# 漸増動的解析(IDA)に基づく 長大橋の耐震性能評価

谷口 惺1・五十嵐 晃2・木田 秀人3

 <sup>1</sup>学生会員 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻(〒615-8540京都市西京区京都大学桂) E-mail:taniguchi.sei.48n@st.kyoto-u.ac.jp
<sup>2</sup>正会員 京都大学大学院工学研究科准教授(〒615-8540京都市西京区京都大学桂) E-mail:igarashi.akira.7m@kyoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 ショーボンド建設株式会社(〒536-0022 大阪市城東区永田3丁目12番15号) E-mail:kida-h@sho-bond.co.jp

大レベルまでのリスク水準を含む様々な地震動入力に対する構造物の耐震性を評価する手法として、漸 増動的解析IDA (Incremental Dynamic Analysis, IDA) がある.この手法は、地震入力波の強度を漸増させ た非線形時刻歴応答解析を行うことで得られるIDA曲線に基づいて構造物の性能を評価するものであり、 動的なプッシュオーバー解析に位置付けられる手法である.動的応答特性や損傷と部材挙動が複合的に干 渉しあうような複雑な地震応答特性を持つ長大橋では、それを踏まえた高度な地震時性能評価が求めら れることから、IDAの適用が有効な方法論であると考えられる.本論文では、仮想的な大スパン鋼Vレッ グラーメン橋を対象としてIDAを実施し、損傷順序を考慮した耐震性評価に対する有効性を示す. また、長大橋の耐震補強においては、特定個所の補強が別の部分の損傷を引き起こす可能性があり、こ れが耐震補強にあたっての大きな課題となることがあるが、IDAではそうした効果を事前に検討する上で 有用な手法であることを、計算例により示す.

Key Words : incremental dynamic analysis, long-span bridge, seismic performance assessment

### 1. はじめに

長大橋の耐震性能評価は、特に大地震に対する構造物 の安全性を確保する上で重要である.耐震設計には性能 設計の考え方が用いられており、橋梁ごとに役割や機能 を踏まえた耐震性能が設定され、これを満足するよう設 計がおこなわれる.耐震性能は、交通量や代替経路の有 無、被災後の復旧の難易度などを考慮して設定される. 橋の供用期間中に発生する確率は低いが強度の大きい地 震動に対して弾性設計をすることは不合理であることか ら、大地震に対しては一定の損傷を許容してエネルギー の吸収を図るが、発生する損傷が橋梁の安全性や復旧性 に与える影響を一定に抑える損傷制御設計がおこなわれ ている.橋脚基部の弾塑性応答によりエネルギーの吸収 を図り地震力を低減する設計がこれにあたる.

一般橋の場合,橋脚基部という特定の予測できる部位 での降伏を許容し,その塑性率が許容塑性率以内となる こと,および地震後の残留変位を上部構造の慣性力作用 位置までの高さの1/100以下とする<sup>1)</sup>規定を満たすことを 確認することになる.これに対し,長大橋は一般に構造 系としての地震作用メカニズムや構成部材の動的特性が 複雑な構造であることに起因して,設計上期待した順序 で期待した部位が損傷を生じるとする仮定についても検 討を要する問題であり,こうした損傷が生じる部位や順 序の予測や決定,およびその妥当性が課題である.

このような長大橋の耐震性能評価の問題に対して、漸 増動的解析(Incremental Dynamic Analysis, IDA)の適用に 着目することが考えられる. IDAは入力波の強度を漸増 させて非線形時刻歴応答解析を行い、その入力強度と構 造物の応答の関係から耐震性能および地震応答特性を評 価する手法である. VanvatsikosらはIDAを鋼剛接骨組み に適用し、大地震に対する構造物全体系の終局耐力を評 価した<sup>3</sup>. また、中澤らは多数の実地震動記録を用いて 確率論的に免震建築物の耐震安全性を評価した<sup>3</sup>. 米国 では、IDAによる剛接骨組みの終局耐力算出法が FEMA350に示されており<sup>4</sup>、実設計にもIDAが普及しつ つある. このように、IDAは大地震に対する構造物の終 局耐力を評価するために建築分野を中心に用いられてい る. 一方、橋梁を対象とした検討としては、Marderらが 高速道路の鉄筋コンクリート橋脚にIDAを適用し、地震 の発生確率と構造物の損傷度を関連づけることでリスク アセスメントを行っている<sup>5</sup>.また,Filipovらはイリノ イ州の準免震橋を対象に,構造形式をパラメトリックに 変化させてIDAを行い耐震性を評価した<sup>6</sup>.

