

論文 カットオフ筋を有する二段目主筋の付着性状

村上 和久*1・篠原 保二*2・河野 進*3

要旨: 二段目カットオフ筋を有する鉄筋コンクリート造梁の主筋付着割裂強度に及ぼす横補強筋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である。実験結果より、鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説の付着信頼強度算定式¹⁾(以下、靱性指針式)の二段筋に関する低減係数を緩和できる可能性を示した。

キーワード: 付着割裂破壊, 二段目主筋, カットオフ, 横補強筋, 中子筋, 単筋

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問題が報告されている。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主筋の付着割裂強度の減少が懸念される。特に、二段目主筋にカットオフ筋を有する場合、一段目主筋に比べ付着強度が0.6倍に低減される。その一方でカットオフ筋に関して靱性指針式の低減係数を緩和できる可能性を篠原ら²⁾や長谷川ら³⁾によって指摘されている。

そこで本研究では昨年度行った二段目カットオフ筋閉鎖型補強を有する梁の部材実験に加えて、変動因子の異なる五体の逆対称モーメントの正負交番載荷実験をすることで靱性指針式の低減係数の妥当性を検討する。

2. 実験概要

図-1, 表-1にそれぞれ配筋図と本年度の試験体一覧を示す。試験体C-0.6-Mは基準試験体とし、昨年度の二倍の高強度せん断補強筋($p_w=0.6\%$)のみを配している。さらに付着割裂防止筋として中子筋型補強筋を付加した試験体C-0.6-0.11-MとC-0.6-0.24-Mと単筋型(STR)の補強をしたSTR-0.6-0.24-M, 中子筋型補強のコンクリート強度(σ_B)を相対的に弱めたC-0.6-0.24-M-LFcの計五体である。カットオフ長さは篠原らが行った実験の標準長さの1070mm, 主筋は降伏を防ぐために焼き入れしたD25を全試験体共通して使用した。補強筋比は補強間隔を一定とし、補強筋径を変えることで対応した。全試験体に関して付着割裂破壊先行型になるように設計し、ブリージングによる上端筋と下端筋への影響をなくすためにコンクリートの打設方向は加力方向に対して直交とした。

表-1 試験体一覧

試験体名	σ_B [N/mm ²]	高強度せん断補強筋	付着割裂強度の補強			せん断耐力計算値[kN]		
			方法	補強筋	pwb	付着	せん断	曲げ
C-0.6-M	44.7	U-10.7 @85 pw=0.6 %	中子筋	D6 @170	0.11%	401	1060	876
C-0.6-0.11-M	44.9					437	1062	878
C-0.6-0.24-M	45.1		単筋	D10 @170	0.24%	480	1065	878
STR-0.6-0.24-M	45.2					480	1066	879
C-0.6-0.24-M-LFc	30.0					446	820	786

表-2 使用鉄筋一覧

呼び名	配した箇所	降伏強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	ヤング率 [10 ⁵ N/mm ²]
D25	主筋	983	1093	1.89
U10.7	せん断補強筋(外周)	1391	1496	2.00
D10	付着割裂防止筋	369	521	1.59
D6		335	532	1.62

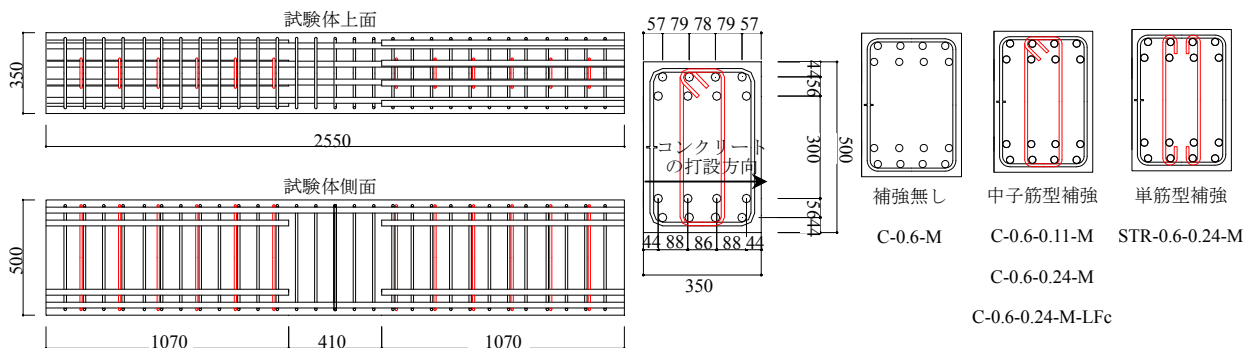


図-1 配筋図及び補強方法一覧

*1 東京工業大学大学院 総合理工学研究科環境理工学創造専攻 (学生会員)

