

論文 2 段目カットオフ筋の付着割裂補強方法

篠原 保二^{*1}・近藤 慶一^{*2}・林 静雄^{*3}

要旨: 非閉鎖型補強筋を含む各種横補強筋が、2 段目カットオフ主筋を有する鉄筋コンクリート造梁の主筋付着割裂強度への影響を明らかにすることを目的とし、部材実験を行った。実験因子は、横補強筋の形状及び横補強筋量、2 段目主筋のカットオフ長さである。実験結果から、中子筋の補強による付着割裂強度増分が非閉鎖型補強筋による増分を上回ること、さらに非閉鎖型補強筋に関しては、その補強筋量を 0.6 倍に減じて評価することによって、閉鎖型補強筋と同等の補強効果となることがわかった。

キーワード: 付着割裂破壊, 2 段目主筋, カットオフ, 横補強筋, 非閉鎖型補強筋

1. はじめに

鉄筋コンクリート造（以下 RC 造）建物の高層化が進み、配筋の過密化による施工性の難化やコンクリート充填性の悪化が問題となってきた。高強度鉄筋の利用はその解決策の一つである。しかし、横補強筋に用いる際は横補強筋量を減らすことによる付着割裂強度の減少が懸念される。特に、2 段目主筋にカットオフ筋を有する場合、付着割裂破壊を避けるために多くの横補強筋量が必要である。

合理的な解決案としては、施工性の良い非閉鎖型補強筋によって横補強筋比を高め、主筋の付着割裂破壊に対し補強する提案がある。¹⁾ しかし、非閉鎖型補強筋を用いた 2 段目主筋やカットオフ主筋を対象とした研究例は少ない。そこで本論文では、非閉鎖型を含む各種横補強筋を用いた RC 造梁部材の静的載荷実験により、2 段目カットオフ主筋の付着割裂破壊に対する補強効果の比較、検討を行った。

表-1 試験体の変動因子及び計算値, 実験結果一覧

試験体名	コンクリート強度 (N/mm ²)	横補強筋			カットオフ長さ (mm)	τ_y	計算値			τ_{2cal} - τ_y	実験結果				
		共通分	付加分	Σpw			Q_{cal} (kN)	τ_{1cal} τ_{2cal} (N/mm ²)	Q_{max} (kN)		τ_{1max} τ_{2max} (N/mm ²)				
0.3-M	38.3	U - 7.1 @80 (SBPD 1275) pw=0.3%	なし		0.3%	1070	8.5	292	3.8	2.5	0.3	472	2.3	3.0	
TR-0.6-M	46.7		中子筋	2 - D10 @140 (SD295) pw=0.3%	0.6%		1070	8.8	417	5.8	3.5	0.4	698	3.8	3.9
IR-0.6-M	48.4		内側 非閉鎖型			1230			7.0	529	421		5.9	3.5	0.5
OR-0.6-M	50.0		外側 非閉鎖型				1070	8.8			514	425	5.3	3.5	
IR-0.6-L	50.8		内側 非閉鎖型			2 - D10 @70 (SD295) pw=0.6%			0.9%	1070		8.8	529	5.9	3.6
IR-0.9-M	49.3		2 - D10 @70 (SD295) pw=0.6%	0.9%	1070		8.8	514			514		7.3	4.4	0.5

注) τ_y : カットオフ主筋降伏時の付着応力度
 τ_{1cal}, τ_{2cal} : 靱性指針²⁾に規定された 1 段目及び 2 段目主筋強度計算値を式の安全係数 0.8 で除した値

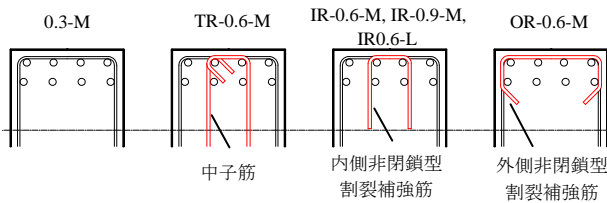


図-1 試験体断面図

表-2 鉄筋の材料特性一覧

呼び名種類	配した箇所	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (10 ⁵ N/mm ²)
D22 (熱処理)	主筋	1011	1090	1.81
	0.3-Mの2段目主筋	982	1031	1.84
U7.1 (SBPD1275)	あばら筋	1456	1473	2.08
D10 (SD295)	中子筋, 付着割裂補強筋	374	505	1.69

