

論文 コーベル式 PC 圧着接合部が梁部材の強度・変形性状に及ぼす影響

大森 匡隆*1・白石 一郎*2・百武 茂*3・高木 仁之*4

要旨：本研究では、先ず、コーベル式 PC 圧着接合部のせん断性状を把握するために、PC 圧着接合部の水平加力実験を実施した。本実験によると、圧着力の増大により接合部強度が上昇し、コンクリート強度を増大させると、変形性能が向上するという結果であった。次に、実験結果に基づきモデル化した接合部特性を用いて、コーベル接合部を有する梁部材の FEM 解析を実施した。本報の解析によれば、PC 規準式による接合部強度が、梁母材の曲げ強度以上であれば、コーベル接合部を有する梁部材は、一体打梁と同等の荷重一部材角関係となるという結果であった。

キーワード：コーベル、プレストレス、圧着接合、接合部強度、FEM 解析

1. はじめに

本報では、図-1 のようなコーベル式 PC 圧着接合部の水平加力実験¹⁾から接合部性状をモデル化した上で、コーベル接合部を有する梁部材の FEM 解析を実施し、梁部材の強度や変形性状について検討を行なった。

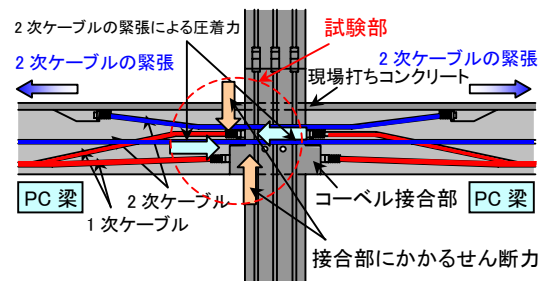


図-1 コーベル式 PC 圧着接合部

2. コーベル式 PC 圧着接合部の実験概要

本実験では、図-2 のような接合筋や目地モルタル等を用いず、コンクリート面のみで接触しているコーベル式 PC 圧着接合部の試験体により水平加力実験を行った。変動因子は、プレストレスを想定した圧着力、コンクリート圧縮強度、あばら筋の有無である。

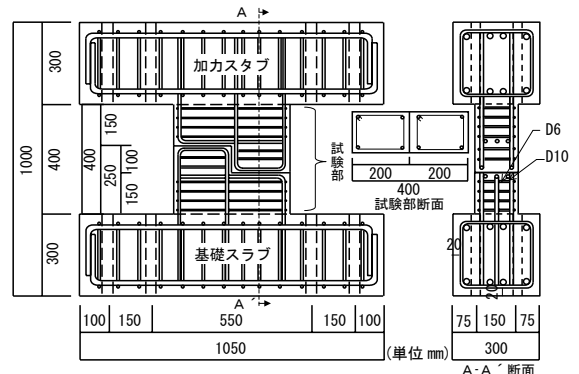


図-2 試験体配筋図 (C1a-N4-NR)

2.1 試験体計画

図-2 に試験体配筋図、図-3 に試験部の形状、表-1 に試験体一覧を示す。試験体数は、摩擦係数を測定するために平滑な接合部の試験体タイプ P が 2 体、段差を有する試験体タイプ C1 ($H_j/D_j=0.5$), C2 ($H_j/D_j=1.0$) が 10 体の計 12 体である。試験部の高さと同水平長さは 400mm、幅は 150mm である。圧着力は 2.0, 4.0, 6.0 N/mm^2 の 3 水準で、接合部の軸力比 $\eta_j (=N/2b_jD_jf_c)$ として

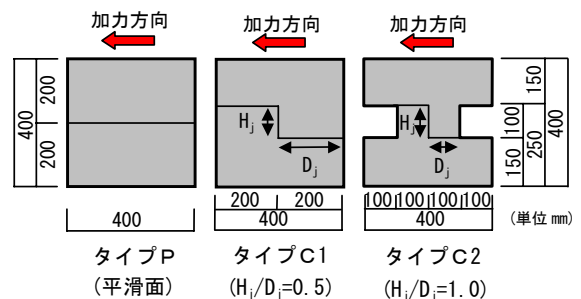


図-3 試験部の形状

*1 株式会社ピーエス三菱 (前 日本工業大学大学院工学研究科建築学専攻) 修士(工学) (正会員)

