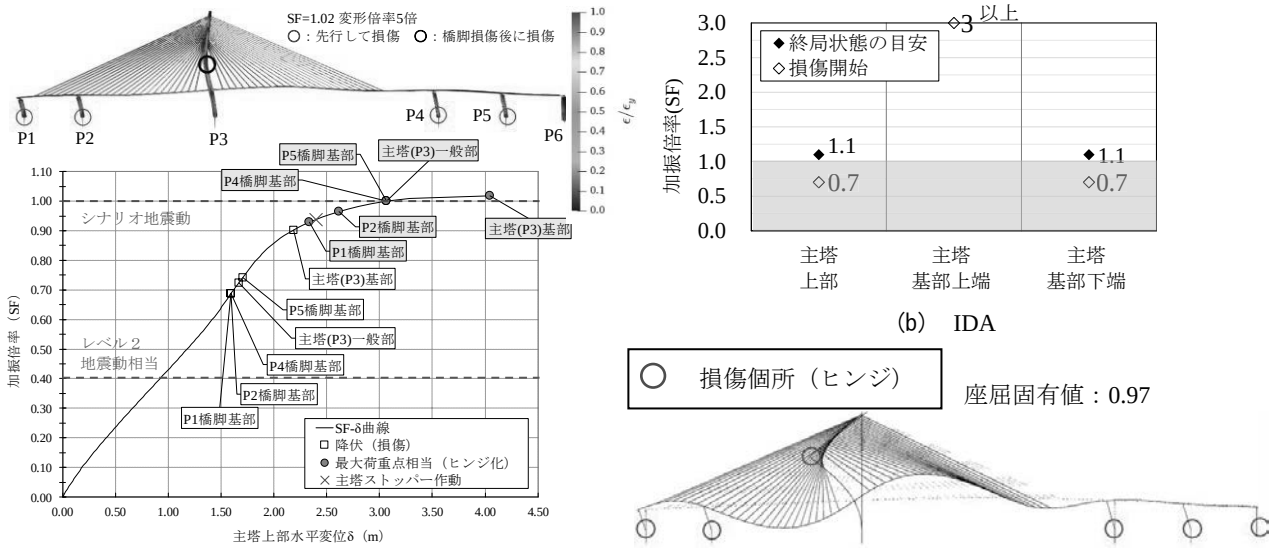


図-10 破壊プロセスの検証（橋軸方向：主塔上部の損傷）

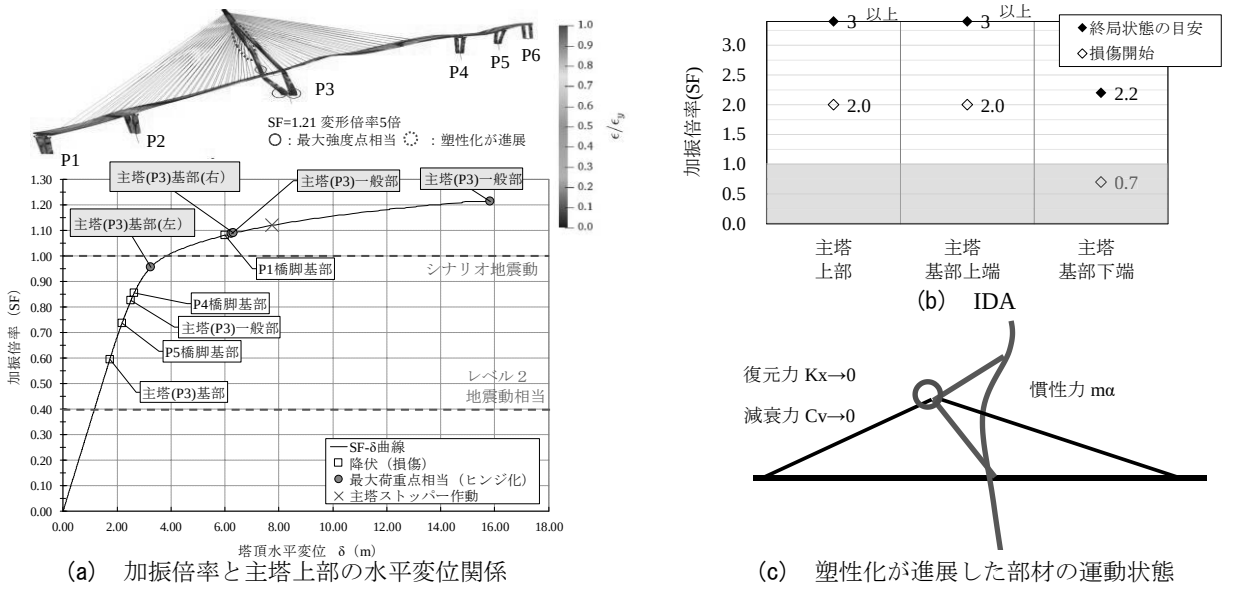


図-11 破壊プロセスの検証（橋軸直角方向：主塔基部の損傷）

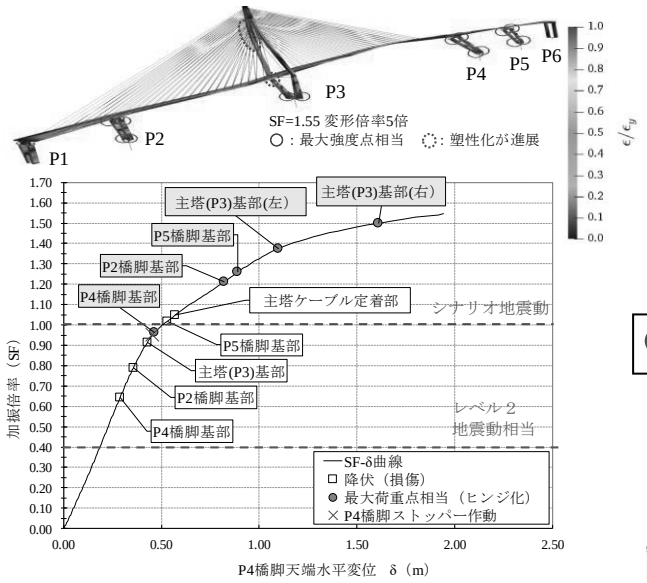
より，損傷部がヒンジ化した座屈固有値解析では座屈固有値が0.97であり，構造が不安定な状態となった．なお，座屈固有値が1未満であれば作用荷重に対して，構造が不安定な状態に至ると評価する[3)]．

座屈固有値解析では主塔上部の損傷を仮定した時が最も厳しい結果となったために，主塔上部の最大耐力は橋梁全体系の最大耐力と考えることができる．ここでIDAの加振倍率（1.1）がPushover解析の加振倍率（1.02）と比較して若干大きくなった原因は，IDAでは時刻歴応答解析を行っており，減衰を考慮している影響と考えられる．

