

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

秋田大学大学院 正会員 ○高橋 良輔
(株) コムスエンジニアリング 正会員 土屋 智史

1. はじめに

非線形有限要素解析は、構造物内部の損傷状態の算定が可能であり、力学・環境作用と材料劣化の空間分布、時間変化も考慮可能なため、損傷に基づいた時間軸上の高度な性能照査が可能な手法として期待されてきた。しかし、汎用的な材料損傷の照査指標の整備は不十分で、例えば断面力などの従来の指標が照査では多く用いられ、その長所を活用し難い状態であった。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、材料損傷を定量的に評価可能な手法を提案した。この手法は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⁾に導入されており、今後、有限要素法による設計合理化が期待される。この損傷指標の適用性は、主に2次元解析で検証⁴⁾されているが、より適用範囲の広い3次元解析の検証は少ない。そこで、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、材料損傷指標と断面力の比較を行った。

2. 解析概要

解析対象は中層はりをもつ新幹線 RC 高架橋とし、標準的な諸元を設定した。図1に解析メッシュを示す。解析には同一のメッシュに対し、手法A⁵⁾、手法B⁶⁾の2種類のコードを適用した。いずれも、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。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。なお手法Aと手法Bは、適用構成則や構成則の組合せなど細かい点で多く異なる。

要素は6面体要素を用い、手法Aは20節点27積分点、手法Bは8節点8積分点要素とした。境界条件は、底面を3方向固定とした。作用は、自重及び水平方向力で、水平方向力は水平方向加速度として物体力で与えた。±0.5Gの交番載荷を1サイクル行い、その後、釣合い計算が発散するまで加速度を与えた。解析ケースは作用方向を変えた2ケースで、CASE1は橋軸直行方向載荷、CASE2は橋軸から45度方向載荷とした。

3. 解析結果および損傷指標の検討

図2に底面における水平方向反力と床版中央の水平方向変位（頂部変位）の関係を示す。反力-頂部変位関係は同様の挙動を示し、解析コードによる違いはほとんど見られなかった。

図3、図4に、頂部変位と引張およびせん断の損傷指標 $\sqrt{J_2}$ ³⁾、圧縮の損傷指標 $\overline{W}_n$ ³⁾の関係を示す。損傷指標は対積分点から150mmまでに含まれる積分点の値を重み付き平均した。ここに示す値は構造物中の最大値を追跡したものである。なお、限界値の適切な値としては、 $\overline{W}_n=0.001\sim0.002$ 、 $\sqrt{J_2}=0.001$ が報告されている⁴⁾。

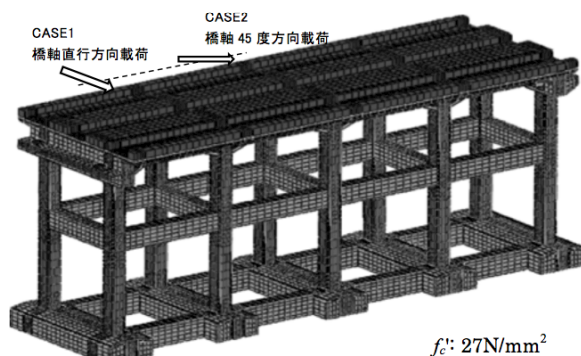


図1 FEメッシュ

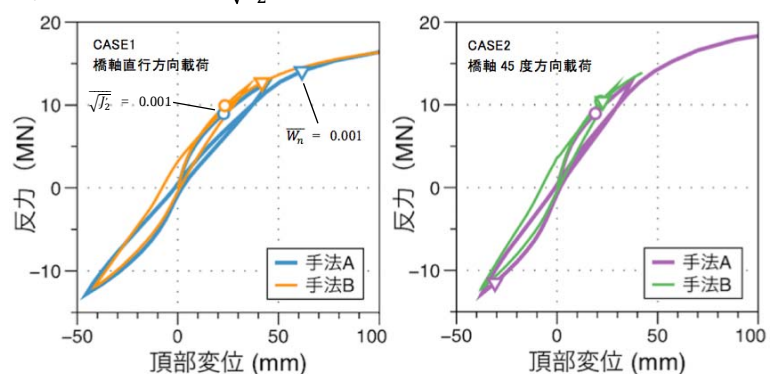


図2 水平方向反力-頂部変位関係(左:CASE1, 右 CASE2)