*2 日本工業大学 工学部 建築学科 教授 工学博士 (正会員)

*3 黒沢建設(株) 修士(工学) (正会員)

*4 明治大学 理工学部 建築学科 助教授 博士(工学) (正会員)

は、0.03~0.14 となっている。コンクリート圧縮強度は $f_c=36\text{N/mm}^2$, $f_c=50\text{N/mm}^2$ の 2 水準、コーベル内あばら筋比は、0%, 0.85% の 2 水準である。コーベル内主筋は、2-D10 で全試験体共通である。

2.2 加力方法

図-4 に加力装置を示す。試験体に一定軸力を作用させた後、水平力を一方向漸増载荷させた。この軸力は、プレストレスによる圧着力を想定したもので、ジャッキコントロールシステムにより一定軸力を保持させた。水平力は、梁のせん断力を想定しており、L 型フレームを介して、アクチュエータによって加力した。いずれの試験体も破壊に至るまで加力を行なった。

2.3 測定計画

水平力および軸力の荷重はそれぞれ、アクチュエータ、ジャッキに内蔵の検出器で測定し、鉄筋のひずみ度の測定は、図-5 に示すように、主筋 (M1, M2, M3) とあばら筋 (S1, S2) について測定した。図-6 に変位測定位置を示すが、試験体変位は上下スタブ間水平変位 (H3, H4), 上下試験体間水平変位 (H1, H2, H5, H6), 上下スタブ間鉛直変位 (V1, V2) について測定を行なった。

2.4 実験結果

図-7 に強度・変形性状への圧着力の影響を示すが、圧着力の増大により、接合部強度が上昇している。いずれの試験体も最大荷重時には主筋が降伏していた。図-8 にはコンクリート圧縮強度の影響を示すが、 $f_c=36\text{N/mm}^2$ と $f_c=50\text{N/mm}^2$ で、接合部強度は同等であった。一方、変形性能については $f_c=50\text{N/mm}^2$ で、コーベル内主筋の降伏後も荷重が保持され向上がみられた。図-9 にあばら筋の有無の影響を示すが、あばら筋のひずみ度は小さく、あばら筋の有無の影響は見られなかった。以上より、接合部強度を上昇させるためには圧着力を増大させ、変形性能を向上させるためには、コンクリート圧縮強度の増大が有効と判断される。図-10 に PC 規準式²⁾の計算結果と実験結果との比較を示すが、PC 規準式は安全側の評価であり、強度上昇の傾向は実験と同様となっている。

表-1 試験体一覧

試験体名	試験部の形状 (形状比H/D)	圧着力N (N/mm ²) η : 軸力比	コンクリート圧縮強度 f_c (N/mm ²)		コーベル部配筋	
			基準	試験	主筋	あばら筋比 ρ (%)
P-N2-H	P (全面平滑)	2.0 ($\eta=0.03$)	50	65.0	-	
P-N6-H		6.0 ($\eta=0.09$)				
C1a-N4-NU	C1 (0.5)	4.0 ($\eta=0.14$)	36	28.7	2-D10	0
C1a-N4-NR		4.0 ($\eta=0.06$)				0.85
C1a-N4-HU		2.0 ($\eta=0.03$)	50	64.3		0
C1a-N2-HR		2.0 ($\eta=0.03$)	50	64.3		0.85
C2a-N4-NU	C2 (1.0)	4.0 ($\eta=0.14$)	36	29.5	2-D10	0
C2a-N4-NR		4.0 ($\eta=0.06$)				0.85
C2a-N4-HU		4.0 ($\eta=0.06$)	50	63.4		0
C2a-N2-HR		2.0 ($\eta=0.03$)				0.85
C2a-N4-HR		4.0 ($\eta=0.06$)				
C2a-N6-HR		6.0 ($\eta=0.09$)				0.85

