

論文 梁主筋を機械式定着した高強度鉄筋コンクリート造外柱梁接合部の構造性能

長谷川 勇樹^{*1}・藤本 武人^{*2}・清原 俊彦^{*3}・田才 晃^{*4}

要旨：梁主筋を機械式定着した外柱梁接合部の設計方法の確立に資するため，高強度鉄筋，高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート(以下 RC)造外柱梁接合部の構造実験を行い，接合部のせん断性状，梁主筋の定着性能などを調べた。試験体は接合部せん断破壊先行型の5体である。パラメータはコンクリート強度と定着長とした。全試験体とも接合部せん断破壊が先行した。層間変形角 $R=1/50\text{rad}$ まで定着板が移動することはなかった。接合部せん断耐力は，既往の設計式で評価可能だった。

キ - ワ - ド：外柱梁接合部，機械式定着，高強度材料，せん断強度，定着長

1. はじめに

近年，RC 造建築物の高層化に伴い，使用する鉄筋が高強度化，太径化，高密度化しており，外柱梁接合部での定着方法は，従来の 90° 折り曲げ定着から，施工の容易な機械式定着が主流になりつつある。さらに，現行の設計基準より，高強度の範囲で機械式定着が使用可能になれば設計の自由度を高められると考えられる。

そこで本研究では，実験的蓄積がほとんどない設計基準強度(以下 F_c) $45 \sim 120\text{N/mm}^2$ の高強度コンクリートを用いた外柱梁接合部の構造性能を把握することを目的として，昨年¹⁾の梁曲げ降伏先行型試験体No.1～5¹⁾に引き続き，柱梁接合部のせん断破壊が先行するように計画した外柱梁接合部部分架構試験体 5 体の静的加力実験を行った。

2. 試験体

2.1 試験体概要

試験体は，超高層 RC 造建築物の下層部の外柱梁接合部を想定した，約 $1/2$ 縮尺模型型試験体 5 体とした。試験体パラメータを表 - 1 に，試験体図を図 - 1 に示す。

表 - 1 試験体パラメータ

試験体	F_c^{*1}	定着長 l_d	梁主筋配筋	せん断余裕度 ^{*2}
	N/mm^2	mm		
No.6 (基準)	80	$365(2/3D_c)^{*3}$	7-D29(SD980相当)	0.57
No.7 (Fc-高)	120	$365(2/3D_c)$	7-D29(SD980相当)	0.69
No.8 (Fc-低)	45	$365(2/3D_c)$	7-D29(SD980相当)	0.33
No.9 (ld-長)	80	$460(0.84D_c)$	7-D29(SD980相当)	0.72
No.10 (ld-短)	80	$275(1/2D_c)$	7-D29(SD980相当)	0.44

*1 F_c : コンクリート設計基準強度

*2 せん断余裕度=接合部せん断終局耐力²⁾/梁曲げ終局耐力³⁾

*3 D_c : 柱せい

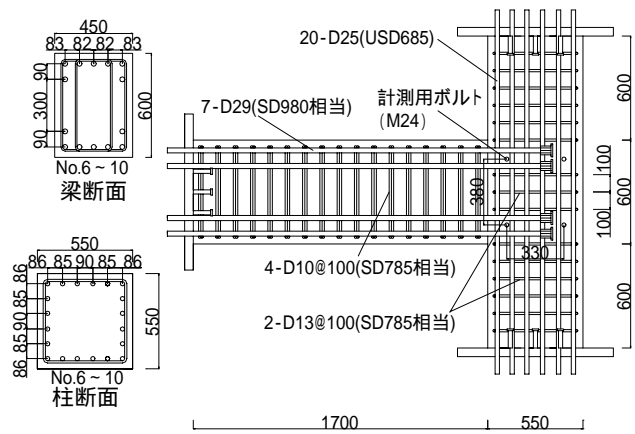


図 - 1 試験体図(No.6)

梁主筋にはネジ節鉄筋を用い，定着金物は，図 - 2 に示す形状のものを使用した。定着長は図 - 3 に示すように柱フェイスから定着板梁側までの距離とした。

試験体寸法は，全試験体とも柱断面 $b \times D=$

*1 横浜国立大学大学院 工学府社会空間システム学専攻 (正会員)

