(40) 非線形解析に基づく各種合成部材及び接合部の損傷評価

米津　薫[1]・藤山　知加子[2]・土屋　智史[3]・牧　剛史[4]・斉藤　成彦[5]・渡辺　忠朋[6]

[1]正会員　株式会社コムスエンジニアリング（〒113-0023 東京都文京区向丘1-1-17 ﾀｶｻｷﾔﾋﾞﾙ6階）
E-mail:yonetsu@comse.co.jp

[2]正会員　法政大学准教授　デザイン工学部（〒162-0843 東京都新宿区市谷田町2-33）
E-mail:fujiyama@hosei.ac.jp

[3]正会員　株式会社コムスエンジニアリング（〒113-0023 東京都文京区向丘1-1-17 ﾀｶｻｷﾔﾋﾞﾙ6階）
E-mail:satoshi@comse.co.jp

[4]正会員　埼玉大学准教授　大学院理工学研究科（〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255）
E-mail:maki@mail.saitama-u.ac.jp

[5]正会員　山梨大学准教授　大学院医学工学総合研究部（〒400-8511 甲府市武田4-3-11）
E-mail:ssaito@yamanashi.ac.jp

[6]正会員　北武コンサルタント株式会社（〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通7-4-7）
E-mail:chuho@hokubu-c.co.jp

本研究では，鋼コンクリート合成床版や風力発電支持物接合部等の複合構造部材を対象とした非線形有限要素解析の結果を用いて，コンクリートの損傷に基づき，複合構造部材の損傷や破壊を評価する手法の適用性を検討した．損傷指標には，空間平均化した偏差ひずみの第2不変量と正規化した累加ひずみエネルギーを選定した．複合構造は複雑な形状となり，局所的に要素寸法の小さい要素分割およびモデル化を行うことが必要となる場合が多く，応答値だけでなく，限界値の算定時にも要素分割の影響を極力低減させる処置が重要となる．適用した損傷指標により，コンクリートの材料損傷が支配的となる各種複合構造部材の損傷と破壊過程を評価でき，非線形有限要素解析による安全性の判定に活用できることを示した．

Key Words : *Hybrid structure,3D nonlinear FEM, nonlocal damage index,damage assessment*

1. はじめに

近年の材料非線形モデルに基づく解析手法の高度化を受け，非線形解析によって土木構造物の性能照査を実施するための環境整備が進められている[1),2)]．従来からの応答値の算定精度向上のための取り組みとともに，対になる照査用限界値に関する研究にも精力的に取り組んだことも，枠組み構築が進んだ要因の一つであると言える．斉藤らは鉄筋コンクリート(以下，RC)部材を対象として，解析コードや解析モデルによらず，材料の力学モデルや要素分割の影響を受けにくい，部材の損傷や破壊を評価する損傷指標を提案している[3),4),5)]．

2012年制定土木学会コンクリート標準示方書［設計編］[1)]では，「非線形有限要素解析による照査」として，他に先駆けて非線形有限要素解析を用いてコンクリート構造物の力学特性に関わる性能照査を実施する際の標準的な方法が示された．また，2014年制定土木学会複合構造標準示方書［設計編］[2)]にも，「有限要素解析による性能照査編」が記載された．しかしながら，複合構造に対する損傷指標の検証事例は少数に留まっており，今後数多く蓄積されることが望まれる．

本稿では，斉藤らが提案し，複合構造標準示方書［設計編］に記載されたコンクリートの損傷指標を，各種複合構造部材および接合部の有限要素解析結果に適用する．構造物や構成部材の損傷や破壊の評価に対する，材料損傷指標の適合性を確認することを目的とする．複合構造物の場合には，構造用鋼材の配置によって相対的に要素長の小さい細かい要素分割を行わざるを得ない場合が多い．本損傷指標は，後述するように，ある領域で平均化処理を行うことで，応答値に対する要素分割の影響を低減している点が特徴の一つであり，複合構造物に適用する利点は大きいものと想定される．

なお，コンクリートの材料損傷が支配的となる複合構造部材および接合部を対象とし，鋼材やズレ止めの損傷評価については検討対象外とする．これらについては，別稿にて報告できればと考えている．

2. 解析手法と損傷指標

(1) 解析手法の概要

本研究に用いた解析手法は，複合構造標準示方書［設計編］[2]に準ずる非線形材料構成則を備えた，東京大学コンクリート研究室で開発中のCOM3[6,7]を用いる．コンクリートについてはアクティブクラック法に基づく非直交多方向固定・分散ひび割れモデルを適用した，3次元材料非線形有限要素解析手法[9]である．

(2) 3次元空間における損傷の評価

コンクリート材料の損傷状態を表現する指標として，偏差ひずみ第2不変量$\sqrt{J_2'}$と正規化累加ひずみエネルギーW_nを採用する[1,2]．これらの指標は，RC部材の2次元解析に対しては，材料モデルや解析コード，形状や荷重・境界条件によらず適用可能であることが既に報告されている[3,4,5]．$\sqrt{J_2'}$はコンクリートの引張損傷を，W_nはコンクリートの圧縮損傷を表すものである．

$$\sqrt{J_2'} = \sqrt{\frac{1}{2} e_{ij} e_{ij}} \tag{1}$$

$$W_n = \frac{1}{f} \sum_{k=1}^{n} \left(\sigma_{ij} \cdot d\varepsilon_{ij} \right)^{(k)} \tag{2}$$

ここに，e_{ij}は偏差ひずみテンソル，σ_{ij}は応力テンソル，$d\varepsilon_{ij}$はひずみ増分テンソル，fは正規化パラメータで，圧縮応力下のコンクリートの最大応力に相当する量である．nはある計算ステップでの指標であることを示している．