以上の既往の研究に見られるように, IDAは大地震に 対する構造物全体系の耐震安全性評価と, リスクアセス メントの2つの側面を持つ.本論文では前者に主眼を置 き,仮想的な5径間連続鋼Vラーメン橋を対象として, 提案手法の適用例を示す.それぞれの部位が損傷を受け る入力波の強度を整理することで,構造物が損傷を受け る順序を評価する.

また,長大橋に対する耐震補強では,ある部分の補強 が結果として別の部位の損傷を引き起こす可能性がある. 耐震補強を施すと動的特性が変化して新たに別の部位が 弱点となることがあるので,特に損傷順序の評価が重要 である.そこで,損傷順序の考慮が可能な提案手法を用 いて耐震補強を評価し,有用性を検証する.適用例とし て,5径間連続鋼Vラーメン橋主桁の当て板補強を取り 上げる.当て板補強が他の部位に与える影響を,提案手 法を用いて評価する.

# 2. 漸增動的解析(IDA)

IDAは、地震動入力の振幅を徐々に増加させながら非線形時刻歴動的応答解析を繰り返し行った結果に基づき、 構造物の耐震性能を評価する手法である.入力波は振幅 倍率(以下,SF)を乗じることで線形に振幅調整され、 振幅の小さいものから順次入力される.それぞれのSF での最大応答値をまとめることで、IDA曲線を描くこと ができる.以下にIDA解析の手順を示す<sup>2</sup>.

- (1) 対象構造物に応じて地震波を選択する.
- (2) 選択した地震波を次式のようにSFを乗じて線形に振幅調整する.SFを乗じることで大小様々な強度の入力波を作成する.



$$a_{SF} = \lambda \cdot a \tag{1}$$

ここに, *asF*:それぞれのSFに対する入力波 *a* :選択された地震波 λ :振幅倍率(SF)

- (3) SFの小さい入力波から順次入力して非線形時刻歴動 的応答解析を行い、各々のSFの値に対応する最大応 答値を求める.
- (4) 図-1に示すように、横軸を着目する最大応答値を表 す指標、縦軸をSFの値としたグラフを描き、IDA曲 線を得る.
- (5) 限界状態を設定し、着目する最大応答値が初めに限界状態を上回るSFの値を求める.例えば、図-1では λ=1.25で初めて限界状態を上回る.
- (6) 対象とする全ての部位あるいは応答値に対して同様 に限界状態に対応するSFを求め整理することで,損 傷順序や弱点となる部位を評価する.さらに、SFを 対応する地震の再現周期などの形で地震危険度の指 標と関連付けることにより、リスク分析への応用も しばしば行われている<sup>5</sup>.

## 3. 適用例

## 3.1 対象橋梁

IDAによる耐震性能評価の対象例とした橋梁であるA 橋の一般図を図-2に示す.A橋は5径間連続鋼Vレッグ ラーメン橋であり,橋長は400mである.主桁は2つの 鋼箱桁と鋼床版で構成されている.中間橋脚(P2,P3)は箱 型断面を有する鋼製のVレッグ橋脚,端橋脚(P1,P4)は鉄

変形量

変形量

限界状態

1.75

5.1 52.1 Cor 1 1

0.75 Cale S

0.25

0



筋コンクリートラーメン橋脚であり,基礎は各々ケーソン基礎,杭基礎を想定する.中間橋脚基部はピボット支承(固定支承)で支持され,端橋脚では可動支承を仮定している.

