

論文 機械式定着を用いた段差梁を有する鉄筋コンクリート造梁・柱接合部の抵抗機構

廣谷 祐貴^{*1}・上村 智彦^{*2}・石橋 一彦^{*3}・林 静雄^{*4}

要旨：左右の梁の芯ずれ量を変数とし、機械式定着を用いた左梁が上側、右梁が下側に取り付く試験体の実験を行い、芯ずれ量及び荷重方向（正荷重：左梁の上端、右梁の下端が引張側）による接合部抵抗機構の違いを検討した。芯ずれ量が梁せい分ずれた試験体は、正荷重でト字形接合部として評価できる。芯ずれ量が梁せいより小さい試験体は、接合部内部の破砕状況などから、左右の梁が重なり合う領域で接合部せん断力の評価を行うことが適切であると考えられる。正荷重の最大耐力は、負荷の最大耐力より大きい。この要因は、圧縮ストラット機構の形成にあることを示した。

キーワード：段差梁、芯ずれ、荷重方向、機械式定着、接合部終局強度、ストラット機構

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物では、接合部の両側の梁に段差を設けることがある。しかしながら、梁・柱接合部を設計する際に用いられる鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説の接合部せん断強度式では、段差梁を有する場合の接合部終局強度を評価することができない。このような場合の接合部とは、梁及び柱からの応力が相互作用し伝達される、図-1に示す接合部域と考えている。また、近年 RC 造の接合部内における簡便な梁主筋の定着法として、機械式定着が利用されている。

前報¹⁾では、接合部における梁主筋の定着法を U 字形定着とした梁の芯ずれ量を変数とする実験を行い、接合部終局強度の評価方法の検討を行った。しかし、梁主筋の定着法が機械式定着の場合、U 字形定着とは異なった接合部抵抗機構が予測される為、接合部終局強度の評価方法も異なると考えられる。また、過去に梁主筋に機械式定着を用いた段差梁を有する梁・柱接合部の力学的挙動に関する研究はされていない。尚、機械式定着を用いたト字形接合部の場合でさえも、接合部抵抗機構から接合部終局強度の評価方法を検討している論文は数少ない。

本研究は、筆者等の行った前報¹⁾の検討結果を踏まえ、接合部内の梁主筋の定着法を機械式定着（図-1参照）とし、梁の芯ずれ量を変数とした試験体の実験から、接合部抵抗機構の検討を行う。

2. 実験概要

各試験体の諸元および使用材料の性質を表-1、2に、また、形状、寸法および加力方法を図-1に示す。試験

体は、芯ずれ量を変数とした4体である。-mJ-0.25D、-mJ-0.5D、-mJ-0.5D'、-mJ-Dは芯ずれ量を、100[mm]、

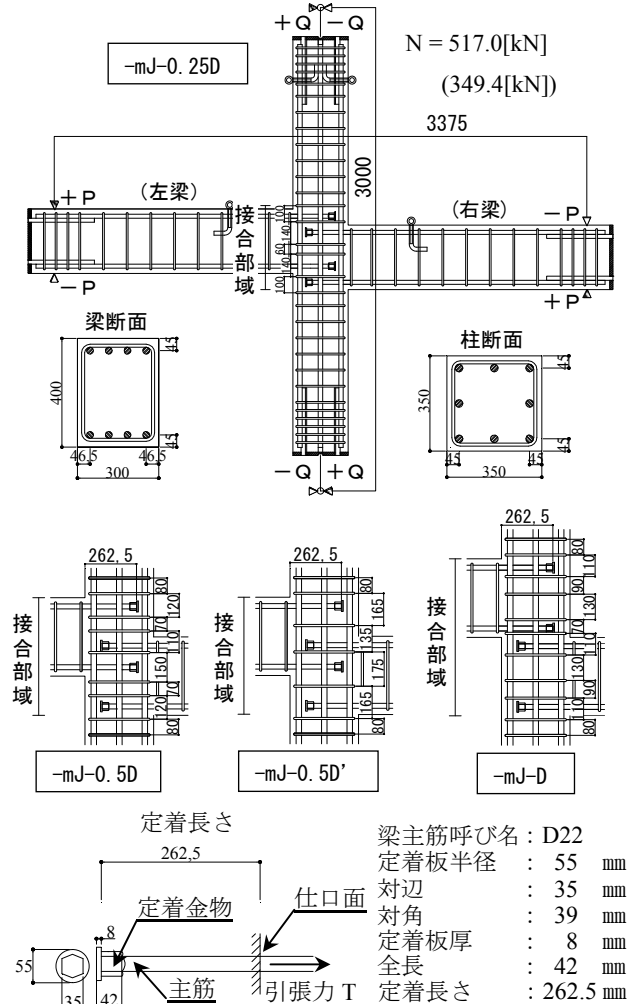


図-1 試験体の形状・寸法[mm]

