

論文 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

澤田 和宏^{*1}・藤塚 幹男^{*2}・石橋 一彦^{*3}・上村 智彦^{*4}

要旨：柱の左右の梁の軸芯ずれを変数とした段差梁接合部の実験を行い、段差梁を有する場合の接合部終局強度と接合部抵抗機構について検討したものである。左右の梁の軸芯がずれ、互いの梁芯が相互の断面内を通る場合のせん断耐力は軸芯ずれのない十字形に比べて上昇した。これは接合部の最もせん断力が大きくなる区間が小さいため、せん断耐力が上昇すると考えられる。また、梁主筋をU字型定着とした場合、折れ曲がり部での支圧力と接合部端コンクリート圧縮合力とで圧縮ストラットを形成していることを指摘した。

キーワード：段差梁、梁・柱接合部、U字型定着、接合部せん断耐力、ストラット機構

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造の構法では、梁に段差を設ける場合がある。しかし、現在までに、本研究で対象とする左右梁断面が同じで、段差梁となる梁・柱接合部の力学的挙動に関する研究は、大和田等¹⁾、鴨川等²⁾、中村等³⁾が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、不明な部分が多々ある。

梁・柱接合部を設計する際に用いられる靱性保証型耐震設計指針・同解説⁴⁾の接合部せん断強度式は、コンクリート強度と接合部形状及び直交梁の有無に関係した式となっている。しかしながら、この強度式では段差梁を有する場合の接合部耐力を評価することはできない。

本研究では、特に段差梁を有する場合の接合部終局強度の評価方法と接合部せん断抵抗機構について重点を置き、実験的検討を行った。

2. 実験概要

試験体は、3体(J-0, J-0.5D, J-2.5D)でパラメータは左右の梁の軸芯ずれとした。J-0は梁主筋を接合部内でU字型配筋とした十字形接合部試

験体、J-0.5Dは梁の軸芯ずれを200[mm]とした段差梁試験体、J-2.5Dは梁の軸芯ずれを1000[mm]としたト字形接合部試験体である。全試験体を接合部破壊型として設計した。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-1に示す。形状以外は、全試験体共通である。なお、梁主筋のU字型定着は、既往の研究⁵⁾等により十分な定着性能が確保できるとされている配筋方法である。

加力方法は、試験体の柱頭に一定圧縮軸力735[kN](軸力比:0.2)を与え、梁端に変位制御により正負交番繰返し荷重(P)を加えた。

3. 破壊性状と破壊形式

図-2に正荷重時の梁端荷重(P)ー層間変形角(R)包絡線を、図-3に最終変形時のひび割れ状況を、表-3に諸現象発生荷重を示す。

J-0とJ-0.5Dは、最大耐力時まで梁主筋は降伏しなかったが、接合部補強筋が降伏し、耐力低下を生じた。最大耐力以降、接合部ひび割れが顕著となりコンクリートの剥落が発生した。

J-2.5Dは、下部接合部で最大耐力時に梁主筋

*1 清水建設(株) 工修 (正会員)

*2 東京工業大学大学院 総合理工学研究科

*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)

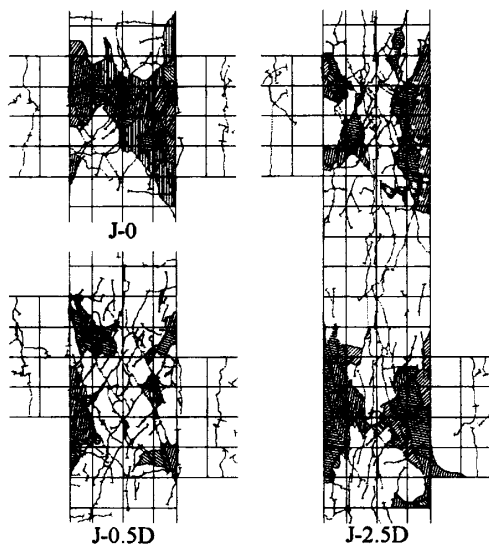
*4 芝浦工業大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

表－１ 試験体諸元

試験体名		J-0	J-0.5D	J-2.5D
梁軸芯ずれ[mm]		0	200	1000
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	0.39[%]	0.40[%]	0.39[%]