モデル化は、曲げによる軸力変動が考慮できるファイ バー要素を用いておこなう. 鋼材の非線形性は2次勾配 がE/100のバイリニアモデルで表現する. コンクリート および鉄筋の履歴則は,道路橋示方書IIIコンクリート橋 編<sup>7</sup>(以下,道示Ⅲ)の材料構成則を使用する.A橋の 鉄筋コンクリート橋脚は既存不適格であり現行の道路橋 示方書の配筋基準を満たしていないと仮定したので、横 拘束効果を期待しない道示Ⅲの材料構成則を用いる. 可 動支承の履歴復元力は、損傷前の動摩擦力、破損、破損 後の動摩擦力を考慮できるようモデル化を行う. 仮定し た履歴復元力モデルを図-3に示す.荷重は、上沓と下沓 の相対変位が可動支承の移動可能量uaに達するまでは動 摩擦力F1,荷重が支承耐力F2に達した後は動摩擦力F3 の値とする履歴モデルである、ピボット支承は斜めに設 置されており破壊後の挙動を予測する根拠が乏しいこと から、線形ばね要素でモデル化した. 基礎の地盤ばねは 線形要素でモデル化する. なお、解析には汎用ソフトウ ェアSeanFEMを用いた.

本論文では、A橋は港湾部に建設されていると想定したので、地震波として道路橋示方書V耐震設計編<sup>1)</sup>(以

F2

F3

F1

ua



下,道示V)に記載された標準波Ⅱ-Ⅲ-1を選択した. IDA解析では地震記録間で応答値にばらつきが見られる. これらの結果のばらつきに対処するため,一般に10から 20波程度の地震波が選択され<sup>Φ</sup>IDA解析がおこなわれる. 一方,本論文は地震記録間の応答のばらつきへの対処で はなく,構造物の損傷順序を評価することを目的とした ので,入力波は1波のみとした.SFは0.50,0.75,1.00,1.25, 1.50,1.75の6種類を用いる.なお,λ=1.00は設計レベル を表す.選択した地震波にSFを乗じることで図-4に示す 加速度応答スペクトルをもつ入力波が作成される.これ らをSFが小さいものから順次入力し,IDA曲線を描く.

# 3.2. IDA曲線

3章で示した手順で得られるIDA曲線を示す. IDA曲 線に用いる指標として,主桁ひずみ,V脚ひずみ,端橋 脚変位,ピボット支承荷重,可動支承の荷重と変位を選 択する.これらはいずれも大地震により損傷が生じる可 能性のある部位に関する指標である.

# (1) 主桁ひずみ

最も小さいSFで降伏する断面での主桁ひずみのIDA曲線を示す.図-5に圧縮ひずみ、図-6に引張ひずみのIDA曲線を示す.IDA曲線の横軸は応答ひずみの降伏ひずみ



に対する比を表す.縦軸はSFを表す.圧縮側では部材 の降伏より先に局部座屈が生じる可能性がある.この現 象を評価するため,図-7に示す低減率を導入してひずみ を評価する.低減率は道路橋示方書II鋼橋編<sup>30</sup>(以下, 道示II)に示された手法で算出する.図-7に示すように, 低減率を導入すると降伏と局部座屈のいずれか先行して 発生する現象を評価できる.

低減率の算出式を式(2)に示す.

$$\alpha = \frac{\sigma_u}{\sigma_y} = \begin{cases} 1.0 & (R \le 0.5) \\ 1.5 - R & (0.5 < R \le 1.0) \\ 0.5 / R^2 & (1.0 < R) \end{cases}$$
(2)

ここに,

 $\sigma_u$ :局部座屈強度

 $\sigma_v$ :降伏強度

R:幅厚比パラメーター

最大圧縮ひずみに着目すると、SFの値を増加させて いった時に中央スパンP2側の断面で最初に損傷が生じる. 低減率は $\alpha = 0.67$ であり、SFの値が0.50で局部座屈の発 生することに対応している.最大引張ひずみに着目した 場合は、主桁P4橋脚側のスパンで最大となっており、こ の断面が弱点となっている.引張ひずみによる降伏が初 めに発生するSFの値は0.75である.以上をまとめると、



図-7 局部座屈の評価



検討しているケースでは局部座屈が先行して発生するこ とが分かる.

# (2) V脚ひずみ

V脚は主桁自重等の影響で圧縮軸力が作用しており, 圧縮側での局部座屈もしくは降伏が先行して発生すると 考えられる.したがって,最大圧縮ひずみでV脚ひずみ を評価することとした.局部座屈の評価法は主桁と同様 である.図-8に圧縮ひずみのIDA曲線を示す.最もひず みが大きくなるV脚の主桁側径間側の断面を対象とする. 最もひずみが大きくなるP2側径間側においても,降伏ひ ずみを上回ることはなかった.IDA曲線がほぼ線形にな っていることからも,V脚は弾性挙動していることが分 かる.