*2 横浜国立大学大学院 工学府社会空間システム学専攻

*3 (株)堀江建築工学研究所 (正会員)

*4 横浜国立大学大学院 助教授 工学研究院 システムの創生部門 工博 (正会員)

550×550mm，梁断面 b×D=450×600mm，柱反曲点距離 h=3000mm，梁 1/2 スパン(加力点が柱芯までの距離)L=2400mm とした。

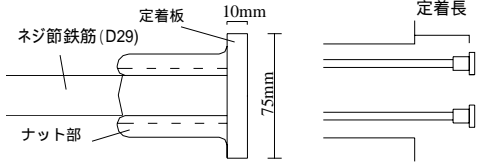


図 - 2 定着金物 図 - 3 定着長

全試験体とも柱梁接合部のせん断破壊が先行するように計画し，配筋は全試験体共通で梁主筋 7 - D29(SD980 相当)，柱主筋 20 - D25 (USD 685)，スタラップ 4 - D10@100 (SD785 相当)，フープ 2 - D13@100 (SD785 相当) とした。接合部補強筋比 p_{wj} は 0.31%である。

変動因子はコンクリート強度と定着長とした。試験体No.6 を基準試験体とし， $F_c=80\text{N/mm}^2$ ，定着長を $l_d=365\text{mm}(2/3D_c)$ とした。No.7, 8 はコンクリート設計基準強度をそれぞれ 120N/mm^2 ， 45N/mm^2 と変動させたもの，No.9，No.10 は定着長をそれぞれ $460\text{mm}(0.84D_c)$ ， $275\text{mm}(1/2D_c)$ と変動させたものとした。試験体に使用した材料特性を表 - 2 に示す。なお，本実験では柱軸力は与えていない。

表 - 2 材料特性

試験体	設計強度 $F_c(\text{N/mm}^2)$	4週強度 (N/mm^2)	実験日強度 $f_B(\text{N/mm}^2)$	ヤング係数 (N/mm^2)
No.6	80	100.5	106.3	39500
No.7	120	129.9	138.8	44100
No.8	45	47.3	47.4	28300
No.9	80	100.5	105.9	40500
No.10	80	100.5	108.0	40300

鉄筋種	降伏強度	引張強度	降伏歪	ヤング係数
	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(%)	(N/mm^2)
D10(SD785相当)	821	1009	0.41	218000
D13(SD785相当)	821	1026	0.41	220000
D25(USD685)	705	903	0.40	204000
D29(SD980相当)	1034	1059	0.56	198000

2.2 加力方法及び測定方法

加力装置図を図 - 4 に示す。下柱の反曲点を想定している位置をピン支持，上柱の反曲点を

想定している位置を 1000kN ジャッキを介したローラー支持とし，梁反曲点位置を 1000kN 鉛直ジャッキにより載荷した。加力履歴は正負交番繰り返し載荷とし，層間変形角 $1/800\text{rad}$ を 1 回， $1/400, 1/200, 1/100, 1/50, 1/25\text{rad}$ を 2 回ずつ，計 11 サイクルとした。

測定項目は，層せん断力，梁せん断力，層間変位，接合部せん断変形成分，梁変形成分，柱変形成分，定着板移動量，主筋及びせん断補強筋のひずみとした。各変形成分は接合部内に埋め込まれた 4 本の M24 のボルト(図 - 1 に例示)で計測フレームを支持し，計測した。梁及び上下柱の変形は，それぞれの部材に対応する 2 本のボルトに持たせた計測フレームにより，各部材端ピン位置の接合部に対する相対変形として測定した。また，接合部のせん断変形による成分 p はパネルゾーンの大きさを考慮した式(1)により求めた。ここで， L は梁反曲点から接合部中心までの距離， h は柱反曲点距離， a は接合部ボルト間の幅， b は接合部ボルト間の高さ， θ は接合部のせん断変形角である。

