

論文 RC 造内部柱梁接合部のせん断機構に関する 3 次元有限要素解析

村上 公洋^{*1}・後藤 康明^{*2}・城 攻^{*3}

要旨：RC 構造物が地震動を受ける際の内部柱梁接合部の挙動把握には 2 次元非線形有限要素解析を用いることが多いが、柱幅と梁幅が一般的には一致しないため内部柱梁接合部コンクリートの幅方向に変化する内部応力状態を把握するには 2 次元では限界があり、3 次元的な考慮が必要である。本研究では、梁主筋の付着性状および接合部コンクリート強度を変化させて接合部せん断破壊先行型の柱梁接合部を解析的にシミュレーションし、接合部コンクリート圧縮ストラット形成とその破壊過程を 3 次元非線形有限要素解析により検討した。

キーワード：接合部せん断破壊、梁主筋付着性状、コンクリート強度、3 次元有限要素解析

1. はじめに

RC 造骨組建築物における柱梁接合部は、一般に 2 方向の梁が存在するために、弾塑性性状を論ずる際には、形状的にも荷重条件においても 2 つの方向に分離した平面架構として扱うのは無理が多い。地震動を受ける際に内部柱梁接合部の抵抗メカニズムは、現段階で十分に構築されておらず、仮に直交梁のない接合部であっても、一般に梁幅と柱幅が異なるため、接合部の内部応力状態を把握するには 3 次元的な考慮が必要である。そこで本研究では接合部破壊先行型の平面十字形柱梁接合部について梁主筋の付着性状及び接合部コンクリート強度を影響要因として、その破壊性状について 3 次元非線形有限要素解析により検討したものである。

2. 解析概要

2.1 解析対象試験

解析対象は筆者等が、過去に行った想定階高 3500mm、スパン 6000mm の均等ラーメン構造骨組の中間階内部柱梁接合部を 1/2 に縮小した模型試験体についてである¹⁾。試験体寸法は梁加力点間 3000mm、柱支点間距離 1750mm である(図

-1)。また柱・梁部材の断面はそれぞれ 300mm × 300mm, 200 × 350mm であり、接合部せん断補強筋は、加力方向には配せず直交方向のみである。試験体諸元を表-1 にコンクリート及び鉄筋の材料特性をそれぞれ表-2, 表-3 に示す。また表-2 に示すように接合部のせん断破壊を先行させるために、接合部のコンクリート強度を柱、梁に比べて下げた。加力は柱の上下端をピン支持として、軸力 $0.3\sigma_B$ の定軸力を与えた後、柱頭に水平方向変位制御による正負繰り返し静的漸増加力を行った。実験時の破壊モードは梁主筋が降伏せずに、接合部せん断破壊により耐力に至った。

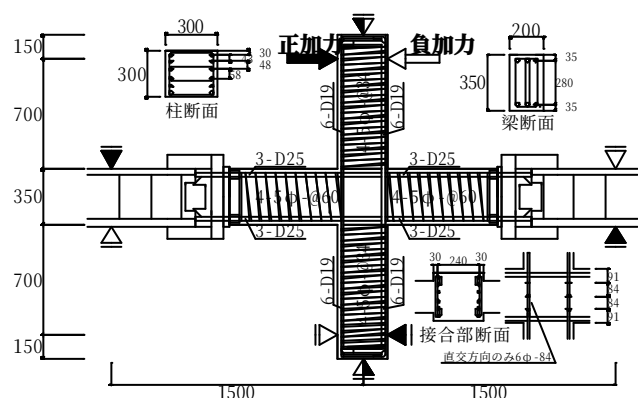


図-1 解析対象試験体図

*1 鹿島建設(株)

工修 (正会員)

*2 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

*3 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

表-1 試験体諸元

部位	種類	鉄筋径
梁・柱	主筋	3-D25(上下共)
		6-D19(左右共)
梁・柱	せん断補強筋	梁スパイラル 4-5φ-@60
		柱スパイラル 4-5φ-@34
接合部	せん断補強筋	直交方向のみ6φ-@84