表－２ 材料特性

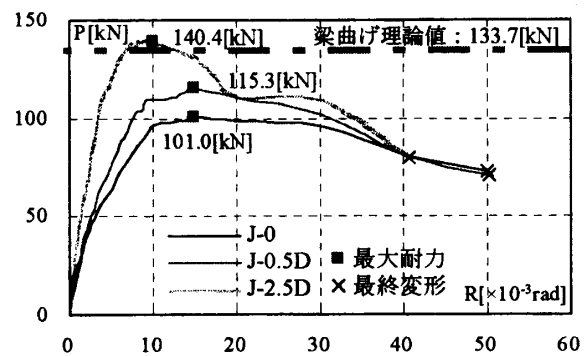
鉄筋種類	梁主筋	柱主筋	補強筋
	D22	D25	D10
降伏強度[MPa]	412	438	345
ヤング係数[$\times 10^5$ MPa]	1.64	1.68	1.66
コンクリート	圧縮強度[MPa]		$\sigma_B=26.5$
	ヤング係数[$\times 10^4$ MPa]		$E_c=2.677$
	最大荷重時歪み[%]		0.182



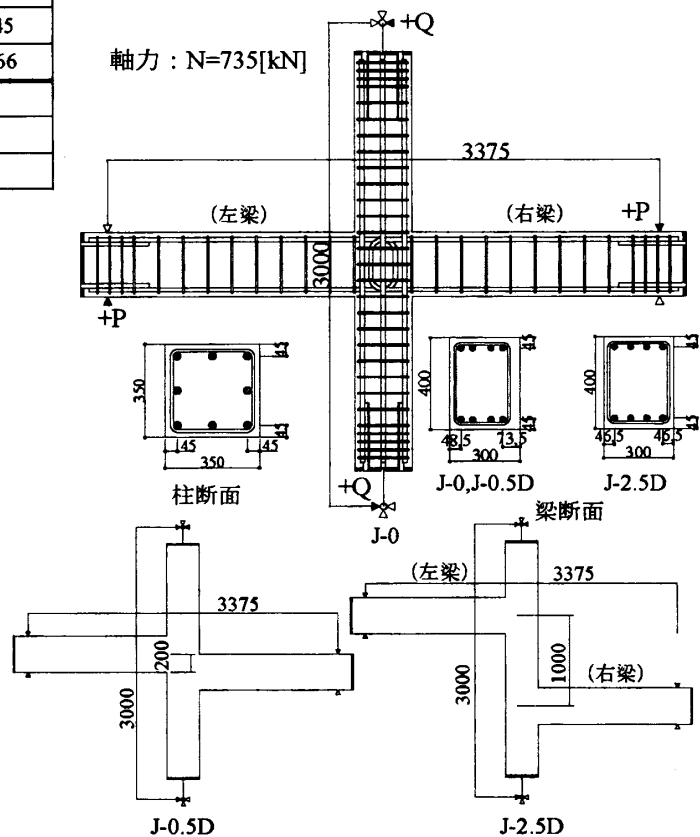
図－３ 最終変形時のひび割れ状況

と接合部補強筋がほぼ同時に降伏し、耐力低下を生じた。最大耐力以降、梁が降伏した下部接合部にひび割れが集中した。そこで、上部接合部の最大耐力を検証するために、左梁のみにせん断力を加え、それ以降は、左右の梁端に载荷した。上下接合部でひび割れの進展、幅の拡大が見られコンクリートの剥落が顕著に発生した。

これらの結果から、J-0 と J-0.5D は接合部破壊型(J 型)、J-2.5D は梁曲げ降伏後の接合部破壊型(BJ 型)と判断した。



図－２ 荷重(P)－層間変形角(R)包絡線



図－１ 試験体の形状・寸法[mm]

4. 接合部耐力に関する検討

4.1 接合部パネルゾーンの水平せん断力

図－４～６に各試験体の接合部周りの応力状態を示す。梁に段差を有する場合には、接合部に入力されるせん断力が一様にならず、領域によって入力されるせん断力が異なると考えられる。そこで、各試験体の接合部せん断力(V_j)を最大耐力から算出するときの方法を以下に示す。

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			
		主筋降伏		曲げひび割れ		せん断ひび割れ		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	101.0	133.7	—	50.6	55.8	55.6	55.8	92.4 *4	101.0
J-0.5D	115.3		—	54.8	55.3	55.6	52.5	92.4 *4	115.3
J-2.5D	140.4		137.6	82.2	86.6	95.9	86.6	120.2 *5	140.4