#### (3) 端橋脚変位

端橋脚天端の水平変位に着目して、橋脚の性能を評価 する.図-9にP1,P4橋脚天端の最大水平変位IDA曲線を示 す.P1橋脚はえ=1.25にて降伏変位を初めて上回るが、 え=1.75でも終局変位には達しない.P4橋脚はえ=1.00に て降伏に達し、え=1.75では終局変位を上回ることが分 かる.P1は補強が施されており耐力が大きいが、P4は 現行耐震基準を満足しておらず、耐力が異なる橋脚であ ることを反映した結果となっている.図-10にP1橋脚の 変位と対応する曲げモーメントの関係を示す.それぞれ のSFについての最大変位と最大曲げモーメントをプロ



ットした図となっている.また,道示Vに示された地震 時保有水平耐力法により算出した降伏変位,終局変位お よび骨格曲線を併せて示す.IDAによる曲げモーメント 一変位曲線は,地震時保有水平耐力法による骨格曲線を 包絡した位置にあり,IDAによる応答のほうが大きくな っていることが分かる.端橋脚は高次モードの影響が卓 越していることが理由として考えられる.

# (4) ピボット支承荷重

ピボット支承はP2,P3にそれぞれ左右2か所ずつ設置 されている.これらの支承の荷重に関するIDA曲線を図-11に示す.横軸はピボット支承に加わる荷重,縦軸は SFの値であるλを表す.P3橋脚基部の支承がλ=1.75に て支承耐力を上回る結果となった.IDA曲線は通常,横 軸に変形に対応する量を用いるが,固定支承の状態を表 示することに適した量として支承に加わる荷重で評価す ることとした.





図-13 損傷が生じる SF

#### (5) 可動支承

可動支承はP1,P4のそれぞれに左右2か所ずつ設置されている.図-12に上沓・下沓間の相対変位に関する IDA曲線を示す.4支承のIDA曲線は概ね一致しており,  $\lambda$ =0.50で可動支承の移動可能量を上回るが、 $\lambda$ =1.75で も支承は上沓が下沓の範囲より完全に逸脱する脱落には 至らないことが分かる.

# 4. 損傷順序と弱点部材の特定への適用

3章で求めたIDA曲線より,各々の損傷状態が生じる SFの値を整理する<sup>®</sup>ことにより,損傷順序の評価が可能 となる.図-13に各損傷状態が初めて生じるSFの値を整 理したものを,図-14に損傷順序を示す.図-13において 赤色の斜線でハッチングした範囲は,構造物の倒壊につ ながると考えられる損傷を表す.A橋では端橋脚P1,P4の 終局状態がこれに相当する.青色の斜線でハッチングし



図-12 可動支承相対変位 IDA 曲線



# 図-14 A橋の損傷順序

た領域は、大地震時のみに許容されると考えられる損傷 を表す. 道示Vに示された耐震性能2に相当する損傷で、 A橋では鋼部材の降伏,RC橋脚の降伏,支承の軽微な損 傷がこれに該当する. ハッチングされた領域に点がプロ ットされる場合は、耐震性能上問題があると評価する. 許容される損傷は大地震時に発生する軽微な損傷であり, ハッチングされていない領域で表される. A橋はまず主 桁が局部座屈し、上沓と下沓の相対変位が可動支承の移 動制限量を超過する. その後, P4が終局状態となる. こ こまでが設計レベル以下の強度の地震動に対して生じる. 次いで,設計レベル以上の地震動に対してP1橋脚の降伏, ピボット支承の破壊の順に発生する.A橋は、損傷後の 補修が大掛かりとなる主桁の損傷が生じることや、設計 レベルの地震動でP4橋脚が終局状態に達するなどの問題 点があり、これらがA橋の弱点となっていることが分か る.

