

論文

[2122] 鉄筋コンクリート柱梁接合部の復元力特性に関する解析的研究

李 祥浩*1・小谷 俊介*2

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)造柱梁接合部の復元力特性を精度良く推定することは、耐震性能評価上重要な問題の一つである。しかしながら、柱梁接合部の復元力特性は、柱、梁及び接合部個々の部材の復元力特性によって影響されるため、精度良く推定するのは困難であり、現在までに実験的研究はかなり行われているが、解析的研究(特に柱梁接合部の変形性能について)は数少ない。一方、著者ら[1]は柱梁接合部のせん断抵抗機構をトラス機構とストラット機構の共存と仮定して、柱および梁部材断面の曲げ解析の応力に基づき、せん断抵抗機構の負担力を算定する方法について検討した。本研究では、RC造内柱梁接合部の耐震性能に関する基礎的な資料を得ることを目的とし、柱梁接合部の復元力特性や接合部パネルでのひずみ状態の推定法について検討を行い、その結果を実験結果と比較検討した。

2. 解析手法

2.1 対象柱梁接合部 ①スラブ及び直交梁なしの平面十字形、②柱及び梁の破壊より接合部の圧縮破壊が先行(J型、BJ型)、③梁主筋の上下対称配筋及び柱主筋の左右対称配筋、④柱主筋は降伏しない、⑤柱中段筋より接合部横補強筋の降伏が先行、⑥接合部横補強筋と柱中段筋は接合部コア内で一様に分布、である柱梁接合部を対象として検討を行う。

2.2 層間変位の計算 柱梁接合部試験体と各部材の変形成分を図1のようにモデル化し、層間変位(δ_t)は、柱、梁および接合部の変形の和として、式(1)から求める。

$$\delta_t = \delta_c + \delta_b + \delta_j \tag{1}$$

$$\delta_c = \delta_{c1} + \delta_{c2} \tag{1-1}$$

$$\delta_b = (H/L) \cdot (\delta_{b1} + \delta_{b2}) \tag{1-2}$$

$$\delta_j = (1 - D_b/H - D_c/L) \cdot H \cdot \gamma \tag{1-3}$$

ここで、 δ_c は柱変形による層間変位、 δ_b は梁変形による層間変位、 δ_j は接合部せん断変形による層間変位、 H は柱高さ、 L は梁スパン、 D_b は梁せい、 D_c は柱せい、 γ は接合部のせん断変形、である。本研究では柱の上下および梁の左右が対称であると考えているために上下の柱変形(δ_{c1} 、 δ_{c2})と左右の梁変形(δ_{b1} 、 δ_{b2})は等しい。接合部は梁せいと柱せいで囲まれた部分とする。

2.2.1 柱及び梁の変形 寺岡ら[2]は、梁部材でのひび割れの影響によって梁主筋の歪分布が解析から求めた梁主筋の歪分布の計算値より大きく、それによって梁部材に付加変形が生じると指摘し、梁主筋降伏時の歪分布モデルを提案している。本研究でも寺岡らの提案を参考にす。すなわち、部材の変形(δ)を曲げ変形(δ_r)、せん断変形(δ_s)、接合部からの抜け出し変形(δ_v)および主筋の歪分布特性を考慮した変形 δ_b の和として、式(2)で計算する。

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻、工修(正会員)

*2 東京大学教授 工学部建築学科、Ph.D.、工博(正会員)