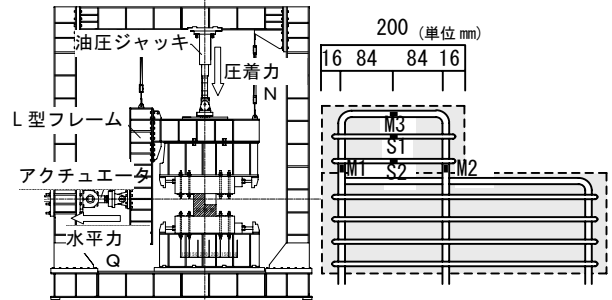


図-4 加力装置 図-5 ひずみ度測定位置

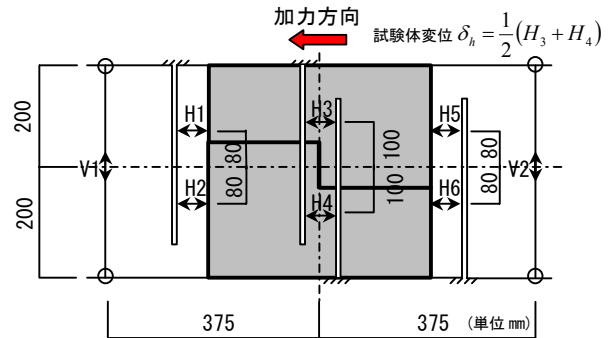


図-6 変位測定位置

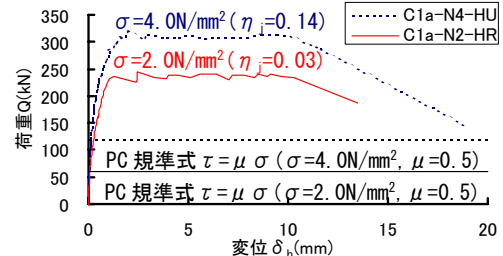


図-7 圧着力の影響

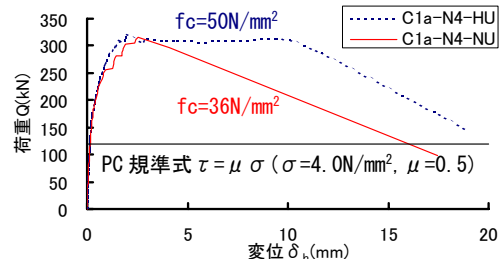


図-8 コンクリート圧縮強度の影響

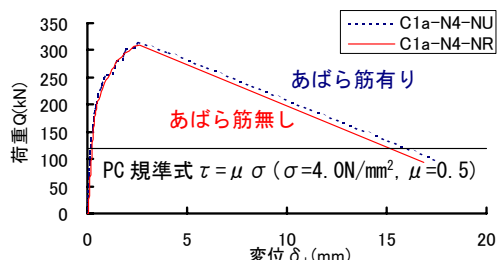


図-9 あばら筋の有無の影響

3. 接合部の復元力特性

平滑な接合部の試験体タイプ P の荷重－変位関係に基づき、接合部特性のモデル化を行なう。

3.1 接合部の解析モデル

図-11 に接合部の解析モデル³⁾を示す。接合部には、図-11 (b) に示すようなリンク要素を挿入し水平バネと鉛直バネにより接合面の滑り等を再現している。復元力特性は、図-11 (c) のような Bi-linear 型とした。このリンク要素の復元力特性は、図-13 に示すような平滑な接合部の試験体 P-N2-H の荷重－変位関係と適合するように試行錯誤した結果、図-11 (c) のように決定した。表-2 に材料特性、図-12 にコンクリートと鉄筋の応力－ひずみ関係を示すが、コンクリートには、Darwin 等の等価一軸モデルを用いている⁴⁾。

3.2 接合部解析モデルの妥当性の検証

接合部特性のモデル化の妥当性を検証するために、段差を有する試験体 10 体に対して FEM 解析を実施した。解析結果の例として試験体 C1a-N4-NU、C2a-N4-HU の 2 体の実験との比較を図-14 に示す。最大荷重以降の耐力低下にはやや差異がみられるが、荷重－変位関係や接合部強度はおよそ対応している。図-15 のひび割れ破壊状況を見ると、ひび割れの方向はおよそ対応しており、実験の圧壊領域と解析の応力の大きな領域とが対応している。

