

論文 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

藤原 将章*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化させた段差梁接合部の実験を行い、段差による接合部終局強度への影響と、正負荷荷方向での接合部抵抗機構の違いを検討した。接合部破壊時の最大耐力は、左右の梁の芯ずれが大きくなるに従い上昇した。このことは、芯ずれ量によって変化するシアースパン比による影響であると考えられ、接合部終局強度時の接合部水平せん断力との相関性が見られた。負荷荷時の最大耐力が正載荷時より大きくなるのは、負荷荷時には、接合部ひび割れが分散していることから、複数の圧縮ストラットが形成され、接合部内で広範囲に力が伝達されていることが要因である。

キーワード：段差梁, 芯ずれ, 梁・柱接合部, 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¹⁾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。また、現在までに、段差梁を有する梁・柱接合部の力学的挙動に関する研究^{2), 3), 4), 5)}は数少なく、既に接合部耐力やせん断抵抗機構について検討を行っているが、未だ解明されるに至っていない。

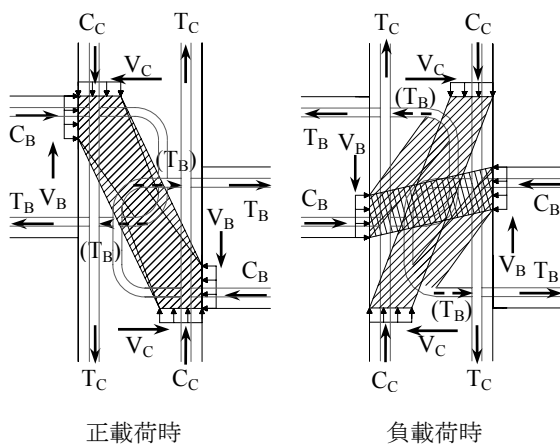
前報⁵⁾では、段差のある場合とそうでない場合の接合部破壊型試験体2体の比較から、段差のある場合、接合部終局強度が上昇することを確認すると共に、接合部終局強度の評価方法の検討を行った。

本研究では、筆者等の行った前報⁵⁾の結果を踏まえ、梁の芯ずれ量を変数とする試験体を増やし、前報で示した接合部終局強度の評価方法の検討を行う。また、図-1のように、正載荷と負載荷で接合部ストラット抵抗機構が異なることが予想される。載荷方向による接合部破壊状況の特徴を把握し、接合部抵抗機構について考察する。

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、寸法を図-2に示す。試験体は、左右の梁の芯ずれ量をパラメータとした4体である。-J-0は芯ずれ量の無い試験体、-J-0.25D、-J-0.5D、-J-Dは梁の芯ずれを100[mm]、200[mm]、400[mm]とした段差梁試験体である。-J-0の試験体は接合部破壊型を想定して設計した。梁芯ずれ量以外の鉄筋の種類、本数等は、全試験体共通である。尚、接合部域での梁主筋をU字型定着としたのは、既往の研究⁶⁾等により十分な定着性能が確保でき、理想的な配筋方法とされているためである。

加力は、負載荷方向の加力から始め、同一変位量の正載荷で繰り返す変位制御による正負交番繰り返し載荷(梁端荷重P)とした。負載荷で最初に最大耐力を経験



$\left[\begin{array}{l} T_c: \text{柱引張力} \quad C_c: \text{柱圧縮力} \quad V_c: \text{柱せん断力} \\ T_b: \text{梁引張力} \quad C_b: \text{梁圧縮力} \quad V_b: \text{梁せん断力} \end{array} \right]$

図-1 予想される接合部ストラット抵抗機構

表-1 試験体諸元

試験体名	-J-0	-J-0.25D	-J-0.5D	-J-D
梁芯ずれ[mm]	0	100	200	400
梁	主筋	4-D22(SD390)		
	補強筋	□-D10@150[mm](SD295)		
柱	主筋	8-D25(SD390)		
	補強筋	□-D10@100[mm](SD295)		
接合部	補強筋比	0.41[%]		