表-2 コンクリート材料特性

試験体部位	接合部	柱梁部
ヤング係数 $E_{1/3}$ (GPa)	21.9	29.5
圧縮強度 σ_B (MPa)	31.6	42.0
引張強度 σ_α (MPa)	2.61	3.16
最大応力時歪 ε_{max} (μ)	2580	2360

表-3 鉄筋材料特性

鉄筋使用位置	梁主筋	柱主筋	接合部補強筋
鉄筋径	D25	D19	6φ
ヤング係数 E_s (GPa)	192	188	197
降伏強度 σ_y (MPa)	417	574	381
引張強度 (MPa)	744	657	513

2.2 解析方法

解析にはオランダのTNOで開発された3次元非線形有限要素解析プログラム DIANA ver7.2を用いた。また、平面十字形柱梁接合部試験体の対称性によるモデルの省略は行わずに、試験体全体を解析対象とした。要素分割図を図-2に示す。解析での加力は、柱頭柱脚に一定軸力载荷後、梁両端に単調増加する逆対称の鉛直変位を加えた。解析モデルは試験体と同じ材料定数を有するものを基本として、梁主筋の付着にボンドリンク要素を用いて表現したもの(J-BL)、J-BLの付着強度を増加させた(J-BM)、梁主筋の付着強度を無限大として弾性状態にした(J-BH)の3体(以下J-Bシリーズ)とJ-BLの付着性状をもちながら、接合部のコンクリート強度を変化させた(J-JL)1体を合わせた計4体とした。なお付着性状は2.2節の(3)付着で、接合部のコンクリート強度については3.4節で後述する。

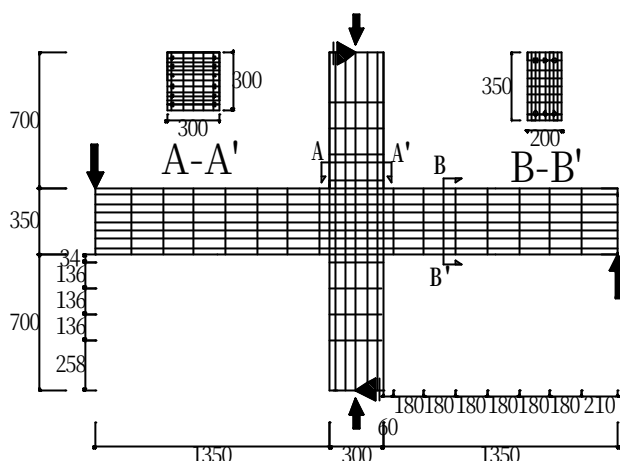


図-2 要素分割図

2.3 解析の材料モデル

(1) コンクリート

8節点直方体要素を用い、要素内8個の積分点で主応力、剛性等を評価する。応力-歪関係は図-3に示すように圧縮上昇域について、コンクリート強度が37.2MPa以下の接合部分はSaenz式に、37.2MPa以上の柱梁部ではShah式に従うものとした。破壊基準には式(1)式に示すDrucker-Pragerの降伏曲面を適用した。

$$f(I_1, J_2) = a \cdot I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad \cdots (1)$$

I_1 : 応力の1次不変量 $\alpha=0.23$ (2)

J_2 : 偏差応力の2次不変量

$$a = \frac{2 \sin f}{\sqrt{3}(3 - \sin f)} \quad k = \frac{6 \cos f \cdot c}{\sqrt{3}(3 - \sin f)}$$

c : 粘着応力度 ϕ : 内部摩擦角 30°

またひび割れには分布ひび割れモデルを用い、主歪の方向が第1ひび割れ方向と60度以上ずれたときに第2ひび割れを発生させる過程を繰り返す多方向固定ひび割れモデルを用いた。ひび割れ発生後におけるせん断応力の伝達係数を図-4に示し、解析モデルに必要な材料定数はコンクリートのシリンダー圧縮試験結果により決定した。

