論文 RC連続高架橋の地震時応答に対する動的耐震照査法の適用

中野 友裕*¹·田邊 忠顕*²

要旨:本論文は,動的荷重を受けるRC構造物を,応答曲率を用いて終局状態を照査す る動的耐震照査法について記述したものである。軸力変動を伴った2軸曲げ状態下の断 面履歴は非常に複雑な挙動を呈するが,動的耐震照査法では,これらの挙動についても 一貫した方法で耐震性の照査が可能である。本論文では,連続高架橋におけるRC橋脚 の耐震安全性を評価する上で,全体系3次元動的解析を基本とした動的耐震照査法が, 様々な形状の連続高架橋の照査に極めて有効であることを示した。

キーワード:動的耐震照査法,終局曲率曲面,連続高架橋,全体系3次元動的解析

1. はじめに

地震などによる土木構造物の損傷の危険性を 設計に取り込むためには,構造物の限界状態を 損なうか否かの算定が重要な課題となる。RC 連続高架橋の設計においても,対象とする構造 物の限界値,地震時の応答値の両者の算定およ び比較が必要となる。

近年の飛躍的な計算機能力の向上,アルゴリ ズムの改良により,現実的な手段として全体系 3次元非線形動的解析が用いられる場面が増え てきた。著者らはこれまでに,連続高架橋の地 震時挙動について,3次元全体系を考慮するこ とにより,設計において考慮されていない付加 曲げモーメントの発生¹⁾や,軸力変動の生じる 2軸曲げに伴う断面損傷過程²⁾を明らかにして きた。これらは比較的単純な構造形式を対象に したものであるが,橋脚や桁の形状は実際には 千差万別であり,損傷程度を判定する上で弾塑 性挙動および地震時の限界値を適切に予測でき る実用的な手法の確立が重要な課題となってい る。

全体系3次元非線形動的解析の最たる特徴は, 連続高架橋の挙動を周囲との一体化に基づいて 評価ができる点にある。こうした点を設計に還 元するためには,単純なモデル化での設計法と, 3次元全体系を考慮した挙動予測の両面から照 査法を構築するのが理想である。そのような総 合的な照査法の確立という意味からも,橋梁全 体に対する地震動の3方向同時入力に伴う軸力 変動および2軸曲げ作用下の耐震照査法を開発 する必要がある。

以上を踏まえ,本研究では前報³⁾で提案した RC橋脚の動的耐震照査法の,全体系3次元非 線形動的解析の枠組みでの適用について,曲線 部を有する連続高架橋の事例を通して述べ,3 方向入力を受けるRC連続高架橋に対する実用 的な耐震照査法としての検討を行った。

2. 動的耐震照査法の概要

2.1 終局曲率曲面

道路橋示方書⁴⁾によれば、考慮している単一 の軸まわりに、一定の軸力下で曲率を増加させ ていったとき、圧縮側鉄筋位置のコアコンクリ ートが終局ひずみ ε_{cu} に達する時点で断面が終 局に至ると規定されている。道路橋示方書では 2方向同時載荷を前提とせずに橋軸方向・橋軸 直角方向を分けて考えている。しかし、2方向 同時に曲率が生じる場合であっても中立軸が存 在していることから、見方を変えてこの道路橋 示方書の規定を、橋軸・橋直軸以外の軸まわり

*1 東海大学講師 工学部土木工学科 博(工) (正会員)

*2 名古屋大学名誉教授 社会基盤技術支援機構専務理事 工博 (正会員)



図-1 任意軸まわりの終局状態



φ_{ξa}

 $\phi_{\eta a}$

図-2 終局曲率曲面の定義



図-3 動的耐震照査法の概念図

に適用すればよい。図-1に示すように橋軸をと 軸,橋直軸を η 軸としたとき,ξ 軸と η 軸双方 において曲率が発生している場合には、図のく 軸まわりに1方向の曲率が発生していると考え ることができる。そしてく軸まわりの曲率が終 局曲率に達したときの ϕ_{\sharp} , ϕ_{η} を, ζ 軸まわり の曲率を2方向に分解したものと考えることに より、その $(\phi_{\varepsilon}, \phi_{\eta})$ の組が2方向同時載荷 時の終局曲率ということになる。これらを φ , ∮ "の様々な比率に対してプロットすれば、円 形断面であればその形状は円となるが、このよ うにしてできる面を以下、終局曲率曲面と呼ぶ ことにする (図-2)。この終局曲率曲面は道路 橋示方書の規定にある単軸曲げの終局曲率 φ ευ, は軸力の大きさにより変化する。