*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)

するよう計画した。尚、柱頭には一定圧縮軸力 564[kN] (軸力比: 0.2) を加えた。

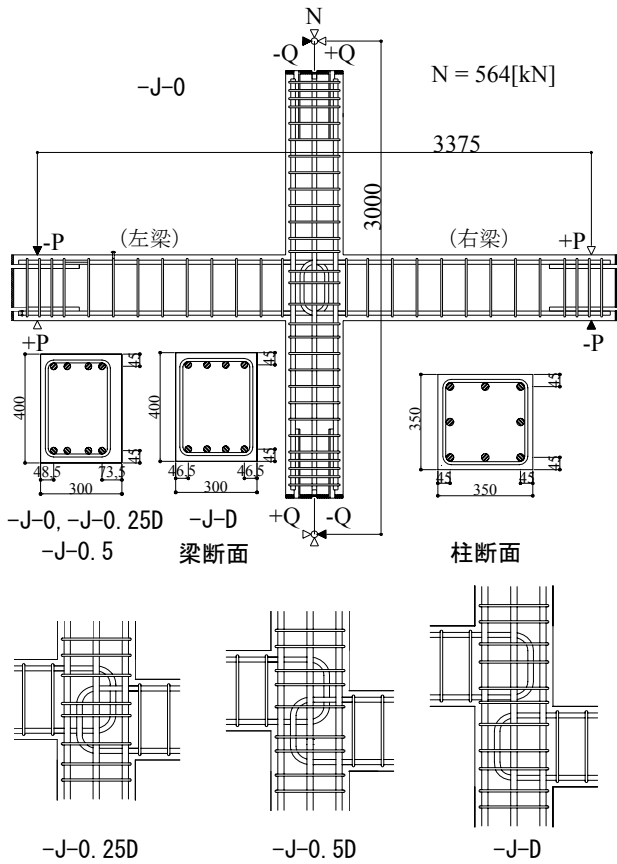


図-2 試験体の形状・寸法[mm]

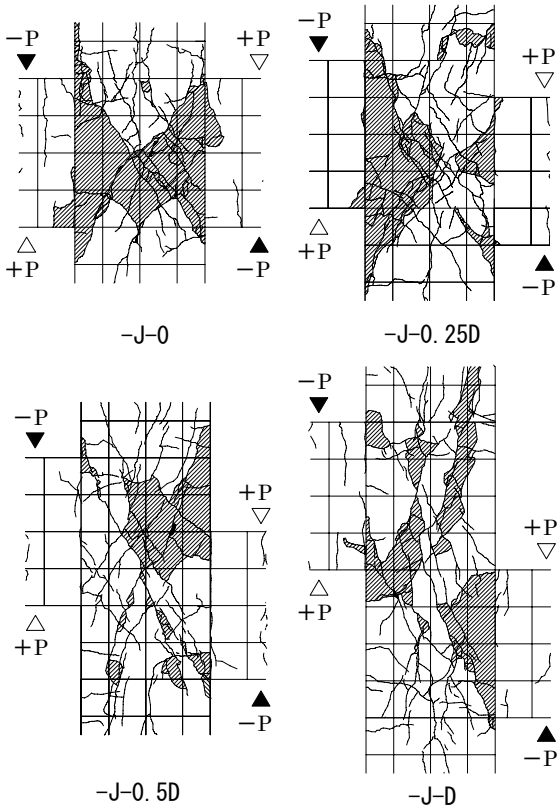


図-3 最終変形時のひび割れ状況

3. 破壊性状と破壊形式

図-3に全試験体の最終変形時のひび割れ状況、図-4に各試験体の梁端荷重(P)－層間変形角(R)曲線(図中の計算値は、表-3の各計算値である。)、表-3に諸現象発生荷重を各々示す。各試験体の最大耐力は、全て負荷重時となった。4体の試験体は、最終変形時まで柱、梁主筋は降伏せず、また、接合部内補強筋は最大耐力以降に降伏し、耐力低下が生じた。最大耐力以降、接合部