$$p = (1 - a/2L - b/h) \cdot h \quad (1)$$

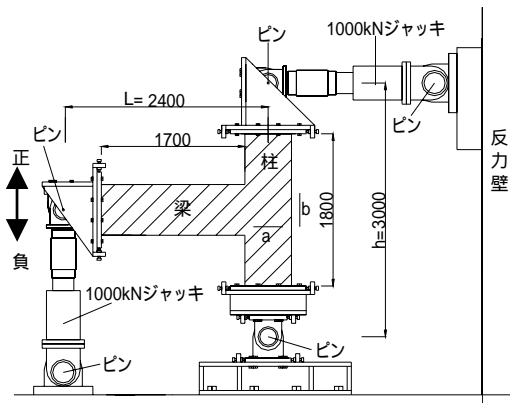


図 - 4 加力装置

3. 実験結果

3.1 破壊性状

各試験体の最終破壊状況を写真 - 1 に，層せん断力 - 層間変形関係を図 - 5 に，変形割合の推移を図 - 6 に示す。

(1) 基準試験体 No.6 の破壊性状

層間変形角 $R=1/800\text{rad}$. で梁の柱フェイス近傍に曲げひび割れが発生し, $R=1/200\text{rad}$. で定着板の 1,2 段目の間から柱梁の入隅部を結ぶように接合部に斜めひび割れが発生した。以後, 変形とともにひび割れ本数, 幅は増加していき, $R=1/50\text{rad}$. でひび割れ幅の拡大が顕著になった。また, $R=1/50\text{rad}$. 1 回目で接合部フープが降伏した。その後, スリップ型の性状となり, $R=+1/25\text{ rad}$. 1 回目で最大耐力に達し, $R= -1/25\text{rad}$. 1 回目で梁主筋が降伏した。 $R=1/25\text{rad}$. 2 回目のサイクルより接合部のコンクリートが剥離し始めた。

最終的に $R=1/25\text{rad}$. での接合部の変形割合が急激に増加していることから, 接合部がせん断破壊したと考えられる。

(2) コンクリート強度による破壊性状の比較

コンクリート強度の高い試験体 No.7 は, No.6 と $R=1/50\text{rad}$. までほぼ同様な経過をたどり, 梁主筋は $R=+1/25\text{rad}$. 1 回目で降伏した。最大耐力は $R=+1/25\text{rad}$. 1 回目サイクル中に達し, 2 回目から接合部のコンクリートが剥離し始めた。

コンクリート強度の低い試験体 No.8 は, $R=1/50\text{rad}$. まで, No.6 とほぼ同様な経過をたどったが, 接合部斜めひび割れが No.6 より早く, $R= -1/400\text{rad}$. で発生し, 最大耐力は, $R=1/50\text{ rad}$. で記録した。

コンクリート強度が低い No.8 試験体は, 他の試験体に比べ接合部せん断ひび割れが早期に生じ, また接合部変形成分の増加がやや早く, 接合部の損傷が早期に進展しているといえる。

No.7,8 は, $R=1/25\text{rad}$. で接合部の変形割合が急激に増加したことより, 接合部がせん断破壊したと考えられる。

(3) 定着長による破壊性状の比較

定着長の長い試験体 No.9 は, $R=1/100\text{rad}$. まで No.6 とほぼ同様な経過をたどった。接合部フープの降伏は No.6 より遅く $R=1/25\text{rad}$. サイクル中に起き, その後, 梁主筋も降伏した。最大耐力は $R=1/25\text{rad}$. であった。 $R=1/50\text{rad}$. でのひ