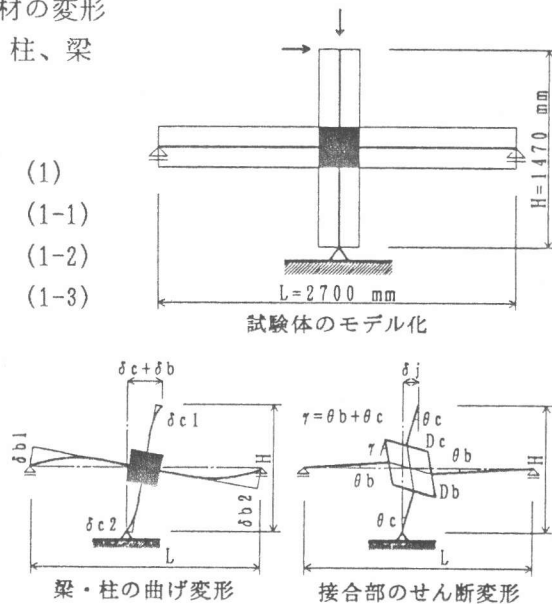


図1 柱梁接合部のモデル化

$$\delta = \delta_t + \delta_s + \delta_p + \delta_b \quad (2)$$

$$\delta_t = \int \phi(x) x dx \quad (2-1)$$

$$\delta_s = (\kappa Q / GA) \cdot l \quad (2-2)$$

$$G = E_c / 2(1 + \nu) \quad (2-3)$$

$$\nu = 0.169 + 4 \times 10^{-5} \cdot \sigma_B \quad (2-4)$$

$$\delta_p = (\Delta s / d_n) \cdot l \quad (2-5)$$

$$\Delta s = \int (\varepsilon_{px} - \varepsilon_{cx}) dx + \int \varepsilon_{px} dx \quad (2-6)$$

$$\delta_b = \sum (\varepsilon / d_n) \Delta x \cdot (x_b' + x) \quad (2-7)$$

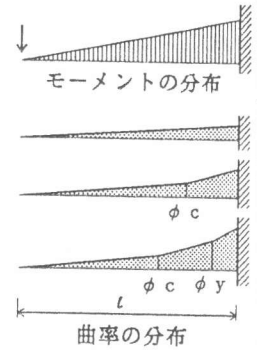


図2 曲率の分布

曲げ変形 部材軸方向のモーメントと曲率分布を図2に示す。曲率分布

を曲げひび割れ発生前 ($\phi < \phi_c$)、ひび割れ発生後から降伏以前 ($\phi_c \leq \phi < \phi_y$)、降伏以降 ($\phi_y \leq \phi$) の三つの場合について線形に仮定し、梁理論による曲げ変形を式(2-1)で計算する。

せん断変形 曲げ変形が卓越する部材を想定し、部材でのひび割れ発生後でもせん断剛性を弾性と仮定し、せん断変形を式(2-2)で計算する。ここで、 κ は形状係数(=1.2)、 Q はせん断力、 G はせん断弾性係数(式(2-3))、 A は断面積、 l は部材のスパン、 E_c はコンクリートの弾性係数、 ν はコンクリートのポアソン比で式(2-4)[3]を用いる、 σ_B はコンクリート圧縮強度、である。

抜け出し変形 梁主筋のひずみ度分布を図3と仮定し、その時の梁主筋の抜け出し量 Δs を式(2-6)で、抜け出し変形を式(2-5)で計算する。ここで、 d_n は梁引張主筋から中立軸までの距離、 ε_{cx} と ε_{px} は梁主筋の歪分布で、断面解析から求める。 ε_{cx} 、 ε_{px} は梁付け根での引張側及び圧縮側の主筋歪から求め、接合部内での梁主筋の作用付着力が付着強度を超える場合には、付着強度になるように ε_{px} を修正する。

歪分布変形 梁主筋の歪分布特性による付加変形を式(2-7)で計算する(図3の右部分)。ここで、 ε はシフトされる歪、 Δx は x の微小区間、 x_b' はひび割れ未発生区間である。歪分布がシフトされる柱面からの距離(x_b)を、曲げひび割れ発生以前ではゼロ、ひび割れ発生後から主筋が降伏するまではモーメントの増加とともに x_b がゼロから梁せい(D_b)まで増大し、主筋降伏以降は進展しない($x_b = D_b$)と仮定する。