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]	408	430	446
ヤング係数[$\times 10^5$ MPa]	1.83	1.81	1.74
コンクリート圧縮強度[MPa]	$\sigma_B=23.0$		

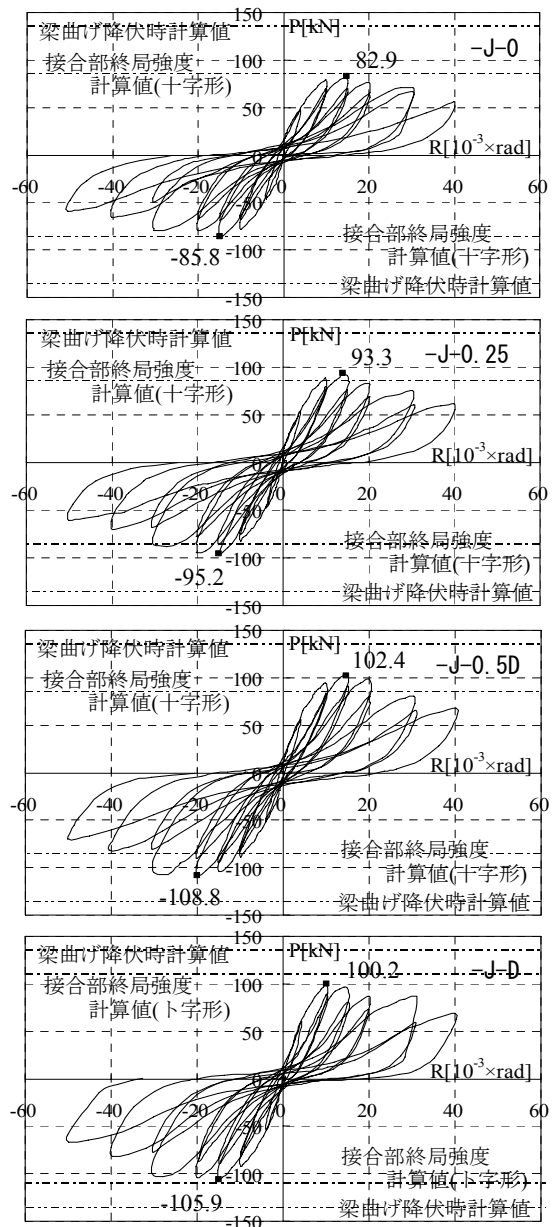


図-4 荷重(P)－層間変形角(R)曲線

表-3 諸現象発生荷重(梁せん断力 P[kN])

試験体	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*2	実験値	計算値*3	実験値	計算値	実験値
-J-0	-85.8	18.4	-14.8	135.0	降伏せず	39.2	-36.9	84.7 *4	-85.8
-J-0.25D	-95.2		-15.4	135.0	降伏せず	41.2	-58.1		-95.2
-J-0.5D	-108.8		-11.8	135.0	降伏せず	42.9	-25.9		-108.8
-J-D	-105.9		-13.8	135.0	降伏せず	46.8	-49.0	109.6 *5	-105.9

*1 $M_b = b\sigma_t \cdot Z_c$ $b\sigma_t = 0.56\sqrt{\sigma_B}$ *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⁾)
 *2 断面分割法による曲げ解析 *5 ト字形 $V_{ju} = \phi \cdot 1.13\sigma_B^{0.718} \cdot b_j \cdot D_c$ (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)-J-0.25D, -J-0.5Dの接合部計算値は十字形として算出した。

