

論文 有限要素解析における損傷指標に基づく L 形および T 形柱はり接合部の損傷評価

鈴木 瞭*1・中田 裕喜*2・渡辺 健*3

要旨: 本研究では、有限要素解析による接合部の照査方法を確立することを目的に、L 形柱はり接合部および T 形柱はり接合部を対象に有限要素解析を行い、RC はりや柱、面部材等での適用性が示されている損傷指標（偏差ひずみ第 2 不変量、正規化累加ひずみエネルギー）の接合部への適用性について検討した。その結果、接合部を部材や部位ごとに分割することで、概ねコンクリートのひび割れや圧縮の損傷を表現できており、接合部に対しても損傷指標を用いて評価可能であることを示した。ただし、隅角部で損傷するケースは他のケースに比べて損傷の判定が早くなることが確認された。

キーワード: 柱はり接合部、有限要素解析、損傷指標、曲げ内半径

1. はじめに

鉄道ラーメン高架橋等の柱はり接合部（以下、接合部）は、鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）¹⁾や配筋の手引き²⁾による鉄筋やハンチ等の構造細目を遵守することで、照査を省略している。仕様の規定は設計における作業の省力化が図れる一方で、仕様の前提に従う必要があり、新材料の適用等において、対応が困難となることが想定される。接合部に対し、算定式や有限要素解析を用いることで、ひび割れや耐力等を評価できれば、各要求性能に対して構造計算が必要となるが、合理的な断面、配筋とすることが可能となる。このようにそれぞれの設計手法に長所と短所があり、これらが選択可能な接合部の照査方法を構築することが求められる。

本研究では標準化されつつある有限要素解析による照査に着目し、土木学会コンクリート標準示方書（設計編）（以下、示方書）³⁾に示されている材料の損傷指標である偏差ひずみ第 2 不変量と正規化累加ひずみエネルギーに基づき評価を行った。材料の損傷指標は RC はりや柱、面部材を対象として適用性が検証されている^{4)~7)}。しかし、接合部は、折り曲げ鉄筋やフックにおける支圧が破壊に影響を与えること、隅角部や部材境界部で破壊すること等、柱や面部材とは異なるため、接合部への損傷指標の限界値や応答値の算出法の適用性を検証する必要がある。これまで著者ら⁸⁾は、ラーメン高架橋の接合部を模擬した L 形接合部、T 形接合部の載荷実験ならびに離散鉄筋等を用いてモデル化した非線形有限要素解析を行っており、接合部の損傷性状や荷重変位関係を評価できることを明らかにしてきた。本研究では、接合部の曲げ内半径部で圧縮損傷する場合も含め、離散鉄筋等を用いたモデルの損傷指標の適用性について検討する。

2. 損傷指標

示方書では、材料の損傷状態は応力やひずみに基づいて設定するものとされており、コンクリートについては、引張損傷に対しては偏差ひずみ第 2 不変量が、圧縮損傷に対しては正規化累加ひずみエネルギーが示されている。本研究では示方書の定義にしたがって損傷指標を算出した。

偏差ひずみ第 2 不変量 $\sqrt{J_2}$ および正規化累加ひずみエネルギー W_n はそれぞれ式(1)、式(2)のように定義されている。

$$\sqrt{J_2} = \frac{1}{2} e_{ij} e_{ij} \quad (1)$$

$$W_n = \frac{1}{f} \int \sigma_{ij}^e d\epsilon_{ij} \quad (2)$$

ここに、 e_{ij} : 偏差ひずみテンソル ($= \epsilon_{ij} - \epsilon_{ij} \delta_{ij} / \delta_{ii}$)、 ϵ_{ij} : 全ひずみテンソル、 δ_{ij} : クロネッカーのデルタ、 σ_{ij}^e : コンクリートの応力テンソル、 $d\epsilon_{ij}$: ひずみ増分テンソル、 f : 正規化パラメータである。正規化パラメータ f は一般にコンクリートの圧縮強度とする。

各損傷指標は、重みつき平均をとることで損傷指標に対する要素分割依存性を低減できることが齊藤ら⁴⁾によって示されている。ここでは各ガウス点を中心とした平均化長さ L を半径とする球体に含まれるガウス点での指標を、式(3)のように距離による重みつき平均をとることで、平均化した損傷指標 $\bar{D}$ を算出した。

$$\bar{D} = \frac{\int_A D \cdot w(x) dA}{\int_A w(x) dA} \quad (3)$$

ここに、 D は局所的な損傷指標であり、 x は対象とするガウス点からの距離である。また、 $w(x)$ は距離 x における重みであり、式(4)のように定義されている。