*1 東京工業大学 建築物理研究センター准教授 工学博士 (正会員)

*2 大成建設 (株) 工学修士 (会員外)

*3 東京工業大学 応用セラミックス研究所セキュアマテリアル研究センター教授 工学博士 (正会員)

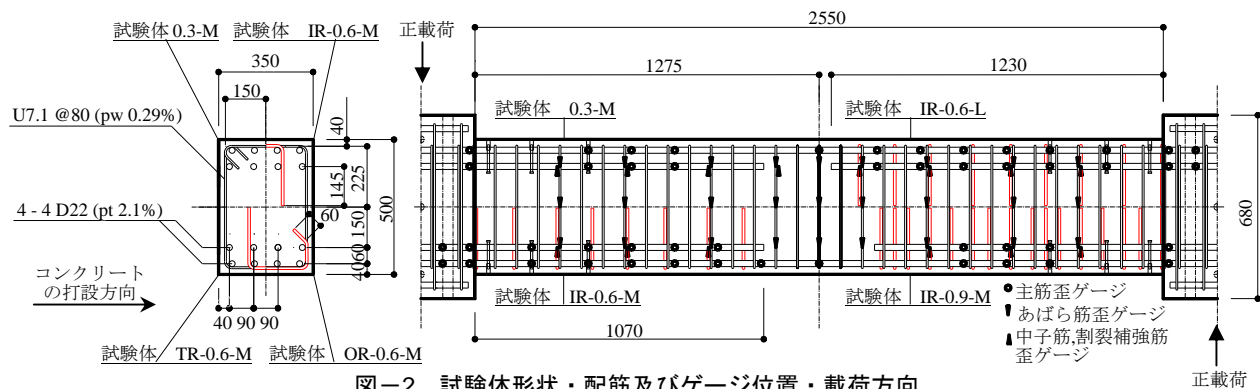


図-2 試験体形状・配筋及びゲージ位置・荷重方向

2. 実験計画

2.1 試験体計画

試験体は表-1 に示す全 6 体である。試験体 0.3-M は基準試験体であり、その他の試験体は試験体 0.3-M に各種付着割裂防止筋を付加し横補強筋比を相対的に高めた試験体、カットオフ長さを変えた試験体である。代表的な配筋、寸法を図-2 に示した。せん断スパン比は 3 で、主筋をカットオフするためにスパンを長く設けた。表-1 に示す各試験体のコンクリート圧縮強度は材齢の線形補間により算出した。また、上下端の主筋に付着強度の差が生じないよう試験体を寝かした状態で打設した。

主筋は D22 を 2 段配筋とし、各段に 4 本ずつ配した。2 段目主筋はすべてカットオフ筋とした。主筋は付着割裂破壊が先行するように SD390 に熱処理を施した高強度鉄筋とし材料特性は表-2 に示した。あばら筋は径 7.1mm の高強度鉄筋を 80mm 間隔で配し、横補強筋比は 0.3% である。

付加した横補強筋は中子筋(試験体名の先頭が TR)、内側の非閉鎖型補強筋(試験体名の先頭が IR)、外側の非閉鎖型補強筋(試験体名の先頭が OR)の 3 種である。外側の非閉鎖型補強筋は定着を確保するために、内側に折り曲げた。一方内側の非閉鎖型補強筋は、中子筋と比較するため直線定着とした。図-1 に断面図を図-2 に各寸法を示す。付着割裂防止筋は呼び径が 10mm の普通強度鉄筋を使用した。横補強筋比はあばら筋と同等の 0.3% と、2 倍の 0.6% となるように配筋のピッチをそれぞれ 140mm, 70mm とした。試験体名中央の数字はあばら筋を含む横補強筋比の合計値 (以下 Σpw) である。

カットオフ筋長さは 2 段目主筋の付着強度計算値が主筋降伏時の付着応力度に対する比 (以下 τ_{2cal} / τ_y) が、 Σpw の効果と同じく、0.3, 0.4, 0.5 の 3 段階となるように 900mm (本論文では含まず)、1070mm (試験体名の後ろが M) と 1230mm (試験体名の後ろが L) の 3 種類とした。2 段目主筋の付着強度計算値は横補強筋比を Σpw とし日本建築学会の指針²⁾に規定された 2 段目主筋の付着強度式により算出した。なお、指針式は安全係数として 0.8 を乗じていることを考慮し 0.8 で除した。