2.2 RC橋脚に対する動的耐震照査法

3方向地震入力を受ける連続高架橋RC橋脚 の応答では、隣接するスパンとの連成や軸力変



図-4 連続高架橋のRC橋脚

動・2軸曲げの相互干渉,上部工振動による付 加曲げモーメントといった現象が複雑に影響する⁵⁾。動的耐震照査法は,これらの結果として 生じる断面履歴に着目する。RC橋脚の場合, 部材内で曲率が終局よりも大きくなる可能性の ある断面(橋脚基部や付加曲げによる梁ー柱接 合部,断面変化部など)に着目し,その断面に おける2方向曲率の合成曲率がその方向の終局 曲率を越えた時点で断面の破壊と判定する。動 的耐震照査法の概念図を図-3に示す。図中の× 印で断面が終局状態に達したと判定される⁹。

3. 動的応答解析の概要

3.1 対象とした連続高架橋

動的耐震照査法を適用する橋脚を,図-4に示 す。この橋脚は単一柱として2方向独立の照査 を行えば規定を満足するように設計されている ものであり,軸方向鉄筋にD38を採用した場合 (以下断面A)は文献³⁾で用いた橋脚と同一の



諸元である。また,D51 を採用した場 合(以下断面B)も道路橋示方書の 規定を満足するが,現在の規定から 考えると非常に過剰な設計である。 これらの橋脚を用いて,既存の連続 高架橋の線形を参考に,図-5のよう な形状の線形を設定した。このよう な場合,地震時の挙動は複雑になる ため,道路橋示方書では動的解析に

よる耐震性能照査を行うこととしているが,具体的な照査法は明示されていない。そこで本橋梁の曲線部 P3~P6 について全体系3次元動的解析に基づいた動的耐震照査法を適用する。

3.2 解析モデル・解析条件

動的解析には,図-6に示すように骨組みモデ ルを用いることとし,曲線に接続する部分の影 響をも考慮できるよう,図-5における P0~P9 の 10 本の橋脚ならびにそれらが支持する上部 工9径間(3径間連続桁×3)を解析対象領域



図-6 構造物のモデル化(抜粋)

とした。時刻歴応答解析には Newmark β 法(β =1/4)を採用した。橋脚基部は十分に硬い地盤 に支持されているものとして固定としている。

減衰定数は、上部工、支承に 0.03, R C 橋脚 0.05 を適用するが、非線形領域に入る橋脚部材 は道路橋示方書に従い 0.02 を用いることとし て各次の減衰定数を算出した。その減衰定数を 用いて Wilson-Penzien⁷⁾に基づき減衰マトリク スを作成した。

動的耐震照査法を非線形部材に適用するため には、軸ひずみと曲率およびそれに対応する軸

コンクリート		鉄筋		
圧縮強度[MPa]	44.553		主鉄筋	帯鉄筋
圧縮強度時のひずみ	0.00299		SD390	SD295
終局ひずみ	0.00358	降伏点[MPa]	390	295
軟化域剛性[MPa]	-14957	直径[mm]	(A)38/(B)51	19

表-1 材料諸元



カとモーメントが正確に求められる必要がある ことから,照査の対象とする橋脚躯体には,非 線形領域においてもひずみの局所化などが矛盾 なく得られる Flexibility 法⁸⁾を用いることとし て解析を行う。その際の断面の復元力特性の算 定には Fiber-Model を用いることとし,コンク リート,鉄筋それぞれについて道路橋示方書の 包絡線を用いる。内部履歴はコンクリートにつ いては Darwin-Pecknold モデル,鉄筋について は Menegotto-Pinto モデルを採用している。

入力地震動は,兵庫県南部地震で観測された 神戸海洋気象台の観測波形 NS,EW 成分を,標 準加速度応答スペクトルに近い特性を有するよ うに振幅調整したものを用い,図-5中のx軸, z軸方向にそれぞれ入力する。上下動は UD 成 分をそのままy軸方向に入力する

材料諸元を**表−1**に,入力地震波形を**図−7**に それぞれ示す。

4. 動的耐震照査法に基づく耐震性照査

4.1 断面Aの場合

解析対象とした連続高架橋は曲線橋であるこ とから、2方向独立した照査では挙動を正確に 把握できない。また、地震時応答挙動も複雑に なり、2軸曲げの影響も顕著になると考えられ

表-2 断面の終局曲率・終局モーメント

	断面A	断面B
終局曲率[1/m]	0.003987	0.003319
終局モーメント[MN・m]	174.4	281.5

るため、2次元解析では時々刻々と変化するこ れらの挙動を評価することが難しく、むしろ全 体系3次元非線形動的解析に基づく安全性照査 が重要となる。これらのことから、現行の道路 橋示方書の規定である単一柱の単軸曲げでの設 計を満足していることが安全性の保証につなが らないことは自明であることから、動的耐震照 査法を適用することを試みる。

表-2に道路橋示方書により算定される,各断 面の終局曲率とそのときのモーメントを示す.