*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 芝浦工業大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*3 千葉工業大学 工学部建築都市環境学科教授 工博 (正会員)

*4 東京工業大学 環境理工学創造専攻教授 工博 (正会員)

200[mm], 200[mm], 400[mm] とした試験体である。
 -mJ-0.5D'は、接合部内部のコンクリートの破壊状況を検討する為に作成した試験体である。全試験体を接合部の破壊を顕著とする為、鉄筋強度を高強度なものとした。梁主筋の定着は、機械式鉄筋定着工法設計指針等²⁾³⁾に推奨値として示された値を参考に用いて試験体を製作した。

-mJ-0.5D'以外の試験体は芯ずれ量以外の鉄筋の種類、本数等は、共通である。加力は、左右梁端に同じ値の梁せん断力を加えて行い、同一変位量で繰り返す変位制御による正負交番繰返し载荷とした。-mJ-0.5D'は、正又は負载荷の一方で最大荷重を経験した後、同一変位量で繰返し、それ以降の载荷は行わず、実験を終了した。尚、-mJ-0.5D'以外の試験体では、柱頭には一定圧縮軸力

表-1 試験体諸元

試験体名	-mJ-0.25D	-mJ-0.5D	-mJ-D	-mJ-0.5D'	
芯ずれ量[mm]	100	200	400	200	
梁	主筋	4-D22 SD490(SD345)			
	補強筋	□-D10@150[mm]			
柱	主筋	8-D25 SD490(SD345)			
	補強筋	□-D10@100[mm]			
接合部	補強筋	4-D10	5-D10	7-D10	3-D10

注) () 内は-mJ-0.5D'の場合

表-2 材料特性

鉄筋種類	梁主筋	柱主筋	補強筋
	D22	D25	D10
降伏強度[MPa]	536.8(399.7)	537.2(370.6)	383.5(383.5)
ヤング係数[10 ⁵ MPa]	1.97(1.74)	1.96(1.84)	1.89(1.50)
コンクリート圧縮強度[MPa]	σ _B =21.1(14.3)		

注) () 内は-mJ-0.5D'の値

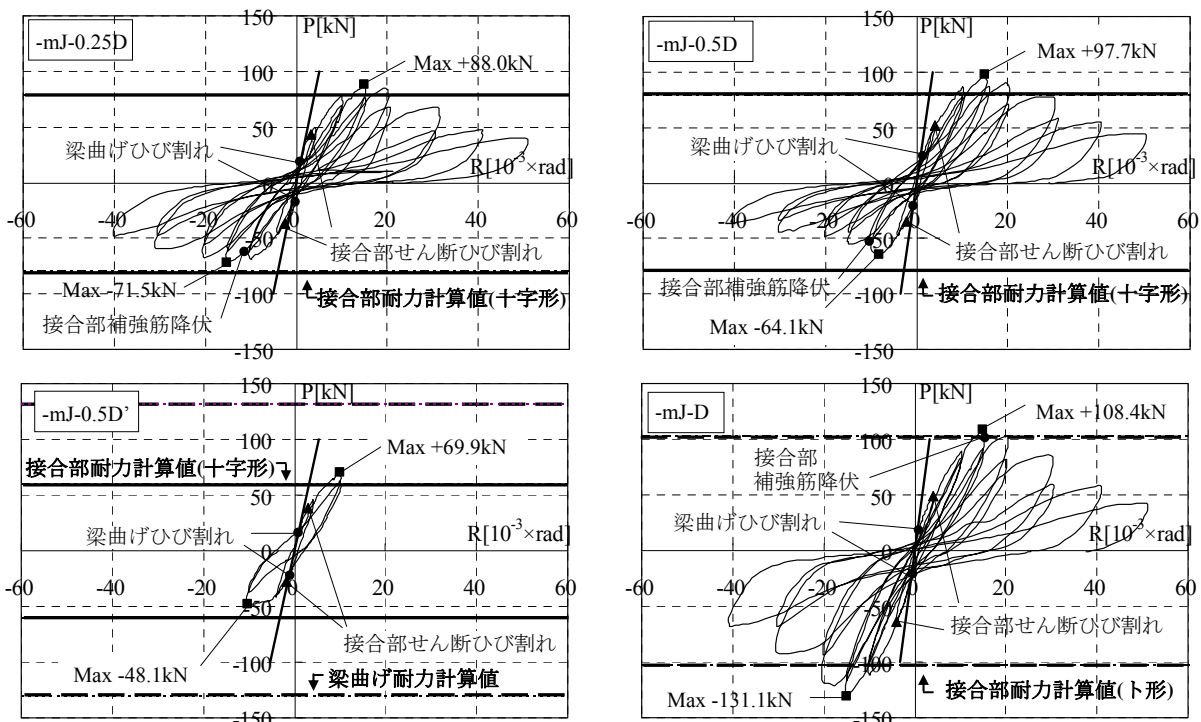


図-2 梁せん断力(P)－層間部材角(R)曲線

表-3 諸現象発生荷重(梁せん断力P[kN])