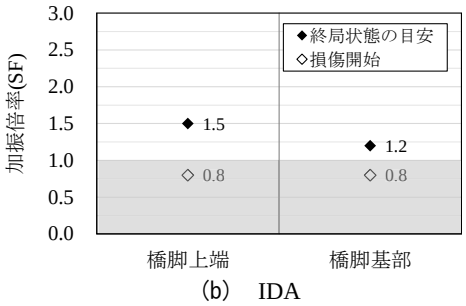
b）橋軸直角方向：主塔基部

IDAの結果がPushover解析の結果よりも危険側となった事例として，橋軸直角方向で主塔基部が損傷する振動モードの比較結果を示す．

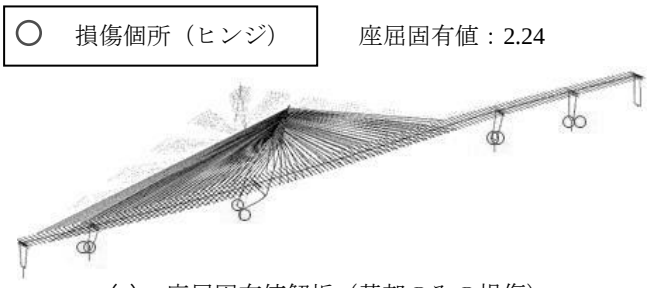
橋軸直角方向加振時の主塔基部損傷モードについて，**図-11(a)**より，Pushover解析では加振倍率が1.21で構造が不安定化に至った．一方，**図-11(b)**より，IDAでは加振倍率が2.2で終局状態の目安に到達した．この要因として，**図-6(c)**のIDA曲線より，主塔基部は加振倍率1.25で最大耐力値がほぼ1.0近傍となり，そこから加振倍率を漸増させても最大耐力値はほとんど変化しないことが確認された．これは部材の損傷による荷重の再分配だけでなく，主塔全体の変形に伴う減衰力が過大に作用したためと考えられる．すなわち**図-11(c)**に示すように，実際には



(a)　加振倍率と P4 橋脚天端の水平変位関係



(b)　IDA



(c)　座屈固有値解析（基部のみの損傷）

図-12　破壊プロセスの検証（橋軸直角方向：橋脚基部の損傷）

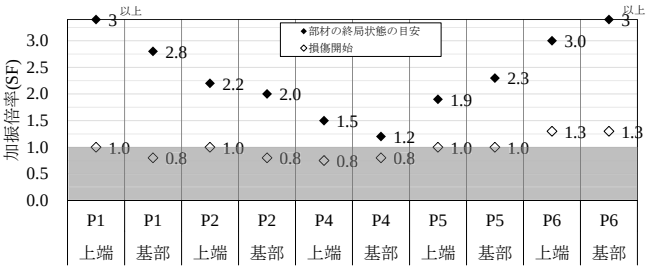


図-13　IDA（橋軸直角方向の橋脚）

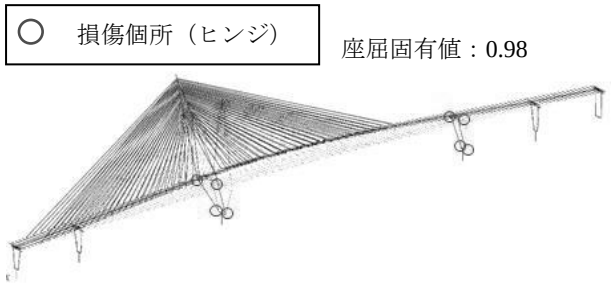


図-14　座屈固有値解析（上端と基部の損傷）

部材が損傷（塑性化）すると復元力が低下するため当該断面の減衰力も低下するが，本検討では長大橋の動的解析で標準的な初期剛性を用いた要素別剛性比例減衰を用いているため，部材の損傷に伴う減衰力の低下が考慮されていない．

このように部材全体が損傷し最大耐力近傍で推移する場合は，減衰力を過大に評価していることや材料の軟化勾配の無視の課題等もあり，IDAによる評価が難しい領域といえる．一方，Pushover解析では減衰力が働かないことから加振倍率は1.21と小さくなる．従って，終局状態の目安に到達する真値は1.21～2.2の間にあると考えられる．Pushover解析では過小評価となり，IDAでは過大評価となる可能性がわかった．

c）橋軸直角方向：主塔基部および橋脚基部

IDAの結果がPushover解析の結果よりも安全側となった事例として，橋軸直角方向で主塔基部と橋脚基部が損傷する振動モードの比較結果を示す．

橋軸直角方向加振時の橋脚基部の損傷モードについて，**図-12(a)**より，Pushover解析では加振倍率が1.55で構造が不安定化に至った．**図-12(b)**より，IDAでは加振倍率が1.2で終局状態の目安に到達した．**図-12(c)**より，座屈固有値解析では座屈固有値が2.24であり，構造が安定な状態になることがわかった．**図-13**に全ての橋脚の上端と基部に着目したIDAの結果を示す．**図-12(b)**におけるIDAの加振倍率1.2について，全橋脚の内，最も加振倍率の小さい評価となるP4橋脚を抽出した値である．

