

次世代に向けた RC ラーメン高架橋の耐震性能評価法に関する検討

Investigation on future evaluation method of seismic performance of RC rigid frame viaduct

北海学園大学 工学部 ○正 員 高橋良輔 (Ryosuke Takahashi)
 (株) コムスエンジニアリング 正 員 土屋智史 (Satoshi Tsuchiya)
 (株) HRC 研究所 正 員 坂口淳一 (Junichi Sakaguchi)
 埼玉大学大学院 理工学研究科 正 員 牧剛史 (Takeshi Maki)

1. はじめに

3次元非線形有限要素解析 (FE 解析) は、複雑な構造物の形状や境界条件、構造物への作用を考慮でき、材料挙動をもとに構造全体の挙動を求めため、構造物の任意の位置における変形や応力、ひずみの履歴、損傷過程を視覚的に把握できる特徴を持つ。一方、現在の鉄筋コンクリート構造物の耐震性能照査では、部材レベルでモデル化された挙動に基づいた非線形骨組み解析が用いられるのが一般的である。この手法は、部材の $M-\phi$ 関係が得られていれば単純な架構構造に対してはモデル化が容易であり、部材毎の断面力による照査で可否の判定が容易なことがその理由として考えられる。一方、既設構造物や3次元挙動を伴う構造物の耐震性能照査に対しては、3次元非線形 FE 解析手法が特に有用と考えられる。これは前述の特徴に加え、材料劣化による変状や地震による損傷、補修や補強などを、応力-ひずみ関係や応力履歴などの材料モデルとして、分布や形状などの構造モデルとして考慮することができるためである。特にラーメン高架橋では、高架下が店舗や施設となるなど耐震補強の制約が大きく3次元に複雑な補強となる場合や、ねじりの影響が大きい場合などが少なくないことから、既設ラーメン構造物の耐震性能照査における非線形 FE 解析の適用が強く望まれる。

このような非線形 FE 解析を用いた性能照査において、骨組み解析等で用いられるような部材断面力での照査を行うことは、本手法の特徴である構造内での破壊進展の把握や構造全体としての性能評価を十分に活かすことができない。そこでこの解析を用いる照査のため、齊藤ら¹⁾は圧縮・引張破壊を判定可能なひずみに基づく評価指標を用いた材料損傷を定量的に評価可能な手法を提案し、

土木学会コンクリート標準示方書²⁾及び複合構造標準示方書³⁾に導入されている。この損傷指標の適用性については2次元解析による検証⁴⁾に加え、牧ら⁵⁾が3次元的な応答を示す部材や3次元的な作用を受ける部材での検証を行なっている。半径 150mm の3次元領域で重み付き平均化を施したコンクリートの圧縮損傷指標である正規化累加ひずみエネルギー \overline{W}_n は、正負交替荷重や、曲げとねじりを受ける RC 単柱の最大荷重、最大トルク時を捉えることが可能であり、さらに軸方向鉄筋を含む要素で取り囲まれるコアコンクリート部に限定して平均化を施した $\overline{W}_{n,core}$ は、ピーク後の軸方向鉄筋が抵抗力を喪失する時点やねじりモーメントの立体トラス機構の破壊時点を捉えることができることが報告されている。

2. 次世代型性能評価法の必要性

ラーメン高架橋などの不静定次数の高い構造物では、一部の部材が破壊に至っても全体の安定性が直ちに損なわれることはない。例えば、レベル2地震作用時には、ラーメン高架橋の中層梁が先行破壊を生じて耐震性能2を満足するとの指摘は以前よりなされており⁶⁾、実際に2022年3月に発生した福島県沖地震等でも東北新幹線の高架橋において、中層梁はりにせん断破壊を生じているがそれ以外には大きな損傷のない高架橋が見られた。一方で、現在の部材毎の性能評価手法は、最大荷重後の全体の挙動を把握することが困難であることから、このような構造物が本来有する性能を評価することができない。そのような性能評価のためには、3次元的な挙動下における構造物中の任意位置の材料損傷過程と、全体変形を追跡可能な解析ツールが必要である。前述の非線形 FE 解析は技術的に成熟しており、構造物中の一部の部