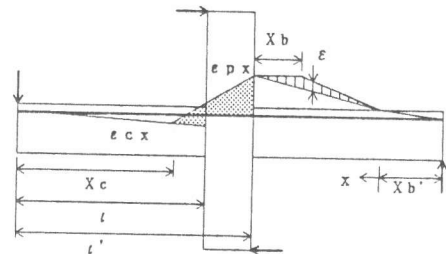


図3 梁主筋のひずみ度分布

2.2.2 接合部の変形 佐々木ら[4]、北山[5]は接合部入力せん断力(応力度)–せん断変形角関係を実験結果から統計的に検討し、その関係をモデル化した。これらの提案モデル(モデル1、2)を過去の実験結果(試験体I1)[6]と比較して図4に示す。この図から提案モデルは、試験体I1の実験結果を正確に評価していないと判断し、本研究では実験結果を充実に追跡できるように四つの直線として表現した(図4の太い実線)。

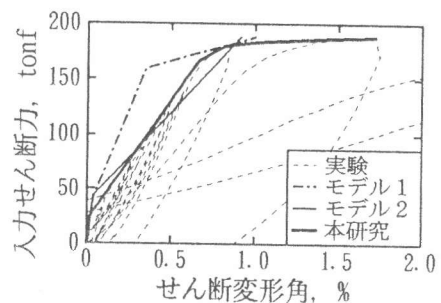


図4 実験とモデルとの比較

2.3 トラス機構の計算

接合部コア内での平均ひずみを図5と考え、その時の平均ひずみをモールのひずみ円(図6)で表す。せん断ひび割れ発生前には、 x 方向及び y 方向の垂直応力をゼロ、柱軸応力度(σ)と

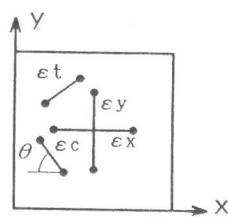


図5 平均ひずみ

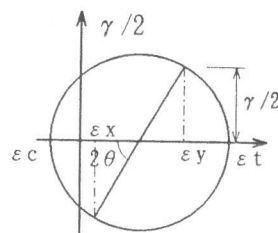


図6 モールのひずみ円

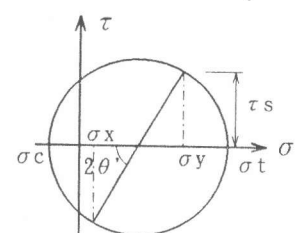


図7 モールの応力円

して弾性理論から歪と応力を求める。この時、接合部横補強筋の歪とトラス機構の負担力(V_{sh} 、 V_{sv})はゼロとする。ひび割れ発生時には引張主応力 σ_t がコンクリートの引張強度 σ_{ct} (ここでは割裂強度値を用いる)に達した時とし、その時の角度(θ)を式(3-1)で求める。ひび割れ発生以後には σ_t をゼロとする。柱主筋間距離(j_c)内での梁主筋の付着力(V_{sh})と梁1段筋間距離(j_b)内での柱主筋の付着力(V_{sv})、接合部横補強筋力(W_h)と柱中段筋(W_v)からなるトラス機構(藤井ら[7])の同様トラス機構に対応、図7)の応力と歪を式(3-2)~式(3-8)で求める。ここでは、主ひずみの角度(θ)と主応力の角度(θ')は同一($\theta = \theta'$)と仮定する。接合部横補強筋が降伏しない時には ε_y を式(3-6)から、降伏後には式(3-7)から求める。以上、 γ 、 θ とトラス機構での W_h 、 W_v (ε_x 、 ε_y)の関係から、 ε_c と ε_t を式(3-8)で求めることができる。なお、式(3-9)は接合部横補強筋降伏後の γ と ε_c の関係であり、接合部コアコンクリートの圧壊時ひずみ(拘束効果考慮)を適切に評価すると圧壊時の γ を求めることができる。ここで、 B_c は柱幅、 E_{sh} と A_h と σ_{ny} は接合部横補強筋の弾性係数と断面積と降伏強度、 E_{sv} と A_v は柱中段筋の弾性係数と断面積、 σ_c はトラス機構の圧縮応力度、 θ はトラス機構の角度である。