試験体名	最大荷重		梁			柱		接合部	
			曲げひび割れ		主筋降伏	曲げひび割れ		終局強度	
			計算値*1	実験値		計算値*3	実験値	計算値	実験値
-mJ-0.25D	正	88.0	18.2	19.2	176.6	38.9	38.7	78.8*4	88.0
	負	71.5		17.6			30.8		71.5
-mJ-0.5D	正	97.7	15.6	24.2	130.9	40.5	47.6	59.6*4	97.7
	負	64.1		21.1			45.9		64.1
-mJ-0.5D'	正	69.9	15.6	18.2	130.9	31.0	45.9	59.6*4	69.9
	負	48.1		22.3			41.5		48.1
-mJ-D	正	108.4	18.2	18.4	176.6	44.2	77.8	101.7*5	108.4
	負	131.1		21.5			58.7		131.1

*1 $M_b = b \sigma_t \cdot Z_c$ $b \sigma_t = 0.56 \sqrt{\sigma_B}$

*2 断面分割法による曲げ解析 *4 十字形 $V_{ju} = \phi \cdot 1.56 \sigma_B^{0.712} \cdot b_j \cdot D_c$ (靱性指針式¹⁾)

*3 $M_c = (c \sigma_t + \sigma_0) \cdot Z_c$ $c \sigma_t = 0.56 \sqrt{\sigma_B}$

注) -mJ-0.25D, -mJ-0.5D, -mJ-0.5D'の接合部計算値は段差の無い十字形として、-mJ-Dは上部下部に分離したト形として算出した。

Z_c : 断面係数 σ_0 : 軸応力度
 b_j : 接合部有効幅
 ϕ : 直交梁有無による補正係数

517.0[kN] (軸力比:0.2) を加え、 $-mJ-0.5D'$ では 349.4[kN] (軸力比:0.2) を加えた。

3. 破壊性状と破壊形式

表-3 に諸現象発生荷重、図-2 に梁せん断力 (P) -層間部材角 (R) 曲線 (図中の計算値は、表-3 の各計算値である。)、図-3 に接合部表面のひび割れ状況を各々示す。図-3 のひび割れ図は、左側の図は、層間部材角 1/100 までに発生したひび割れを示し、黒線は、層間部材角 1/250 までに、青線と赤線は、層間部材角 1/250~1/100 の間に正載荷と負載荷で発生したひび割れを示す。また、右側の図の斜線部は、最終変形時のコンクリートの剥落を示す。全試験体は、最終変形まで柱、梁主筋は降伏しなかった。また、 $-mJ-0.25D$ 、 $-mJ-0.5D$ は負載荷で最初に最大荷重付近で接合部補強筋が降伏した。 $-mJ-D$ は正載荷で最初に最大荷重付近で接合部補強筋が降伏した。また、全試験体で最大荷重以降、接合部内のコンクリートの剥落がみられた。これらの結果から、破壊形式は、全試験体、接合部破壊型と判断した。 $-mJ-D$ の最大荷重は、正載荷では、靱性指針式によるト字形接合部終局強度式の値に近づき、負載荷ではそれより大きくなっている。その他の試験体では、正載荷の最大荷重が靱性指針式の段差の無い十字形接合部として扱った終局強度式の値より大きくなっている。

4. 接合部ひび割れ状況

$-mJ-0.25D$ は、接合部せん断ひび割れが中央部に 1 本生じた。接合部せん断ひび割れは、負載荷では最初に発生したせん断ひび割れが柱梁入隅部に向けて進展するとともに、最初に発生したせん断ひび割れの周りに並行したせん断ひび割れが多数発生し、最大荷重をむかえた。正載荷では、最初に発生したせん断ひび割れが柱方向に進展するとともに、接合部領域全体に斜めせん断ひび割れが多数発生した。