*1 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 修士 (工学) (正会員)

*2 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博士 (工学) (正会員)

*3 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博士 (学術) (正会員)

$$w(x) = \begin{cases} 1 - x/L & x \leq L \\ 0 & x > L \end{cases} \quad (4)$$

この平均化した損傷指標は、平均化長さ $L=150\text{mm}$ で平均化した場合には、 $\sqrt{f_2}=1000\mu$ 、 $\overline{W}_n=1500\mu$ を限界値として評価できることが検証されている^{6)~8)}。以降は、平均化した損傷指標を単に損傷指標と呼ぶこととする。

3. 解析の概要

3.1 解析モデルの概要

図-1に解析モデルを示す。解析は、汎用有限要素解析コード DIANA ver.10.5 を用い、三次元有限要素解析を実施した。解析モデルは、一般的な鉄道ラーメン高架橋に用いられる接合部を50%程度に縮小した既往の実験の供試体⁸⁾⁹⁾を三次元でモデル化した。コンクリートはソリッド要素とし、接合部の要素寸法は 31.25mm とした。鉄筋は軸方向の剛性のみを考慮した埋込み鉄筋要素とし、L形接合部における軸方向鉄筋の折り曲げ部は 10mm 程度で分割し、折り曲げ定着部の曲線を再現した。また、実験で用いたピン支点を再現するため、ピン支点の回転中心と水平部材および鉛直部材の支点部のソリッド要素を剛なビーム要素で接続した。

コンクリートは、圧縮側は Parabolic のモデルを、引張側は Hordijk のモデルとし、破壊エネルギーに基づく軟化勾配を考慮した。なお、コンクリートの圧縮強度は 27N/mm^2 、引張強度は 2.6N/mm^2 、弾性係数は 25.9kN/mm^2 とし、軸方向鉄筋は線形で、弾性係数は 200kN/mm^2 とした。軸方向鉄筋を線形としたのは、柱やはりでの曲げ降伏を回避し、接合部の耐力を評価するためである。なお、軸方向鉄筋が非線形の場合も、本論文で得られた損傷指標の適用性は同様であることを別途確認している。コンクリートの引張破壊エネルギーは示方書に基づき、圧縮破壊エネルギーは $G_{fc} = 8.8\sqrt{f_c}$ (N/mm^2)により算出した。ひび割れは固定ひび割れモデルとし、ひび割れ面でのせん断力の伝達については、ひび割れ幅によりせん断力が低下する Al-Mahaidi のモデルを適用した。鉄筋とコンクリートとの付着応力は、既往の研究¹⁰⁾を参考に、島らが提案した付着応力すべり関係の付着応力を40%に低減することとした⁸⁾。荷重方法は、L形モデルでは正側方向（接合部が開く側）と負側方向（接合部が閉じる側）に一方方向荷重とし、T形モデルでは対称となるため、正側一方方向のみとした。なお、このモデルは概ね実験を再現できることを確認したものである⁸⁾⁹⁾。

3.2 解析ケース

表-1に、解析ケースを示す。解析は、L形モデルとT形モデルを対象とした。

柱は断面高さ $B=500\text{mm}$ 、はりは断面高さ $H=500\text{mm}$ ($H/B=1.0$) または、 $H=800\text{mm}$ ($H/B=1.6$) とし、支点および

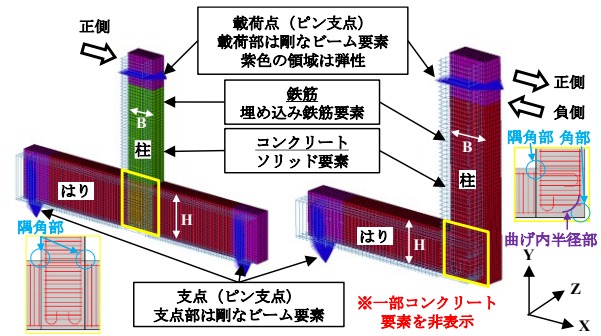


図-1 解析モデル

表-1 解析ケース

モデル名	形状	H/B	曲げ内半径
L_1.0_P3	L形	1.0	3φ
L_1.0_P10			10φ
L_1.6_P3		1.6	3φ
L_1.6_P10			10φ
T_1.0	T形	1.0	
T_1.6		1.6	

※φは軸方向鉄筋径

※奥行(z)方向は500mm

※H：はりの断面高さ(=500mm($H/B=1.0$), 800mm($H/B=1.6$))