図-8に橋脚断面に断面Aを採用した場合の 動的応答解析結果に基づく,2軸まわり曲率履 歴と時刻歴合成曲率履歴を示す。同図 a)~d)内 の円形は,死荷重のみを軸力として作用させた 場合の終局曲率曲面である。なお,曲率軸の を と η はそれぞれ橋軸接線方向軸とその直角方向 軸であることを表している。

断面Aを採用した場合には,単一柱としての 照査は満足しているが,同図 a)~d)より,連続高



の1000年前二年履歴 図-8 断面Aの場合の全体系3次元非線形動的解析による動的耐震照査結果

架橋全体の応答の中では終局状態を大きく越え ていることが分かる。また,同図 e)のP4橋脚 について時刻歴合成曲率を見ても,4.6 秒付近 から軸力変動を考慮した終局曲率を大きく越え ている。これらの結果は,橋梁全体が3方向地 震入力を受ける場合,橋脚は極めて甚大な損傷 を受けることを示しており,曲線部を形成する 4本の橋脚すべてが終局に至ることを示してい る。また,同図 e)から,軸力変動による終局曲 率の変化は極めて小さいこともわかる。

4.2 断面Bの場合

橋脚断面に断面Bを採用した場合の動的耐震 照査法に基づく照査結果を,図-9に示す。前述 したとおり断面Bは過剰な設計になっているが, 同図 a)~d)にあるとおり,断面Aの場合と比べ て2方向応答曲率が非常に低減されており,曲 線部のいずれの橋脚基部も終局曲率に達してい ない。これは表-2に示した断面特性の相違によ るものと考えられ,断面Bの終局モーメントが 断面Aと比べて大きいことに起因していると考 えられる。また,軸力変動が終局曲率に対して 不利になる可能性を把握するために,軸力変動 による終局曲率の変化を考慮に入れた照査結果 (同図 e))も,終局曲率に達しておらず,3方 向同時入力を受ける場合であっても安全である ことが示されている。

4.3 動的耐震照査法の適用法

動的耐震照査法を実際の設計に取り入れる上 では,次のような手順で適用可能と考えられる。 ①橋梁全体の設計の中での断面の決定 ②断面の終局曲率曲面の算定

③適切な断面履歴則を用いた全体系3次元非線 形動的解析

④損傷が予測される断面における2方向曲率履 歴と終局曲率曲面の比較

⑤必要に応じて軸力変動が終局曲率曲面に与え る影響を加味する。

このような手順(特に④⑤)を踏むことで, 既往の設計法に基づく構造物の,全体系3次元 応答に対する安全性が照査可能となる。



図-9 断面Bの場合の全体系3次元非線形動的解析による動的耐震照査結果

5. まとめ

本稿では複雑な地震時応答挙動が予測される 構造物に対して,動的耐震照査法を適用した例 を示した。動的耐震照査法は断面レベルでの損 傷に着目することで構造物の安全性を照査する 方法であることから,3方向同時地震入力を受 けるRC橋脚の任意方向の曲げ状態や軸力変動 の効果も考慮することができる方法である。本 照査法は,照査システムとして汎用性があり, 容易に実務に取り入れることのできる方法であ ることから,従来判定の難しかった時々刻々と 変化する曲げの主軸・軸圧縮力などを考慮した 安全性も評価が可能になると考えられる。

参考文献

- 中野友裕,田邉忠顕:地震時における RC 橋脚への 3次元効果に関する数値解析的研究,土木学会論文 集, No.739/V-60, pp.165-179, 2003
- Nakano, T. and Tanabe, T.: Analytical Studies on Reinforced Concrete Columns subjected to Bi-Axial

Bending, J. of structural engineering, Vol.49A, pp.935-944, 2003

- 中野友裕,田邉忠顕:円形断面RC橋脚の動的耐 震照査法に関する研究,コンクリート工学年次論文 集, Vol.27, No.2, pp.37-42, 2005
- 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計 編,日本道路協会,2002
- 中野友裕,田邉忠顕:付加曲げモーメントを考慮 した鋼板巻立てRC橋脚の地震時挙動に関する解 析的研究,構造工学論文集, Vol.51A, pp.1333-1344, 2005
- 森下邦宏,宇佐美勉,阪野崇人,葛西昭:鋼製橋
 脚の動的耐震照査法に関する検討,土木学会論文集
 No.710/I-60, pp.181-190, 2002
- Wilson, E. L. and Penzien, J.: Evaluation of Orthogonal Damping Matrices, *International J. for numerical methods in engineering*, Vol. 4, pp.5-10, 1972
- 中野友裕,田邉忠顕:コンクリート構造物の数値 解析への Flexibility 法の適用に関する研究,土木学 会論文集, Vol.725, 2003.2