$$\theta = \tan^{-1}(\sqrt{(1+\sigma_o/\sigma_{ct})}) \quad (3-1)$$

$$V_{sv} = V_{sh} \cdot (j_b/j_c) = W_h \cdot \tan \theta \quad (3-2)$$

$$W_v = V_{sh} \cdot \tan \theta = \varepsilon_y \cdot E_{sv} \cdot A_v \quad (3-3)$$

$$W_h = V_{sh} \cdot j_b / (j_c \cdot \tan \theta) = \varepsilon_x \cdot E_{sh} \cdot A_h \quad (3-4)$$

$$\sigma_x = W_h / (B_c \cdot j_b) \quad \sigma_y = W_v / (B_c \cdot j_c) \quad \tau_s = V_{sh} / (B_c \cdot j_c) \quad (3-5)$$

$$\sigma_c = (W_h \cdot j_c + W_v \cdot j_b) / (B_c \cdot j_b \cdot j_c) \quad (3-6)$$

$$\varepsilon_y = (\varepsilon_x \cdot E_{sh} \cdot A_h \cdot j_c) / (E_{sv} \cdot A_v \cdot j_b) \cdot \tan^2 \theta \quad (3-6)$$

$$\varepsilon_y = (\sigma_{ny} \cdot A_h \cdot j_c) / (E_{sv} \cdot A_v \cdot j_b) \cdot \tan^2 \theta \quad (3-7)$$

$$\gamma = (\varepsilon_y - \varepsilon_x) \cdot \tan 2\theta = 2 \cdot (\varepsilon_y - \varepsilon_c) \cdot \tan \theta = 2 \cdot (\varepsilon_t - \varepsilon_y) / \tan \theta \quad (3-8)$$

$$\gamma = 2 \cdot \{(\sigma_{ny} \cdot A_h \cdot j_c \cdot \tan^2 \theta) / (E_{sv} \cdot A_v \cdot j_b) - \varepsilon_c\} \cdot \tan \theta \quad (3-9)$$

2.4 解析方法 梁の曲率を増分し、手順②から⑥の計算を繰り返す。なお、手順③と⑤の計算方法については文献[1]に譲る。

- ①柱部材及び梁部材断面の曲げ解析を行う。
- ②梁危険断面での曲率に応じたモーメントから梁せん断力、柱せん断力、柱危険断面でのモーメントと曲率を計算する。
- ③柱及び梁危険断面での曲げモーメントから接合部まわりの応力を算定する。
- ④トラス機構の負担力を計算する。
- ⑤ストラット機構の負担力を計算する。
- ⑥各部材と全体の変形を計算する。

3. 解析対象および解析結果

3.1 解析対象 東京大学で行われた平面柱梁接合部3体で、試験体の諸元を表1に示す。試験体の高さは147cm、スパンは270cm、梁断面は20x30cm、柱断面は30x30cmである。試験体I1[5]は高強度材料、試験体B1とB3[8]は普通強度材料を用いたもので、B1は付着劣化、B3は付着を良好に維持させる試験体である。破壊モードは試験体I1が梁降伏前接合部せん断破壊、B1とB3が梁降伏後の接合部せん断破壊と判断されている。

表1 試験体諸元 単位: kgf/cm²

試験体名	I 1	B 1	B 3
梁主筋 上下共	8-D16 (8140)	8-D13 (3780)	12-D10 (3170)
柱主筋	16-D19 (7610)	16-D16 (3580)	16-D13 (3780)
接合部 横補強筋	3-φ6 3sets (3670)	2-φ6 4sets (2400)	3-φ6 7sets (2400)
軸応力度	36.0	20.0	
圧縮強度	1007	250	
強度時歪	0.27%	0.37%	
割線剛性	3.98	2.19	
割裂強度	42.4	26.3	