※B：柱の断面高さ(=500mm)

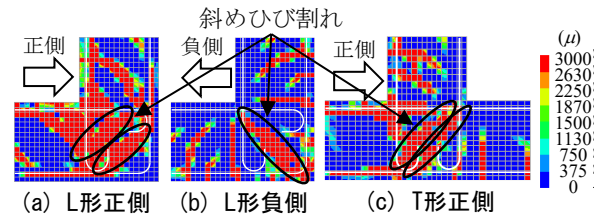


図-2 最大主ひずみ分布

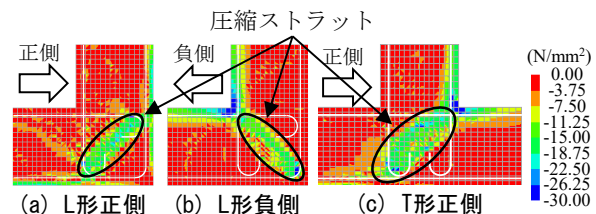


図-3 最小主応力分布

載荷点から接合部基部までの長さ $L=1,800\text{mm}$ とした。L形接合部の隅角部に沿う外側軸方向鉄筋の曲げ内半径は 3ϕ または 10ϕ とし、その他の軸方向鉄筋ならびにT形モデルにおける柱の軸方向鉄筋は半円形フックとした。柱、はり、接合部内の帯鉄筋比 p_w はすべて0.57%とした。

4. 柱はり接合部のひび割れと耐荷機構

接合部に生じるひび割れと耐荷機構についてL_1.0_P3とT_1.0のケースを用いて以下に示す。なお、4章、5章において、分布図は接合部のZ方向に対して中央の断面を示しており、軸方向鉄筋を白線で併記した。

4.1 L形モデル正側荷重時

図-2(a)に、正側最大荷重時の最大主ひずみ分布を示す。荷重初期に柱、はりに曲げひび割れが生じた後、柱、はりの曲げ圧縮縁同士を結ぶ斜めひび割れが生じる。こ

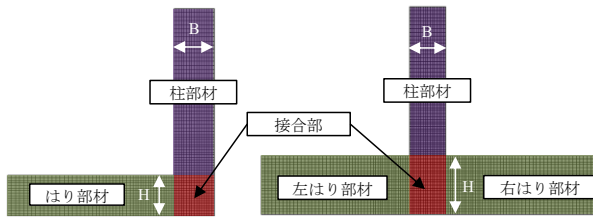


図-4 接合部の部材分割

の斜めひび割れは荷重の増加とともに本数が増える。

図-3(a)に、正側最大荷重時の最小主応力分布を示す。斜めひび割れに沿って圧縮ストラットが発生し、柱やはりの外側基部が損傷することが想定される。いずれの傾向も曲げ内半径 10ϕ ならびに $H/B=1.6$ でも同様である。

4.2 L形モデル負側載荷時

図-2(b)に、負側最大荷重時の最大主ひずみ分布を示す。載荷初期に柱、はりに曲げひび割れが生じた後、隅角部と角部を結ぶ斜めひび割れが生じる。この斜めひび割れは複数本が概ね同時に発生し進展する。

図-3(b)に負側最大荷重時の最小主応力分布を示す。斜めひび割れに沿って隅角部から外側軸方向鉄筋の折曲げ開始点間にかけて圧縮ストラットが形成される。曲げ内半径が小さい場合には圧縮力を負担する領域が小さくなるため曲げ内半径部で圧縮損傷するが、曲げ内半径が大きくなると圧縮ストラットの幅も大きくなり、相対的に圧縮領域が小さい隅角部で破壊することが想定される。

4.3 T形接合部

図-2(c)に最大荷重時の最大主ひずみ分布を、図-3(c)に最大荷重時の最小主応力分布を示す。ひび割れの発生箇所や載荷方向と圧縮ストラットの向きの関係より、L形接合部の正側載荷時と同様の傾向であるといえる。

5. 損傷指標による接合部の評価

5.1 損傷指標の接合部への適用

接合部での斜めひび割れと損傷を損傷指標 $\sqrt{J_2}=1000\mu$ 、 $\overline{W}_n=1500\mu$ によってそれぞれ評価可能か検討した。本研究では、図-4に示すようにL形モデルは柱、はり、接合部の3部材、T形モデルは柱、左右のはり、接合部の4部材に分割し、各部材における損傷指標 $\sqrt{J_2}$ 、 $\overline{W}_n$ の最大値を求めた。各ステップにおける損傷指標の最大値を求めることで得られる変位と損傷指標の関係をJ曲線、W曲線と呼ぶこととする。

