

論文 多段配筋梁の付着割裂破壊に関する実験

高見 信嗣^{*1}・江戸 宏彰^{*2}

要旨：多段配筋された鉄筋コンクリート造梁の付着割裂破壊実験を行なった。試験体の主筋段数を主なパラメータにして、1段から5段まで変化させた実験の結果、付着割裂破壊は、主筋段数に関係なく最も内側段の主筋位置で起き、いずれもサイドスプリット型となること、主筋段数が増えるほど最も内側段の主筋の付着割裂強度は低下することがわかった。一方、部材の付着割裂耐力は、主筋段数が増えるほど上昇する傾向にあるが、主筋段数が増えるほど耐力の上昇が鈍化することがわかった。そして、実験から得られた知見を用いて、多段配筋梁の一般化された内側段主筋の付着割裂強度式を導いた。

キーワード：付着割裂強度、多段配筋、耐力

1. はじめに

筆者らは鉄筋コンクリート造のメガストラクチャーの開発を行っており、既にメガ架構により構成される超高層建物を提案¹⁾したが、そのメガ架構の梁（メガ梁）は5段配筋を想定している。一方、梁部材で主筋が2段配筋された既往の実験^{2), 3)}によると、その内側段主筋の付着割裂強度が外側段主筋よりもかなり低下する場合があります、2段目主筋での付着割裂破壊が生じる場合があることが指摘されている。日本建築学会刊行の「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針（案）・同解説」⁴⁾では、この強度低下を考慮した2段目主筋の付着割裂強度の設計法が示されているが、3段配筋以上となる場合は、その設計法はなく、付着割裂破壊を起こした実験例もほとんどない。1段目主筋より2段目主筋の付着強度が低下することより、3段目以上の主筋ではさらに低下する可能性があるため、付着割裂破壊を想定した多段配筋梁の曲げせん断実験を実施し、その性状を確認することとした。

2. 実験計画

試験体一覧を表1に、試験体形状・配筋およびゲージ位置の一例を図1に示す。試験体は、

表1 試験体一覧

No.	主筋		肋筋配筋	備考
	配筋	材種		
1	1段	高強度 (焼入れ)	2-D6@60	共通事項： 主筋D25 Fc=60 (N/mm ²) 肋筋σ _{wy} =700 (N/mm ²) 梁長さL=2600mm 断面b×D=200×650mm *主筋位置がNo.1と異なる
2	2段			
3	3段			
4	4段			
5	5段			
6	1段*			
7	3段		2-D6@30	

断面の幅200mm、せい650mm、クリア長さが2600mmでせん断スパン比が2.0となる。No.1～No.5は主筋段数が順に1段から5段の配筋となる。No.6は1段配筋であるが、その位置が内側に入り、No.2の2段筋位置と同じとなる。これらの肋筋はD6@60の外周筋のみ(p_w=0.53%)である。No.7は3段配筋であるが、肋筋はD6@30(p_w=1.07%)となる。いずれも主筋にはD25を使用しているが、曲げ降伏を起こさないように焼入れ処理を施し、付着割裂破壊を指向した。肋筋は共通でSD685を用いた。コンクリートは、超高層建物のメガ梁を想定して高強度コンクリートを用い、打設は通常の打設方向である上端主筋側から打設した。材料試験結果を表2に示す。

加力は、建研式加力装置を用い、上下スタブを平行に維持させながら正負の繰り返し変形を加

*1 大林組技術研究所 構造第三研究室 研究員 (正会員)

*2 大林組技術研究所 構造第三研究室 室長 博 (工) (正会員)