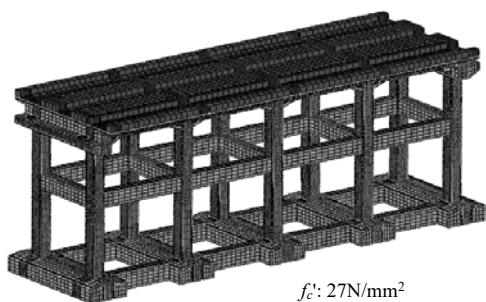


図1 FEメッシュ

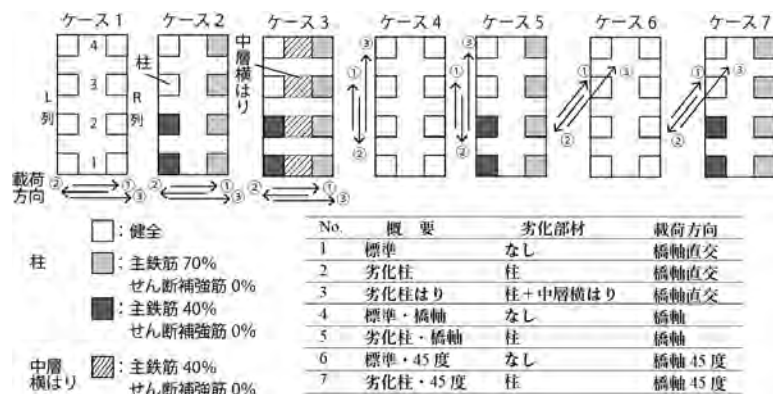


図2 解析ケース

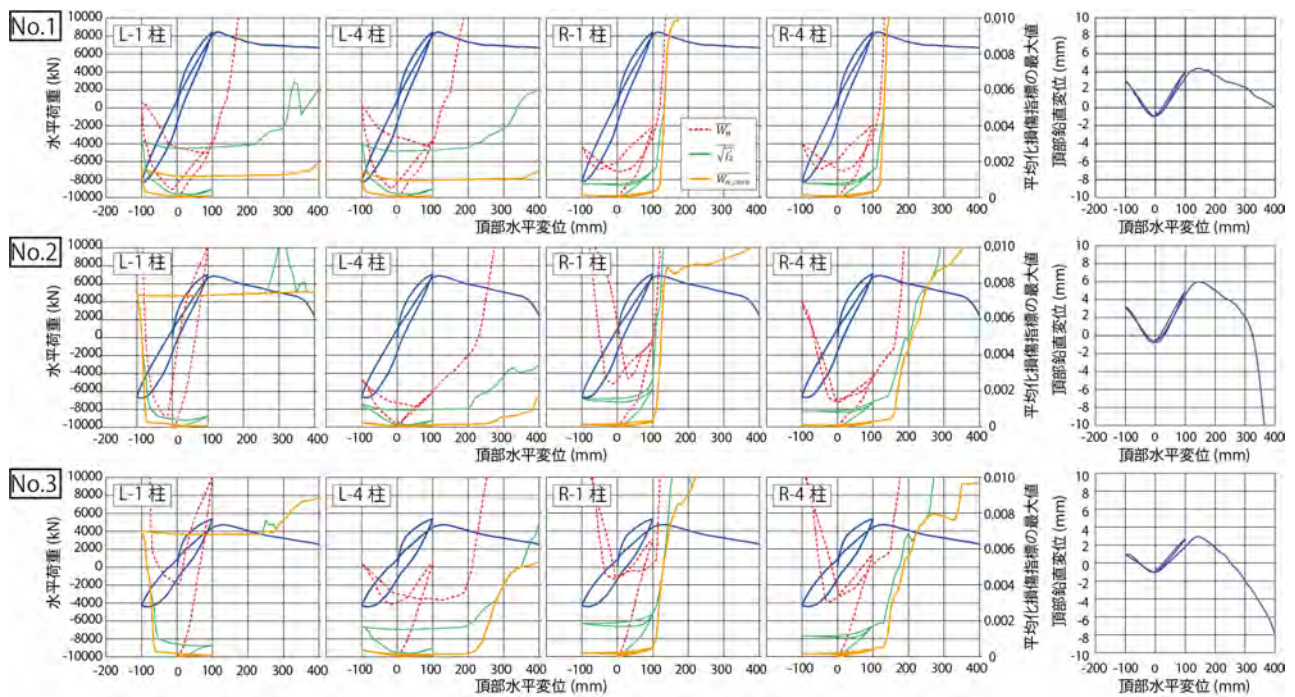


図3 水平荷重と頂部水平変位，平均化損傷指標の最大値，頂部鉛直変位の関係（橋軸直交方向載荷）

材がせん断破壊などの脆性的な破壊を生じた後でも全体の挙動を概ね評価できることが報告されている⁷⁾。一方、性能の照査にあたっては、構造全体の破壊を判定する指標や限界値が必要となるがそれらについての検討は十分ではなく、未だ確立されているとは言えない。そこで本研究では、RC ラーメン構造物に対しては柱部材の終局を捉えることができる $\overline{W}_{n,core}$ を用いることで構造全体の終局の判定が可能と考えられることから、鉄道 RC ラーメン高架橋を対象とした 3 次元非線形有限要素解析を行い、損傷指標によるラーメン構造全体の終局の判定について検討した。