(1) L形モデル正側載荷時

図-5に荷重変位曲線と、接合部のJ曲線、接合部のW曲線を示す。また、各図には最大荷重時の接合部のW曲線の値 $\overline{W}_{n\text{pmax}}$ も記載している。

図-6にL_1.0_P3とL_1.6_P3のケースにおいて、接合部のJ曲線が 1000μ に達した時の $\sqrt{J_2}$ 分布と最大主ひずみ分布を示す。図より、 $\sqrt{J_2}$ は、いずれのケースでも接合

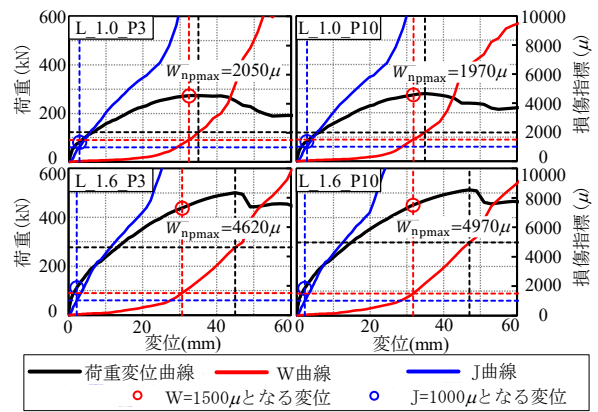


図-5 L形正側載荷時の荷重・損傷指標－変位曲線

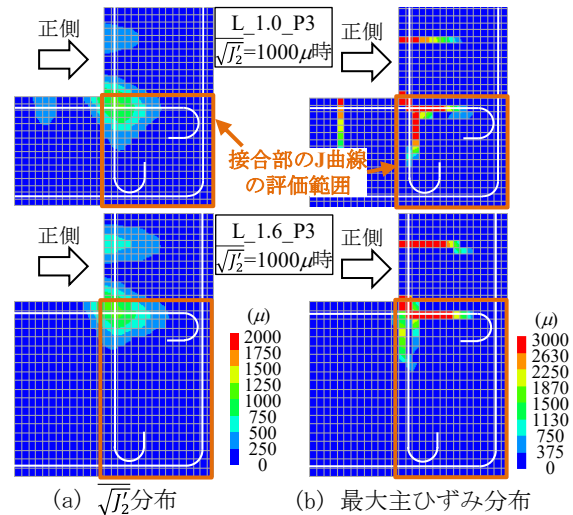


図-6 L形正側載荷時の $\sqrt{J_2}$ 分布と最大主ひずみ分布

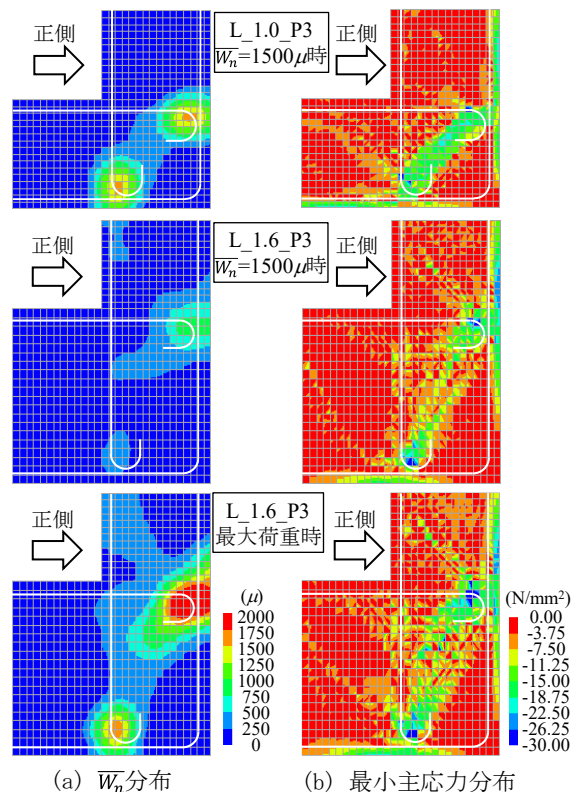


図-7 L形正側載荷時の $\overline{W}_n$ 分布と最小主応力分布

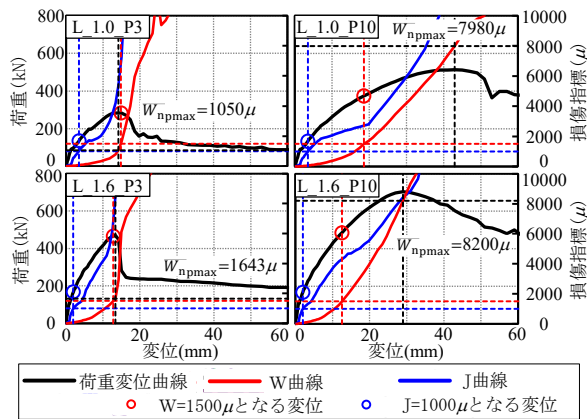


図-8 L形負側載荷時の荷重・損傷指標-変位曲線

部の隅角部から軸方向鉄筋に沿って発生したひび割れを評価しているものと考えられる。なお、図-5よりJ曲線に対しても曲げ内半径の影響は小さいといえる。

図-7に、L_1.0_P3とL_1.6_P3のケースにおいて、W曲線が1500μに達した時の $\bar{W}_n$ 分布と最小主応力分布を示す。また、L_1.6_P3のケースでは最大荷重時の $\bar{W}_n$ 分布と最小主応力分布も示す。なお、曲げ内半径が10φの場合の $\bar{W}_n$ 分布と最小主応力分布は、3φのケースと概ね同様であった。