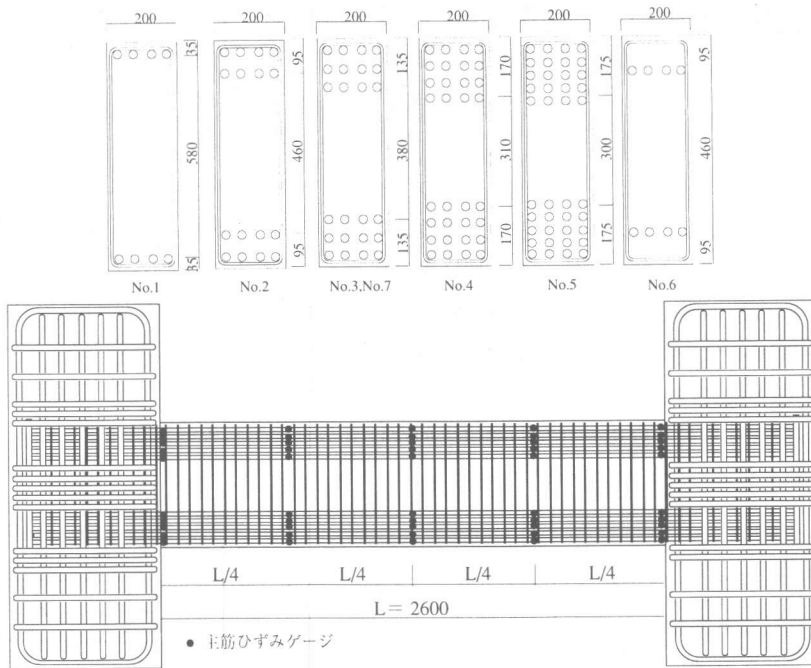


図1 試験体形状・配筋およびゲージ位置

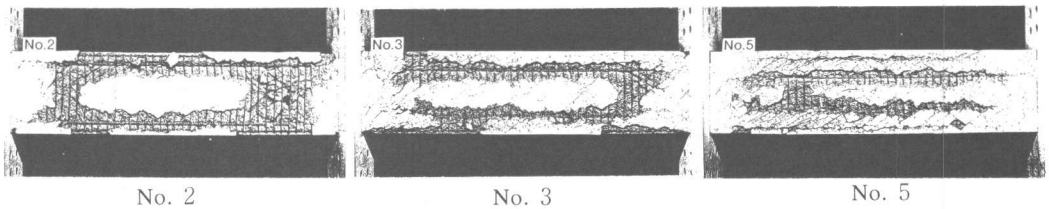


図2 破壊写真の一例

えた。なお軸力は加えていないが、試験体の材軸が鉛直になるように立てたため、加力装置と上スタブからの重力により約100kNの圧縮力が梁断面に加わっている。

3. 実験結果

3.1 破壊モードと耐力・変形性状

実験結果一覧を表3に、破壊写真の一例を図2に、荷重一部材角関係を図3に示す。全試験体ともに付着割裂破壊した。付着割裂ひび割れは、主筋段数に関わらず、上端側の最も内側段の主筋（以後、内側段主筋）位置から先行して起き、その後、下端の内側段主筋位置や外側の段の主筋位置にも発生していた。また、1段配筋の場合では、曲げひび割れが先に起きるが、主筋段数が多い試験体ほどせん断ひび割れや付着ひび割れ

表2 材料試験結果

コンクリート	σ_B (N/mm ²)	σ_t (N/mm ²)	ϵ_B (μ)	$E_c \times 10^3$ (N/mm ²)
No.1~No.4	68.4	4.09	3090	33.5
No.5~No.7	73.7	3.77	3120	35.0
鉄筋	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	ϵ_y (μ)	$E_s \times 10^3$ (N/mm ²)
D25	965	1060	7050	187
D6	745	949	5750	195

が先行する傾向となる。付着割裂破壊は内側段主筋位置で起き、いずれもサイドスプリット型であった。割裂部のコンクリートは、主筋方向にこすれるようにして圧壊しており、この圧壊の発生と同時に荷重の上昇が鈍化し始め、その後の繰り返し荷重により履歴形状がスリップ形となる。主筋の曲げ降伏は最後まで生じず、部材としての耐力も付着割裂破壊で定まった。