表中の*1～*5の説明を以下に示す。

*1 断面分割法による曲げ解析

*2 $M_c = (c\sigma_t + \sigma_0) \cdot Z_n$ $c\sigma_t = 1.8\sqrt{\sigma_B}$

*3 $V_j = j_c \cdot b_c \sqrt{c\sigma_t^2 + c\sigma_t \cdot \sigma_0}$
主応力説: $c\sigma_t = 1.3\sqrt{\sigma_B}$

*4 十字形 $V_{ju} = 1.56\sigma_B^{0.712} \cdot b_j \cdot D_c$ (靱性指針式⁴⁾)

*5 ト字形 $V_{ju} = 1.13\sigma_B^{0.718} \cdot b_j \cdot D_c$ (靱性指針式⁴⁾)

注) J-0.5D の接合部計算値は十字形として算出した

(*2～*5 は, kgf 単位を使用)

σ_0 : 軸応力度

Z_n : 断面係数

b_j : 接合部有効幅

j_b, j_c : 梁, 柱応力中心間距離

M_c : 柱曲げひび割れモーメント

$b_c D_c$: 柱幅とせい

V_j : 接合部せん断力

(1) J-0 試験体

J-0 の接合部せん断力(V_{j1})は, 左右の梁から入力される力から求める。

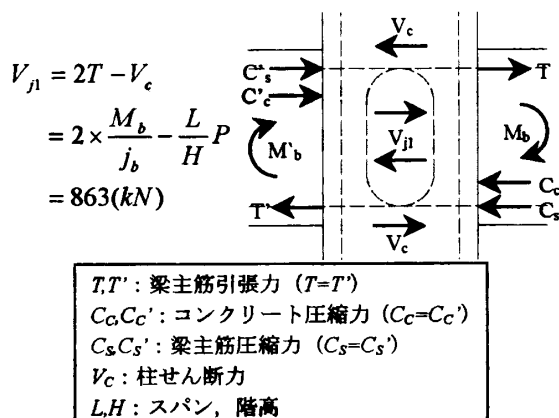


図-4 接合部せん断力 (J-0)

(3) J-2.5D 試験体

J-2.5D のように短柱を形成する場合には, 上下の接合部はト形接合部と同じ応力状態になると考えられる

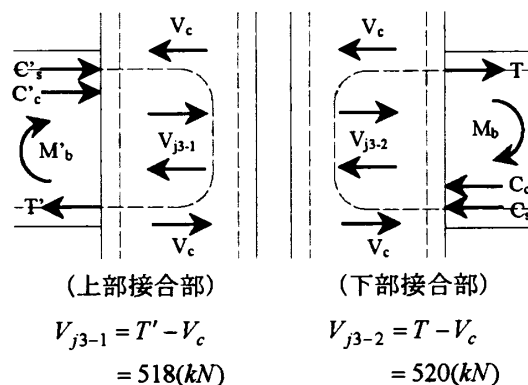


図-6 接合部せん断力 (J-2.5D)

(2) J-0.5D 試験体

J-0.5D の接合部せん断力は, 左右の梁から力が作用する領域(V_{j2-2})と, 一方のみから力が作用する領域($V_{j2-1,3}$)に分けられ, 領域に入力されるせん断力は異なる。

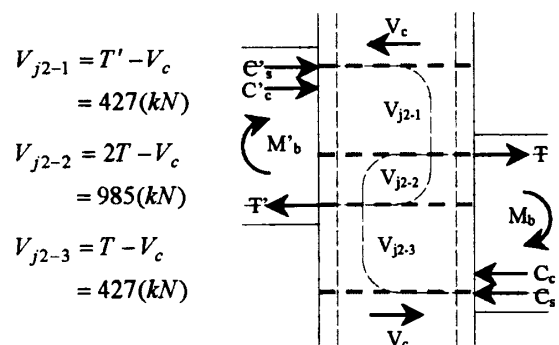


図-5 接合部せん断力 (J-0.5D)

4.2 接合部せん断強度式による評価

前節で求めた実験値(V_j)と靱性指針式による計算値(V_{ju})と共に表-4に示す。

接合部破壊の J-0・J-2.5D は, 実験値と計算値はほぼ同じである。J-0.5D の実験値 V_{j2-2} は, J-0 の実験値 V_{j1} を上回った。これは, 段差梁接合部は, 十字形接合部よりも耐力が上昇することを示している。従って, 段差梁接合部では, 最も大きなせん断力が作用する V_{j2-2} の領域で接合部耐力を評価する必要がある。文献 6)で鉄骨造ではあるが同様の知見が示されている。