図より、 $H/B=1.0$ の時にはW曲線の1500μ到達時と最大荷重時が概ね同等であり、圧縮ストラットの両端で $\bar{W}_n$ の値が1500μを超えていることから、想定される損傷形態と一致している。 $H/B=1.6$ の時には最大荷重に先行してW曲線が1500μに達する。図-7より、W曲線が1500μに達した時に、内側の要素は1500μに到達しているものはないことがわかる。この時、外側の要素だけが1500μに達している。すなわち、外側の要素のみならず内側の要素の $\bar{W}_n$ が1500μに達した時に最大荷重をとるものと考えられる。また、はり高さが大きくなったことで相対的に弱点となった柱基部側で損傷が先行することがわかる。

(2) L形モデル負側載荷時

図-8に荷重変位曲線と、接合部のJ曲線、接合部のW曲線を示す。また、各図には最大荷重時の接合部のW曲線の値 $\bar{W}_{nmax}$ も記載している。

図-9に、L_1.0_P3とL_1.6_P3のケースにおいて、J曲線が1000μに達した時の $\sqrt{J_2}$ 分布と最大主ひずみ分布を示す。図より、いずれのケースでも柱、はりの基部に生じる曲げひび割れを評価していると考えられる。なお、 $\sqrt{J_2}$ 分布より曲げひび割れに対しては曲げ内半径の影響は小さいと考えられるが、図-8より変位が大きくなるとJ曲線の傾向は曲げ内半径の大きさにより異なり、これは斜めひび割れの挙動の差によるものと考えられる。

図-10にL形モデルにおいて、W曲線が1500μに達した時の $\bar{W}_n$ 分布と最小主応力分布を示す。図より、曲げ内半径が3φの時にはW曲線の1500μ到達時と最大荷重