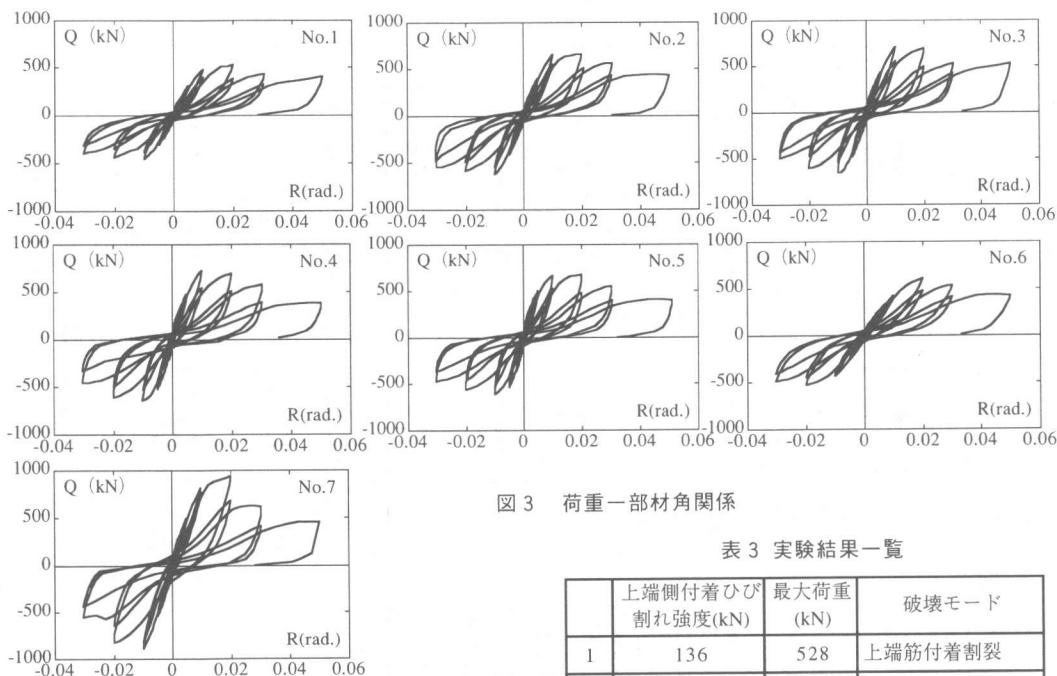


図3 荷重一部材角関係

表3 実験結果一覧

	上端側付着ひび割れ強度(kN)	最大荷重(kN)	破壊モード
1	136	528	上端筋付着割裂
2	197	662	上端2段筋付着割裂
3	196	704	上端3段筋付着割裂
4	235	722	上端4段筋付着割裂
5	226	672	上端5段筋付着割裂
6	109	608	上端筋付着割裂
7	315	934	上端3段筋付着割裂

3.2 最大荷重

図4に最大荷重の比較を示す。No.1からNo.5で比較すると、主筋段数の増加に対して4段配筋までは耐力が上昇している。これは主筋段数が多くなるほど、主筋合計の付着力が増大し、それに応じてせん断抵抗として作用するトラス機構せん断力が大きくなるためと考えられる。しかし、主筋段数が増えるほど耐力の上昇は鈍化する。これは主筋段数が多くなるほど、内側段の主筋の付着強度が低下する(図6、図8参照)ため、合計の付着力が頭打ち傾向となることが主因と推測される。また、5段配筋になると3段配筋や4段配筋の試験体より最大荷重が低くなる結果となった。これはNo.5は各段主筋間の距離がかなり接近しており、集合鉄筋における有効周長の減少と同様な現象が起きて、合計の付着力が低下した可能性も考えられる。No.7はNo.3より高く、横補強筋量を増やした効果が確認できる。またNo.6はNo.1より高く、主筋を内側に入れた方が耐力が上がる結果となった。

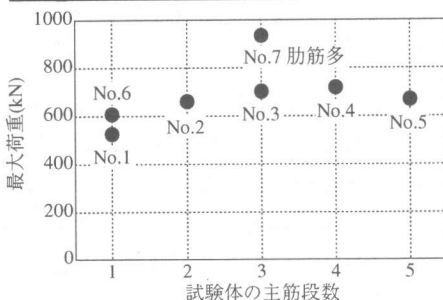


図4 最大荷重の比較

3.3 主筋の付着応力度

図5に正サイクル・ピーク時上端内側段コーナー主筋のL/4区間(L:全長)ごとの付着応力

度の一例を、付着力の向きが荷重に対して順方向の時に、正になるように示す。No.1やNo.2の内側段主筋は、加力方向と順方向に付着力が発生しているが、No.3やNo.5ではC区間やD区間で逆向きの付着力が発生していた。この傾向はNo.4でも起きており、多段配筋時のひとつの特徴と考えられる。