$-mJ-0.5D$ は、層間部材角 1/250 までに、接合部域上・下端を結ぶ斜めひび割れが負載荷で生じたが、 $-mJ-0.25D$ と異なり、接合部域中央の左右の梁主筋の定着板付近でそれぞれに 1 本の斜めひび割れが発生した。正載荷では、層間部材角 1/100 までに接合部域上部に斜めひび割れが発生し、最初に発生したひび割れが進展するとともに、接合部域全体にひび割れが発生した。

$-mJ-D$ は、層間部材角 1/250 までに、接合部せん断ひび割れが、正載荷では上部接合部に、負載荷では、下部接合部に見られた。最終変形までに、接合部せん断ひび割れは、正・負載荷で、左梁の取り付く上部接合部と右梁の取り付く下部接合部で 2 つのひび割れ領域で独立してみられた。尚、全試験体、定着板付近でのひび割れが

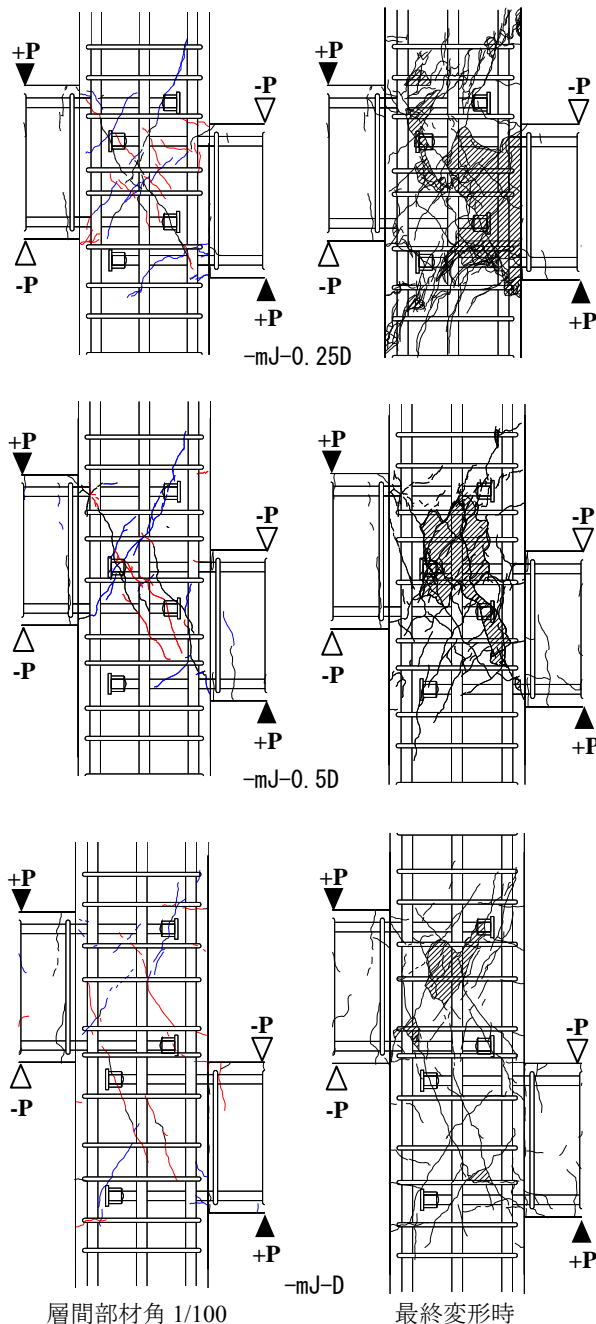


図-3 接合部域のひび割れ状況

多く見られた。

5. 接合部内部の損傷・破砕状況

各試験体の接合部内部の損傷状態の検討を行う為、図-4 に接合部内部の破砕状況を示す。写真は、加力終了後に各試験体接合部域で切り取った後、柱幅の中央の位置で柱せい方向に切断した面に蛍光塗料を塗布し、撮影したものである。尚、ピンク色がひび割れ、緑色が梁主筋を示す。

$-mJ-0.25D$ と $-mJ-0.5D$ は、左右の梁の梁主筋の間で囲まれた部分で損傷が見られる。特に、左右の梁の重なり合う接合部域の破砕が激しい。この現象は、以下によるものと思われる。図-5 に、正・負載荷での接合部域周

辺の作用応力を示す。

正載荷では、引張側梁主筋応力 ($B T_s$) は、梁主筋先端定着板周りが、梁及び柱接合部端のコンクリート圧縮応力により拘束されており、十分な定着力は、図られると思われる。一方、圧縮側梁主筋応力 ($B C_s$) は、接合部域のコンクリートにより抵抗される。従って、損傷が生ずるとすれば、左右の引張側梁主筋と、反対側梁の圧