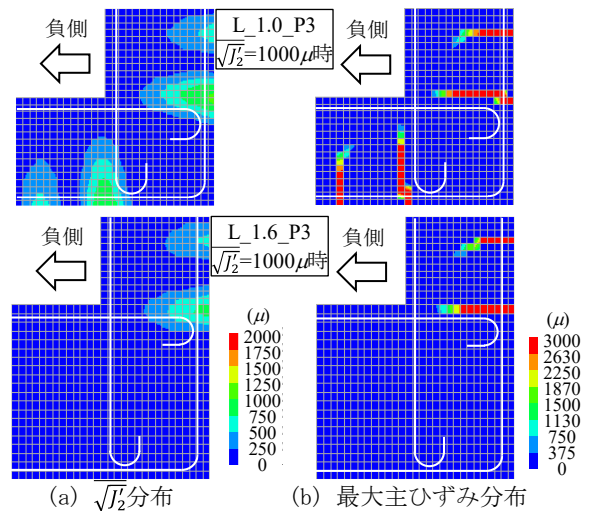


図-9 L形負側載荷時の $\sqrt{J_2}$ 分布と最大主ひずみ分布

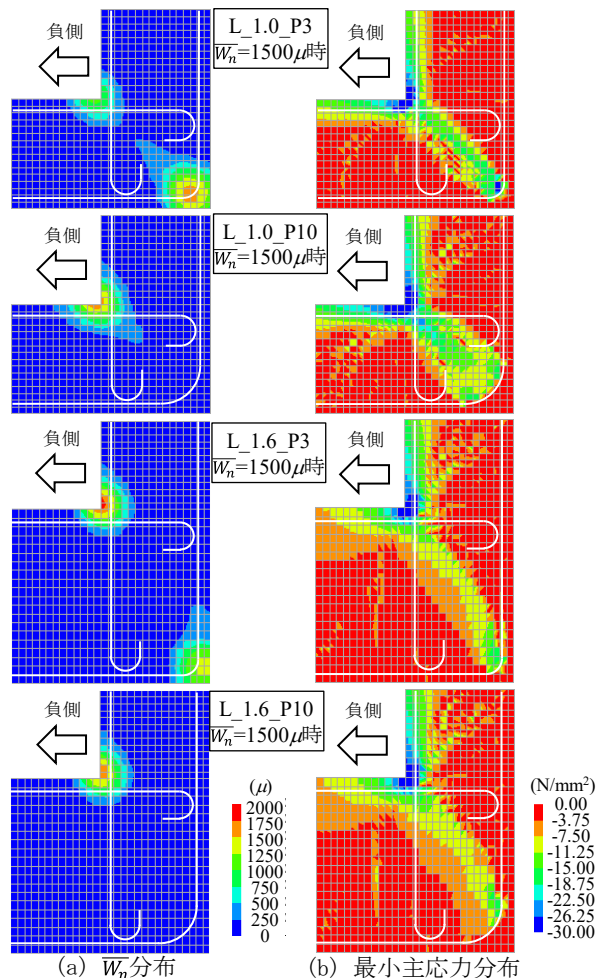


図-10 L形正側載荷時の $\bar{W}_n$ 分布と最小主応力分布

時が概ね同等であり、 $H/B=1.0$ の時には曲げ内半径部で $\bar{W}_n$ が1500μに達することから、想定される損傷形態と一致している。一方で、 $H/B=1.6$ の時には隅角部でも $\bar{W}_n$ が1500μに達することから、相対的に弱点となった柱基部側での損傷が接合部での損傷と同等のタイミングで生じたと考えられる。曲げ内半径が10φの時には最大荷重に先行してW曲線が1500μに達するものの、隅角部で損傷

するという想定と一致している。

(3) T 形モデル

図-11 に荷重変位曲線と、接合部の J 曲線、接合部の W 曲線を示す。また、各図には最大荷重時の接合部の W 曲線の値 $\overline{W}_{n\max}$ も記載している。

図-12 に、T_1.0 と T_1.6 のケースにおいて、J 曲線が 1000μ に達した時の $\sqrt{f_2}$ 分布と最大主ひずみ分布を示す。図より、いずれのケースでも柱部材に発生した曲げひび割れを評価しているものと考えられる。

図-13 に、T_1.0 と T_1.6 のケースにおいて、W 曲線が 1500μ に達した時の $\overline{W}_n$ 分布と最小主応力分布を示す。図より、T 形接合部の $H/B=1.0$ 、 $H/B=1.6$ はそれぞれ L 形接合部の $H/B=1.0$ 、 $H/B=1.6$ の正側荷重時と同様の傾向を示している。ただし、耐力は L 形モデルの正側荷重時に比べて 10～20%程度低下する。このことより、T 形モデルの $\overline{W}_n$ 分布と最小主応力分布は、同じ H/B である L 形モデルの正側荷重時の $\overline{W}_n$ 分布と最小主応力分布と同様になることがわかった。なお、柱とはりが直交する十字形等の接合部に対しても同様であると考えられる。

以上より、L 形モデルでは負側荷重時にも正側荷重時にも、接合部の損傷を $\overline{W}_n=1500\mu$ によって概ね評価することができ、T 形モデルでは L 形モデルの正側荷重時と同様の損傷形態を示すことがわかった。また、 $\overline{W}_n=1500\mu$ の限界値を無視した場合、図-5、図-8、図-11 で見られる W 曲線が急激に増加し始める点を、接合部の最大荷重に対応する点として判定できることも示唆される。