次に、正サイクル時に付着の向きが常に順方

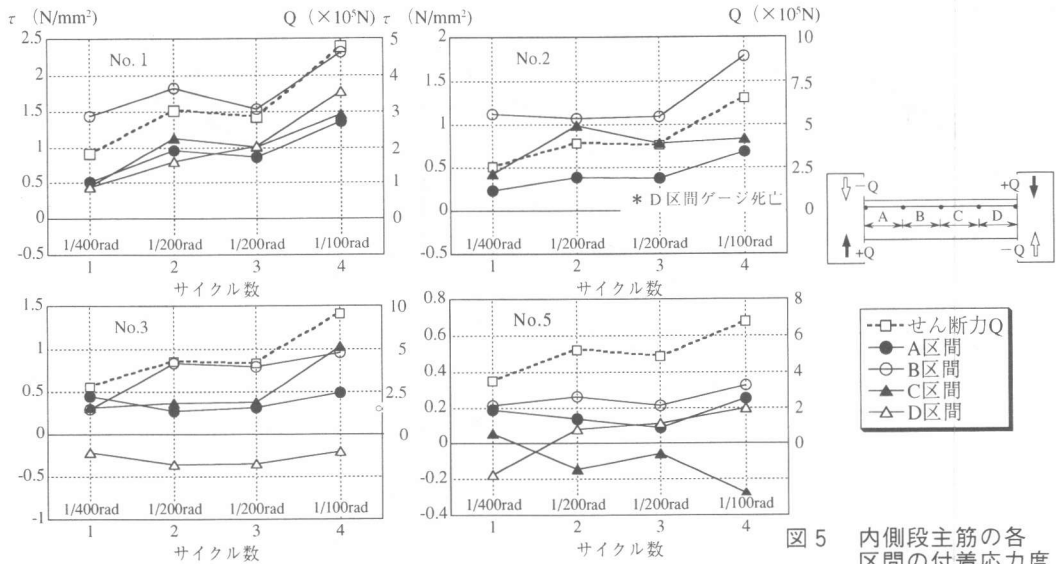


図5 内側段主筋の各区間の付着応力度

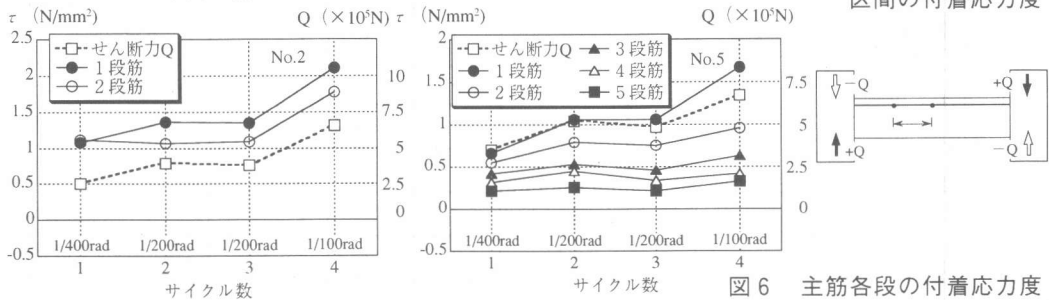


図6 主筋各段の付着応力度

向であったB区間（以後、中央引張区間）のピーク時上端内側段コーナー主筋の付着応力度の一例を図6に示す。No.2, No.5ともに外側段の主筋の方が付着応力度が高く、No.5では内側段の主筋ほど1段筋との応力度の差が大きくなる。また、その差は変形が大きくなる程増大している。これは内側段主筋の付着劣化が外側段主筋より先行して始まり、応力の上昇が鈍化した後も、外側段の主筋は水平変形の増大に伴い応力が上昇するためである。

鉄筋の付着剛性は、付着ひび割れが発生することで低下すると考えられるが、付着ひび割れの幅との相関性が強いと考えられ、これが増大するほど付着剛性が低下すると思われる。主筋段数が多い試験体では、内側段の主筋に付着ひび割れが発生する時はすでにせん断力レベルが高く、ここでのせん断応力度も高くなると推測され、内側段の主筋位置でのひび割れがその外

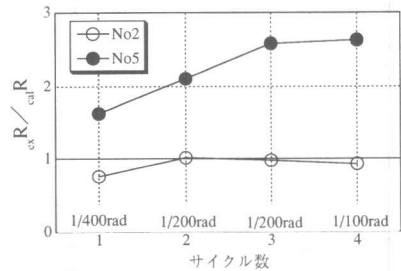


図7 1段筋の内側主筋に対する付着応力比の実験/計算

側より顕著に起きたため、内側主筋の付着剛性が大きく低下したと思われる。

ところで、内側段主筋に対する外側段主筋の付着応力比は付着性状が良好で、鉄筋とコンクリートの平面が保持されているならば、上端筋と下端筋の同段主筋間距離の比にある程度は対応すると考えられる。そこで、各試験体の中央引張区間における1段筋の内側段主筋に対する実験の付着応力比と、主筋間距離による計算の付着応力比を以下のように求めて比較した。