また、図-16 に全試験体の接合部強度の比較を示すが、実験結果と解析結果は、いずれの試験体も良く対応しており、接合部特性のモデル化は妥当と判断される。

4. コーベル接合部を有する梁の復元力特性

前章でのリンク要素を用いる FEM 解析によりコーベル接合部を有する梁部材の地震時挙動を検討した。

4.1 梁部材の解析モデル

図-17 に梁部材の解析モデルを示すが、コーベル接合部には、図-11 (b) のリンク要素が挿入されている。表-3 に材料特性、図-18 にコンクリートと鉄筋の応力－ひずみ関係を示す。なお、

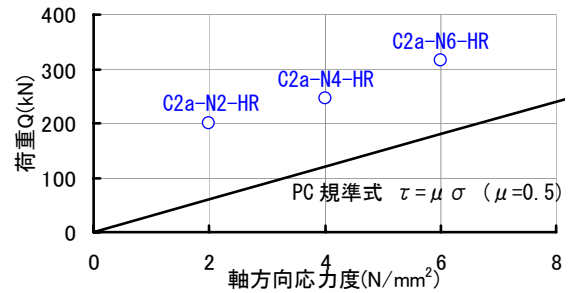


図-10 PC 規準式と実験結果の比較

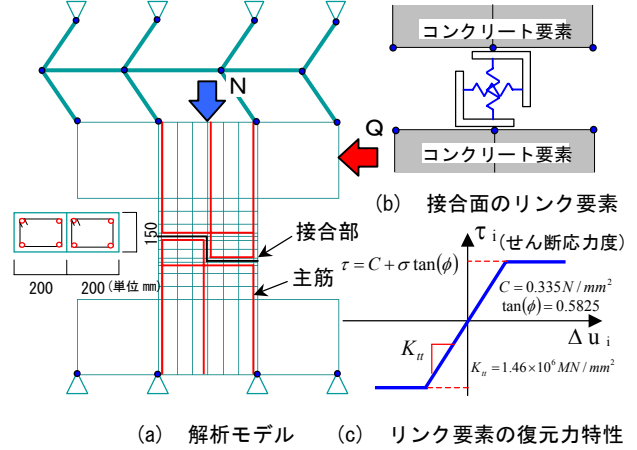


図-11 接合部の解析モデル³⁾

表-2 材料特性

コンクリート	表-1参照	
主筋	降伏強度	295 N/mm ²
	ヤング係数	200000 N/mm ²
あばら筋	降伏強度	295 N/mm ²
	ヤング係数	200000 N/mm ²
	あばら筋比	0.085 %