3. 解析概要

図 1 に解析メッシュを示す。解析対象は中層はりを有する新幹線 RC 高架橋で標準的な諸元を設定した。解析には、ひび割れ規準により弾塑性モデルからひび割れ後の構成則へ移行し、ひび割れはアクティブクラック法に基づく多方向固定分散ひび割れモデルで表現するコード⁸⁾を適用した。ひび割れ後のせん断モデルは、ひび割れ間コンクリートとひび割れ面に沿った応力伝達を考慮する。鉄筋は分散鉄筋モデルで、鉄筋とコンクリート間の相互作用を考慮した平均応力-ひずみ関係を用いる。要素は 20 節点 27 積分点の 6 面体要素で境界条件は底面を 3 方向固定とした。作用は自重と水平方向力で、水平方向力の載荷は最大荷重後を再現可能な変位制御とし、頂版中央に変位を与えた。±1 δ_y の交番載荷を 1 サイクル行った後、頂部変位が 400mm を超えるまで載荷した。

解析は健全な構造モデルと、特定の柱に損傷が集中して 3 次元的な挙動となるよう、図 2 に示すように鋼材腐食として一部の柱の主筋とせん断補強筋量を減少したモデルに対して、水平方向力の作用方向を橋軸直交方向、橋軸方向、橋軸と斜め 45 度方向とした解析を実施した。

また、中層横はりの全体挙動への影響を見るため、水平方向力の作用方向が橋軸直交方向の場合に対しては、柱に加えて中層横はりの鉄筋も低減したケースを解析した。

4. 解析結果および損傷指標の検討

橋軸直交方向載荷の 3 ケースにおける、柱 L-1, L-4, R-1, R-4 の水平方向荷重と頂部水平変位，平均化正規化累加ひずみエネルギー \overline{W}_n の最大値，平均化偏差ひずみ第 2 不変量 $\sqrt{J_2}$ の最大値， $\overline{W}_{n,core}$ の最大値，頂部水平方向変位の関係を図 3 に示す。柱部材の鉄筋量を低減させたケース No.2 の最大荷重は健全時から 17%程度の減少であった。それに加えて中層横はりの鉄筋量を低減させた No.3 は、中層はりでせん断圧縮破壊を生じ、最大荷重は健全時から 36%程度と大幅に減少した。中層はりが構造全体の耐荷性に大きく貢献していることがわかる。正側では、いずれも 1 サイクル目の鉄筋降伏時を最大荷重として、2 サイクル目では緩やかに荷重が減少している。頂部鉛直変位はいずれも、最大荷重直後の水平変位+150mm 程度で最大となりその後減少していることから、頂部鉛直変位の減少は荷重低下と関係していることが推測される。また、柱部材の鉄筋量を低減させたケース No.2 は、健全である No.1 と異なり、頂部水平変位が+300mm を超えたあたりから鉛直変位の減少が大きくなる。水平荷重もそのあたりから減少の傾きが大きくなっており、このことから水平荷重の減少と鉛直変位の減少が相関していることが窺える。中層はりの鉄筋量を低減した No.3 の水平荷重と頂部水平変位の関係では、No.2 のような最大荷重以降の荷重低下傾向の変化が見られなかった。頂部鉛直変位と頂部水平変位の関係でもやはり No.2 のような傾きの変化は見られなかった。ただし、健全の No.1 に比べて変位が減少する時の傾きは No.2 と同様に大きく、水平荷重-頂部水平変位に