$$R_{ex} = \tau_1 / \tau_{in} \quad (1)$$

$$R_{cal} = j_1 / j_{in} \quad (2)$$

R_{ex} : 実験の付着応力比

R_{cal} : 計算の付着応力比

τ_1, τ_{in} : 1段筋及内側段主筋の付着応力度

ただし、中央引張区間のみ

j_1 : 上下1段筋間の距離

j_{in} : 上下内側段主筋間の距離

図7に各正サイクルピーク時付着応力比の R_{ex} / R_{cal} の一例を示す。No.2は最大荷重に達する0.01radまで実験と計算の応力比はほぼ等しい。一方、No.5は第一サイクルから計算より実験の方が応力比が大きく、サイクル数の増加に伴いその差が拡大する傾向にある。これは前述したように、内側段主筋が付着劣化して応力上昇が鈍化したのに対して、外側段主筋は比較的付着が良好で応力度が上昇し続けたためである。

4. 内側段主筋の付着割裂強度の評価方法

本実験から得られた知見をもとに多段配筋梁の内側段主筋の付着割裂強度の評価を試みる。3.3節に述べたが、両端1D区間を除いた中央領域で、1段配筋から5段配筋の試験体で全段の主筋の付着力の向きが荷重と順方向に発生していたのは、中央引張区間だけであったため、付着強度の評価をこの区間を対象にして検討する。

図8に付着割裂破壊した試験体の中央引張区間の内側段主筋の付着割裂強度と主筋段数の関係を、図9に中央引張区間の内側段主筋の付着割裂強度とその外側主筋からのせん断応力度の関係を示す。なお、せん断応力度とは、外側主筋の付着力によって内側段主筋位置に加わるせん断応力度で、内側段を除く全段主筋の中央引張区間の付着力から以下のように算出した。

$$\tau_c = \frac{\sum \tau_i \phi_i n_i}{b} \quad (3)$$

τ_c : 外側段主筋からのせん断応力度

τ_i : i段筋の付着応力度

ϕ_i : i段筋一本当たりの周長

n_i : i段の主筋本数

b : 梁幅

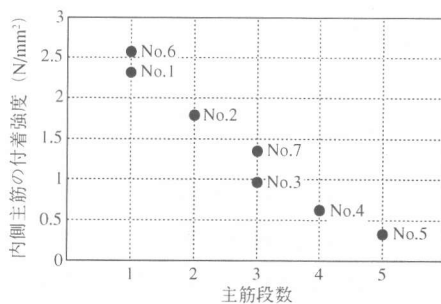


図8 内側主筋の付着強度と主筋段数

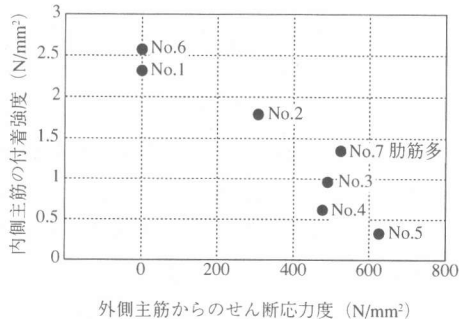


図9 内側主筋の付着強度と外側主筋からのせん断応力度

図8から主筋段数が増えるに従い付着強度が低下し、図9よりせん断応力度が高くなるほど付着強度が低下する傾向が認められる。また、No.1とNo.6では同じ1段配筋でも筋筋から離れたNo.6の方が付着強度が高くなるが、これは既往の実験⁵⁾でも指摘されており、それに準ずる結果となった。ここでは筋筋から離れた内側段主筋が対象であり、その比較として基準にする付着強度は、筋筋から離れている1段筋であるNo.6主筋の付着強度とする。

ところで、コンクリートがせん断破壊するような応力場(せん断終局応力度にはほぼ達した状態)にある時、ここに存在する鉄筋に新たな付着力を加えようとしても、付着力によるせん断力の増加は起きないことになる。そこで付着強度は、コンクリートに残存するせん断力の余力分のせん断強度に対する比に応じて低下すると考えることにする。ここでは、せん断終局応力度を部材のせん断耐力から求めることにする。その耐力式には文献⁴⁾のトラス・アーチ理論を用いた柱および梁のせん断信頼強度式を用い、以下の方法で残存せん断強度比を定義した。