キーワード 非線形有限要素解析, 損傷指標, RC ラーメン

連絡先 〒010-8502 秋田市手形学園町1-1 秋田大学大学院理工学研究科

TEL 018-889-2653

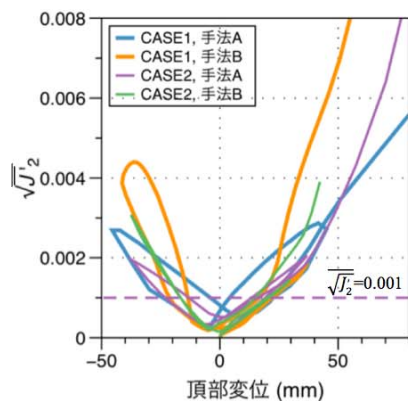
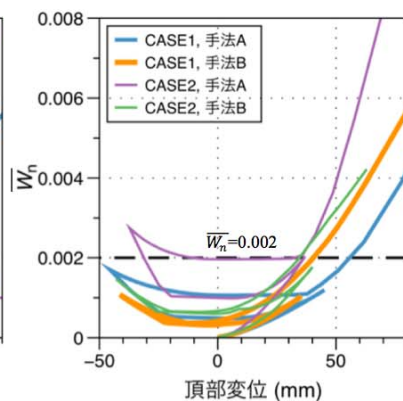
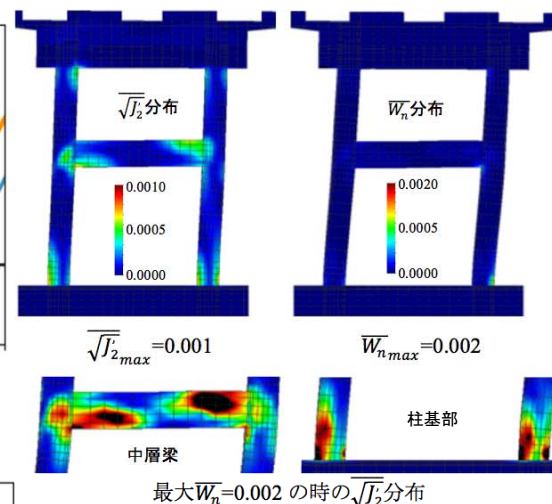
図3 $\sqrt{J_2}$ -頂部変位関係図4 $\bar{W}_n$ -頂部変位関係

図5 損傷指標コンター (CASE1, 変形 x20)

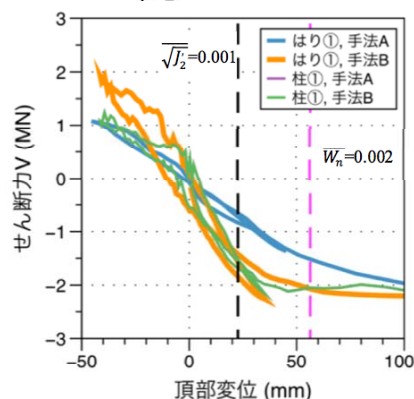


図7 断面せん断力-頂部変位関係

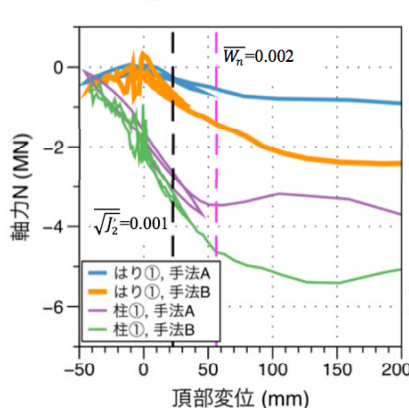


図8 断面軸力-頂部変位関係

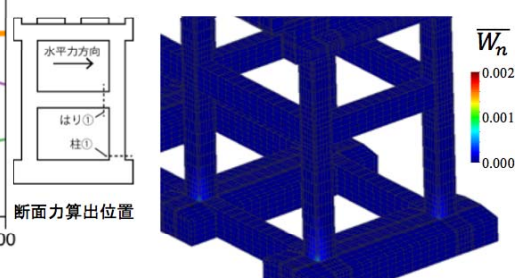


図6 損傷指標コンター (CASE2)

荷重方向による $\sqrt{J_2}$ の差は小さく、いずれも反力 10MN で限界値の 0.001 に達するが、 $\bar{W}_n$ は荷重方向が橋軸 45 度の場合、より早く限界値 0.002 に達する。CASE1 で $\sqrt{J_2}$ と $\bar{W}_n$ の最大値、CASE2 で $\bar{W}_n$ の最大値が限界値に達した時の損傷指標コンターを示す。また限界値時点のプロットを図 2 に示す。コンター図から $\sqrt{J_2}$ は柱梁部の曲げひび割れで限界値に至ったことがわかる。その後、柱基部の圧縮領域で $\bar{W}_n$ が限界値に達する。より早く $\bar{W}_n$ が限界値に至る橋軸 45 度方向荷重の CASE2 は隅角部で圧縮損傷しており、荷重方向による損傷位置の違いが限界値に反映されたとと言える。図 7、8 は図中に示した位置①の梁柱断面のせん断力と軸力の履歴である。せん断力は梁、柱ともに $\bar{W}_n$ が限界値に達する付近から増加しない。図 5 で示すように $\bar{W}_n$ が限界の時、中層梁では斜めのひび割れ損傷が卓越していることから、これは柱部の損傷に加え、せん断ひび割れの影響と考えられる。 $\bar{W}_n$ が卓越する柱では限界値以降軸力増加が小さくなるが、 $\bar{W}_n$ が小さい梁では軸力に対する損傷の影響はほとんど無い。限界値以降の柱軸力挙動が手法 A、B で大きく異なっているが、これは各構成則のポストピーク付近の挙動の差と考えられる。また、全体的に $\bar{W}_n$ の限界が早いと言えるが、要素寸法が比較的大きいため要素寸法に対する平均化領域寸法の影響が考えられる。

4. まとめ

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において損傷指標と断面力の比較を行った。損傷指標と限界値により高架橋の損傷過程と位置を把握でき、荷重方向による損傷時期の違いも把握できた。3 次元解析においても損傷指標は十分適用可能と考えられるが、構成則の違いや平均化領域などについて検証が必要である。

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：正負交番荷重を受ける 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) Maekawa, K., Okamura, H. and Pimanmas, A. :Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON PRESS, 2003.
- 6) 高橋良輔ほか：RC はりのせん断挙動解析におけるひび割れモデルに関する検討，コンクリート工学年次論文集, Vol.30 No.3, pp.55-60, 2008