破壊エネルギーに基づくひずみ軟化型材料モデルを用いた非線形解析では，構造物や部材のマクロな挙動については要素分割の影響を低減できるものの，局所的なひずみ応答値は要素寸法に依存する[8]．そこで，損傷評価に際しては，局所的な応答値の要素寸法依存性を低減するため，式(3)，(4)の重み付き平均化処理を行う．

$$\overline{D} = \frac{\int_V D \cdot w(s) dV}{\int_V w(s) dV} \tag{3}$$

$$w(s) = \begin{cases} 1 - s/r & (s \le r) \\ 0 & (s > r) \end{cases} \tag{4}$$

ここに，$\overline{D}$は平均化された損傷指標，Dは局所的な損傷指標，Vは平均化領域の体積，$w(s)$は対象とする積分点からの距離sに応じた重み関数，rは平均化長さ（本研究では，$r = 150\text{mm}$とした）である．平均化領域の概念は**図-1**の通りである．2つの指標は方向性を持たないスカラー量であるため，平均化処理を行うのに適している．なお，半径rは要素寸法依存性を低減するための平均化長さであり，物理的な意味は有していない．

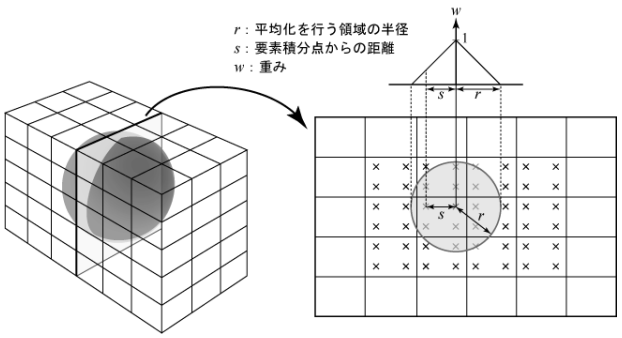


図-1 平均化の概念[2]

既報[3,4,5]では，RC 部材に対する具体的な限界値して，斜めひび割れや曲げひび割れの開口といったコンクリートの引張損傷は，損傷指標$\sqrt{J_2'}$が 0.001～0.0015 を超えることにより，コンクリートの圧壊は損傷指標$\overline{W_n}$が 0.0015～0.002 を超えることにより評価可能であることが示されている（$r = 150\text{mm}$ の場合）．この考え方は，複合構造標準示方書［設計編］[2]にも踏襲されている．

3. 複合構造部材および接合部の損傷評価

既に公表されるものを中心に，計6種類の様々な複合構造部材および接合部に対して3次元有限要素解析を適用した事例について，損傷評価を試みる．静的な耐荷力に関する検討を基本とするが，1件は試験的に疲労挙動に関する検討を対象に含める．

(1) SRCはりのせん断破壊解析[9]

せん断破壊型のSRCはり部材の実験[10]のNo.30供試体（せん断補強筋なしで，a/d=3.4とする単純支持2点載荷）を対象に検討を行う[9]．実験では，曲げひび割れや斜めひび割れの発生を伴いながら荷重上昇を続け，たわみ約15 mm時に荷重が約1000 kNに達した後に，部材剛性が大きく低下し，約45 mm時に荷重が約1050 kNを示し，最終的にせん断破壊に至ったと報告されている[10]．

RC部と載荷版/支持版はソリッド要素（RC要素と弾性要素）を用いてモデル化し，構造用鋼材（H形鋼）はシェル要素にてモデル化する．鋼材とコンクリートの間に接触・剥離と摩擦すべりを考慮可能なジョイント要素を定義する．はり部材の要素分割は，材料構成則の前提となる要素寸法と鋼材配置を勘案して行った．構造用鋼材の要素には，完全弾塑性型の応力－ひずみ関係を与えた．

解析結果を**図-2**，**図-3**に示す．最大荷重が約1040 kNと

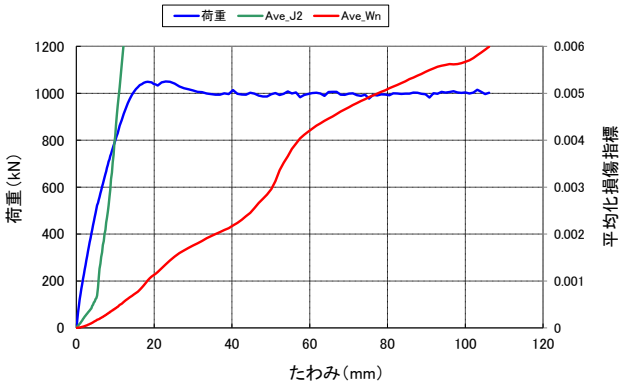
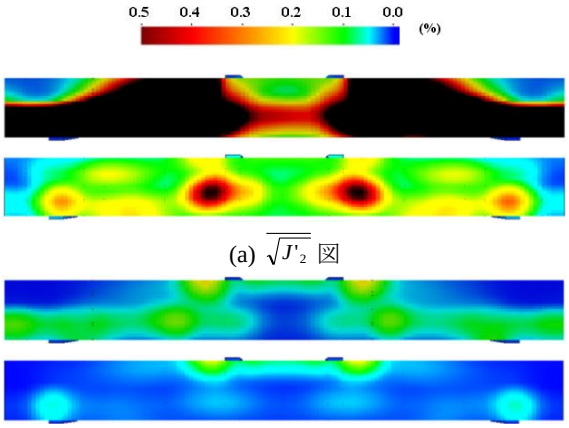


図-2　SRCはりの解析結果グラフ[9)]