注) 括弧の中の数字は降伏強度を示す
割線剛性は圧縮強度の1/4時(x10⁵)

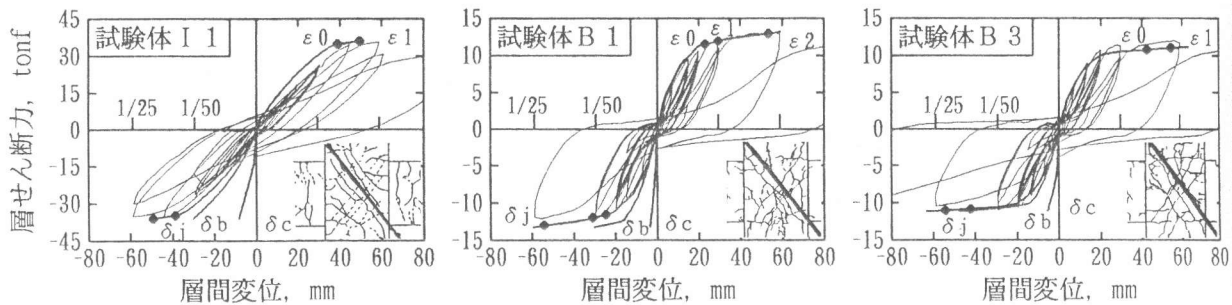


図8 層せん断力-層間変位関係

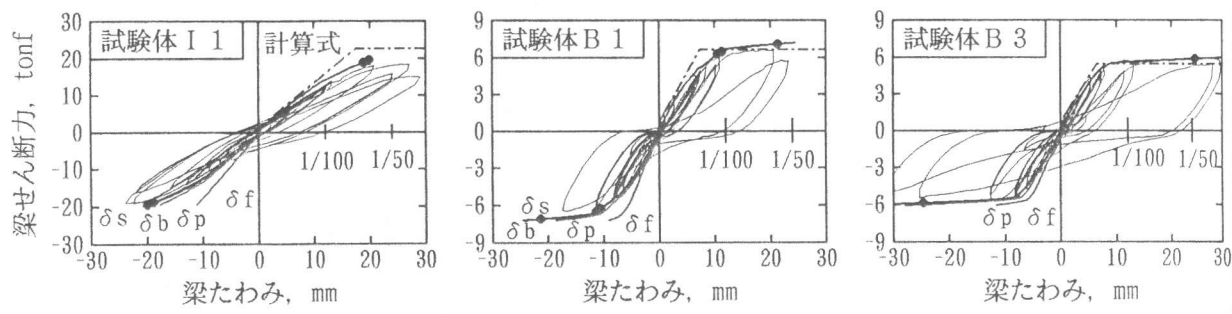


図9 梁せん断力-梁たわみ関係

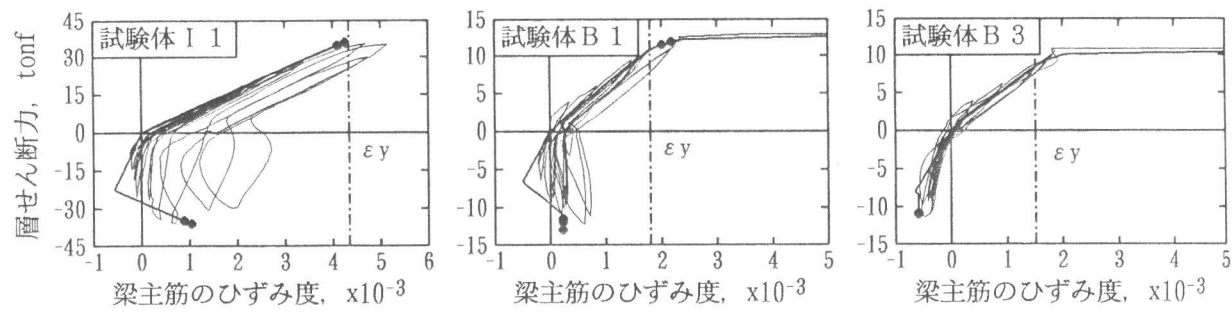


図10 層せん断力-梁主筋のひずみ度関係

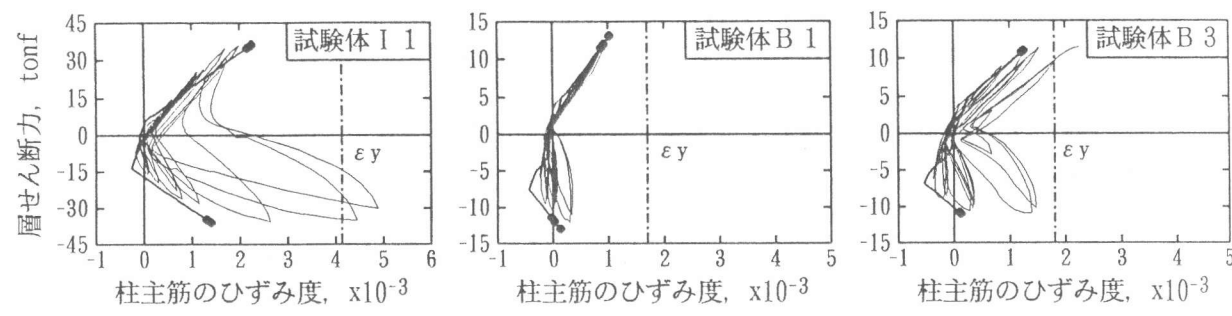


図11 層せん断力-柱主筋のひずみ度関係

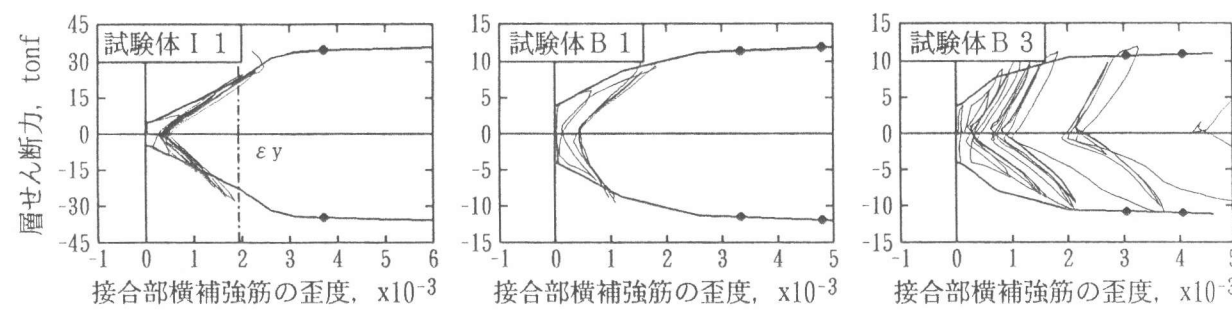


図12 層せん断力-接合部横補強筋のひずみ度関係

3.2 解析結果 前述の方法で解析した結果の層せん断力-層間変位関係を図8に、梁せん断力-梁たわみ関係を図9に示す(細実線:実験、太実線:解析)。図8中の正方向には接合部での圧縮主歪度がコンクリートの最大強度時歪(材料試験結果による)、0.5%、1%を超えた時点をつた々 ε_0 、 ε_1 、 ε_2 で表し(・印、試験体I1の接合部での歪状態:図10)、負方向には層間変位に占める柱変形(δ_c)、梁変形(δ_b)、接合部変形(δ_j)を表している。ひび割れ図(層間変形角1/50時)にある太い線は、式(3-1)から求めたひび割れの角度である。