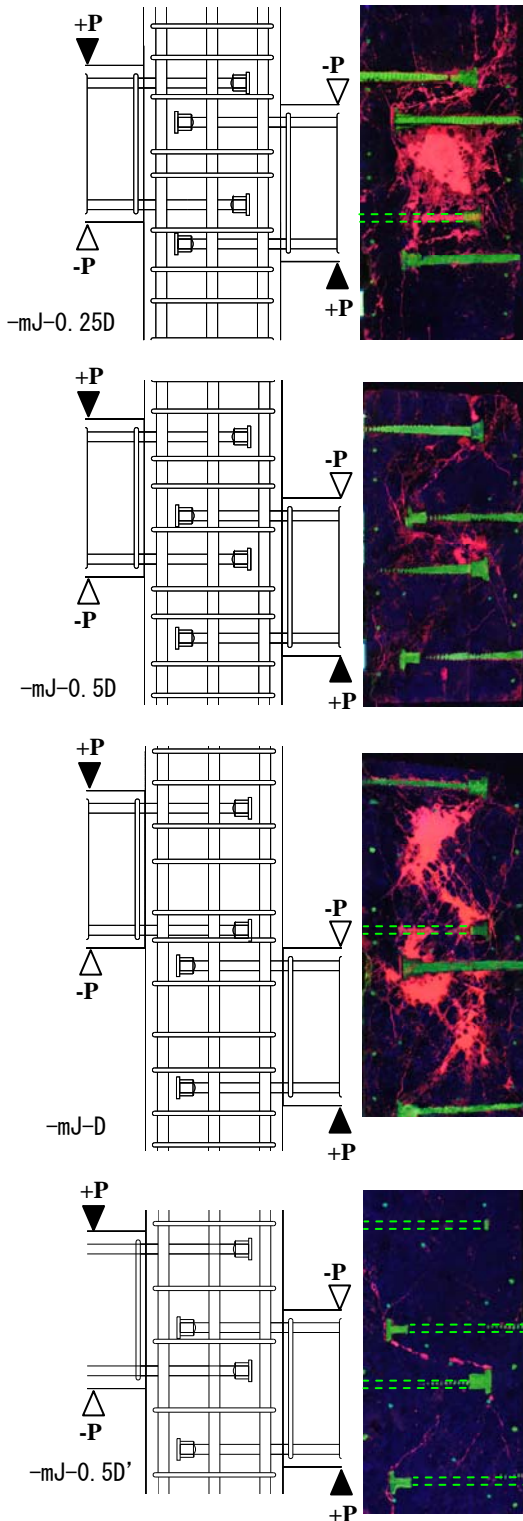


図-4 接合部内部の損傷・破砕状況

縮側梁主筋間に発生すると考えられる。

負載荷では、圧縮側梁主筋 ($B C_s$) は、接合部域のコンクリートに損傷を伴わずに伝達されると考えられるが、引張側梁主筋応力 ($B T_s$) は、左右の引張側梁主筋応力で囲まれた部分では、周辺のコンクリートからの拘束性が少ないことから、損傷が大きくなると考えられる。

-mJ-D は先の試験体とは異なり、左梁の取り付く接合部域上部と、右梁の取り付く接合部域下部で破砕が激しく、上部と下部で、独立して破壊が進行していた。また、左梁上端梁主筋定着板から左梁下部危険断面位置に向けたひび割れと、左梁下端梁主筋定着板から左梁上部危険断面位置に向けたひび割れが生じており、右梁が取り付く接合部域下部でも同様のひび割れがみられる。

-mJ-0.5D'は、他の試験体と載荷方法が異なり、最終変形まで載荷を行わなかった為、細かいひび割れ状況を把握することができる。他の試験体と同様に、全ての梁主筋の間で定着板同士を結ぶ方向のひび割れが見られる。