# 5. 耐震補強設計への適用例

IDAによる耐震性能評価(以下,提案手法)を,長大橋の耐震補強設計候補に適用することで耐震補強方策の 得失を検討することが可能であることが考えられる.A 橋は,設計レベルの地震動に対して図-15に示す4か所 の断面で部材の降伏が生じる.そこで,これらの断面に 対する当て板補強を検討するものとする.当て板の寸法 は,設計レベルにおいて初めに降伏が生じる事を基準と して設定した.補強前にひずみが大きかった主桁断面の 補強前後のIDA曲線を比較したものを図-16に示す.V脚 ひずみのIDA曲線と,ピボット支承のIDA曲線をそれぞ れ図-17,図-18に示す.また,損傷が生じるSFの値を整 理したものを図-19に,損傷順序を図-20に示す.主桁の 補強により主桁のひずみが低減する一方で、V脚ひずみ とピボット支承の荷重は補強により逆に増加することが 分かる.これらの部材は鉛直力の影響を受けやすく,当 て板補強による主桁自重の増大もその一因であると考え られる.また、Plが初めて降伏するSFの値も補強後に 減少しているが、これは動的応答特性の変化により変位 がわずかに増大したたためと考えられる.このように、 既設橋の耐震補強をする際に、ある部位の補強が結果と して別の部位の応答を増大させ、損傷を早める可能性が ある.提案手法を用いることで、このような現象が明確 に評価されることから、耐震補強設計の検討への適用は 有望であると考えられる.

# 7. 結論

本論文で得られた知見をまとめれば、以下のようになる.

- (1) 動的特性が複雑な長大橋にIDAを適用することで、 構造物の損傷順序を考慮した耐震性の明確な評価が 可能である.弱点部分や弱点部材の抽出などが特に 有用であると考えられる.
- (2)構造物の耐震補強を行うと、特定の部位の補強が結果的に他の部位の応答を増加させ、場合によっては逆に損傷を生じやすくする可能性がある。補強の前後で損傷順序の変化や弱点部材が変化するが、提案手法ではそれらを評価することが可能であるため、耐震補強設計の検討に有用であると考えられる。





図-19 補強後の損傷を受ける SF



図-20 補強前後の損傷順序の変化

# 参考文献

- 日本道路協会:道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2012.
- 2) Dimitrios Vamvatsikos and C. Allin Cornell: Incremental Dynamic Analysis,Earthquake Engng Struct. Dyn, 2002.
- 中澤俊幸,吉敷祥一,曲哲,三好新,和田章:免震構造 物における耐震安全性の確率論的評価に関する基礎検討, 日本建築学会構造系論文集 第76巻 第662号,pp745-754,20114.
- FEMA. Recommended seismic design criteria for new steel momentframe buildings. Report No. FEMA-350, SAC Joint Venture, Federal

Emergency Management Agency, Washington DC, 2000.

- J. B. Mander, R. P. Dhakal and N. Mashiko, Incremental Dynamic Analysis Applied to Seismic Risk Assessment of Bridges
- 6) Evgueni T. Filipov, Jessica R. Revell, Larry A. Fahnestock, James M. LaFave, Jerome F. Hajjar, Douglas A. Foutch and Joshua S. Steelman, Seismic performance of highway bridges with fusing bearing components for quasi-isolation, Earthquake Engng Struct. Dyn., 2013.
- 7) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編, pp.138, 2002.
- 8) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編, pp.162-169,2002.

# Seismic Performance Evaluation of Long Span Bridges Based on

# Incremental Dynamic Analysis

# Sei TANIGUCHI, Akira IGARASHI and Hideto KIDA

Assessment of the seismic performance of long span bridges is of great concern in ensuring seismic safety of those infrastructures against strong seismic events. However, this task involves great difficulties due to the complicated nature of the dynamic behavior of the structural system and components of the long span bridges, and sequences of multiple failure events of different kinds can take place for the case of a long span bridge. In this paper, a seismic performance assessment method for long span bridges is investigated, based on the evaluation of failure and damage sequences that take place under strong seismic ground motions using the incremental dynamic analysis (IDA) procedure. The specific amplitude of earthquake ground motion that causes the damage in each possible failure mode is determined by IDA, and the failure sequence is obtained by relating the intensity of ground motion and the structural failures. Application of the procedure to a hypothetical steel V-leg rahmen bridge is shown.

For long span bridges, strengthening of a specific member or component in the structural system may result in unexpected damage or failure at different locations in the event of strong earthquakes. It is clearly demonstrated that the IDA assessment procedure is useful in identifying such effects. The result of IDA using nonlinear time history analysis shows that the cover plate retrofit is effective in reducing the maximum strain in the girder, while it tends to increase the middle pivot bearing force and the strain in the V-leg sections.