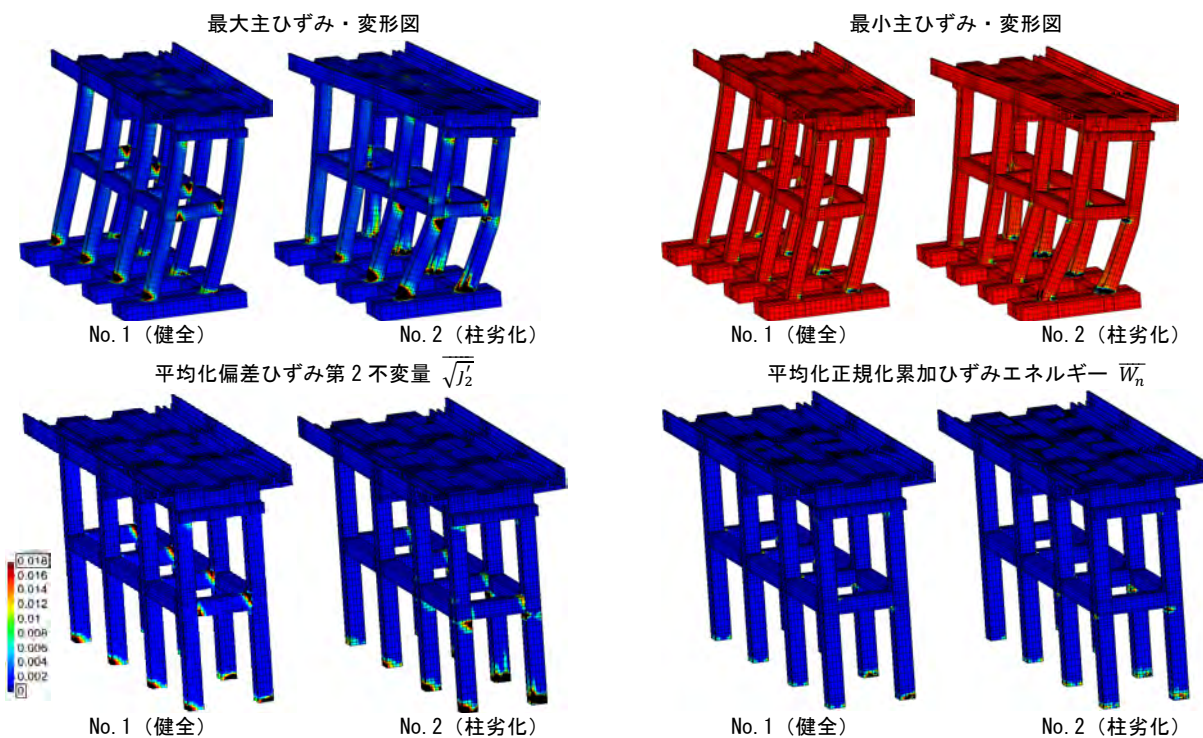


図4 橋軸直交方向載荷ケース No. 1 と No. 2 の材料損傷指標カウンター（頂部水平変位 360mm 時点）

おける最大荷重以降の減少の傾きも健全の No.1 に比べて No.2 と No.3 の傾きが大きいことから、ここでも鉛直変位での傾向との相関性が見られる。

\overline{W}_n に着目すると、4つの柱において圧縮破壊の基準値（0.002）に達した時に最大荷重の減少と頂部鉛直変位の減少が始まり、 \overline{W}_n が構造物全体の破壊と高い相関関係にあることがわかる。図4は、水平方向変位が360mmの時点における \overline{W}_n 、 $\sqrt{I_2}$ のカウンター図である。 \overline{W}_n は特に柱基部で圧縮破壊の基準値を超えており、柱部材が劣化したケース No.2 では、鉄筋量の低いR列および第1列側の柱に圧縮損傷が集中し、さらにR列柱の中層はり接合部境界での圧縮破壊も見られ、構造物内での鉄筋量の変化による破壊位置の変化や破壊の分布を再現できているのがわかる。また、 $\sqrt{I_2}$ のカウンター図に着目すると、健全である No.1 の場合には中層はりで $\sqrt{I_2}$ が卓越した斜めの領域が見られるが、柱部材が劣化したケース No.2 の場合では No.1 に比べてその値は小さく、柱の接合部境界付近で No.1 では見られない $\sqrt{I_2}$ が卓越した領域が見られる。これは中層横はりより先に下層柱部材両端部の圧縮破壊とそれに伴う塑性ヒンジ形成が生じ、中層横はりが抵抗しなくなるためである。中層横はりが劣化した No.3 では、健全同様に柱部材に対して中層横はりのせん断破壊が先行することから最大荷重後の挙動が No.2 よりも健全の No.1 に近いと考えられる。なお、健全の No.1 では前述の福島県沖地震等でも東北新幹線の高架橋において観測された中層横はりの斜めひび割れが生じており、本解析が妥当に実際の損傷領域を再現できていることが示されている。