6. 各載荷方向の最大耐力時における接合部補強筋歪み

図-6に最大耐力時の接合部補強筋の歪みを示す。グラフの縦軸は歪ゲージ番号、横軸は最大耐力時の歪みを示す。黒抜が正載荷、白抜が負載荷となっている。

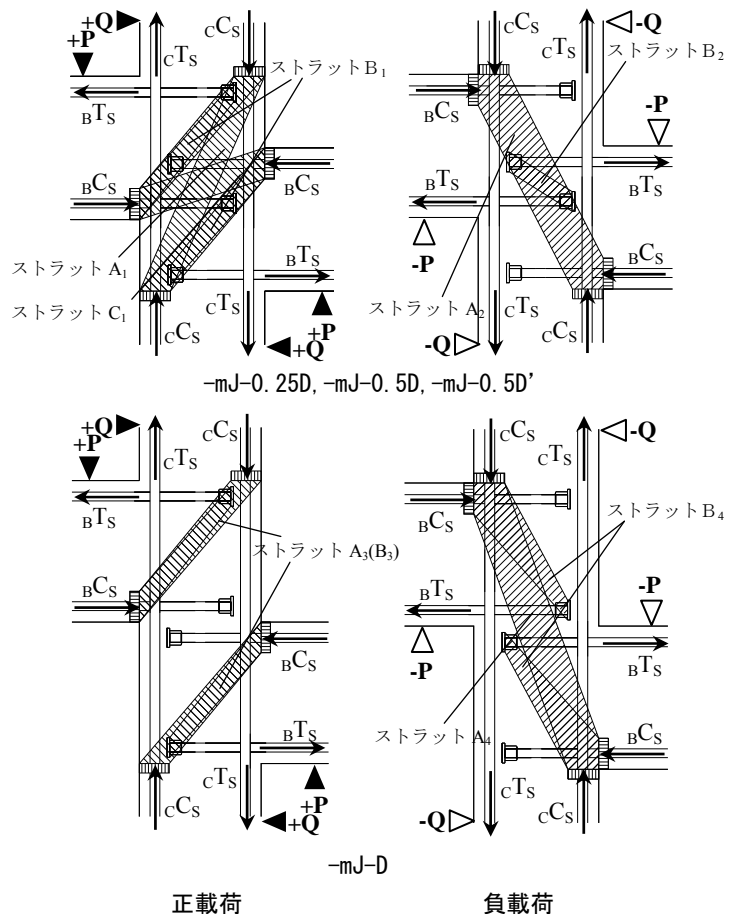
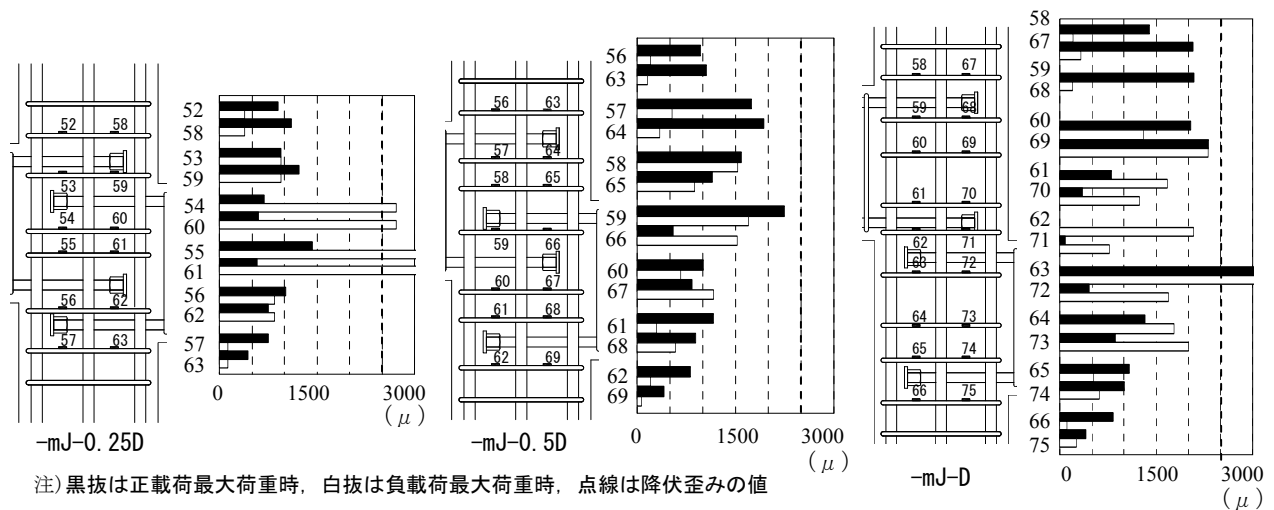


図-5 接合部抵抗機構



注) 黒抜は正載荷最大荷重時、白抜は負載荷最大荷重時、点線は降伏歪みの値

図-6 接合部補強筋の歪み分布図

-mJ-0.25D, -mJ-0.5D は、正載荷で、接合部全体で平均的に歪んでいる傾向が見られ、負載荷で、左右の梁が重なり合う接合部域で歪みが大きくなっている。このことは、「5. 接合部内部の損傷・破砕状況」で述べており、負載荷では左右の梁が重なり合う接合部域の損傷が進行していること、正載荷では接合部域全体に損傷が進行していることと対応している。

-mJ-D は、正載荷で、歪みゲージ番号 62, 71 番で歪みがほとんど見られず、接合部の上部、下部で独立して破壊が進行したと考えられる。一方、負載荷で、接合部中央部で歪みが進行していた。