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

内のコンクリートの剥落が顕著であった。

これらの結果から、破壊形式は、-J-0, -J-0.25D, -J-0.5D, -J-D 全て接合部破壊型 (J型) と判断した。

全試験体、正載荷時でのひび割れは左梁接合部端上部より右梁接合部端下部に向けて発生しており、ストラット機構が形成されていることが予想出来る。

-J-0 は、図-3に示したように、正・負載荷時に接合部ひび割れは左右対称に発生している。

4. 載荷方向による破壊性状の相違

4.1 載荷方向による最大耐力の違い

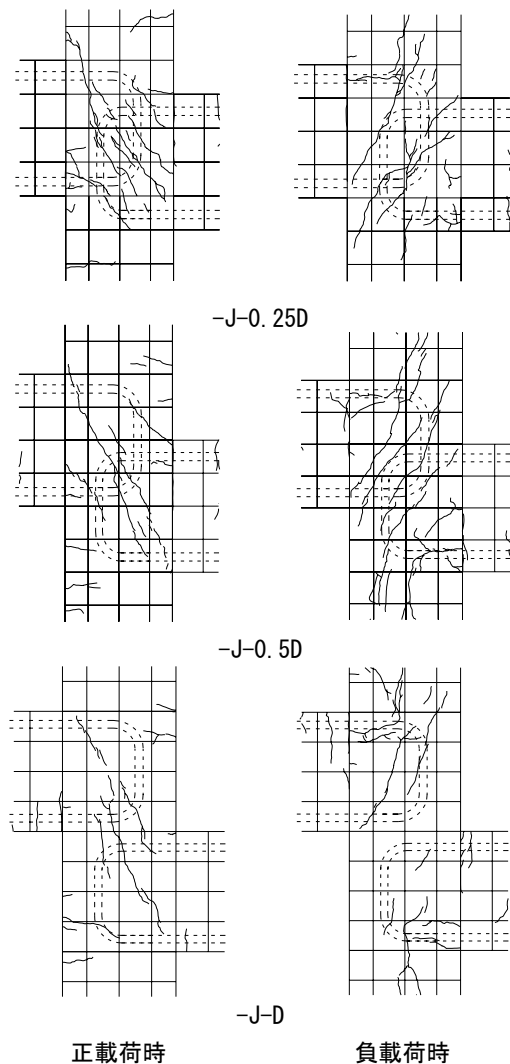
表-4に載荷方向の最大耐力を示す。一般的に、芯ずれのない試験体のような場合、正、負載荷時の最大耐力の大きさは、先行し最大耐力を経験した載荷時に大きい値を示す。本実験では、負荷重載荷の後に同一層間変位で正載荷を行う繰り返し変位制御載荷を行っている。

-J-0, -J-0.25D は、負載荷時の最大耐力を経験した後に正載荷時の最大耐力を経験した。しかしながら、-J-0.5D と-J-D では、加力計画とは異なり、正載荷時の最大耐力を経験した後に、大きい層間変位で負載荷時の最大耐力を経験した。この場合も正載荷時より負載荷時に大きな荷重となる結果となった。このことは、正載荷時と負載荷時での抵抗機構が異なることが要因と考えられ、段差があることにより、負載荷時の方が、正方向載荷より耐力が大きくなることを意味する。

表-4 載荷方向の最大耐力の違い (梁せん断力 P[kN])

試験体	先に最大耐力を経験した方向	負方向の最大耐力[kN]	正方向の最大耐力[kN]
-J-0	負方向	-85.8(0.015)	+82.9(0.015)
-J-0.25D	負方向	-95.2(0.015)	+93.3(0.015)
-J-0.5D	正方向	-108.8(0.02)	+102.4(0.015)
-J-D	正方向	-105.9(0.015)	+100.2(0.01)

※()内は層間変形角[rad]



※点線は梁主筋(U字型)を示す
 図-5 最大耐力時のひび割れ図

4.2 接合部ひび割れ状況の相違

図-5に芯ずれした試験体の各載荷方向の最大耐力時のひび割れ状況を示す。

-J-0.25D, -J-0.5D では、負荷荷時に、右側梁上端と下側柱の圧縮域、左側梁下端と上側柱の圧縮域を各々結ぶ斜めひび割れが発生すると共に、斜めひび割れが分散し、段差が大きくなるにつれて、ひび割れ方向は垂直方向となる傾向がある。ひび割れ発生状況は、概ね図-1の圧縮ストラットの形成状態を予測させる。