(2) 鉄筋

鉄筋は2節点を有する1次元線材要素とした。それぞれの応力-歪関係は(図-5)に示すようにbi-linear型とした。

(3) 付着

梁主筋にはボンドリンク要素を用いて付着特性を与え、ほかの鉄筋は完全付着とした。

図-6 に鉄筋軸方向のボンドリンク要素の τ - S 関係を示す。剛性並び付着強度は大和田らの研究³⁾を元にした。付着強度 $\tau_{\max}$ および付着剛性について表-4 に示す。

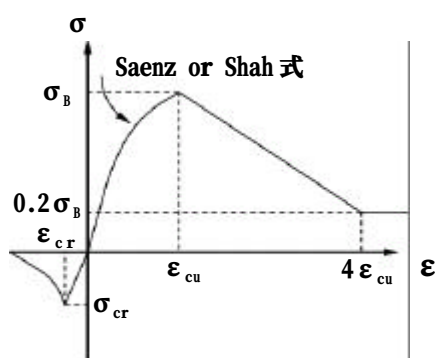


図-3 コンクリートの応力-歪関係

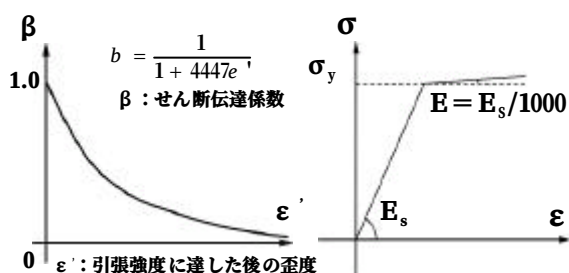


図-4 ひび割れ面
せん断伝達係数

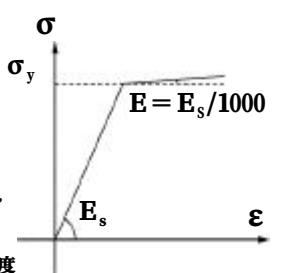


図-5 鉄筋の
応力-歪関係

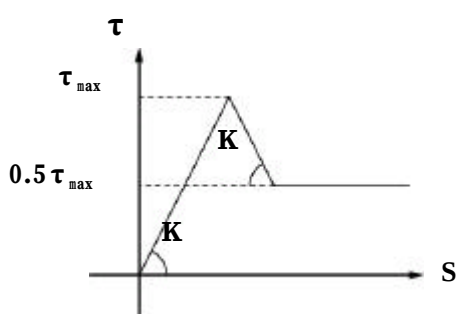


図-6 付着応力度-すべり関係

表-4 付着特性

解析試験体名	付着強度 $\tau_{\max}$ (MPa)	剛性 K (MPa/mm)
JBL	392	49
J-JL		
J-BM	562	
J-BH	(付着剛性弾性)	