7. 各試験体の定着板の支圧力の検討

各試験体の各載荷方向の定着板の支圧力と梁せん断力関係を図-7に示す。尚、各試験体で、左右の梁が同じ挙動を示した為、左梁主筋の歪みより求めた定着板の支圧力を示す。

正載荷では、全試験体で同荷重で同じ支圧力を示しているのに対して、負載荷では、-mJ-0.25D, -mJ-0.5D の支圧力がほぼ等しく、-mJ-D は、先の 2 体に比べ、支圧力が小さい。また、正載荷での 3 体の梁主筋の支圧力と、負載荷での -mJ-D の支圧力はほぼ等しいのに対して、負

載荷で -mJ-0.25D, -mJ-0.5D の支圧力は大きい。このことから、負載荷で -mJ-0.25D, -mJ-0.5D の定着板付近では、-mJ-D の正・負載荷時より、大きい支圧力が周辺コンクリートに伝達されている事がわかる。

8. 接合部終局強度に関する評価方法の検証

8.1 接合部抵抗機構の検討

図-5に、接合部域周りから作用する梁及び柱主筋応力と、コンクリート圧縮応力と共に、これらの応力から形成されると予想される抵抗機構である圧縮ストラットを示している。尚、図中の圧縮ストラット B_1 , B_2 , B_3 , B_4 は、梁主筋が接合部域から引抜かれる際に発生する定着板の支圧力によって構成される抵抗機構である。図より、-mJ-0.25D, -mJ-0.5D, -mJ-0.5D' と -mJ-D 並びに、正・負載荷方向で抵抗機構に違いがあることが分かる。

-mJ-0.25D, -mJ-0.5D, -mJ-0.5D' は、負載荷で、接合部域の上端と下端を結ぶ圧縮ストラットと、左右の梁が重なり合う領域にある 2 つの定着板を結ぶストラットがある。従って、最も圧縮応力が厳しいのは、2 つの定着板を結ぶストラット領域である。負載荷に比べて、正載荷では、圧縮ストラット抵抗機構が多数形成されるため、接合部域全体で応力伝達がなされている傾向がある。

-mJ-D は、正載荷では、接合部域上部と下部でト字形接合部の様に独立して挙動していることがうかがわれ、このことは、接合部域上部と下部の境界部の歪みゲージ (62, 71 番) の歪みが小さいことから予想できる。一方、負載荷では、主に、接合部域の上端と下端を結ぶストラット機構で、抵抗機構が形成されている。

8.2 接合部水平せん断力を用いた評価方法の検討

図-8に示すように、接合部水平せん断力 (V_j) と梁せん断力 (P) は比例関係にあり、各部分の接合部水平せん断力は、正・負載荷で同じ値である。図より、接合部内の領域によって水平せん断力が異なっているが、

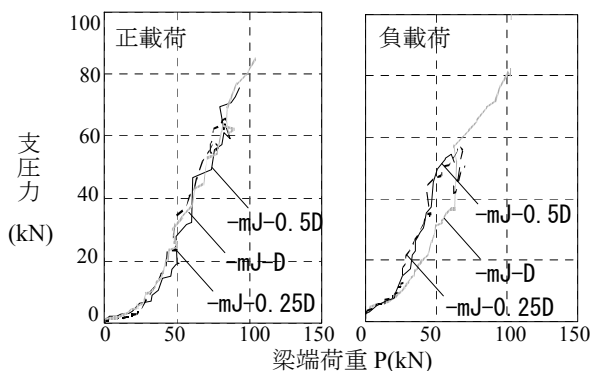
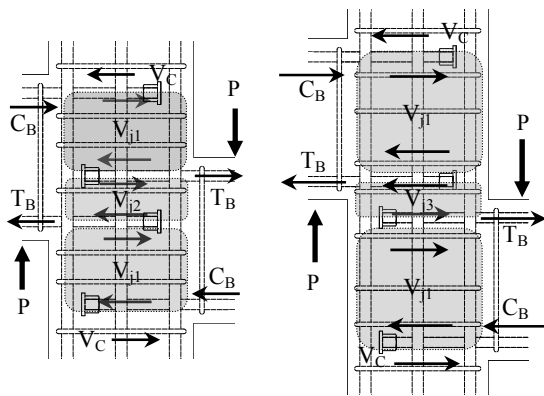