5.2 接合部分の細分化による評価

5.1 では、接合部における J 曲線の 1000μ 到達は、柱やはりの基部への曲げひび割れ発生に対応していた。また、L 形モデルの隅角部で損傷するケースでは、他のケースに比べて早期に損傷を判定した。斜めひび割れや隅角部での損傷に対して $\sqrt{f_2}$ 、 $\overline{W}_n$ の適用性を検証するために、 $\sqrt{f_2}$ 、 $\overline{W}_n$ を接合部の部位ごとに抽出して検討を行った。図-14 に、部位の分割方法を示す。接合部の中央部に斜めひび割れが発生し、隅角部や曲げ内半径部、柱やはりの基部近傍で損傷することから、今回の解析結果を踏まえ、それらの区別ができる分割方法とした。隅角部で損傷する場合に早期に損傷を判定する理由として、隅角部での損傷は圧縮ストラットと柱とはりの曲げ圧縮応力を受ける多軸圧縮応力場であることが挙げられる。これに対して損傷指標の限界値や平均化長さを変える等の対応も考えられるが、ここでは示方書に記載された値を用いることとし、接合部の部位に着目して検討する。L_1.0_P3 と L_1.0_P10 を対象として、部位ごとの $\sqrt{f_2}$ 、 $\overline{W}_n$ によって斜めひび割れ発生や損傷箇所を評価する。

図-15 に、荷重変位曲線と、J 曲線、W 曲線を示す。ここでは、接合部に発生する斜めひび割れを判定するこ

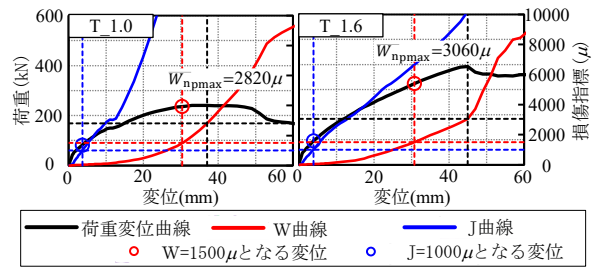


図-11 T 形正側荷重時の荷重・損傷指標－変位曲線

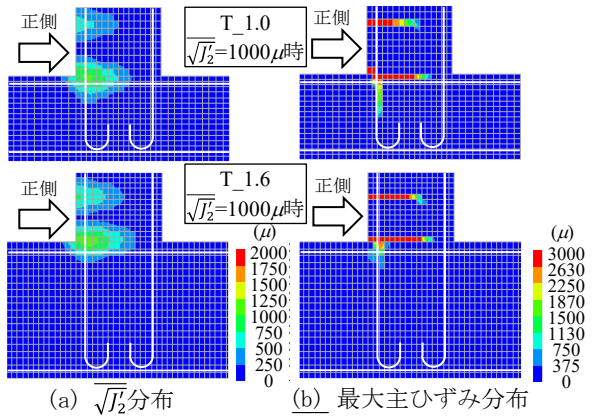


図-12 T 形正側荷重時の $\sqrt{f_2}$ 分布と最大主ひずみ分布

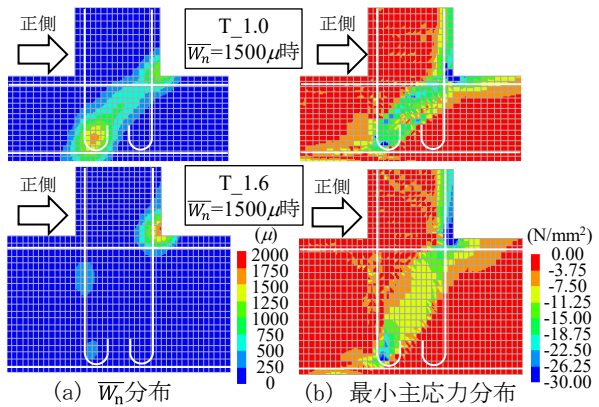


図-13 T 形正側荷重時の $\overline{W}_n$ 分布と最小主応力分布

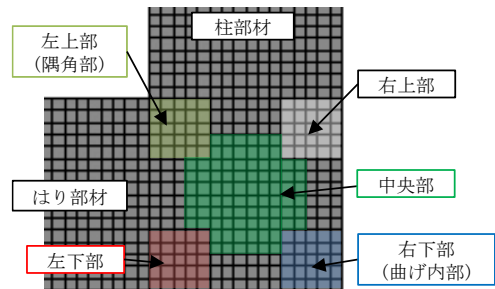


図-14 接合部の分割方法

とから、J 曲線は接合部分中央部の曲線を、W 曲線は 5.1 と同様に接合部の曲線を示し、接合部内の各部位の W 曲線が 1500μ に達する変位をプロットしている。

図-16 に L_1.0_P3 のケースにおいて、接合部の中央部の J 曲線が 1000μ に達したときの最大主ひずみ分布を示す。いずれの荷重方向時にも、斜めひび割れが発生した直後であり、斜めひび割れが発生する箇所に着目するこ