また図9中での正方向の一点鎖線は降伏時の剛性低下率(α_y) [9]を用いて求めた計算値であり、負方向には梁たわみに占める曲げ変形(δ_i)、抜け出し変形(δ_o)、主筋の歪分布特性を考慮した変形(δ_b)、せん断変形(δ_s)である。図8からは各解析結果ともに実験結果を概ね追跡している。また、最大耐力時の接合部での圧縮主ひずみは材料試験による最大強度時歪(ε_0)より大きく、接合部横補強筋によるコンクリートの拘束効果の影響で圧壊時のひずみが大きくなることも推定される。試験体B1とB3での層間変位に占める δ_b の割合は試験体I1より大きい。ひび割れの角度は主応力度による計算値が良い対応を示している。図9からは計算式による変形は、試験体I1(高強度材料)とB1(付着劣化)については過小(δ_b 大)評価しているが、B3(付着良好)については良い対応を示している。梁主筋、柱主筋及び接合部横補強筋の層せん断力-歪度関係を図11、図12、図13にそれぞれ示す。各図の中の・印は、順に圧縮主ひずみ ε_0 、 ε_1 、 ε_2 を表し、梁主筋および柱主筋の負方向での折曲りは接合部内での作用付着力が付着強度(解析では実験の最大値を用いた)に達したことからである。各鉄筋のひずみ度の推移について、各試験体ともにばらつきはあるが、概ね追跡している。

4. 解析結果の検討

4.1 梁の変形成分 試験体I1の梁たわみに占める各変形成分を図14に示す。図中の・印は層間変形角と ε_1 (圧縮主歪が0.5%を超える時)を示す。梁変形の大部分は曲げと抜け出しによる変形で層間変形角1/100以上からは曲げによる変形の割合が小さく、抜け出しによる変形が大きい。