主筋降伏時の付着応力度は付着応力が危険断面から有効せい 430mm 以上中央側の領域で、カットオフ筋にそって一律に働くとして算出した。2 段目主筋の付着割裂強度が計算値どおり Σpw の補強効果を発揮する場合は、 τ_{2cal} / τ_y に比例して最大耐力が増大する。

2.2 荷重方法

荷重方法は建研式荷重方法により逆対称モーメント分布を模擬した正負交番静的漸増繰り返し荷重とした。

図-2 の両端のスタブは加力梁、及び反力梁に緊結されており、加力梁に取り付けた 2 本のジャッキで両スタブが平行を保つように制御した。加力は変位制御とし、変形角で 1/800, 1/400rad がそれぞれ 1 回、その後は 1/200, 1/100, 1/67, 1/33rad で各 2 回の繰り返しとした。ただし、1 回目の変形角ピーク時にせん断力が過去の最大値を超えない場合は除荷後加力を打ち切った。

2.3 測定方法

測定項目は、試験体に作用するせん断力、スタブ間の相対変位、主筋及び横補強筋の歪である。各鉄筋の歪は歪ゲージにより測定した。歪ゲージの添付位置は図-2 に示した。ただし歪を測定した主筋は幅方向に並ぶ 4 本のうち打設底面に近い外側の 1 本と打設上面に近い内側の 1 本ずつである。また、横補強筋の歪ゲージは打設底面側に 1 枚ずつ添付した。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

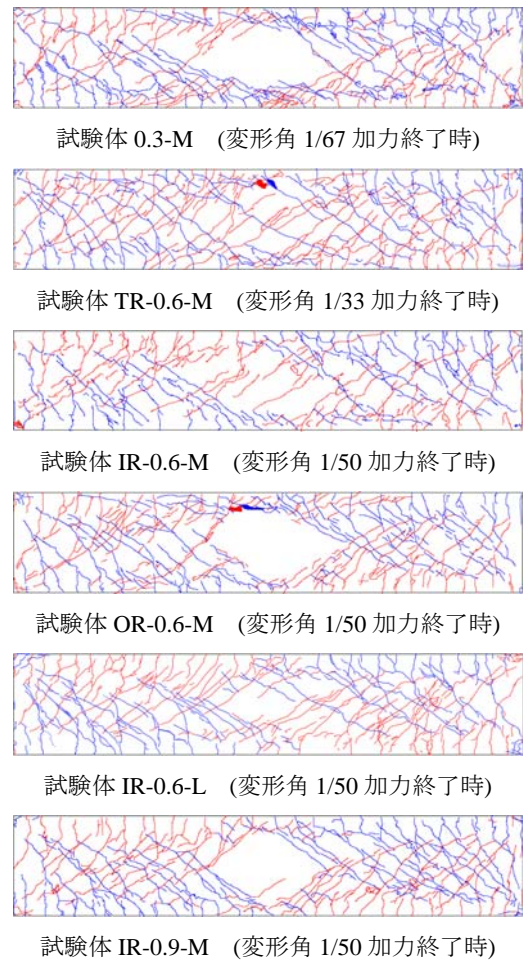
図-3 に最大耐力を迎えた直後のひび割れ図を示す。図の青線が正荷重時に、赤線が負荷重時に発生したひび割れである。いずれの試験体もせん断ひび割れ及び付着ひび割れが多数生じた。最大耐力時は、カットオフした 2 段目主筋の先端を横切る斜めひび割れが大きく開いた。カットオフ長さの長い試験体は、他と比べ中央部までせん断ひび割れが生じていた。破壊形式はひび割れ性状だけでは断定できないが、後述する付着強度計算値と対応が良いことや歪性状から、カットオフ筋端部の付着割裂破壊と判断した。