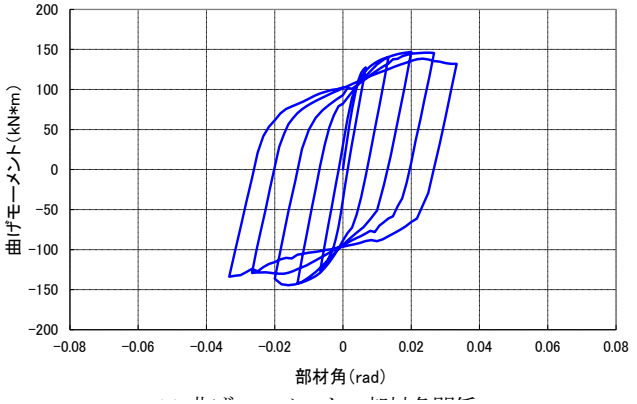


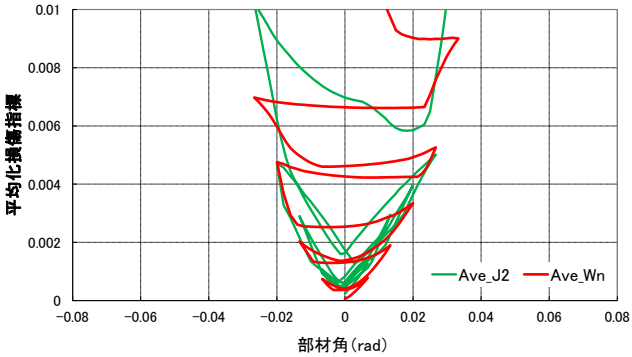
(a) $\overline{\sqrt{J'_2}}$ 図

(b) $\overline{W_n}$ 図

上段：部材外側からの表示，下段：部材内側からの表示

図-3　たわみ42.5 mm時の平均化損傷指標コンター図[9)]





(b) 平均化された損傷指標－部材角関係

図-4　CFT柱の解析結果グラフ

なっており，実験結果に近い結果が得られた．初期剛性もほぼ一致している．図-2のグラフには，平均化損傷指標の推移を併記している．図-3のH形鋼を除外したコンター図をみると，鋼材配置の影響により部材外側と内側で大きな相違が生じており，三次元的な損傷の分布になっていることが分かる．SRC部材のせん断破壊については，当初，H形鋼のない部材外側でひび割れ損傷が進展するが，最終的に載荷版周辺のコンクリートの圧縮損傷が進展することで部材耐荷力が低下し始めることが解析より推定される．$\overline{W_n}$ = 0.0015～0.002の限界値により，安全性の照査を実施できると判断される．

(2)　CFT柱の曲げ挙動解析

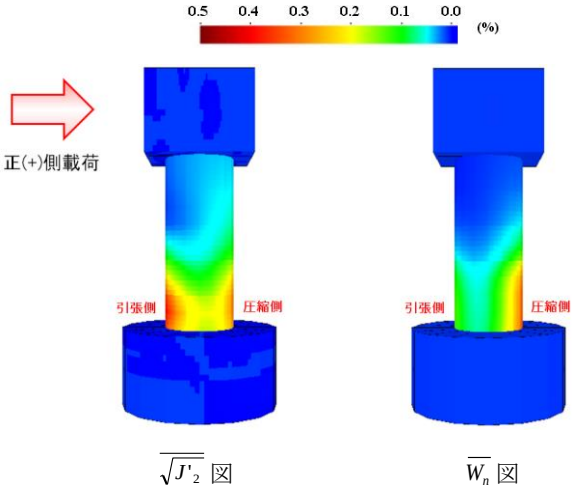
CFT柱の正負交番による曲げ載荷実験[11)]のK-1試験体（鋼管厚4.2 mmで外径269 mmの円形断面で，せん断スパン比3.0，軸力比0.21）を対象に検討を行う．実験では，3 δ_y程度の時点で鋼管基部に局部座屈が生じ，それと前後して最大荷重（モーメントで約150 kN*m）に到達し，さらに載荷が進むにつれて局部座屈が進展して，緩やかに荷重が低下したと報告されている[11)]．

充填コンクリート部と載荷部/支持部はソリッド要素（無筋要素と弾性要素）を用いてモデル化し，構造用鋼材（鋼管）はシェル要素にてモデル化する．鋼材とコンクリートの間に接触・剥離と摩擦すべりを考慮可能なジョイント要素を定義する．鋼材の要素には，完全弾塑性型の応力－ひずみ関係を与え，破断は考慮していない．また，基部のコンクリート要素には，鋼管に囲まれていることを踏まえ，大きめの圧縮破壊エネルギーを付与して，緩やかな圧縮軟化挙動を示すよう設定した．

解析結果を図-4，図-5に示す．解析では3 δ_y程度の部材角0.02 rad時に最大モーメント147 kNを示しており，実験結果に近い結果が得られた．図-5の鋼管を除外したコンター図より，圧縮損傷とひび割れ損傷ともに，充填コンクリート基部で生じていることが分かる．図-4(b)のグラフには，平均化損傷指標の進展を示しているが，CFT部材の曲げ挙動については，充填コンクリートでひび割れ損傷が進展するが，その後，基部のコンクリートの圧縮損傷が進展することで部材耐荷力が低下し始めることが解析より推定される．$\overline{W_n}$ により安全性の照査を実施できると判断されるが，限界値は0.0015～0.002よりも少し大きめの値に設定できる可能性がある．

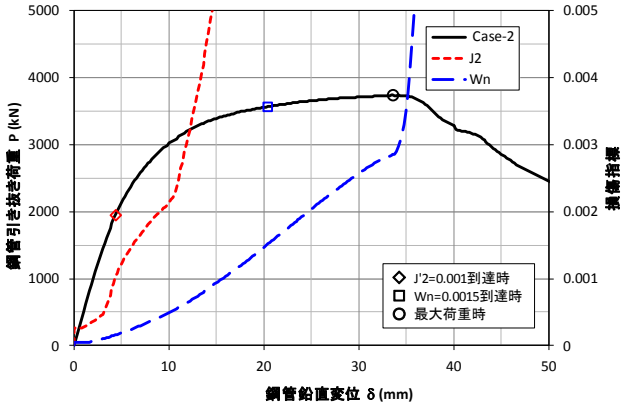
(3)　異種部材直角接合部の引き抜き解析[9)]