-J-D に関しては、負荷荷時に-J-0.25D と-J-0.5D の試験体同様のひび割れもみられるが、右梁上面部と左梁下面部の境界である接合部中心面に負荷荷時でのひび割れがなく、図-3にも示したように、最終変形時に、左側梁に接続した上部接合部部分と、右側梁に接続した下部接合部部分と、別々に挙動し、上部接合部と下部接合部で各々破壊が発生している傾向がみられる。-J-D では負荷荷時において、接合部上部・下部で別々のト字形接合部のような挙動を呈している。

4.3 各載荷方向の最大耐力時における接合部補強筋歪み

ここでは、-J-0.25D を例に挙げ、正・負荷荷それぞれの最大耐力時(±4 サイクル)の接合部補強筋歪みの大きさを図-6に示す。

正荷荷時においては、左右の梁が重なる接合部中央で歪みが大きくなっており、負荷荷時においては、左右の梁が重ならない上下接合部で歪みが大きくなっている傾向が見られる。このことより、正荷荷時には接合部中央の破壊が進行していること、負荷荷時には接合部中央および接合部上下端で破壊が進行していることがわかる。これらのことは、図-5の正・負荷荷時のひび割れの特徴と対応している。同様のことが、-J-0.5D についても、確認出来た。また、-J-D の接合部中心面で負荷荷時の歪みが、ほとんど見られなかったことからト字形接合部の挙動の特徴が見られた。

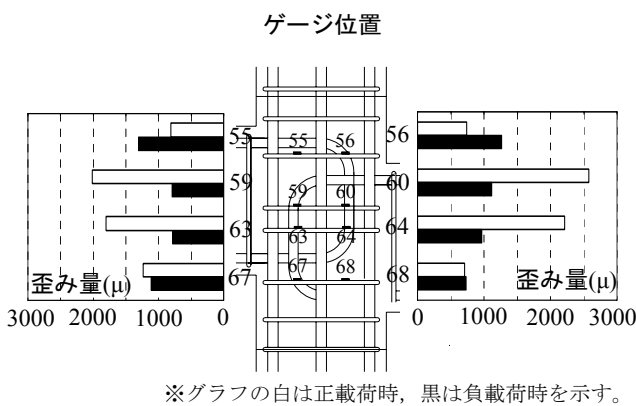


図-6 正・負荷荷時の最大耐力時の接合部補強筋歪み

4.4 同じ芯ずれ試験体における正荷荷時と負荷荷時の接合部終局強度の違いに関する考察

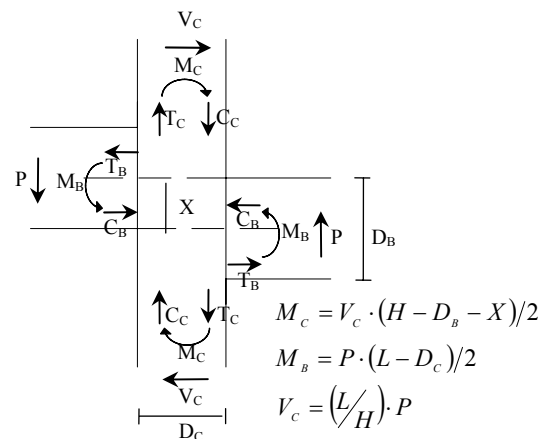
ここでは、J-0.25D, -J-0.5D 試験体について考察する。

正荷荷時と負荷荷時の接合部周辺の応力状態とストラット機構は図-1に、最大耐力時のひび割れ図は図-5に各々示されている。図-1に示すように、正荷荷時と負荷荷時ともに、圧縮ストラットが、接合部周りの梁・柱から入力される応力により形成されると考えられる。この傾向は、図-5の最大耐力時のひび割れ図からも推察される。

芯ずれをした試験体において、負荷荷時に、正荷荷時より2~6%程度大きい最大荷重を呈した要因は、正荷荷時でのひび割れは、左梁接合部端上部より右梁接合部下部に向かっており、図-1のように一本の圧縮ストラット機構が形成されているのに対し、一方、負荷荷時には、図-5のひび割れ図からも推測されるように、図-1のように複数の圧縮ストラット機構の応力伝達機構が可能であることによる。