図5は橋軸方向、橋軸45度方向載荷のNo.4～No.7の柱 L-1, L-4, R-1, R-4 の水平方向荷重と頂部水平変位、 \overline{W}_n と $\sqrt{I_2}$ 、 $\overline{W}_{n,core}$ の最大値、頂部水平方向変位の関係頂

部水平変位の関係である。いずれのケースも橋軸直交方向と同様、 \overline{W}_n が圧縮破壊の基準値に達する時点と最大荷重時が一致し、頂部鉛直変位は最大荷重後に減少する。一方、橋軸直交方向載荷では最大荷重直後、すなわち、 \overline{W}_n が圧縮破壊の基準値に達する時点から頂部鉛直変位が減少するが、橋軸方向および橋軸と45度方向載荷の場合には、 \overline{W}_n が圧縮破壊の基準値に達する時点は頂部鉛直変位が増加している段階にある。一方、 $\overline{W}_{n,core}$ に着目すると、荷重の減少や頂部水平変位の減少開始前に4つの柱全てで圧縮破壊の基準値に到達せず、構造全体の破壊を示す頂版の変位減少を捉えることができる。

以上より、 $\overline{W}_{n,core}$ を用いることで構造物全体の破壊を判定できることがわかる。一方、構造全体の終局判定のためには、その限界状態を設定する必要がある。ここで、構造全体が終局に至る状態を構造物が不安定となった場合と考えると、構造中の各部の破壊による拘束の解放数が不静定次数を上回った場合や、外力に対する支持条件が満たされなくなった場合に終局だと判定できる。 $\overline{W}_{n,core}$ が圧縮破壊の基準値に達した時は、支点において力の6成分全てに対して抵抗ができない状態と考えられるから、今回のラーメン高架橋における水平方向力に対する終局は、8本全ての柱で $\overline{W}_{n,core}$ が圧縮破壊の基準値に達した時と判断できる。これに安全性等を考慮し、より少ない柱で $\overline{W}_{n,core}$ が圧縮破壊の基準値に達した時点水平方向荷重に対する構造物全体の限界状態として定めればよいと考えられる。

構造物全体の抵抗モーメントが0の時点倒壊として終局とする場合も考えられるが、非線形有限要素解析ではその状態に至る前に解が発散する可能性もある。また一般的に荷重制御の場合には、損傷進展によるモーメントの低下を表現できない。そのため、作用の種類や構造