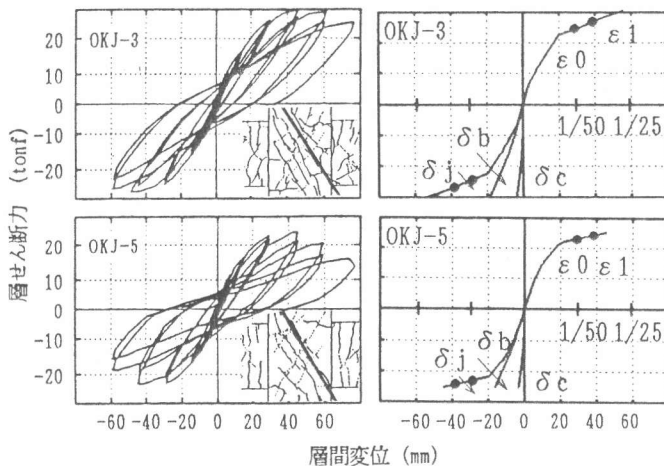


図15 層せん断力-層間変位関係

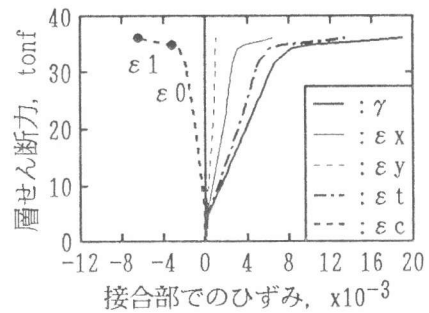


図10 接合部での歪状態

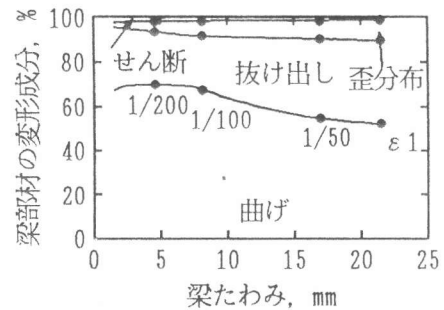


図14 梁部材の変形成分

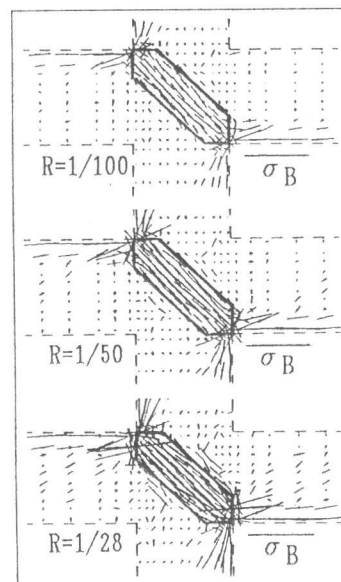


図16 主応力度の推移

4.2 他試験体での適用 本解析方法を用い、柏崎ら[10]が行った実験結果と比較して図15に示す。試験体は2体で、梁降伏前接合部せん断破壊型と報告されている。両試験体ともに解析結果が実験結果を概ね追跡している。また、層間変位に占める接合部のせん断変形(δ_j)が大きくなっている。

4.3 ストラットの幅 試験体I1について、本解析から得られたストラットの幅を有限要素解析[11]による主応力度図と比較して図16に示す。主応力度図では接合部中央部での応力の流れが多少膨らんでいて、本解析での仮定(直線)との相違はあるが、概ね対応している。

5. まとめ

柱梁接合部の復元力特性や接合部パネルでのひずみ状態の推定法について検討を行った結果、

(1)柱梁接合部の復元力特性は、梁、柱および接合部の復元力特性から概ね評価できる。

(2)梁部材の変形は曲げ変形、せん断変形と抜け出し変形に梁主筋のひずみ分布特性を考慮することで概ね評価できる。

(3)本解析方法から接合部内での平均ひずみ状態が概ね把握できる。

(4)今後、接合部入力せん断力-せん断変形角関係のモデル化や接合部内での付着強度の定量的評価方法について検討する必要がある。

【謝辞】本解析を行うに当たり、貴重な実験データを引用させて頂いた千葉大学野口博教授、東京都立大学北山和宏助教授に感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 李祥浩、小谷俊介、青山博之：鉄筋コンクリート内柱梁接合部のせん断終局強度、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 2、pp. 565-570、1993.