No.6 基準



No.7 Fc-高



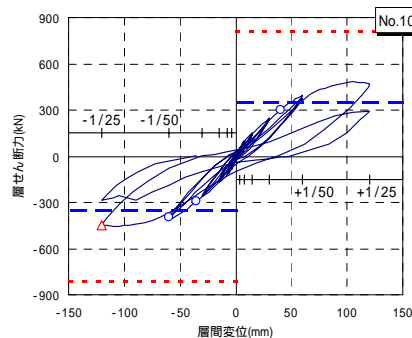
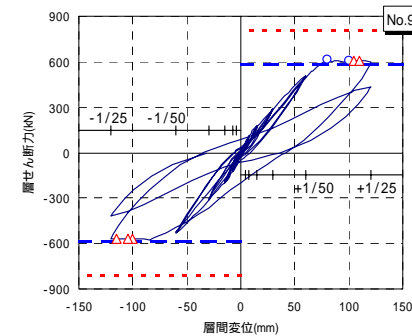
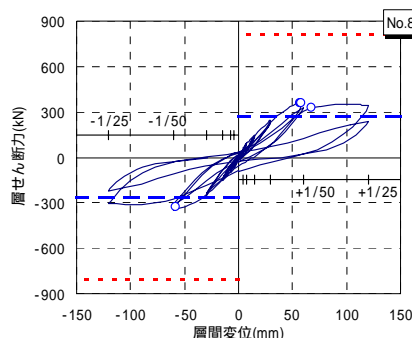
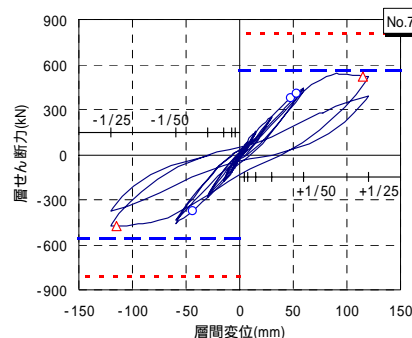
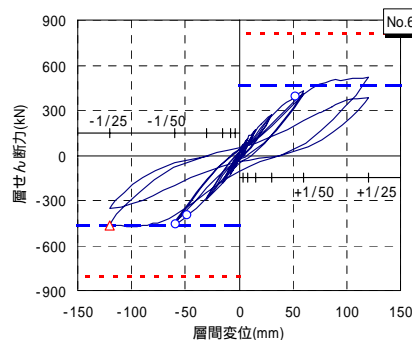
No.8 Fc-低



No.9 ld-長



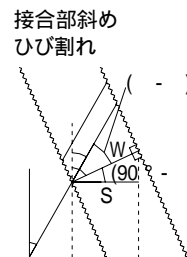
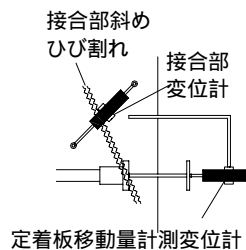
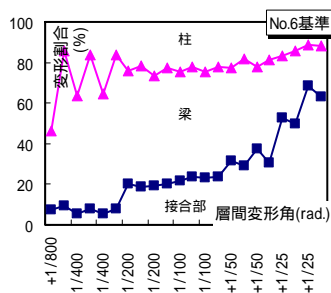
No.10 ld-短



- - - 梁曲げ終局耐力 梁主筋降伏
- - - 接合部せん断終局耐力 接合部フープ降伏

写真 - 1
最終破壊状況

図 - 5
層せん断力 - 層間変形関係



(-) : 接合部変位計の伸び
 (-) : ひび割れの水平方向となす角
 (90° -) : 変位計の鉛直方向となす角
 W: ひび割れ幅
 S: ひび割れ幅の梁主筋成分