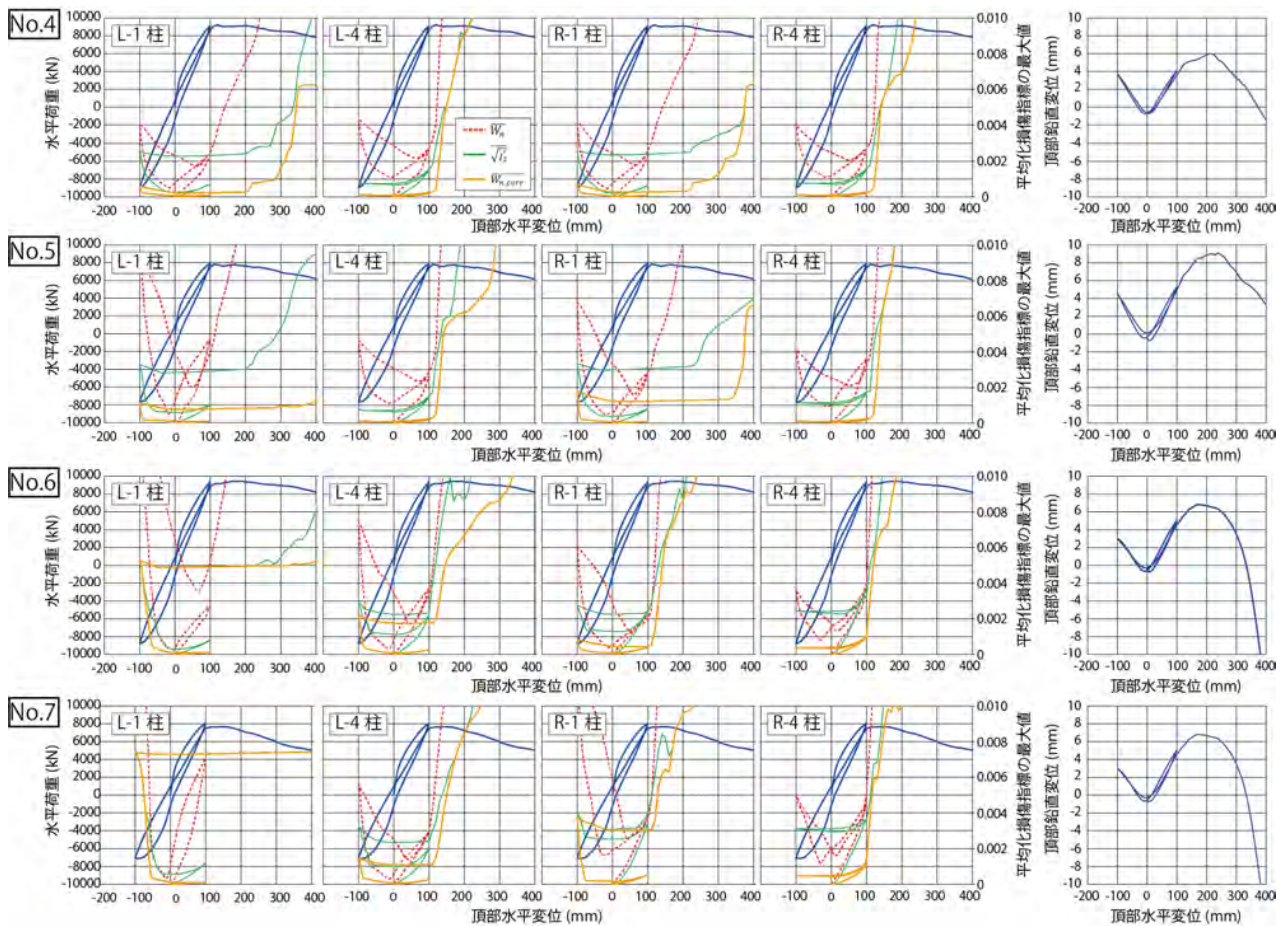


図5 水平荷重と頂部水平変位、平均化損傷指標の最大値、頂部鉛直変位の関係（橋軸方向、橋軸45度方向載荷）

物ごとに検討は必要となるが、損傷指標を用いた構造物全体の破壊判定は有用な方法の一つと言える。なお、今回は静的解析による検討であったが、より実際に近い動的解析による損傷指標の適用性や構造全体の破壊の判定についての検討が必要であり、今後、実施予定である。

5. まとめ

材料レベルの挙動に基づき全体挙動を評価可能な手法による次世代型の耐震性能評価の構築のため、正負交番水平方向力が作用するRCラーメン高架橋を対象とした3次元非線形有限要素解析を行い、材料損傷指標による構造全体の終局判定について検討を行った。その結果、コアコンクリートの正規化累加ひずみエネルギーを用いて高架橋全体の破壊を判定できることがわかり、それを元に終局限界の考え方を示した。3次元非線形有限要素解析と本指標による構造物全体の破壊判定は、構造物全体の安全性の終局に対する照査に有用であり、次世代型の耐震性能評価法の構築を推し進めるものである。本評価法の構築と普及を目指し、今後さらに検討をすすめる。

謝辞

本検討を実施するにあたり、土木学会コンクリート委員会コンクリート構造物の設計と連成型性能評価法に関する研究小委員会（351委員会）において、ご意見をいただきました。ここに関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 齊藤成彦ほか：非線形有限要素解析によるRCはり部材の損傷評価，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造),Vol.67,No.2,166-180,2011
- 2) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書設計編，2011
- 3) 土木学会：2014年制定 複合構造標準示方書〔原則編〕〔設計編〕，2013
- 4) 牧剛史ほか：正負交番載荷を受けるRC骨組み構造物の非線形有限要素解析による損傷評価，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.69, No.1, 33-52, 2013
- 5) 牧剛史ほか：コンクリートの損傷指標を用いたRC部材の三次元耐荷機構の数値解析の評価，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.78, No.1, 121-137, 2022
- 6) 例えば、石橋忠良，吉野伸一：鉄筋コンクリート2層ラーメンの交番載荷試験，土木学会年次学術講演会公演概要集，第37回第5部門，pp.389-390, 1982
- 7) 高橋良輔，土屋智史：3次元非線形有限要素解析と損傷指標によるRCラーメン高架橋の性能評価，土木学会年次学術講演会公演概要集，第72回第5部門，pp.687-688, 2017
- 8) Maekawa, K., Okamura, H. and Pimanmas, A. :Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON PRESS, 2003.