3.2 荷重－変形角関係，最大せん断耐力

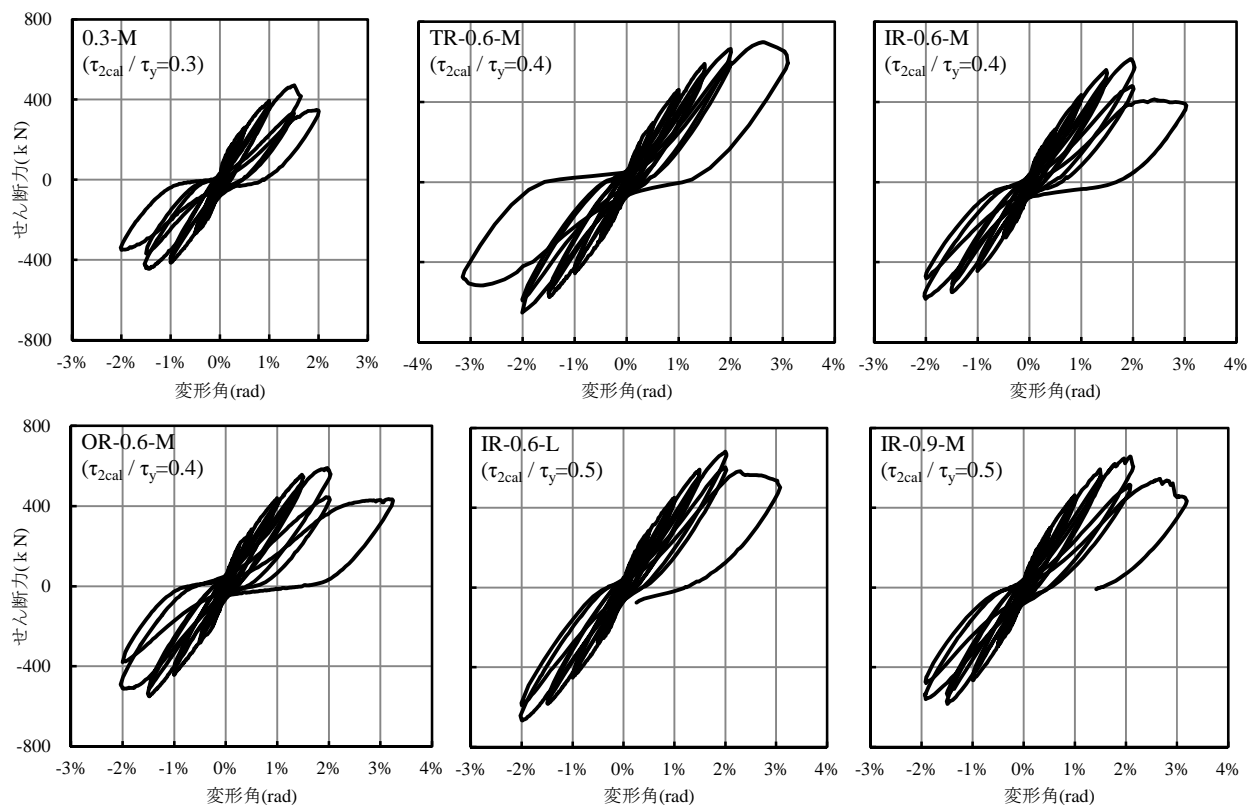
図－4 に荷重変形角関係を示す。全試験体とも最大耐力を迎えた後にスリップ型の履歴を示した。最大耐力時の変形角は試験体によって異なり 0.3-M は変形角 1/67 rad, 非閉鎖型補強筋で補強した試験体 IR-0.6-M, OR-0.6-M, IR-0.6-L, IR-0.9-M は変形角 1/50 rad, 中子筋で補強した試験体は, 1/33 radであった。

図－5 は, 表－1 に示した正載荷時の最大せん断力を, 横軸に τ_{2cal} / τ_y を取り比較した。同図から各種横補強筋を付加したこと, カットオフ長さを長くしたことで耐力が増加したことがわかる。横補強筋形状で比較すると, 中子筋(TR 型)による補強は非閉鎖型補強筋(IR, OR 型)で同等の補強量を配した試験体よりも耐力が大きくなった。非閉鎖型補強筋による耐力増加は内側補強(IR 型)のほうが外側補強(OR 型)に比べて幾分大きく, 付着割裂ひび割れが発生する主筋近傍に補強筋を配することが有効であると考えられる。

また, 同図の破線は断面解析によって算出したモーメントをせん断スパンで除した値である。材料特性は試験体によって異なるが主筋は表－2 の一行目の材料特性とし, コンクリートは圧縮強度が平均値の 47.3N/mm², 強度時歪は 0.23%とした梅村モデルを仮定した。また, 表－1 には同様に各試験体ごとに材料特性を適宜変えた断面解析によるせん断耐力予測値(Qcal)を示した。実験