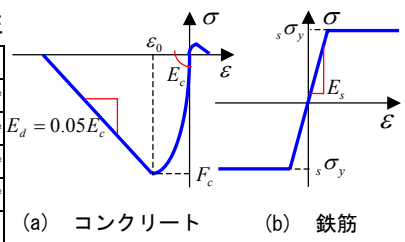


図-12 応力－ひずみ関係

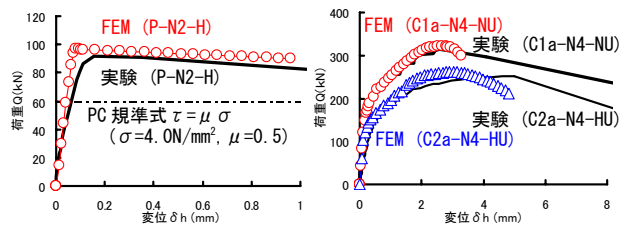


図-13 平滑接合部 図-14 段差を有する試験体

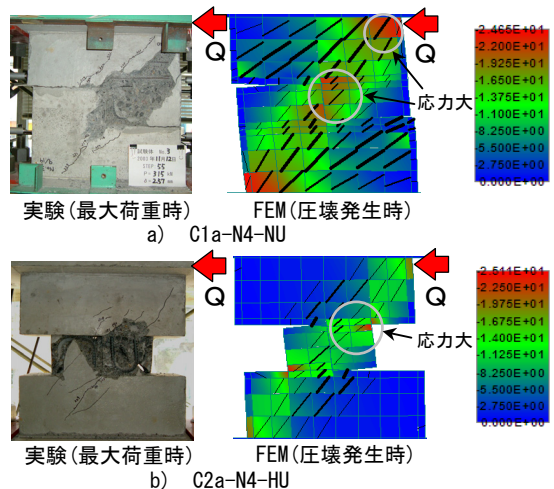


図-15 ひび割れ破壊状況の比較

解析法や解析モデルの詳細については、文献3)、5)を参照されたい。なお、本報のFEM解析には、幾何学的非線形が考慮されている。

4.2 梁曲げ強度を発揮させるための接合部強度

コーベル接合部を有する梁部材の復元力特性は、一体打梁と同等であることが望ましいとされている。梁部材の解析を実施するにあたり、まず、梁母材の曲げ強度を発揮させるための、接合部強度について検討する。

図-17のようなせん断力を受ける梁部材は、図-19のように左右端のコーベル接合部での挙動が異なる。右端では接合部が接触し、左端では接合部が離れる側であるため、以下の検討では、接合部強度の小さい左端に着目することとする。

図-20に本報で曲げ強度の算定に用いた梁断面の応力状態を示す。一方、本報では接合部強度としてPC規準式を用いるが、接合部強度は、コンクリート圧縮合力 C_c に摩擦係数 μ ($\mu = 0.5$)を乗じたものとなる。なお、図-20には軸力やPC鋼材が示されているが、本章の解析では軸力0でPC鋼材も用いていない。図-17、表-3の梁部材における接合部強度 Q_j と、梁母材の曲げ強度 Q_f の関係を図-21に示す。図より、この梁部材の場合には引張鉄筋比 $p_t=1.5\%$ 未満の領域では、接合部強度が梁母材の曲げ強度を上回り、一体打梁の曲げ強度が発揮されると予測されるのに対し、 $p_t=1.5\%$ 以上の領域では、梁母材の曲げ強度が接合部強度を上回り、接合部強度で梁部材の強度が決定されてしまうと予測される。

4.3 梁部材の解析結果と考察

梁母材の曲げ強度が発揮される領域の $p_t=0.4\%$ (Case A)と、接合部強度で梁部材の強度が決定されてしまう領域の $p_t=2.5\%$ (Case B)の2ケースについてFEM解析を実施した。図-22に解析結果の荷重-部材角関係の比較を示す。Case Aではコーベル接合部付梁部材は、一体打梁とほぼ同等であるのに対し、Case Bでは一体打梁よりも強度が低下している。また、図-23に解析結果の変形状態(部材角 $R=0.015\text{rad}$)、図-24に試験体左端接合部の滑り変位を示すが、Case Bで

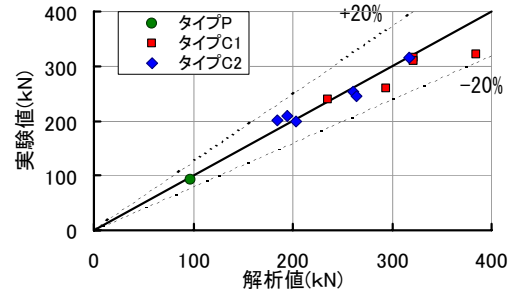


図-16 解析結果と実験結果の比較

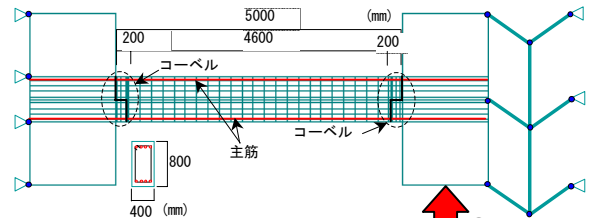


図-17 梁部材の解析モデル

表-3 材料特性

コンクリート	圧縮強度	50	N/mm ²
	引張強度	3.3	N/mm ²
	ヤング係数	36950	N/mm ²
主筋	降伏強度	500	N/mm ²
	ヤング係数	200000	N/mm ²
	引張鉄筋比	0.4, 2.5	%
せん断補強筋	降伏強度	1200	N/mm ²
	ヤング係数	200000	N/mm ²
	せん断補強筋比	1.2	%