図-14より，橋軸直角方向において，主塔と橋脚の基部及び上端の損傷を仮定した座屈固有値は0.98であり，構造の不安定化に至っている．つまり，橋梁全体系の構造不安定化のクリティカルとなる状態は橋脚の基部と上端が終局状態の目安に到達した時点と考えらえる．**図-13**より，P4橋脚の上端が終局状態の目安に到達する加振倍率は1.5であるため，Pushover解析の加振倍率1.55と概ね整合する値となった．着目部位が終局状態に至っても橋梁全体系としての終局状態に至らない場合，IDAはシステムリ

ダンダンシー[7]を過小評価する可能性があることがわかった．なお，IDAの精緻化を行うためにはモデル化や構成則の設定等を工夫する必要がある．

d）まとめ

IDAとPushover解析を比較したが，着目する加振方向や部材により，終局状態の目安に到達する加振倍率が異なる傾向を示し，評価結果はばらつくものであった．IDAのみによるシステムリダンダンシーの評価とはせずに，座屈固有値解析，Pushover解析およびIDAの結果を相互に補い評価するのが望ましいことがわかった．

6. おわりに

本稿では望ましい破壊プロセスを実現するように設計した1本主塔の長大斜張橋を対象に，IDAを用いて破壊プロセスを検証した．以下に得られた主な知見を示す．

(1) IDAの結果より，橋軸方向および橋軸直角方向を対象とした加振倍率とシナリオ地震動の損傷イベントの関係において，全構造部材が終局状態の目安に到達する加振倍率は1.0倍以上であるため，シナリオ地震動が作用した状況において，塑性化等の損傷が生じるものの橋全体系では致命的な状態に至らないことを確認した．

(2) IDAとPushover解析での整合性を代表モードで確認した．その結果，部材の終局状態が橋梁全体系の終局状態と一致する場合，IDAとPushover解析の結果が比較的整合することがわかった．部材全体が損傷し最大耐力近傍で推移する場合は，減衰力を過大に評価する特徴によりIDAの結果は橋梁全体系の終局状態を過大評価する可能性があることがわかった．また，着目部位が終局状態に至っても橋梁全体系としての終局状態に至らない場合，IDAはシステムリダンダンシーを過小評価する可能性があることがわかった．

(3) (2) より，IDAでは各部材の終局状態の目安の設定や，モデル化の設定により終局状態の目安に至る値が変動することがわかった．IDAの精緻化を行うためにはモデル化や構成則の設定等を工夫する必要がある．従って，破壊プロセスの検証はIDAの各損傷の絶対値のみに着目した評価とはせずに，座屈固有値解析やPushover解析の結果等と相互に補い評価することが望ましい．

参考文献

1) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，2017.11
2) 本田利器，秋山充良，片岡正次郎，高橋良和，野津厚，室野剛隆：「危機耐性」を考慮した耐震設計体系―試案構築に向けての考察―，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.72,No.4（地震工学論文集第35巻），pp.I_459-I_472,2016
3) 篠田隆作，杉山裕樹，篠原聖二，河野晴彦，鈴木俊洋，深谷茂広，舘浩司：座屈固有値解析による構造安定性の定量評価，第25 回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集，pp. 31-36，2022
4) 藤原眞幸，河野晴彦，篠原聖二：1主塔長大斜張橋の耐震特性の評価　～耐震戦略の実現に向けて～　，阪神高速道路第55回技術研究発表会論文集，2023
5) 谷口惺，五十嵐晃，木田秀人：漸増動的解析(IDA)に基づく長大橋の耐震性能評価，土木学会論文集A1，Vol. 70，No. 4，pp. I_323-I_333，2014
6) 徳永宗正，小野潔，橋本亮，西村宣男，谷上裕明：繰り返し塑性履歴の影響を考慮したファイバーモデルによる鋼骨組構造の耐震性能照査法の提案，土木学会論文集A，Vol. 65，No. 1，pp. 121-141，2007
7) 奥井義昭，傳田諒，熊木和輝，佐久間智：鋼橋のシステムリダンダンシーの評価方法とLoad rating におけるシステム係数の提案，構造工学論文集，Vol. 68A，pp. 1-10，2022