図－3 最大耐力時破壊状況



図－4 荷重-変形角関係

による最大せん断力は断面解析による予測を 30%~60% 上回った。しかし、図-5 では $\tau_{2cal} / \tau_y = 0.5$ の試験体の耐力増分は τ_{2cal} / τ_y が 0.3 と 0.4 の試験体の耐力増分と比較すると、断面解析結果からの増加分が小さくなる傾向があり、横補強筋量を増やしていくと耐力を過大評価する可能性もある。このことは後述する IR-0.9-M の割裂補強筋の応力が IR-0.6-M のそれよりも小さくなったことに起因している。

さらに中子筋に比べて非閉鎖型補強筋の補強効果が低減したことを考慮して、非閉鎖型付着割裂補強筋の横補強筋量を 0.6 倍した τ_{2cal} / τ_y を灰色で示す。付着割裂補強筋による耐力増分は断面解析結果に対してほぼ同等であり、補強効果をより適切に評価できている。

3.3 主筋の歪・付着性状

測定した主筋の歪から付着性状の検討を行った。全ての試験体で主筋の降伏は見られなかった。試験体 IR-0.6-M, OR-0.6-M の正載荷時における歪分布を図-6 に示す。図中の数字は変形角を示している。実線で示す 2 段目主筋の歪分布に注目すると、引張側のカットオフ筋端で歪勾配が大きく、付着応力が集中していることが分かる。また、危険断面位置から中央に有効せい分の 430 mm の位置を破線で示した。この位置と危険断面位置の歪差はどの試験体も小さく斜めひび割れによる歪シフトが起きていると考えられる。

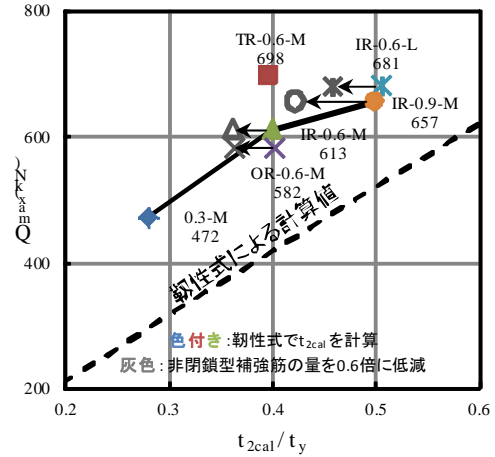
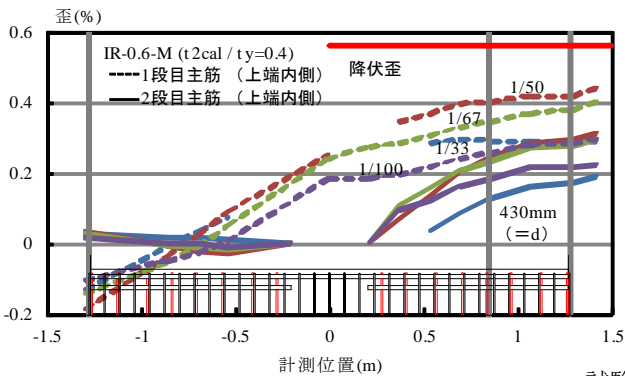
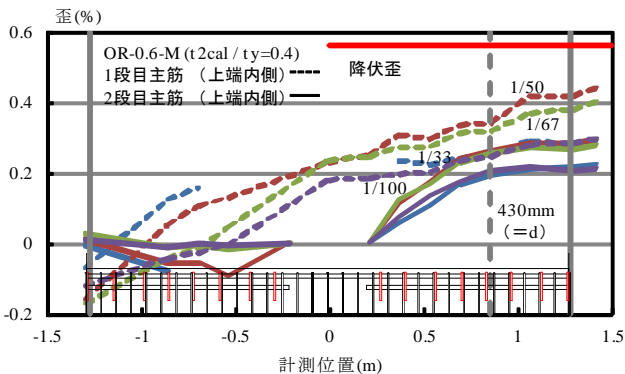
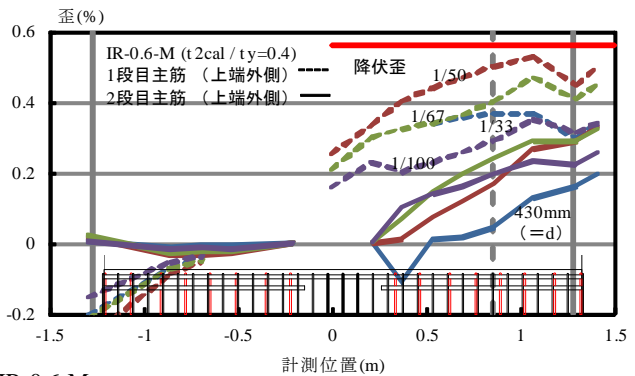