表-4 靱性指針式との比較

	J-0	J-0.5D			J-2.5D
	V_j	V_{j2-1}	V_{j2-2}	V_{j2-3}	$V_{j3-1,2}$
$V_j(\text{kN})$	863	427	985	427	520
$V_{ju}(\text{kN})$	937	527	937	527	527
V_j/V_{ju}	0.92	0.81	1.05	0.81	0.99

注) V_{j2-1} , V_{j2-3} の V_{ju} はト字形接合部, V_{j2-2} の V_{ju} は十字形として算出した値を示す。

4.3 シアースパン比による影響

図-7の縦軸に接合部せん断力の実験値を靱性指針式による計算値で除した値をとり, シアースパン比との関係を示す。図中には本研究室で行ったアスペクト比(梁せい/柱せい)をパラメータとした実験結果⁷⁾と過去に行われた段差梁の実験結果^{1),2),3)}を共に示す。また, シアースパン比の定義を図-8に示す。

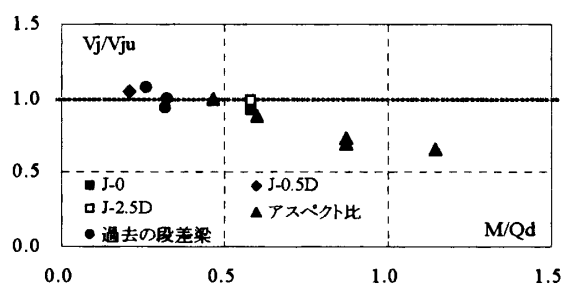
図-7 V_j/V_{ju} -シアースパン比関係

図-7から, シアースパン比が小さくなると, せん断耐力が上昇する。逆にシアースパン比が大きくなると, V_j/V_{ju} が1を下回り危険側の評価となる。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耐力変動を考慮し

ていない。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するならば耐力の上昇度を, アスペクト比とシアースパン比が大きくなるような場合は, 耐力低下を考慮しなければならない。

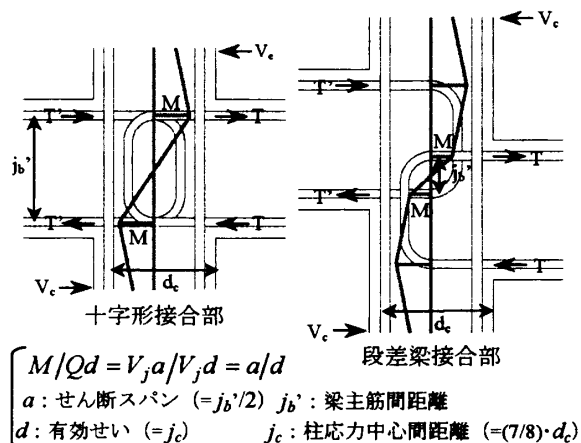


図-8 シアースパン比の定義

5. 接合部せん断抵抗機構に関する検討

5.1 ストラット圧縮合力とストラット方向

文献 2),3)とは, 定着方法が異なることを踏まえ, 接合部への作用外力がストラット機構によって伝達され则认为, 実験により測定した梁と柱の主筋の歪みから, 接合部圧縮ストラットの応力状態について検討を行う。各成分の算出方法を図-9に, 各試験体の最大耐力時接合部圧縮ストラット関連の各値を表-5に示す。また, 図-10に接合部端のコンクリート圧縮域の形状から算出したストラット方向(θ_s)とストラット圧縮合力方向(θ_{sr})を示す。

J-0の接合部端のコンクリート圧縮域の形状が

表-5 接合部ストラット成分の各値

試験体名		$a_b[\text{mm}]$	$a_c[\text{mm}]$	$C_H[\text{kN}]$	$C_V[\text{kN}]$	$C_S[\text{kN}]$	$\theta_s[\text{rad}]$	$\theta_{sr}[\text{rad}]$
J-0	右梁	42.6	99.0	256	700	745.5	0.95	1.22
	左梁	57.8	98.8	327	707	778.5		1.14
J-0.5D	右梁	49.3	93.8	251	651	698	1.13	1.20
	左梁	73.7	93.1	377	650	751		1.05
J-2.5D	上部	64.1	上	85.5	上	560	0.94	1.02
			下		下	637		
	下部	98.1	上	88.9	上	701		0.87
			下		下	644		