複合 PC ランガー橋の RC アーチ材と鋼鉛直材の接合部における引抜き抵抗に関する既往の解析事例[12)]を対象とする．RC 部，構造用鋼材部ともにソリッド要素（RC 要素と弾塑性要素）でモデル化し，鋼材とコンクリート

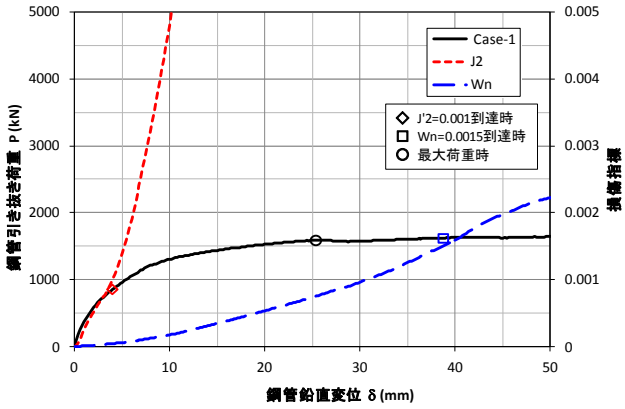


$\overline{\sqrt{J'_2}}$ 図　　$\overline{W_n}$ 図

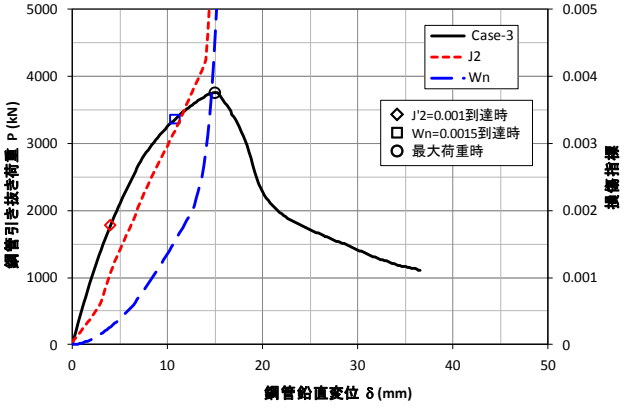
図-5　+0.02 rad (処女載荷) 時の平均化損傷指標コンター図



(b) Case-2 (アーチ材軸力 7477.3 kN 載荷後に引き抜き)

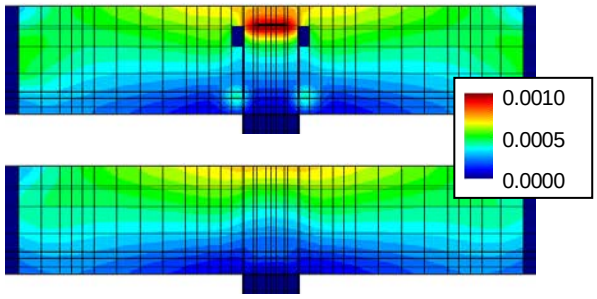


(a) Case-1 (アーチ材軸力ゼロ)

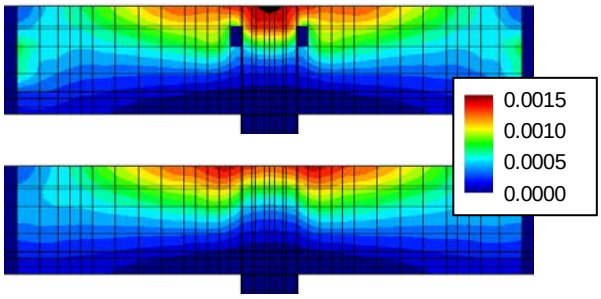


(c) Case-3 (アーチ材軸力と引き抜き荷重一定割合保持)

図-6　異種部材直角接合部の解析結果グラフ [9]



(a) $\overline{\sqrt{J'_2}}$ コンター図 (左：内面，右：外面)



(b) $\overline{W_n}$ コンター図 (左：内面，右：外面)

図-7　平均化損傷指標コンター図 (Case-3) [9]

の間に接触・剥離と摩擦すべりを考慮可能なジョイント要素を定義している．本モデルは頂部接合部近傍のみを取り出した部分モデルであるため，アーチ材および角鋼管の切断面における境界条件は，事前に実施したランガー橋の全体モデルの 3 次元骨組み解析から得られた断面力分布を参考に設定している．その上で，構造物全体の変形を勘案して，3 通りの荷重条件を与えた解析を実施している．

解析結果を**図-6**，**図-7** に示す．**図-6** のグラフには，平均化損傷指標の推移を併記しているが，いずれのケースにおいても，$\overline{W_n}$ = 0.0015～0.002 の限界値により，安全性の照査を実施できると判断される．代表的に示した**図-7** の Case-3 のコンター図をみると，形状の影響により部材外側と内側で大きな相違が生じており，三次元的な損傷の分布になっていることが分かる．(**図-7** は，$\overline{\sqrt{J'_2}}$ = 0.001，$\overline{W_n}$ = 0.0015 に達したステップにおける各指標のコンター図を表している．)

(4)　風車基礎接合部の引き抜き解析

風車基礎接合部の引き抜き模型実験 [13]を対象とした，既往の解析事例 [14]に対して損傷評価を試みる．離散的なひび割れの進展により，破壊に至ったケースである．解

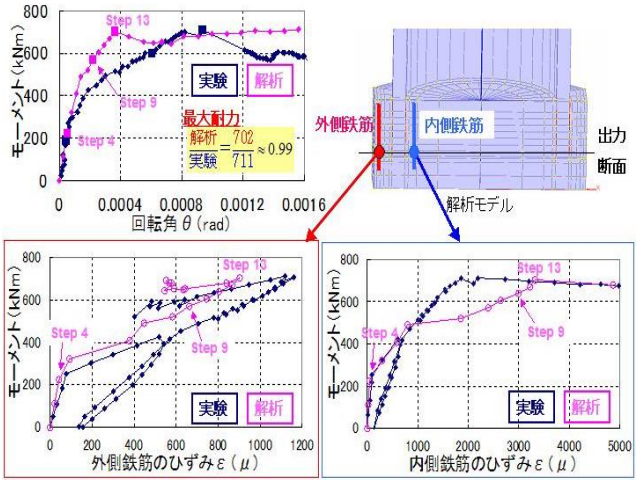


図-8　既往の解析結果概要[14)]