図-5 最大耐力の比較

最大耐力時である変形角 1/50rad に注目すると、2 段目主筋の引張端は最大値となっているが、カットオフ筋の先端では既に歪勾配が減少し、その後付着劣化が進行した。内側と外側の主筋を比較すると、カットオフ筋先端の付着劣化は外側の方が先行しており、かぶりコンクリートの付着割裂ひび割れが影響したと思われる。さらに横補強筋形状を比較すると、外側補強筋 OR 試験体は、カットオフ筋の先端の歪勾配が変形角 1/67rad までは上昇を続けていることに対し、内側補強筋 IR 試験体は、1/100rad で頭打ちとなり、OR 試験体を用いた方が外側のカットオフ筋先端の付着劣化を遅らせることができた。



試験体 IR-0.6-M



試験体 OR-0.6-M

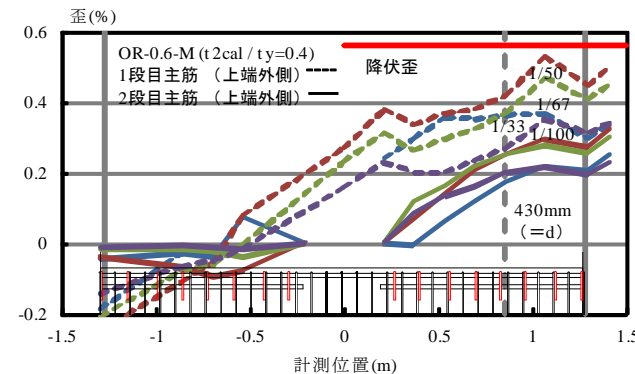


図-6 正載荷時上端主筋の歪分布例

3.4 主筋の最大付着応力度

表-3 に正載荷における最大平均付着応力度一覧を示す。平均付着応力度は主筋に添付した歪ゲージにより計測した引張側と圧縮側の歪の差から算出した。また、前述したとおり、危険断面より有効せい分中央よりの領域は歪シフトが起きていたため、引張側の歪は危険断面から 420mm の位置に添付したゲージの値、圧縮側は危険断面のゲージの値とした。表中の数字は各主筋の平均付着応力度の最大値であり同じ試験体内でも異なる変形角の場合もある。ただし、表中の太字は最大耐力前の値で、2 重下線は最大耐力後の値であり、ほとんどの鉄筋が最大耐力時の値であることがわかる。また、2 段目主筋は最大耐力後、平均付着応力度が最大となるものはなかった。

試験体 0.3-M と非閉鎖型割裂補強筋を配した試験体 IR-0.6-M、IR-0.9-M を比較すると、非閉鎖型割裂補強筋の補強筋量の増加により、内側主筋の付着強度が効果的に補強されていることがわかる。また、カットオフ筋の長い試験体の付着強度は、同じ横補強筋比でカットオフ長さの短い試験体と比べ小さく、既往の文献（例えば文献³⁾）と同様な結果となった。

図-7 に表-3 より作成した 2 段目主筋の内側と外側の最大付着応力度の比率の比較を示す。付加した横補強筋量が増えるにつれて内側の主筋の付着割裂強度が外側に対し大きくなるのがわかる。また、IR 型補強の試験体と OR 型補強の試験体で内外の付着応力度の比率が等しく、2 段目主筋に対して外周の横補強筋も内側主筋の付着割裂に有効に働くことがわかる。

また、同表中の全平均値は、上下主筋、内外側の平均値であり、表-1 及び図-8 にその比較を示す。同図から計算値と実験値の対応が良いことがわかる。また、図中の破線は設計式を表わしているが、どの試験体も設計式に対し安全側の評価となる。しかし、一点鎖線で 0.3-M からの 2 段目主筋付着強度計算値増分の 0.6 倍を示すと、非閉鎖型試験体の平均付着応力度最大値はほぼこの線上にある。このことから図-5 で示したとおり、非閉鎖型補強筋の付着強度増分は閉鎖型補強筋として扱った場合の 0.6 倍程度と考えられる。