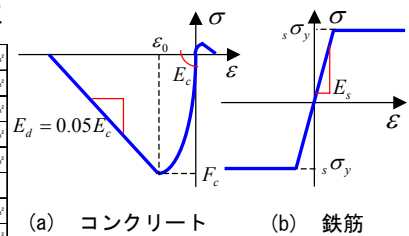


図-18 応力-ひずみ関係

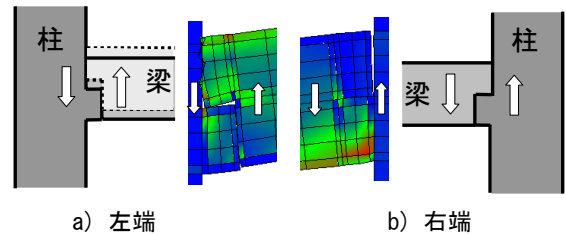


図-19 接合部の挙動

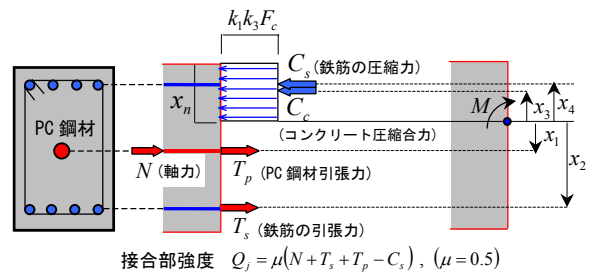


図-20 断面の応力状態

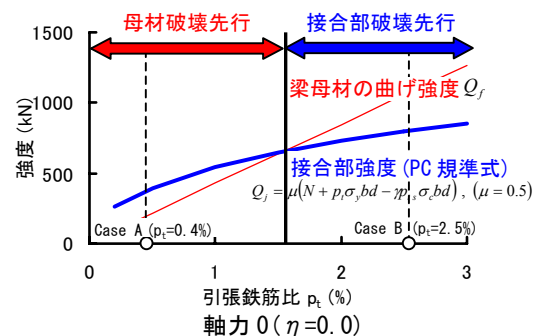


図-21 接合部強度と梁母材の曲げ強度

は、Case A に比べて、コーベル接合部での滑り変位が大きくなっており、図-21 の予測と符合している。接合部強度が不足する場合の対処としては、プレストレス導入による方法が考えられるが、これについては次章で考察する。

5. 梁母材の曲げ強度を發揮させる必要軸力

5.1 プレストレス導入による接合部強度

接合部強度により、梁部材の強度が決定されてしまった Case B に対し、プレストレス導入の効果について検討した。図-25 に梁母材の曲げ強度を接合部強度を上回るのに必要な軸力、すなわち、梁母材の曲げ強度を發揮するための必要軸力を示している。軸力 0 では接合部強度が不足していた Case B は、図-25、図-26 のように梁の軸力比 η ($=N/bDf_c$) 0.12 の軸力を導入することにより、梁母材の曲げ強度が發揮されると予測される。なお、図-25、図-26 には PC 鋼材による梁母材の曲げ強度上昇は考慮されていないが、PC 鋼材による曲げ強度の上昇に比べて、接合部強度の増加の方が大きいため、PC 鋼材を無視したことは必要軸力に関しては危険側となることはない。

図-27 に PC 鋼材を追加した梁部材の解析モデル、表-4 に材料特性、図-28 に応力-ひずみ関係を示すが、プレストレス力は実際の使用状況を参考に PC 鋼材の降伏応力度の 60% とした。

5.2 解析結果および考察

図-29 に解析結果の荷重-部材角関係、図-30 に試験体左端接合部の拡大図と左端接合部の滑り変位を示す。軸力 0 では接合部強度が不足していた Case B は、プレストレスを導入することで一体打梁と同等の荷重-部材角関係となり、コーベル接合部での滑り変位量も抑えられており、図-26 の予測と符合していることがわかる。このように、コーベル式接合部強度が不足するような場合には、プレストレスを導入することにより一体打梁同等の曲げ強度を發揮させることが可能であると考えられる。一般的には、軸力導入により変形性能が低下する傾向にあるが、接