注) 表中の記号については, 図-9, 10 参照

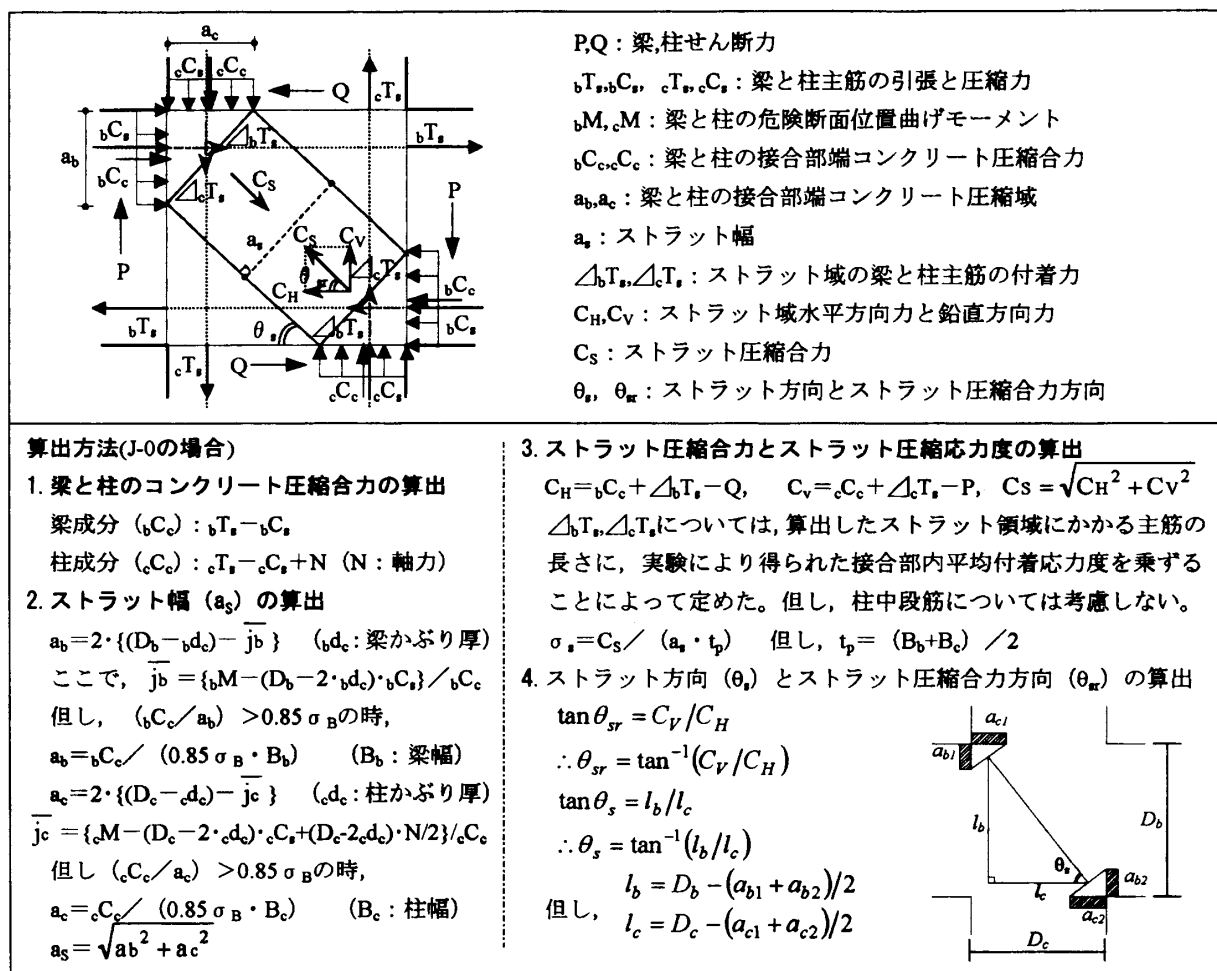


図-9 ストラット機構と構成成分の算出方法

ら算出した角度(θ_s)とストラット合力の角度(θ_{sr})は一致しなかった。ストラット合力の角度(θ_{sr})から, ストラット合力方向は, 梁主筋の折れ曲がり部に向かっていると考えられる。J-0は, 十字形接合部であるが, 配筋がU字型定着であることから, 接合部端からの圧縮合力は梁主筋の折れ曲がり部での支圧力と釣り合っていると思われる。J-0.5D・J-2.5Dも同様に, 接合部端コンクリート圧縮域から梁主筋の折れ曲がり部に向かって, 主たるストラットを形成している。