$$\gamma = \frac{\tau_{cu} - \tau_c}{\tau_{cu}} \quad (4)$$

$$\tau_{cu} = \frac{Q_{cu}}{b j_1} \quad (5)$$

γ : 残存せん断強度比

τ_{cu} : せん断終局応力度

τ_c : 外側段主筋からのせん断応力度

Q_{cu} : 文献⁴⁾のトラス・アーチ理論を用いた梁のせん断信頼強度式による耐力

j_1 : 最外主筋間距離

そして、規準とする付着強度に文献⁴⁾の強度低減を行う前の2段目主筋の基本付着信頼強度式(6)を用い、これに残存せん断強度比 γ を乗じることで、一般化された形として内側段主筋の付着割裂強度を以下の式(7)で表現する。

$$\tau_{bu2} = \alpha_1 \{ (0.27b_{st2} + 0.33) \sqrt{\sigma_B + k_{st2}} \} \quad (6)$$

$$\alpha_1 = 0.75 + \sigma_B / 400 \quad (\text{梁の上端筋主筋})$$

$$= 1 \quad (\text{上記以外の主筋})$$

τ_{bu2} : 文献4)による2段目主筋の付着割裂強度

b_{st2} : 2段目主筋の割裂線長さで次式による。

$$b_{st2} = \frac{(b - N_2 d_b)}{N_2 d_b}$$

n_2 : 2段目主筋の本数, d_b : 主筋径

k_{st2} : 横補強筋の効果で次式による。

$$k_{st2} = 103(b_{st2} + 1)p_w$$

$$cal \tau_{in} = \gamma \tau_{bu2} \quad (7)$$

τ_{in} : 内側段主筋の付着割裂強度

図10に内側段主筋最大付着応力度の実験値と式(7)との対応を示す。1段配筋から3段配筋の試験体では、 $cal \tau_{in}$ と γ の間にはほぼ比例的な相関性が認められ、計算値との対応はよい。しかし4段配筋および5段配筋の試験体で過大評価となる。その原因は明確ではないが、必ずしも実験の最大付着応力度がそのせん断応力下での付着強度を発現したものとは限らないことや、これらの試験体では、前述したように各段主筋間の距離がかなり接近しているため、集合鉄筋における有効周長の減少が起きていた可能性もある。

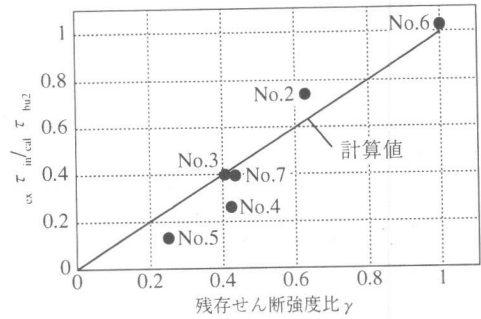


図10 基準付着強度に対する内側主筋の付着強度比と残存せん断強度比

5. まとめ

本研究より得られた知見を以下に示す。

- 1) 付着割裂破壊は、主筋段数に関係なく、最も内側の主筋段位置で起き、サイドスプリット型の破壊となる。
- 2) 内側主筋の付着割裂強度は、1段筋の付着割裂強度よりも低く、主筋段数が増えるほど低下する。
- 3) 部材の付着割裂耐力は、主筋段数が増えるほど上昇する傾向にあるが、主筋段数が多くなると頭打ち傾向となる。本実験では4段配筋まで耐力の上昇が認められた。
- 4) 多段配筋の場合でも肋筋を増やすことによって、主筋の付着割裂強度と部材としての付着割裂耐力を向上させることができる。
- 5) 内側主筋の付着割裂強度は、外側鉄筋からのせん断力の影響により低下するものと考えられ、割裂面での残存せん断強度比という概念を取り入れることで、多段配筋梁内側主筋の一般化された付着割裂強度式を導いた。

参考文献

- 1) 西村,他:60層RC造建物の性能評価型耐震設計法(その3) 試設計建物の概要,日本建築学会大会学術講演集,C-2構造、,pp.729-730.1999
- 2) 狩野,他:二段配筋における内側主筋位置での付着割裂破壊(その1) 実験概要及び実験結果,日本建築学会大会学術講演集,C.構造「,pp.221-222.1993
- 3) 大屋戸,他:2段配筋を有する鉄筋コンクリート梁の付着性状,コンクリート工学論文集,コンクリート工学協会,Vol.15,No.2,pp.187-192.1993
- 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(案)・同解説,1997
- 5) 松原,他:二段配筋されたRC梁の付着割裂破壊,コンクリート工学論文集,コンクリート工学協会,Vol.13,No.2,pp.151-156.1991