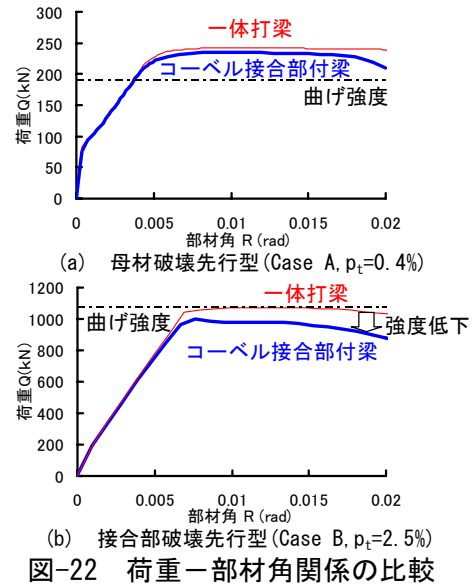


図-22 荷重-部材角関係の比較

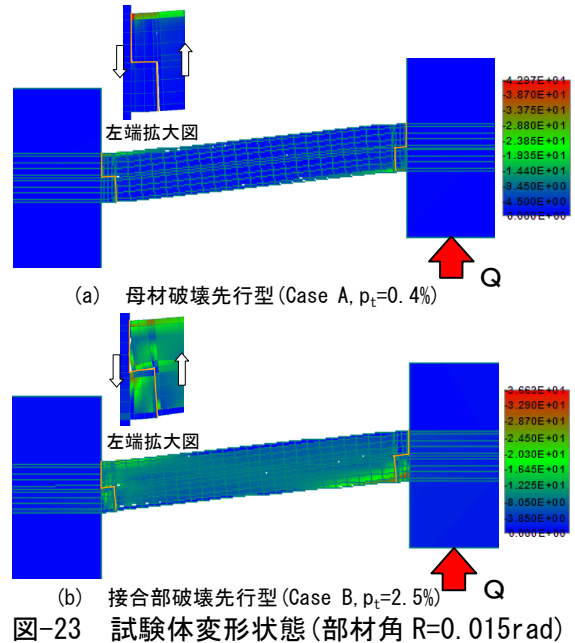


図-23 試験体変形状態(部材角 R=0.015rad)

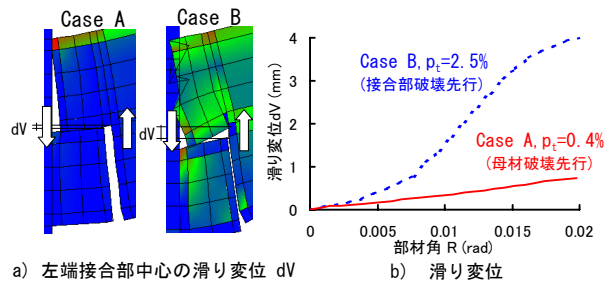


図-24 左端接合部の滑り変位

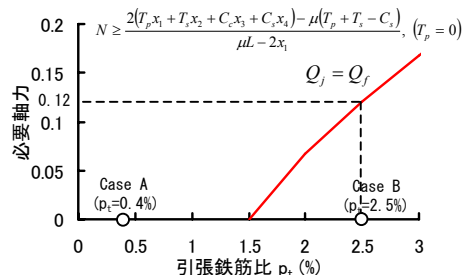


図-25 梁母材の曲げ強度を發揮させる必要軸力

合部実験結果の図-7によれば、軸力比 0.1 程度では大きな変形性能の低下はみられなかった。

6. まとめ

コーベル式 PC 圧着接合部の水平加力実験を実施し、実験結果の接合部性状を取り入れた FEM 解析により、コーベル接合部を有する梁部材の解析を実施した。本報により得られた結果を以下に示す。

- (1) 実験結果によれば、コーベル式 PC 圧着接合部の接合部強度は圧着力の増大により上昇した。また、変形性能はコンクリート圧縮強度の増加により向上した。
- (2) PC 規準式による接合部強度を梁母材の曲げ強度以上とすれば、コーベル接合部を有する梁部材は、一体打梁と同等の荷重-部材角関係となった。
- (3) 軸力 0 で接合部強度が不足するような場合には、プレストレス導入により接合部強度を上昇させ、一体打梁と同等の性状を得ることが可能と考えられる。