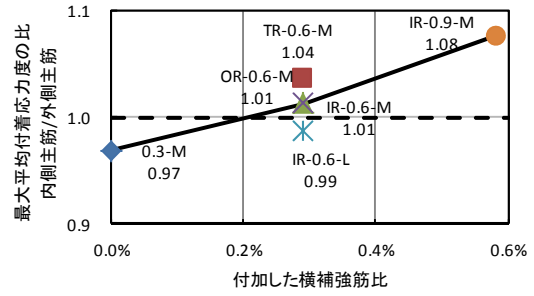


図-7 内側と外側の 2 段目主筋最大平均付着応力度比率の比較

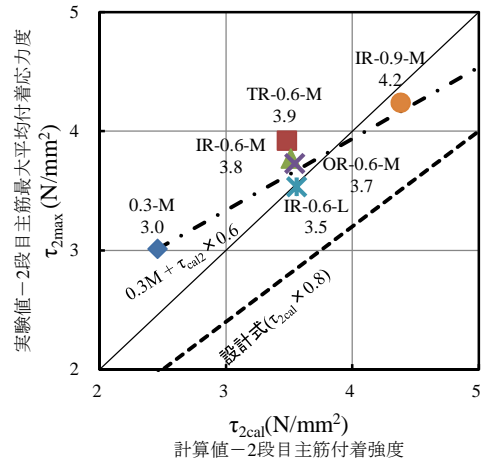


図-8 2 段目主筋の最大平均付着応力度比較

3.5 横補強筋の応力度

表-4 に最大耐力時の引張り側 2 段目主筋位置における各横補強筋の応力を示す。ほとんどの主筋が最大耐力時に平均付着応力度の最大値を迎えたため、付着強度は最大耐力時の横補強筋の応力と関係していると考えられる。応力の算出は、測定した歪から、鉄筋の材料特性を考慮し完全弾塑性の履歴を仮定して算出した。横補強筋の歪は図-2 に示す全試験体共通の位置で測定しており、試験体中央を原点としゲージの位置を-4 ~ +4 と示した。表中の太字は降伏した後の値を示した。網掛けの部分はカットオフ長さの関係で 2 段目主筋が存在しない位置であり、平均値の算出には含めていない。

表-3 最大平均付着応力度一覧

試験体	計算値		最大付着応力度 [N/mm ²]								全平均値		内側/外側		
	Σpw	τ _{1cal} τ _{2cal} (N/mm ²)	1段目上端		2段目上端		1段目下端		2段目下端		1段目	2段目	1段目	2段目	
			内側	外側	内側	外側	内側	外側	内側	外側					
0.3-M	0.3%	3.8	2.5	2.2	2.5	3.0	3.1	2.2	2.3	3.0	3.0	2.3	3.0	0.90	0.97
TR-0.6-M	0.6%	5.8	3.5	3.7	4.3	4.0	3.9	3.4	3.6	4.0	3.8	3.8	3.9	0.89	1.04
IR-0.6-M	0.6%	5.9	3.5	2.8	3.6	3.9	3.7	3.0	3.3	3.7	3.8	3.2	3.8	0.84	1.01
OR-0.6-M	0.6%	5.3	3.5	2.4	3.2	4.1	4.0	2.4	3.0	3.4	3.5	2.7	3.7	0.79	1.01
IR-0.6-L	0.6%	5.9	3.6	<u>3.1</u>	<u>4.1</u>	3.3	3.4	3.3	3.5	3.7	3.8	3.5	3.5	0.85	0.99
IR-0.9-M	0.9%	7.3	4.4	<u>3.2</u>	<u>3.9</u>	4.4	4.1	3.4	3.7	4.4	4.0	3.5	4.2	0.87	1.08