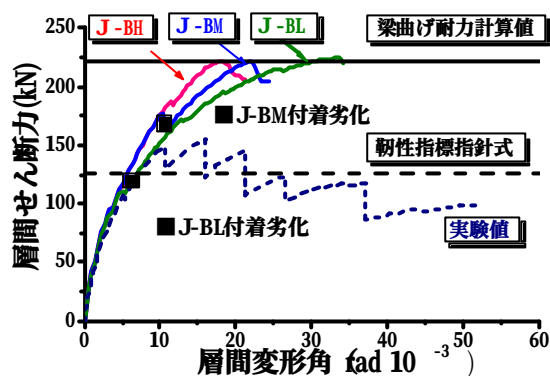
3. 解析結果

3.1 コンクリート要素の破壊について

3 軸応力状態となっているコンクリート要素の主応力がコンクリートの引張強度 σ_{cr} や圧縮強度 σ_B に達してもそのコンクリート要素が破壊したことにはならない。また、コンクリートの 3 軸応力状態と破壊の関係が明らかにされておらず、3 次元有限要素解析ではコンクリート要素の破壊をどのように定義するかが重要となってくる。そこで変位 step ごとに要素内の 8 つの積分点それぞれで得られる 3 つの主応力を S_1 , S_2 , S_3 ($S_1 > S_2 > S_3$) として、要素内で得られた 3 つの主応力値を Drucker-Prager の破壊基準式(1)に代入し、 f 値がゼロになる時に、そのコンクリート要素が破壊したものと定義する。

3.2 J-B の解析結果

図-7 に J-BL, JBM, J-BH の層せん断力-層間変形角関係を示す。既往の提案式による梁曲げ耐力計算値、靱性保証型耐震設計指針²⁾(以下、靱性指針)による接合部せん断耐力計算値もあわせて示す。J-B 全試験体ともに初期剛性は若干実験値よりも大きい傾向を示している。これは実験の初期段階で発生する梁危険断面付近の局部的な曲げひび割れを、解析では離散ひび割れ等を用いたモデル化を行っていないためと考えられる。J-BL では、接合部内部の梁主筋が付着強度 $\tau_{\max}$ に達して劣化が生じると剛性が低下し実験値の剛性に比較的近づく。しかし最大耐力は、どの解析値も大きく実験値をうわまわっている。破壊モードに関しては梁曲げ耐力計算値と解析値における最大耐力解析値とが等しいこと、また J-BL 試験体では図-8 に示す様に梁端付け根部のコンクリート要素が最大耐力以前に破壊していることから J-B 試験体の破壊モードは梁端付け根部部の曲げ破壊で最大耐力が決まっていると判断した。