図 - 7 定着板移動量の計測方法

図 - 8 ひび割れ幅計算

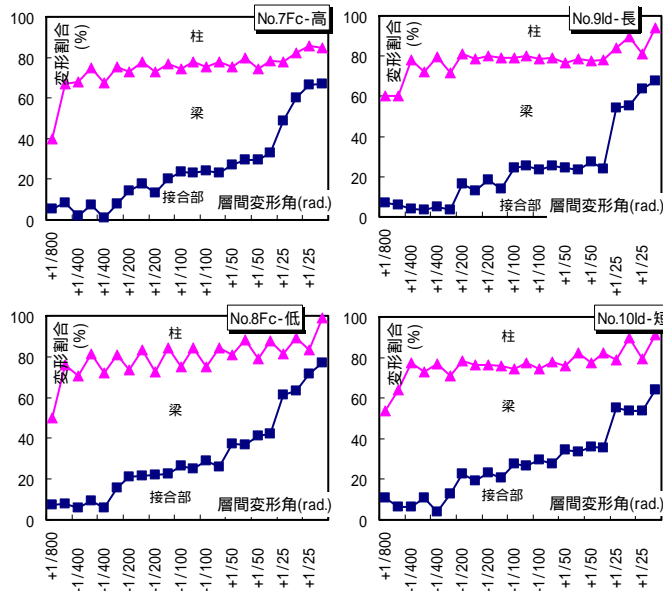


図 - 6 変形割合の推移

着板移動量計測変位計の計測値から、定着板をかすめるひび割れを接合部変位計の伸びより梁主筋方向のひび割れ成分を出し、それを引いた値と仮定して、式(2)(3)により算出した。ただし、接合部内のひび割れ方向は全て柱、梁フェイスの交差点から定着板の引張重心とを結ぶ直線とした。これにより、各ピ - クにおける定着板の周辺コンクリートに対する相対的移動量を図 - 9 に示す。

$$W = \cdot \cos(-) \quad (2)$$

$$S = W \cdot \cos(90^\circ -) \quad (3)$$

ひび割れ幅は、他の試験体に比べ極めて小さかった。しかし、最終的にコンクリ - トは剥離した。

定着長の短い試験体 No.10 は、接合部斜めひび割れの発生は No.6 に比べ早く、 $R=1/400\text{rad}$ であった。その後、No.6 とほぼ同様な経過をたどった。 $R=1/25\text{rad}$ サイクル中に最大耐力を記録し、また、梁主筋が降伏した。 $R=1/25\text{rad}$ でコンクリ - トが剥離し始め、剥離した領域は定着金物位置よりも梁側に集中しており、定着長が短くなることにより、接合部の有効な領域も小さくなっているものと思われる。

No.9,10 とも、他の試験体と同様、 $R=1/25\text{rad}$ での接合部の変形割合が急増したことから接合部のせん断破壊が起きたと考えられる。また、 $R=1/25\text{rad}$ サイクル中に梁主筋が降伏した。

3.2 梁主筋定着板移動量

定着板の移動量は、図 - 7, 8 に示すように定

(3)

全試験体とも $R=1/50\text{rad}$ までほとんど移動していないが、 $R=1/25\text{rad}$ では隅筋、中筋といった主筋の位置に関わらず、大きな移動が見られた。これは、接合部の破壊が進んだことにより定着性能が劣化したことに加え、柱背面のコンクリ - トが剥離したことなどが要因として考えられる。

3.3 引張力と支圧力の推移

各ピ - クにおける梁主筋の引張力と支圧力の推移を図 - 10 に示す。梁主筋に作用する引張力を支圧力と付着力で負担しているとし、引張力は危険断面のひずみゲ - ジの値により、支圧力は定着板近傍のひずみゲ - ジの値により算出した。付着力は引張力と支圧力の差とした。図 - 10 の sT は 梁主筋の降伏応力度に断面積を掛けた値である。ひずみゲージは各試験体とも、梁下端中央の主筋における計測データを用いた。