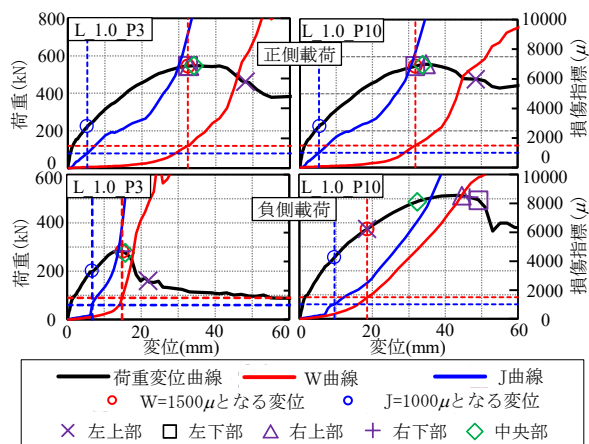


図-15 接合部を分割した場合の荷重・損傷指標-変位曲線

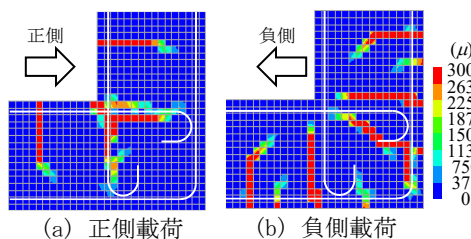


図-16 中央部 $\overline{W}_n=1500\mu$ 到達時の最大主ひずみ分布

と $\sqrt{J_2}=1000\mu$ を限界値として評価できるといえる。

各載荷方向時の損傷は以下のとおりである。

(1) 正側載荷時

図-15より、接合部右上もしくは接合部左下のW曲線が 1500μ に達した時と最大荷重時が同等であることから、圧縮ストラットの両端で損傷したと評価できる。これは図-7からも明らかである。

(2) 負側載荷時

図-15より、L_1.0_P3のケースでは、接合部右下のW曲線が 1500μ に達した時と最大荷重時が概ね同等であることから、圧縮ストラットの右下端(曲げ内半径部)で損傷したと考えられる。L_1.0_P10のケースでは、接合部左上、右下の順にW曲線が 1500μ に達することから、圧縮ストラットの左上端(隅角部)での損傷が右下端(曲げ内半径部)付近まで進展した時に最大荷重をとる結果となった。

今後、実構造物の条件を想定した検証が求められるが、ハンチや直交するはりをも有する接合部に対しても同様の耐荷機構の形成が想定されるため、本稿の知見は汎用の接合部に準用できると考えられる。

6. おわりに

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 接合部を分割し、対象とするひび割れが発生している範囲に限定し、 $\sqrt{J_2}$ によって評価することで、離散鉄筋を用いたモデルであっても、接合部に発生す

る斜めひび割れを $\sqrt{J_2}=1000\mu$ によって評価可能であることがわかった。

- (2) L形モデル、T形モデルを分割し、損傷指標 $\overline{W}_n$ によって評価することで、離散鉄筋を用いたモデルであっても、接合部の損傷を概ね $\overline{W}_n=1500\mu$ によって評価可能であることがわかった。
- (3) 多軸圧縮応力場となる隅角部で損傷するケースは、他のケースと比べて早期に損傷を判定した。部位ごとに検討することで、曲げ内半径部で $\overline{W}_n=1500\mu$ となる時に最大荷重をとる結果となった。

なお、本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

参考文献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物、丸善、2004
- 2) (財)鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物 配筋の手引き、2005
- 3) 土木学会:2017年制定 コンクリート標準示方書(設計編)、2017.3
- 4) 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, Vol.67, No.2, pp.166-180, 2011
- 5) 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.209-22, 2012
- 6) 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
- 7) 牧剛史, 土屋智史, 斉藤成彦, 渡邊忠朋: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的評価, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.78, No.1, pp.121-137, 2022
- 8) 草野浩之, 中田裕喜, 田所敏弥, 安保知紀:接合部内の配筋諸元がL形RC柱梁接合部の破壊性状に及ぼす影響, 第15回日本地震工学シンポジウム, pp.51-60, 2018
- 9) 西村脩平, 中田裕喜, 渡辺健, 田所敏弥, 安保知紀:柱と梁の断面高さが等しいT形柱梁接合部の損傷過程および解析による評価の検討, 土木学会全国大会第75回年次学術講演会, V-602, 2020
- 10) 松本隆明, 檜貝勇, 斎藤成彦:かぶり厚が異形鉄筋の付着性状に及ぼす影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.823-828, 2004