参考文献

- 1) 稲生 雅史, 百武 茂, 黒澤 亮太郎, 白石 一郎, 高木 仁之: コーベル式 PC 圧着接合部のせん断耐力に関する実験的研究 (その 1)~(その 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2 分冊, 構造IV, pp937-942, 2004
- 2) 日本建築学会: プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, 1998
- 3) ATENA: Computer Program for Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures, ATENA, Program Documentation, Cervenka Consulting, Revision Oct. 31, 2005
- 4) Darwin, D., and D. A. Pecknold: Nonlinear Biaxial Law for Concrete, J. Eng. Mech. Div. ASCE, Vol. 103, No. EM2, pp. 229-241. April, 1977
- 5) 白石 一郎, 高木 仁之: RC 柱のトラスアーチ理論におけるアーチ機構のせん断挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No2, 2003

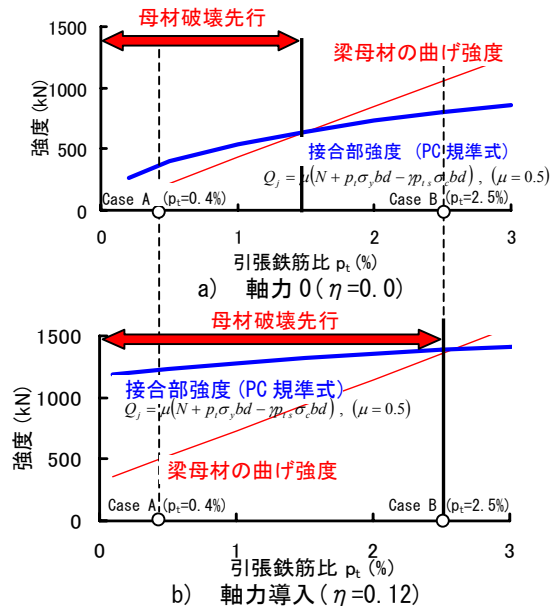


図-26 軸力導入による破壊モード

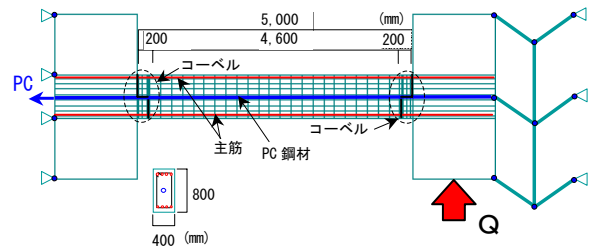


図-27 PC 鋼材導入の解析モデル

表-4 材料特性

PC鋼材	降伏強度	1142	N/mm ²
	ヤング係数	200000	N/mm ²
	降伏ひずみ度	0.0057	-

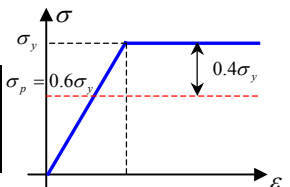


図-28 応力-ひずみ関係

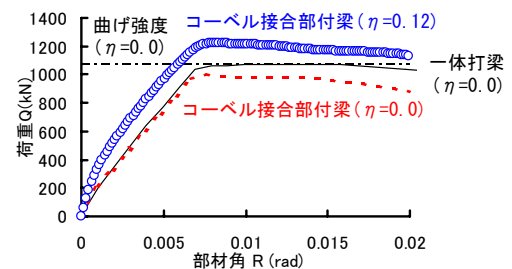


図-29 荷重-部材角関係

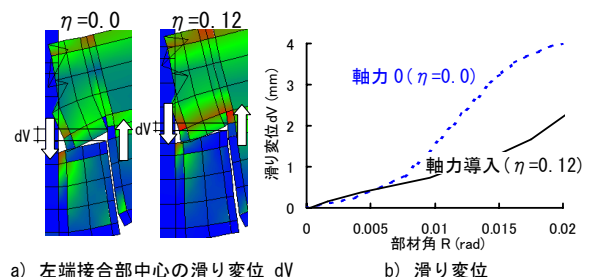


図-30 接合部の滑り変位