5. 芯ずれ量が大きくなると最大耐力が上昇することについて

ここでは、3章に示したように、芯ずれ量が大きくなるにつれ、最大耐力が上昇したことについて考察する。図-7に接合部への作用応力を示す。芯ずれをした試験体において、同じ荷重時に、梁から接合部へ入力される接合部水平せん断力($V_j = T_B + C_B - V_C$)は、芯ずれ量の影響はないが、柱の反曲点と柱接合部端までの距離は、芯ずれ量が大きくなるに伴い小さくなるため、柱接合部端の曲げモーメント(M_C)が小さくなる(図-7参照)。結果として、柱から接合部へ入力される圧縮ストラットに作用する柱接合部端圧縮力(C_C)は、小さくなる。すなわち、全試験体、梁端荷重が同じ大きさの場合では、梁から入力される圧縮力(C_B)は同じだが、柱から入力される圧縮力(C_C)は芯ずれが大きくなるにつれ小さくなる。このことは、芯ずれが大きくなるにつれ、接合部



$\left[\begin{array}{l} L: \text{梁スパン長さ} \quad H: \text{柱高} \quad X: \text{芯ずれ量} \\ D_C: \text{柱せい} \quad D_B: \text{梁せい} \end{array} \right]$

図-7 接合部への作用応力

圧縮ストラットに作用する圧縮合力が小さくなることを意味する。従って、接合部コンクリートの圧壊に至るには、より大きな接合部水平せん断力を必要とし、その結果として最大耐力が上昇する。

6. 接合部終局強度に関する既往⁵⁾の評価方法の検証

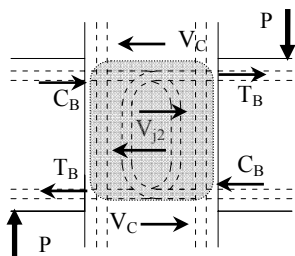
6.1 接合部パネルゾーン内の水平せん断力の変化

図-8に各試験体の接合部水平方向せん断力の大きさを示す。各試験体の接合部水平せん断力は梁せん断力(P)の変数によって表わす。

(1) -J-0 試験体

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

$$= 8.50P$$



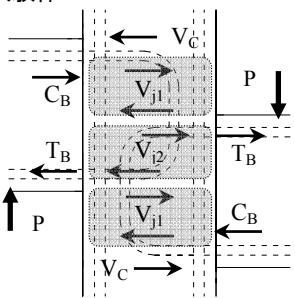
(2) -J-0.25D, -J-0.5D 試験体

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

$$= 3.69P$$

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

$$= 8.50P$$



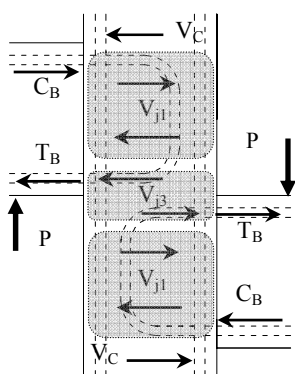
(3) -J-D 試験体

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

$$= 3.69P$$

$$V_{j3} = \frac{L}{H}P$$

$$= 1.13P$$



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

-J-0, -J-0.25D, -J-0.5Dの各試験体では、左右の梁が重なり合う V_{j2} の領域に最も大きな水平せん断力が作用する。また、同じ荷重時で考えた時、それらの試験体の V_{j2} は同じ値となる。-J-Dの試験体は、左右の梁の重なりが