- 2) 寺岡勝、平澤光春、佐々木聡、林和也、藤原敏夫：鉄筋コンクリート造内柱・梁接合部における梁部材の降伏変形推定法、フジタ技術研究所報第29号、pp. 79-84、1993.
- 3) 友澤史記、野口貴文、小野山貫造：高強度・超高強度コンクリートの基礎的力学特性に関する調査、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp. 497-498、1990.
- 4) 佐々木聡、寺岡勝、狩野芳一：RC造内柱・梁接合部パネルのせん断力-せん断変形角関係、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15、No. 2、pp. 571-576、1993.
- 5) 北山和宏：鉄筋コンクリート造柱・梁接合部の復元力特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14、No. 2、pp. 431-436、1992.
- 6) 李祥浩、北山和宏、小谷俊介、青山博之：高強度RC造柱・梁接合部のせん断強度、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14、No. 2、pp. 379-384、1992.
- 7) 藤井栄、森田司郎：鉄筋コンクリート外部柱・梁接合部のせん断抵抗機構、日本建築学会構造系論文報告集、第398号、pp. 61-71、1989.
- 8) 北山和宏、小谷俊介、青山博之：鉄筋コンクリート造内柱・梁接合部の横補強筋機能の実験的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、C、構造II、pp. 423-424、1988.
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1988.
- 10) 柏崎隆志、野口博：超高強度鉄筋コンクリート造内柱・梁接合部のせん断性能に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13、No. 2、pp. 475-478、1991.
- 11) 李祥浩、小谷俊介、青山博之：鉄筋コンクリート造内柱梁接合部のせん断性状に関する非線形有限要素解析、構造工学論文集、Vol. 40B、pp. 285-294、1994.