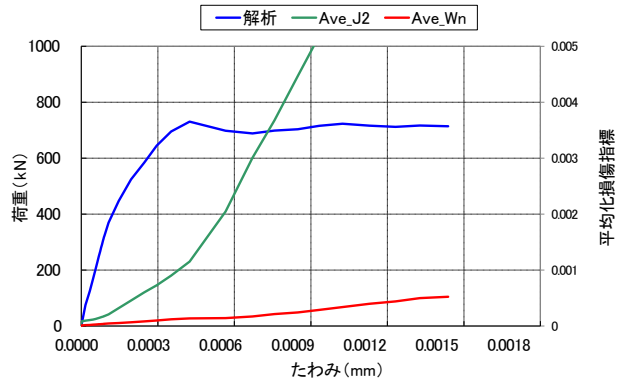


図-9　風車基礎接合部の引き抜き解析結果グラフ[14)]

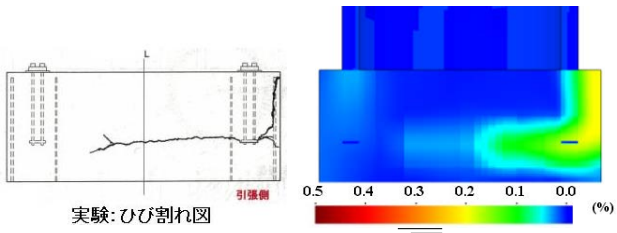


図-10　ひび割れ図[14)]と 0.00057 rad 時の $\sqrt{J'_2}$ コンター図

析から得られた図-8 のモーメント－回転角関係では，剛性を高めに評価しているものの，最大耐力が精度良く評価されている．さらに，アンカープレートと同高位置での鉄筋のひずみ挙動は，外側鉄筋，内側鉄筋ともに，全体的な挙動が良く追跡できていることが確認されている[14)]．RC 部，鋼材部ともにソリッド要素でモデル化し，アンカープレートとコンクリートの間に接触・剥離と摩擦すべりを考慮可能なジョイント要素を定義している．

図-9，図-10の解析結果より，この例では最大荷重以降も $\overline{W_n}$ は大きく進展しておらず，$\sqrt{J'_2}$ = 0.001～0.0015 の限界値により，より安全性の照査を実施できる傾向を示している．図-10の $\sqrt{J'_2}$ のコンター図は，実験時のひび割れ図と良く対応していることが分かる．

(5)　合成床版（I型鋼・平鋼リブ）の押し抜き破壊解析

鋼コンクリート合成床版（コンクリート厚 160 mm，底

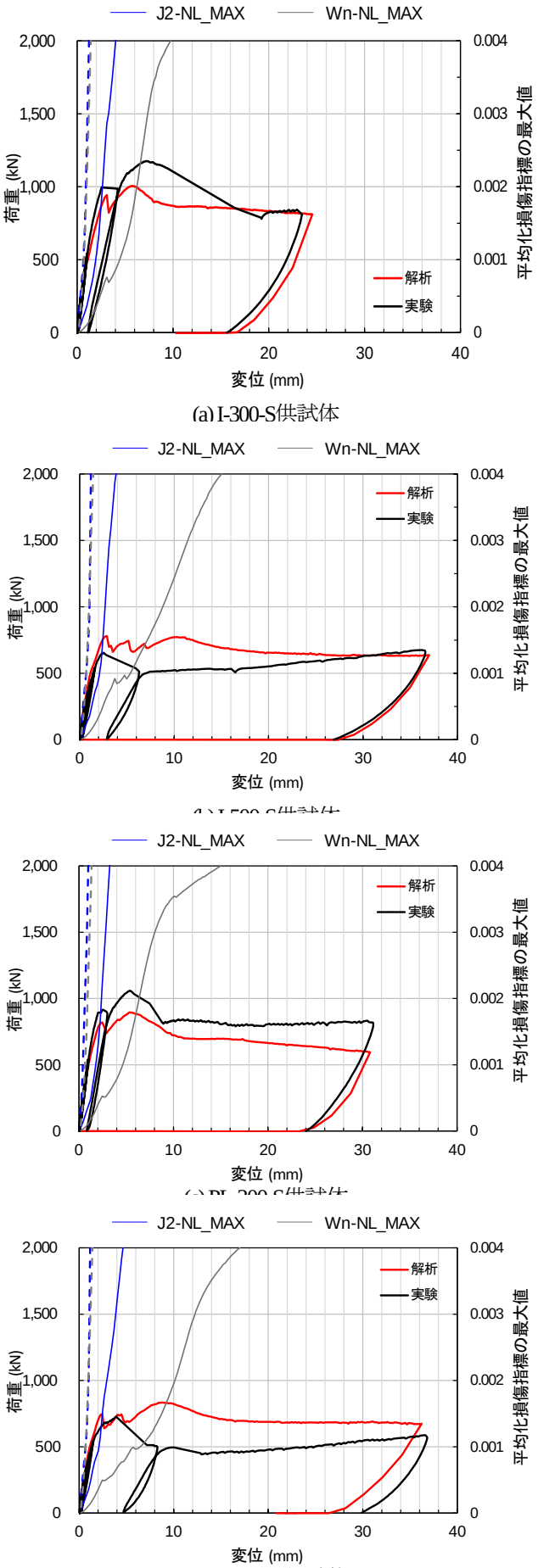
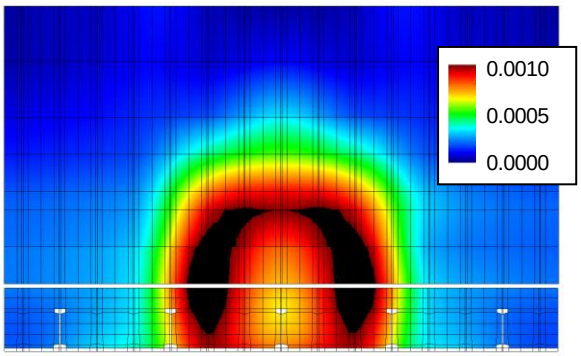
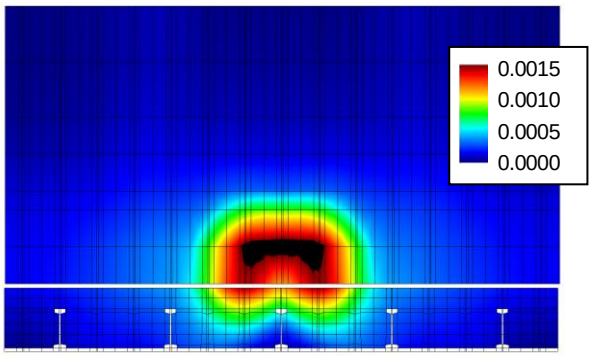