全試験体とも層間変形が増加すると支圧力の

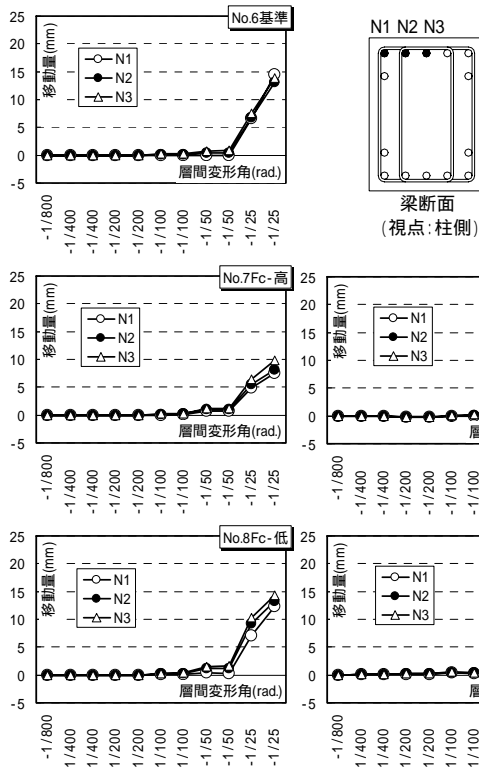


図 - 9 定着板の周辺コンクリートに対する相対的移動量

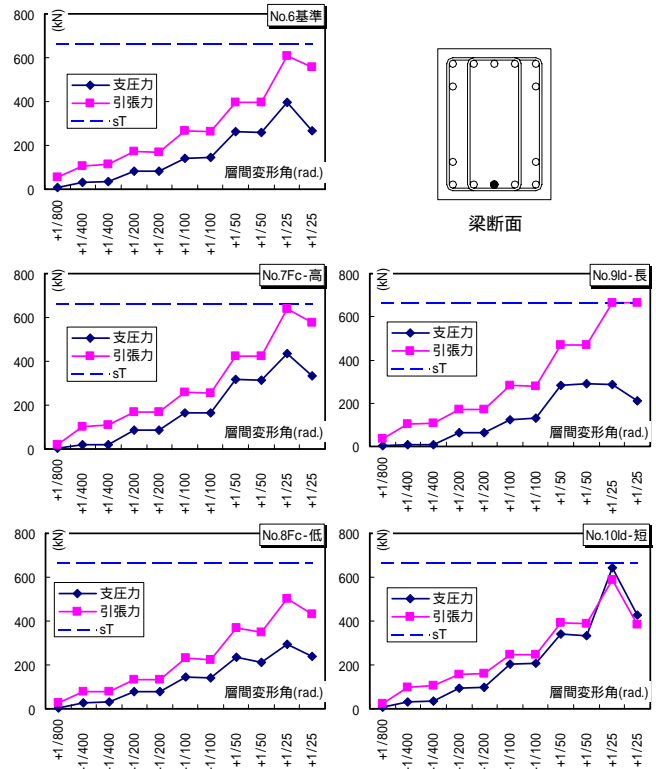


図 - 10 引張力・支圧力の推移

負担割合が大きくなる傾向があった。コンクリート強度で比較すると、支圧力、付着力の負担割合に顕著な差異はなかった。定着長で比較すると、定着長が短いほど、変形が小さいレベルから支圧力の負担割合が大きく、長くなるほど付着力の占める割合が大きかった。

ここで、 $\alpha = 0.7$ 、 $\beta = 0.85$ 、 $F_j = 0.8 \times B^{0.7}$ 、 b_j は接合部有効幅(柱幅と梁幅の平均)、 D_j は定着長とした。コンクリート強度が 140N/mm^2 程度の試験体No.7は、式(4)による接合部せん断耐力計算値を若干下回ったが、計算値に近い値であった。他の試験体は、どれも計算値を上回った。

4. 耐力評価

全試験体とも、どの破壊形式より接合部せん断破壊が先行した。接合部せん断耐力を下限値を示す式(4)²⁾による計算値と比較する。また、梁曲げ終局耐力³⁾、定着耐力として側方割裂破壊耐力^{4) 5)}、掻き出し破壊耐力⁶⁾の計算値および、実験で得られた最大耐力、破壊形式を表 - 3 に示す。定着耐力から層せん断力への変換は梁の応力中心距離を $7/8d$ と仮定して行った。

$$V_{ju} = F_j b_j D_j \quad (4)$$

表 - 3 耐力計算値と実験値

試験体	層せん断力計算値(kN)				
	接合部せん断 終局耐力 ²⁾	梁曲げ 終局耐力 ³⁾	定着耐力		
			提案式 ⁴⁾	NewRC ⁵⁾	掻き出し破壊 ⁶⁾
No.6 (基準)	465	810	786	704	343
No.7 (Fc-高)	560	810	913	689	371
No.8 (Fc-低)	264	810	528	593	278
No.9 (ld-長)	584	810	899	704	445
No.10 (ld-短)	354	810	672	704	234

試験体	実験値		
	最大 層せん断力(kN)	最大荷重時 層間変形角(rad.)	破壊形式
No.6 (基準)	519	0.040	接合部せん断破壊
No.7 (Fc-高)	540	0.030	接合部せん断破壊
No.8 (Fc-低)	363	0.020	接合部せん断破壊
No.9 (ld-長)	612	0.027	接合部せん断破壊
No.10 (ld-短)	483	0.035	接合部せん断破壊