5.2 ストラット圧縮合力と支圧力との釣り合い

表-6に支圧力(T_d)とストラット合力方向のストラット幅(a_s)及び圧縮ストラット応力度(σ_s)を示す。支圧力(T_d)の算出方法⁸⁾を図-11に示す。

梁からの支圧力はストラット圧縮合力の約80~90%を占めていることが分かる。残りのスト

ラット合力は, それぞれの対角線方向のコンクリート圧縮域で負担していると考えられるが,

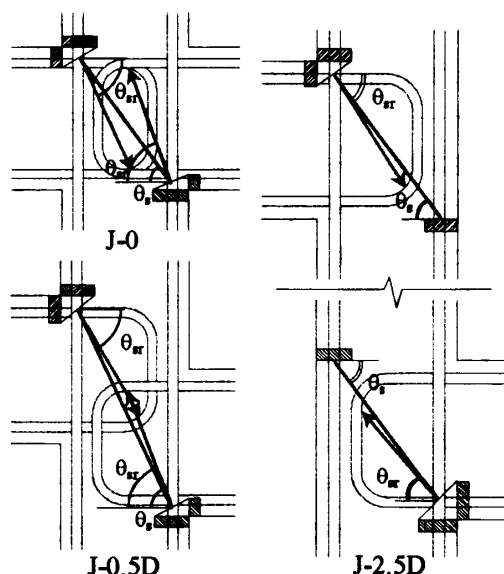


図-10 ストラット方向と圧縮合力方向

表-6 支圧力とストラット圧縮応力度

試験体名		T[kN]	T _d [kN]	C _s [kN]	T _d /C _s	a _s [mm]	σ _s [MPa]
J-0	右梁	335	568	746	0.76	108	21.3
	左梁	383	641	779	0.82	114	21.0
J-0.5D	右梁	360	602	698	0.86	105	20.4
	左梁	443	723	751	0.96	118	19.7
J-2.5D	上部	504	722	655	1.10	106	19.0
	下部	638	907	840	1.08	125	20.7

注) 表中の記号については、図-9, 11 参照

支圧力による釣り合いが支配的であると言える。また、各試験体共に最大耐力時にストラット圧縮応力度がひび割れにより圧縮強度が低下することを考慮した有効圧縮($\nu\sigma_B=18.2[\text{MPa}]$)⁹⁾に達しており、接合部は圧壊していると考えられる。

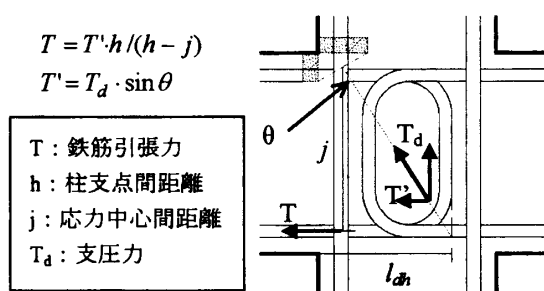


図-11 支圧力の算出方法

6. まとめ

- 1) 段差梁接合部のせん断耐力は十字形に比べて上昇し、最もせん断力が大きくなる領域で評価する必要がある。
- 2) シアースパン比が変化する場合は接合部耐力を靱性指針式では評価できない。
- 3) 梁主筋を接合部で U 字型定着とした場合、主に、折れ曲がり部での支圧力と接合部端コンクリート圧縮合力間で釣り合いを形成する。

参考文献

- 1) 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

- 2) 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針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
- 3) 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
- 4) 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.243-249, 1999.8
- 5) 星野信夫ほか: RC はり・柱接合部の U 字型定着法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1463-1464, 1976.10
- 6) 平野道勝ほか: 段差を有する柱はり接合部の力学的性状に関する実験報告, 日本建築学会構造系論文報告集, pp.27-35, 1991.7
- 7) 田中信也, 上村智彦ほか: 鉄筋コンクリート造内部梁・柱接合部の破壊性状への接合部アスペクト比の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.2, pp.433-438, 2004.7
- 8) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, pp.163-166, 1990.11
- 9) 長沼一洋ほか: ひび割れたコンクリートの圧縮特性に関する研究, JCI コロキウム「RC 構造のせん断設計法に関する解析的研究」論文集, pp.23-30, 1989.10