図-11　合成床版の解析結果グラフ[15)]



(a) $\overline{\sqrt{J'_2}}$ コンター図（上：上面図，下：中央切断面）



(b) $\overline{W_n}$ コンター図（上：上面図，下：中央切断面）

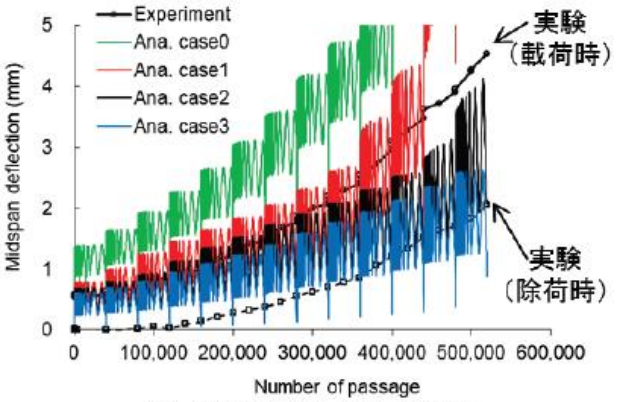
図-12　平均化損傷指標コンター図(I-300-S)

鋼板厚 9 mm)のずれ止めリブの形状や配置が静的な押し抜きせん断破壊に及ぼす影響について検討した既往の解析事例[15]を対象とする．既報[15]では数多くの供試体で検討されているが，いずれのケースも解析結果は実験結果をよく再現できている．ここでは，他のケースについても同様の結果となることを確認した上で，I 型鋼と PL 鋼で，リブピッチを 300 と 500 mm としたケースについて損傷評価結果を掲載する．RC 部，構造用鋼材部ともにソリッド要素でモデル化し，鋼材とコンクリートの間に接触・剥離と摩擦すべりを考慮可能なジョイント要素を定義している．

解析結果を**図-11**，**図-12** に示す．**図-11** のグラフには，平均化損傷指標の推移を併記しており，同色の点線は $\sqrt{J'_2}$ と W_n の局所値の最大値を表している．代表的に示した**図-12** の I 型鋼でリブピッチを 300 mm とした I-300-S 供試体のコンター図とあわせて考察すると，合成床版の押し抜きせん断破壊については，当初，ひび割れ損傷が進展するが，最終的に上面の載荷版周辺で圧縮損傷が集中して部材耐荷力が低下し始めることが解析より推定される．(**図-12** は，$\overline{\sqrt{J'_2}}$ = 0.001，$\overline{W_n}$ = 0.0015 に達したステップにおける各指標のコンター図を表している．)以上の結果より，$\overline{W_n}$ = 0.0015～0.002 の限界値によって，安全性の照査を実施できると判断されるとともに，複合構造部材において損傷指標を空間平均化する意義が確認できる．

(6)　ロビンソン型合成床版の輪荷重走行試験解析[9]

主たるずれ止めとして頭付きスタッドを用いるロビンソン型合成床版(コンクリート厚 200 mm，底鋼板厚 9 mm)の輪荷重走行試験[16]の再現を試みた，既往の解析事例[9),17)]を対象とする．既報[17)]では本検討に先立ち，リブ側面とコンクリート間の初期付着力に関する感度解析を実施しているが，ここでは実験結果との整合が良かったケース 2 について損傷評価を試みる(**図-13** の黒線がケース 2 の解析結果である[17)])．RC 部，構造用鋼材部ともにソリッド要素でモデル化し，鋼材とコンクリートの間に



(a)　版中央たわみ-載荷回数関係

図-13　既往の解析結果概要[17)]

接触・剥離と摩擦すべりを考慮可能なジョイント要素を定義している．スタッドはスタッド剛性によるバネを底鋼板とコンクリートとの境界面に設定し，スタッド形状自体はモデル化していない．

図-14，**図-15**の解析結果より，この例では底鋼板周辺のコンクリートにひび割れ損傷が進展した後，鋼材との一体性を喪失したこともあって，最終的に床版上面の圧縮損傷が卓越して破壊に至っているものと推定される．**図-14**のグラフには，たわみの最大値と平均化損傷指標の進展を併記しているが，いずれのケースにおいても，繰返し回数が増えるに従って，たわみとともに損傷指標も大きくなっていることが分かる．(**図-15**は，$\overline{\sqrt{J'_2}}$ = 0.001，$\overline{W_n}$ = 0.0015に達したステップにおける各指標のコンター図を表している．)