* 太字：最大耐力前に付着応力が最大 二重下線：最大耐力後に付着応力が最大

表-4 最大耐力時の横補強筋の応力一覧

試験体	横補強筋形状	横補強筋比	最大耐力時		下端筋側の応力				上端筋側の応力				平均応力		
			せん断力 kN	変形角 Rad	-4	-3	-2	-1	1	2	3	4	下端	上端	上下平均
					N/mm ²										
0.3-M	あばら筋	0.29%	471.5	1.5%	633	815	910	434	577	1138	642	550	786	777	781
TR-0.6-M	あばら筋	0.29%	697.6	2.6%	959	979	1275	630	816	—	938	1041	1071	990	1030
	中子	0.29%			374	不良	不良				331	374	357	374	354
IR-0.6-M	あばら筋	0.29%	612.8	2.0%	499	720	821	546	1048	1099	830	714	680	881	780
	内非閉鎖	0.29%			139	374	374				374	300	158	296	277
OR-0.6-M	あばら筋	0.29%	581.5	2.0%	717	865	1160	771	699	1049	827	628	914	835	874
	外非閉鎖	0.29%			-133	-210	43				-50	-24	-59	-100	-44
IR-0.6-L	あばら筋	0.29%	681.0	2.0%	548	689	656	879	1051	774	839	628	693	823	758
	内非閉鎖	0.29%			259	215	342	365	219	316	283	200	295	255	275
IR-0.9-M	あばら筋	0.29%	657.0	2.1%	784	1235	1333	1014	769	981	803	609	1117	798	957
	内非閉鎖	0.58%			203	301	209				252	不良	192	238	222

注) 太字：降伏した横補強筋の応力
網掛：カットオフ筋のない位置

どの試験体もカットオフ筋の先端付近で横補強筋の応力が高い傾向にある。これはカットオフ筋の先端を横切るせん断ひび割れの影響が大きいと考えられる。

補強筋形状による比較を行うと、まず中子筋は測定不良の位置を除き 331N/mm² 以上でありほぼ降伏応力を発揮していた。一方内側非閉鎖型補強筋は降伏が見られるものの最小の値は 139 N/mm² であり、中子筋と比較し測定位置による差が大きい。これは上下端で定着の取れている中子筋の方が歪は大きくなり、高い拘束力によって表-3 に示した付着強度の違いが生じたためと考えられる。また、外側の非閉鎖型補強筋は圧縮の値が生じている。これは定着のために設けた折り曲げ部付近にゲージを添付したが、補強筋が引張力を受ける際に曲げ戻りがあったためと考えられる。

非閉鎖型補強筋 IR の横補強量で比較すると、IR-0.9-M 試験体は IR-0.6-M 試験体より、最大耐力が高いにも関わらず補強筋の応力(拘束力)が小さい。このことから非閉鎖型補強筋の補強量を増やしても、補強量に比例した拘束力を生じるわけでないといえる。なお、IR-0.9-M 試験体の非閉鎖型補強筋に一部降伏が見られたが、変形角 1/200rad において生じたせん断ひび割れの影響を受けたもので、ひび割れの進展と開口により歪は大きくなったが、最大体力前の 1/67rad からは減少したため 301 N/mm² となった。

カットオフ長さによる違いを比較すると IR-0.6-L は IR-0.6-M と比べあばら筋、非閉鎖型割裂補強筋の応力がともにやや低く、カットオフ筋の平均付着応力度の最大値と同様の傾向を示していた。

4. まとめ

逆対称モーメント分布を想定した各種横補強筋を有する梁の静的載荷実験により、2 段目カットオフ主筋の付着割裂強度の補強効果について以下の結論を得た。

- 1) 非閉鎖型補強筋により付着割裂強度の補強をする場合、その補強効果は靱性式の閉鎖型補強筋の評価に対して 6 割程度であった。
- 2) 非閉鎖型補強筋を主筋の間を通す付着割裂補強 (IR 型) を行うと、その補強量が増えるほど、内側主筋が重点的に付着補強された。
- 3) 外側主筋の付着劣化が先行する傾向があり、非閉鎖型補強筋を主筋の外側をまわす OR 型補強を行っても、付着強度は IR 型補強とほぼ同じであった。

謝辞

本研究を行うにあたり(株)高周波熱錬からの助成を頂きました。ここに関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 長友克寛, 佐藤裕一, 松原三郎, 高橋恵子: 非閉鎖型補強筋による付着割裂強度の改善効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1135-1140, 2005.6
- 2) 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, 1999
- 3) 山田紘, 唐津敏一, 森田司郎: せん断スパン内でカットオフされた RC 梁主筋の付着割裂強度, 日本建築学会構造系論文集, No.459, pp.101-110, 1994.5