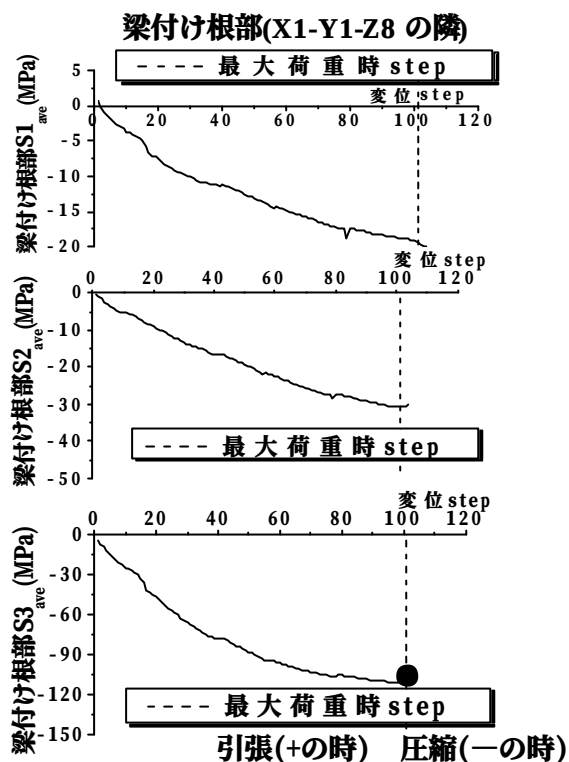


図-11 梁付け根部のコンクリート要素主応力度推移

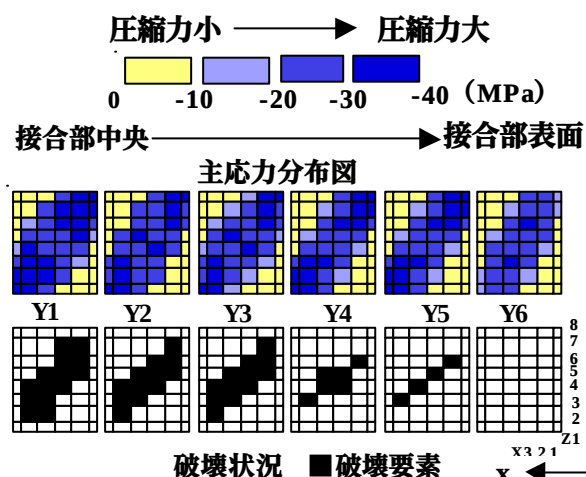


図-12 J-BL 主応力 $S_{3_{ave}}$ 分布及び破壊状況

3.4 圧縮強度低減係数

せん断を受ける RC 構造部材は、引張主応力方向と直交方向にひび割れが発生した後は、ひび割れ方向に生じる圧縮力をひび割れ間のコンクリート束（圧縮ストラット）で伝達することが知られている。また野口等³⁾の実験からひび割れたコンクリートの圧縮応力—ひずみ関係は、シリンダー圧縮試験の圧縮応力—ひずみ関係に

比べると、耐力剛性ともに低下することが指摘されている。しかし本解析プログラム DIANA では、引張主歪増大に伴うコンクリート圧縮強度の低減を考慮する機能は標準で組み込まれていない。実際に J-BL 解析結果では、接合部断面 Y1(接合部中央部)での引張主歪により生じる引張主歪 ε_{ave} 分布は斜め圧縮ストラット部分（図-13）で大きく、その歪方向は斜めストラットに直交している。しかし前述した要素 X3-Y1-Z5 の主応力 $S_{3_{ave}}$ （図-10 の●印）は接合部のコンクリートシリンダー強度 (31.6MPa) とほぼ等しい。そこで接合部中央要素 X3-Y1-Z5 の最大荷重時引張主歪 ε_{ave} をコンクリート強度低減係数の提案式 (2)⁵⁾ に代入して、低減係数(0.65)によるひび割れたコンクリート圧縮強度(20.6MPa)を求めた。J-B シリーズ解析の最大耐力時には接合部のコンクリートが損傷を受けて、実際の強度は低くなっていると思われる。そのため J-B シリーズの破壊モードは、実験とは違って梁付け根コンクリートの破壊によって最大耐力が決定した。そこで J-BL の材料特性を元にして、接合部コンクリート要素のみに上記の低減を考慮したコンクリート圧縮強度 (20.6MPa) と弾性係数 $E_{1/3}$ (15.2GPa) を適用した J-JL モデルを解析した。

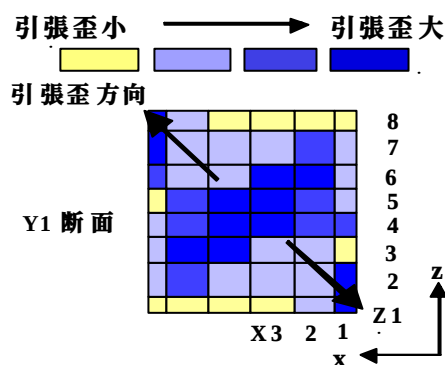


図-13 J-BL 接合部中央部の引張歪 ε_{ave} 分布図

$$l = \frac{1}{0.27 + 0.96 \cdot \left(\frac{\varepsilon_{1u}}{\varepsilon_0} \right)^{0.167}} \quad (l \leq 1) \cdots (2)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{1u}: \text{圧縮破壊時平均引張歪み} \\ \varepsilon_0: \text{シリンダー圧縮強度時軸歪み} \end{cases}$$