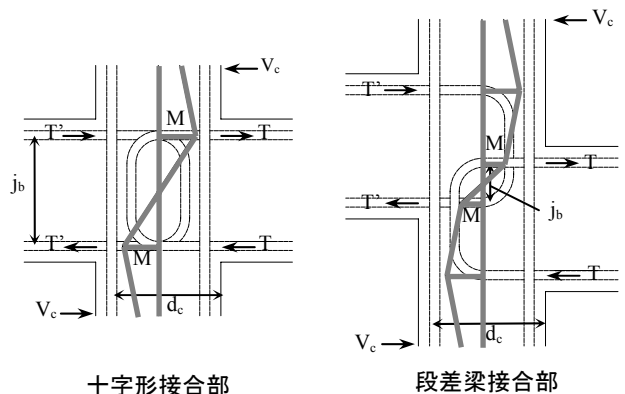
なく、 V_{j1} が V_{j3} より大きくなる。水平せん断力が大きい領域が前述の接合部破壊状況の進行と対応している。

6.2 各試験体の接合部終局強度時水平方向せん断力の比較

左右の梁が重なる接合部域を持つ-J-0, -J-0.25D, -J-0.5Dでは、前述のように、接合部水平方向せん断力 (V_{j2}) と、荷重 (梁せん断力) が同じ比例関係にあることから、実験時の最大耐力時の接合部水平方向せん断力は、前述の5章の結果を踏まえると、左右の梁の芯ずれが大きくなるに従って大きくなる。このことは、左右の梁の芯ずれが大きくなると、接合部終局水平せん断耐力が上昇する接合部抵抗機構となることを意味する。

この原因を、接合部水平せん断力 (V_{j2}) が作用する領域のせん断スパン長さが影響するものと考え、接合部終局せん断耐力を、シアースパン比 (M/Qd) との関係で考慮することとする。

接合部のシアースパン比の定義を図-9に示す。

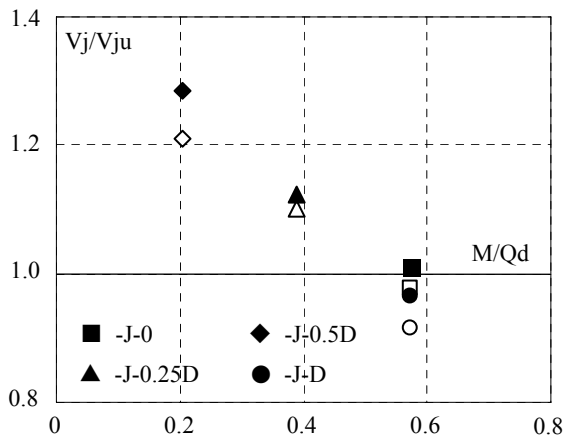


$$\left[\begin{array}{l} M/Qd = V_j a / V_j d = a/d \\ a: \text{せん断スパン} (=j_b/2) \quad j_b: \text{梁主筋間距離} \\ d: \text{有効せい} (=j_c) \quad j_c: \text{柱応力中心間距離} (=7/8 \cdot d_c) \end{array} \right.$$

図-9 シアースパン比の定義

図-10に、縦軸に接合部終局時のせん断力の実験値 (V_j) を靱性指針式による計算値 (V_{ju})¹⁾ で除した値をとり、シアースパン比 (M/Qd) との関係を示す。

図から分かるように、シアースパン比が小さくなると、接合部せん断耐力が上昇する傾向が見られる。シアースパン比が小さくなれば、シアースパン比が大きい場合に比べて、接合部せん断強度も上昇すると考えられる。靱性指針の接合部せん断強度式は、このようなシアースパン比による接合部せん断強度の変動について考慮されていない (表-5参照)。段差梁接合部のせん断耐力を左右の梁が重なり合う領域の接合部せん断力で評価でき、左右の梁の芯ずれとともに変化するシアースパン比によるせん断耐力への影響を考慮しなければならないことが確認できる。



※ 負荷荷時は黒塗り記号，正載荷時は白抜き記号

図-10 シアースパン比(M/Qd)-(V_j/V_{ju})関係

表-5 靱性指針式との比較

	-J-0		-J-0.25D		-J-0.5D		-J-D	
	V_{j2}	V_{j1}	V_{j2}	V_{j1}	V_{j2}	V_{j1}	V_{j2}	V_{j1}
V_j [kN]	729	351	810	402	925	391		
V_{ju} [kN]	720	404	720	404	720	404		
V_j/V_{ju}	1.01	0.87	1.12	0.99	1.28	0.97		