図-7 梁端荷重 (P) — 支圧力関係

-mJ-0.25D, -mJ-0.5D, -mJ-0.5D'では、左右の梁が重なり合う V_{j2} の領域で最も大きくなる。また、-mJ-D では、左右の梁の重なりがなく、 V_{j1} が V_{j3} より大きい。段差梁を有する接合部の評価を行う場合、最も大きい水平せん断力が入力される接合部域と 4 章・5 章で述べたせん断ひび割れの進展や、破砕の進行状況と対応していることから、最も大きい水平せん断力の部分で耐力を評価する必要があると考えられる。

表-4 に、最大荷重時の梁せん断力 (P) から求めた接合部水平せん断力 (V_j) と、靱性指針式から求めた接合部終局強度計算値 (V_{ju}) で除した値 (V_j/V_{ju}) を示す。

左右の梁の重なりが無い-mJ-D の実験値 (V_j) は、正載荷で概ねト字形接合部として取り扱って計算した値



-mJ-0.25D, -mJ-0.5D, -mJ-0.5D'

-mJ-D

$$V_{j1} = \frac{(L - D_c)}{2 \cdot j_B} \cdot P - \frac{L}{H} \cdot P = 3.69P \quad (1)$$

$$V_{j2} = \frac{(L - D_c)}{j_B} \cdot P - \frac{L}{H} \cdot P = 8.50P \quad (2)$$

$$V_{j3} = \frac{L}{H} \cdot P = 1.13P \quad (3)$$

P, V_C : 梁と柱のせん断力
 L, H : スパンと階高
 T_B, C_B : 梁付根の引張・圧縮力 ($T_B = C_B$)
 j_B, D_C : 梁応力中心間距離, 柱せい

図-8 各試験体の接合部せん断力

表-4 最大荷重時の水平せん断力と計算値の比較

		-mJ-0.25D	-mJ-0.5D	-mJ-D	-mJ-0.5D'
実験値	正	758.0	841.3	405.8	602.4
	負	616.1	552.0	490.8	414.3
計算値					
V_{ju} (kN)		677.9			513.9
V_j / V_{ju}	正	1.12	1.24	1.07	1.17
	負	0.91	0.81	1.29	0.81

注)-mJ-D の V_{ju} は接合部域上部と下部に分離されたト字形接合部 その他の V_{ju} は段差の無い十字形接合部として靱性指針より算出した。

(V_{ju}) に一致しているが、負載荷では、上回る結果となった。また、左右の梁が重なり合う領域を有する -mJ-0.25D, -mJ-0.5D の場合、正載荷での実験値は、計算値より大きい値となり、芯ずれ量が大きくなるにつれ上昇している傾向にある。一方、負載荷での実験値は、芯ずれ量が大きくなるにつれ小さくなっている。正載荷の実験値が、負載荷より大きいのは、図-5 に示した様に、正載荷には、負載荷より圧縮ストラット機構が多数形成されるため、接合部域の周りの応力が分散されて伝達されることに起因すると考えられる。

9. まとめ

- 1) 芯ずれ量が梁せい分ずれた試験体の最大荷重は、正載荷でト字形の靱性指針による計算値と概ね一致した。このことは、ト字形接合部の抵抗機構に対応していることを示している。
- 2) 芯ずれ量が梁せいより小さい試験体の場合、接合部ひび割れ状況、接合部内部の破砕状況並びに、梁主筋先端の定着板の支圧力の大きさから、最も大きい水平せん断力が入力される左右の梁が重なり合う領域で、接合部せん断力で接合部耐力を評価することが適切であると考えられる。
- 3) 芯ずれ量が梁せいより小さい試験体の場合、負載荷に比べて正載荷の最大荷重時の接合部水平せん断力が大きい。また、芯ずれ量が大きくなるに従い、正載荷では最大耐力が上昇するのに対して、負載荷では耐力が低下した。このことは、正載荷では、負載荷より圧縮ストラット機構が多数形成されるなどの影響によるものと考えられる。

謝辞 本研究は、平成 21 年度科学研究費補助金(研究代表者、上村智彦)により行ったもので、実験にあたり芝浦工業大学の大学院生、藤原将章氏、山下優恭君、卒論生、大山聡太君、長田優也君、高見太章君、千葉工業大学石橋研究室の卒論生の協力を得ました。また、実験に関する助言を竹中工務店(株)の石川裕次氏、資材の提供を東京鉄鋼(株)の松本重樹氏より得たことを記し、皆様方に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤原将章, 上村智彦ほか: 段差梁を有する鉄筋コンクリート造梁・柱接合部の終局強度, コンクリート工学年次論文報告集, pp.367-372, 2009.7
- 2) 日本建築総合研究所: 機械式鉄筋定着工法設計指針, 2006.1
- 3) 東京鉄鋼株式会社: プレートナット工法 設計施工指針, 2007.8