以上より，今後も詳細な検討を必要とするが，疲労による破壊現象に対しても，静的な耐荷力と同様に，本研究で取り扱った2つの損傷指標を適用できる見込みがあると考えている．

4.　結論

コンクリートの材料損傷指標を各種複合構造部材および接合部の有限要素解析結果に適用し，構造物や構成部

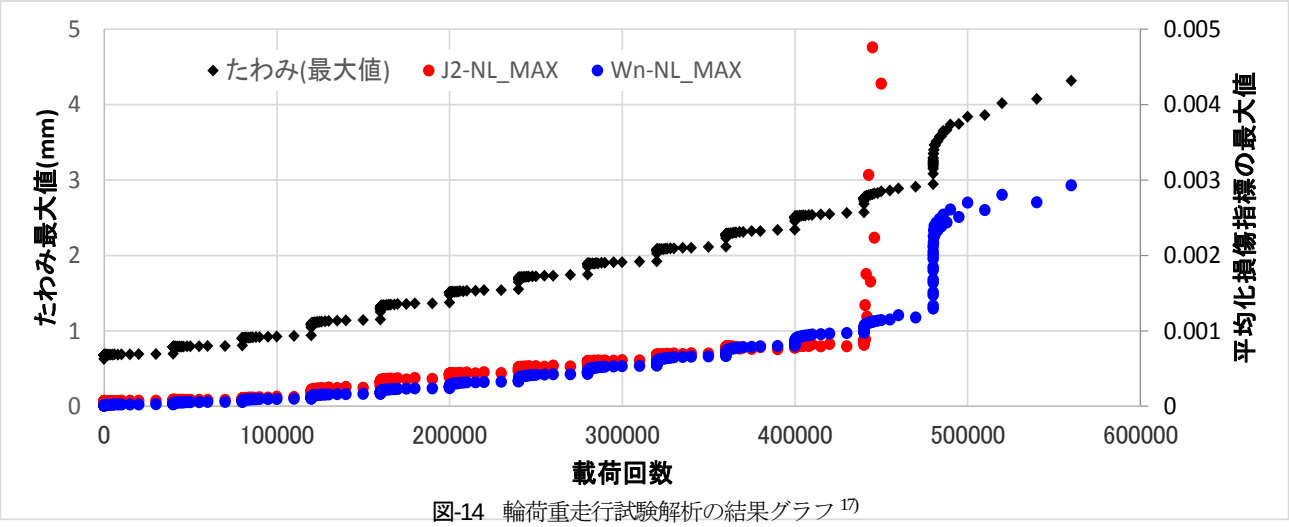
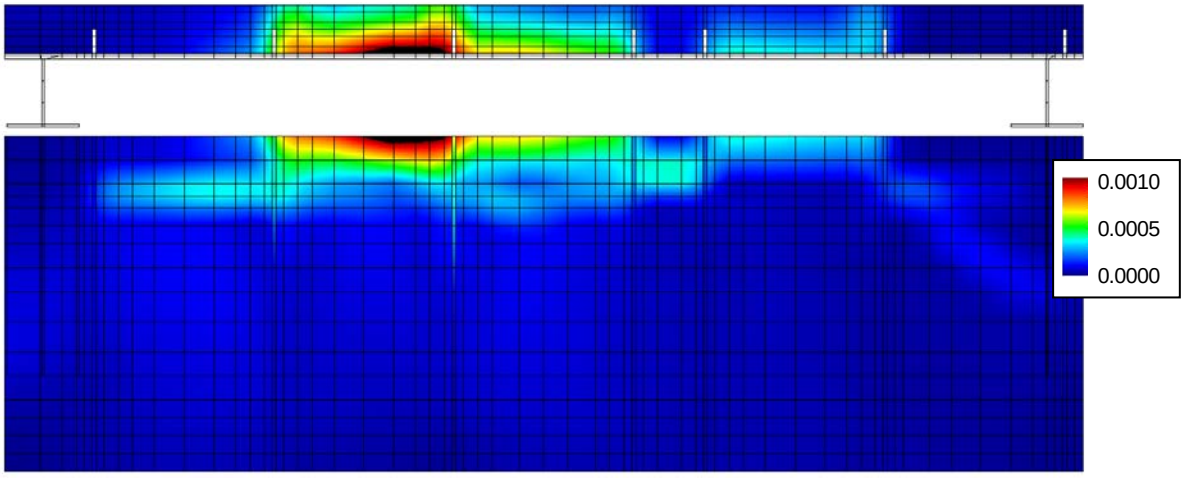
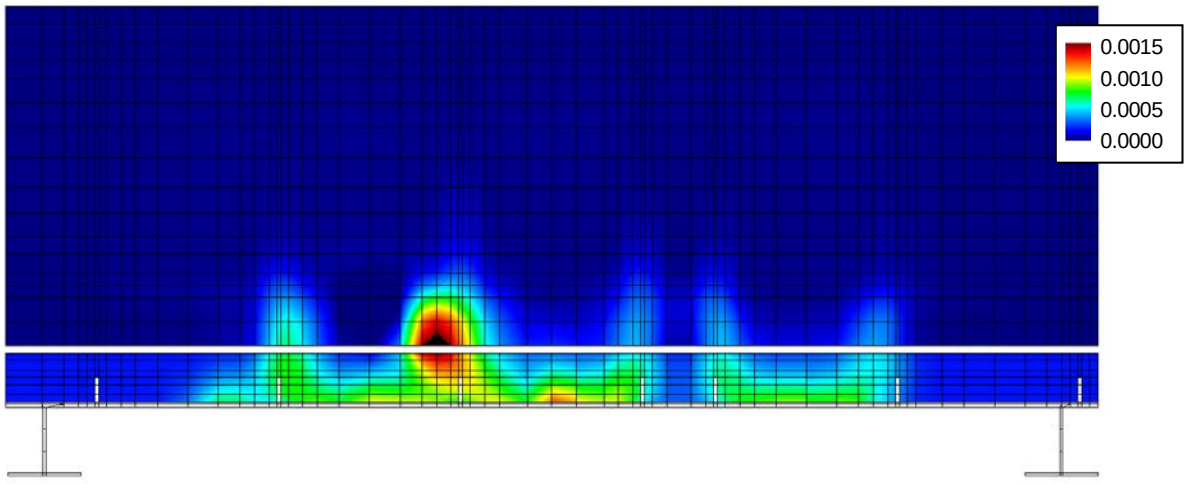