※-J-Dの V_{ju} はト字形接合部，その他の V_{ju} は十字形として算出した。

6.3 既往の段差梁試験体との接合部終局強度の比較

図-11に靱性指針式による計算値(V_{ju})に対する実験値(V_j)の比と，シアースパン比(M/Qd)との関係を示す。図中には本研究室で行った段差梁の実験⁵⁾と，過去に行われた段差梁の実験^{2),3),4)}のうち，接合部破壊(J型)した試験体を示した。靱性指針式から求めた接合部せん断力を十字型の接合部せん断力とするならば，左右の梁の芯ずれが大きくなることに相当するシアースパン比が小さい場合に，既往の資料の場合，最大耐力時の接合部せん断力が上昇する。

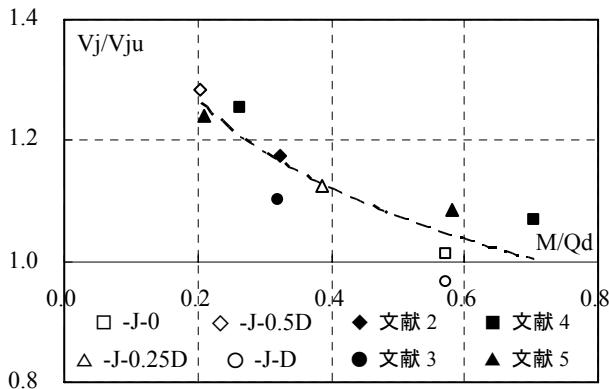


図-11 接合部終局強度の比較

7. まとめ

本研究より以下の知見が得られた。

- 1) 各試験体の接合部破壊時の最大耐力は，左右の梁の芯ずれが大きくなるに従い，上昇した。このことは，芯ずれによって変化するシアースパン比による影響であると考えられ，接合部水平せん断力との相関性が見られた。
- 2) 全試験体で，負荷荷時の最大耐力が正載荷時より大きくなった。これは，破壊性状から負荷荷時には接合部内で斜めひび割れが分散していることから，複数の圧縮ストラットによる応力伝達機構が形成され，接合部内で広範囲に力が伝達されたことが要因であることが考えられる。
- 3) 左右の梁の芯ずれが大きくなると，同じ荷重時において，柱付け根から入力されるコンクリート圧縮力が小さくなるので，接合部域に形成される斜め圧縮ストラットの応力度が小さくなり，結果として，最大耐力が上昇する。

謝辞 本研究は，平成20年度科学研究費補助金(基盤研究(C))(研究代表者，上村智彦)により行ったもので，東京工業大学の藤塚幹男氏，芝浦工業大学の平瀬智樹君，廣谷祐貴君，山下優恭君，並びに，千葉工業大学工学部建築都市環境学科の石橋研究室の卒論生の協力を得た。ここに，実験実施にあたり御協力頂いた皆様方に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 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，pp.255-258，1999.8
- 2) 中村雅彦ほか：高強度材料を用いた超高層RC造柱・はり部分骨組の水平加力実験(その2 段差梁骨組)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.869-870，1993.9
- 3) 鴨川直昌ほか：高強度材料を用いた超高層鉄筋コンクリート造柱梁接合部の実験的研究 その2. 柱梁接合部形状(段差梁接合部)の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.813-814，2000.9
- 4) 石飛英輝，大和田義正：段差梁を持つ鉄筋コンクリート柱梁接合部の終局強度に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.195-196，2001.9
- 5) 藤塚幹男，上村智彦ほか：段差梁を有する鉄筋コンクリート造梁・柱接合部の力学的挙動に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，pp.241-246，2007.7
- 6) 星野信夫ほか：RCはり・柱接合部のU字型着法に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1463-1464，1976.10