提案式およびNewRC式による計算値は、実験値よりも十分高く、側方割裂破壊の兆候がなかった実験の観察結果と矛盾しなかった。コ-ン状破壊（掻き出し破壊）については、どの試験体も大変形時に定着板が移動したが、これは接合部破壊が進んだことにより、定着性能が劣化したことが要因と見られる。仮にコ-ン状破壊していたとしても、掻き出し破壊耐力⁶⁾の計算値を実験値が大きく上回った。

各試験体の接合部のせん断強度 j を、実験値を用いて式(5)より算定した。式(5)中の M_b は梁端モーメント、 Q_c は層せん断力、 j_b は応力中心距離 ($=7/8d$) とした。その計算値を靱性指針のト型接合部の接合部せん断強度 j_u - コンクリート強度 f_c 関係図²⁾ にプロットしたものを図 - 11 に示す。

$$j = (M_b / j_b - Q_c) / (b_j \cdot D_j) \quad (5)$$

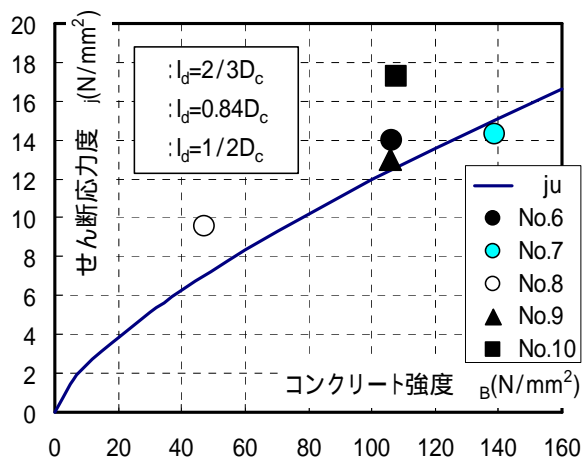


図 - 11 ト型接合部 j_u - f_c 関係

コンクリート強度が高いほど、実験値の計算値に対する余裕度は低くなる傾向が分かる。定着長に着目して、No.9,10 を比較すると、コンクリート強度が同じであっても定着長が短い No.10 がより大きなせん断応力度を伝達した。これは、接合部せん断応力度算定時に接合部有効せい D_j を定着長に等しいとして算定しているが、実験で観察された損傷の拡がりから判断すると、実際には定着長よりも大きな領域が有効に抵抗

したためと考えられる。

5. まとめ

梁主筋を機械式定着し、高強度材料を用いた接合部せん断破壊先行型 RC 造外柱梁接合部の静的加力実験を行い、以下の知見を得た。

(1)全試験体とも、計画通り接合部せん断破壊が他の破壊形式よりも先行した。 $f_c = 100 \text{ N/mm}^2$ 程度の高強度コンクリートを用いても、既往の略算式²⁾で接合部せん断耐力の評価は可能であった。

(2)全試験体とも、層間変形角 $R=1/50\text{rad}$.まで定着板の移動は認められなかった。

謝辞：本研究は、(財)日本建築防災協会に設置された機械式定着工法研究会(岡田恒男委員長)の研究プロジェクトの一環として行った。多くの関係者各位に謝意を示す。

参考文献

- 1) 渡部杏子, 清原俊彦, 田才晃, 長谷川勇樹: 梁主筋を機械式定着した高強度コンクリート造外柱接合部の変形性能, コンクリート工学年次論文集, 第 26 巻, 2004
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証指針・同解説 pp.245 - 249 1999
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 pp.144 - 149 1999
- 4) 加藤慎二, 清原俊彦, 田才晃: RC 造柱梁接合部内に機械式定着した梁主筋の定着耐力の評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集 第 24 巻 2002
- 5) 村上雅英, 窪田敏行: 高強度電炉鉄筋の開発に関する研究 RC 外部梁柱接合部の梁主筋の機械式定着強度実験式の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.127 - 128 1993
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証指針・同解説 pp.265 - 267 1999