3.5 J-JL の解析結果

図-14 に J-BL, J-JL の層せん断力-層間変形角関係を示す。また J-JL の最大荷重時における Y1~6 の断面における主応力 S_{3ave} 分布図, 接合部内コンクリートの破壊状況を図-15 に示す。J-BL, J-JL の初期剛性は, 共に等しい値を示したが, 付着劣化下後 (図-14 の■) の剛性は J-JL が小さくなる。最大耐力は, 実験値よりも解析値のほうが高いものの, J-BL と比べて J-JL は実験値に示される荷重変形関係の推移に比較的よく対応している。次に内部応力状態について述べる。J-JL では梁端付け根部に全く破壊部分は見受けられなかった。接合部では, 圧縮ストラットが Y1~Y6 にわたり形成している。破壊した部分の圧縮応力はコンクリートの 1 軸圧縮低減強度 20.6MPa を前後する値を示した。接合部コンクリートの破壊は, J-BL よりも J-JL ほうが広く, その過程は接合部コンクリート内部要素(Y1)から始まり, 表面部(Y6)に破壊が至った時点で最大耐力にいたった。そのことから J-JL

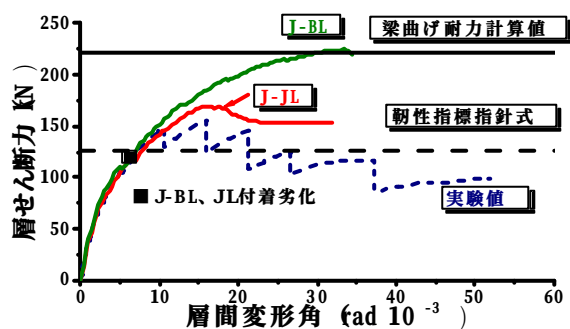


図-14 J-JL 層間せん断力-層間変形角

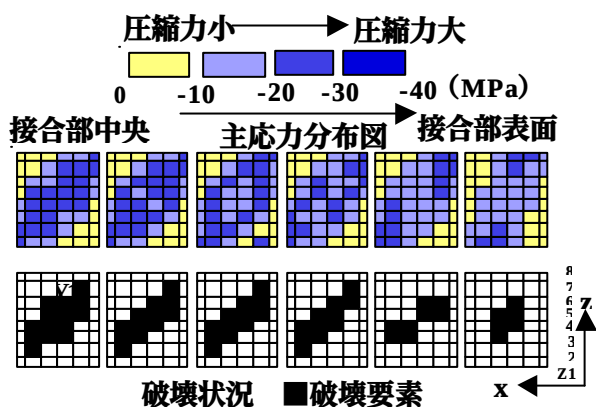


図-15 J-JL 主応力 S_{3ave} 分布及び破壊状況

は, 接合部せん断破壊先行型の破壊モードであると判断した。

4.まとめ

RC 造平面十字形接合部を対象として 3 次元非線形有限要素法解析を行い以下の知見を得た。

- 1) 3 次元非線形有限要素解析におけるコンクリート要素の破壊の定義に関する一手法として, Drucker-Prager の破壊基準式を適用し, 接合部コンクリートに生じる引張主歪による圧縮低減係数を評価することで, 接合部せん断破壊先行型の破壊モードを再現した。
- 2) 接合部の内部応力状態は, 斜め圧縮ストラットが形成され, その部分でコンクリートが破壊基準に達することを 3 次元的に示した。
- 3) 接合部がせん断破壊する場合, 接合部コンクリート要素の斜め圧縮ストラット方向の主応力平均値は, 破壊した要素において, 引張主歪で低減した 1 軸圧縮強度に近似する。

【参考文献】

- 1) 後藤 康明, 城 攻ほか: RC 十字形柱梁接合部せん断抵抗性状に対するせん断補強筋の効果について, 日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp.443-448, 1989.10
- 2) 砂井 貴秀ほか: RC 造内部柱梁接合部における耐震挙動の非線形 3 次元有限要素解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.643-648, 1999
- 3) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 4) 大和田 義正, 菅谷 一裕:「地震時応力を受ける RC 梁柱接合部の弾塑性挙動に関する研究」日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp.669-670, 1996.9
- 5) 野口 博, 濱田 聡:「ひび割れコンクリートの圧縮特性の劣化に関する基礎実験」日本建築学会学術講演梗概集, C-2, pp.397-398, 1988.10