図-14　輪荷重走行試験解析の結果グラフ [17)]



(a) $\sqrt{J'_2}$ コンター図（上：中央切断面，下：底面図）



(b) $\overline{W_n}$ コンター図（上：上面図，下：中央切断面）

図-15　平均化損傷指標コンター図

材の損傷や破壊の評価に対する適合性を確認した．その結果，検討した範囲ではあるものの，2つの指標によって，コンクリートの材料損傷が支配的となる複合構造部材および接合部での損傷や破壊を概ね評価することができた．具体的な照査用限界値としては，複合構造標準示方書［設計編］[2)]に記載された値を用いることで妥当ないし幾分安全側の評価となる．

今後も，適用事例を蓄積することで，非線形解析によって土木構造物の性能照査を行う環境整備に資する情報を提供していきたい．例えば，RC部材では，部材厚が小さい場合の平均化半径の取り扱いに関する課題が指摘されている[18)]が，複合構造物でも同様の問題を有しており，疲労の解析を含め，引き続き検討を重ねていきたい．

謝辞：本検討に際して，土木学会 複合構造委員会 2014 年版 複合構造標準示方書小委員会（委員長：中島章典 教授(宇都宮大学)）の皆様より，貴重な御意見を賜りました．また，本研究で使用した解析プログラムCOM3は，前川宏一 教授(東京大学大学院)のご厚意により使用させて頂きました．ここに記して感謝の意を表します．

参考文献

1) 土木学会：コンクリート標準示方書［設計編］，2012.
2) 土木学会：複合構造標準示方書［設計編］，2014.
3) 斉藤成彦，牧剛史，土屋智史，渡邊忠朋：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, pp.166-180, 2011.
4) 土屋智史，牧剛史，斉藤成彦，渡邊忠朋，前川宏一：非線形有限要素解析による RC 面部材の損傷指標と耐力評価，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.68, No.3, pp.209-224, 2012.
5) 牧剛史，斉藤成彦，土屋智史，渡邊忠朋，島弘：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, pp.33-52, 2013.
6) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H. : *Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete*, Spon Press, London, 2003.
7) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T. : *Multi-Scale Modeling of Structural Concrete*, Taylor and Francis, 2008.
8) 土木学会：コンクリート標準示方書［耐震性能照査編］Ⅲ. 改定資料，2002.
9) 土木学会：複合構造標準示方書［設計編］改訂資料，X. 有限要素解析による性能照査編 9. 解析例，2014.
10) 村田清満，池田学，渡邊忠朋，戸塚信弥：鉄骨鉄筋コンクリート部材のせん断耐力，土木学会論文集，No.626，pp.207-218，1999.
11) 池田学，萬代能久，吉田直人：短柱 CFT 部材の曲げ耐力・変形性能の算定法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33, No.2, pp.1135-1140, 2011.
12) 牧剛史，川村力，上田多門，土屋智史，渡辺忠朋：鋼－コンクリート複合 PC ランガー橋接合部の引抜き抵抗に関する数値解析的検討，土木学会論文集 A，Vol.66，No.3，pp.491-504，2010.
13) 小松崎勇一，篠崎裕生，斉藤修一，原田光男：風車基礎ペデスタルの引抜きせん断耐力に関する実験的検討，土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集，土木学会，2008.
14) 土屋智史，本庄勇治，石原孟：FEM 非線形解析に基づく風車基礎接合部の力学的挙動の解明，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，土木学会，2009.
15) 藤山知加子，櫻井信彰，前川宏一：ずれ止め諸元が鋼コンクリート合成床版の損傷モードに及ぼす影響，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 68, No. 1, 1-15, 2012.
16) 街道浩，渡辺滉，橘吉宏，松井繁之，堀川都志雄：鋼コンクリート合成床版の輪荷重走行試験および 3 次元有限要素解析による疲労耐久性評価，構造工学論文集，Vol.50A，pp.1119-1130, 2004.
17) 藤山知加子，松村寿男，高須賀丈広：3 次元非線形 FEM 解析に基づく移動荷重下の鋼・コンクリート合成床版破壊過程の考察，土木学会論文集 A1（構造・地震工学）, Vol.70, No.2, pp.227-237, 2014.
18) 牧剛史，土屋智史，斉藤成彦，渡邊忠朋：構成材料の損傷に基づく RC 柱の耐荷・変形機構の数値解析的評価，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.71, No.1, pp.29-47, 2015.

DAMAGE ASSESSMENT FOR COMPOSITE MEMBERS AND JOINTS BASED ON NONLINER FINITE ELEMENT ANALYSIS

Kaoru YONETSU, Chikako FUJIYAMA, Satoshi TSUCHIYA,
Takeshi MAKI, Shigehiko SAITO and Tadatomo WATANABE

This paper shows the evaluation method of damage and failure of concrete for composite member such as steel-concrete composite slabs and foundation of wind turbine. The second strain invariant of deviatoric strain tensor and consumed strain energy averaged over certain region calculated from local strain were applied for the damage assessment. Owing to their complexity shapes of composite structures, FE-modeling was often required very small mesh division locally. Then, it is important that to reduce influence caused by mesh definition on assessment of output and ultimate limit state. As a result, those nonlocal damage index can assess the failure process for several types of composite structure where the damage of concrete is dominated. It was revealed that these index could evaluate the safety of composite structures by nonlinear FE analyses.