*2 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)

*3 東京工業大学 建築物理研究センター教授 工学博士 (正会員)

3. 載荷方法

載荷方法は逆対称曲げモーメント分布を模擬した正負交番静的漸増繰り返し載荷とした。図-2 に示すように両端のスタブは加力梁、反力梁に緊結している。逆対称モーメントが作用するように2本のジャッキで水平を保つように制御した。加力は変位制御とし、1/400rad 1回、その後は 1/200, 1/100, 1/50, 1/33rad で各 2 回の繰り返しとし、図-2 に示すジャッキの押す側の方向を正方向と定義した。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。

4. 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。歪ゲージの貼付位置を図-3 に示す。オレンジ色で示した位置がゲージを一枚貼付、緑色で示した点は重要な測定点であるために二枚貼付した。また曲げの影響を受けないように側面にゲージを貼付した。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本である。

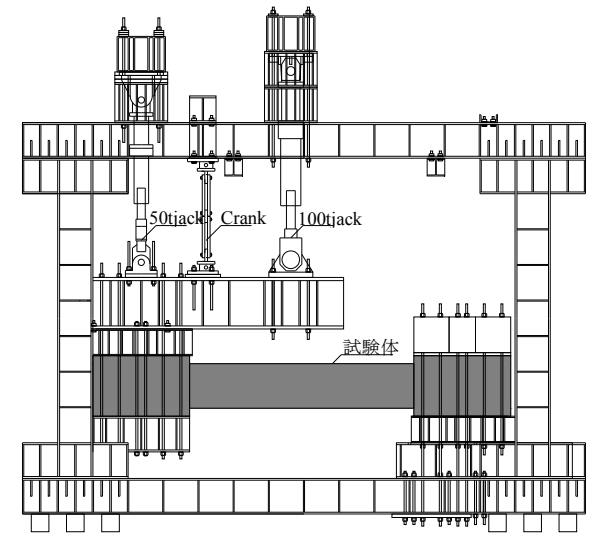


図-2 加力装置図

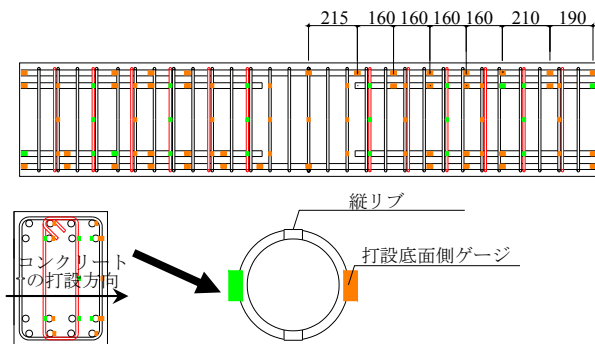


図-3 ゲージ貼り付け位置

5. 実験結果

5.1 破壊性状

図-4 に最大耐力後(変形角:1/50rad)の各試験体のひび割れ性状を示す。青色は正載荷時に発生したひび割れ、赤色が負載荷時に発生したひび割れとなっている。いずれの試験体もせん断ひび割れ及び付着割裂ひび割れが確認された。またどの試験体にも曲げひび割れが発生したが端部の圧壊が顕著に見られなかった事と、後述する主筋に降伏が見られなかったことから曲げによる破壊でないと考えられる。

付着強度の計算値の低かった試験体 C-0.6-0.24-M-LFc, C-0.6-M, C-0.6-0.11-M に関しては加力中に最大耐力を迎えると同時に主筋が滑ったことによる付着ひび割れが割裂音とともに確認できた。またその他の付着強度の計算値が相対的に高い試験体 C-0.6-0.24-M, STR-0.6-0.24-M に関して付着割裂ひび割れは最大耐力時までは顕著でなく、最大耐力後の繰り返し載荷時に顕著に見られた。最終的に、昨年度の実験²⁾で見られた二段目主筋のカットオフ位置先端を通る斜めひび割れ(○で示す)が支配的となって破壊されたと想定できる。また後述するひび割れ幅の測定からこの支配的と思われる斜めひび割れが二段筋カットオフ位置での付着・定着破壊が起因していると考えられる。

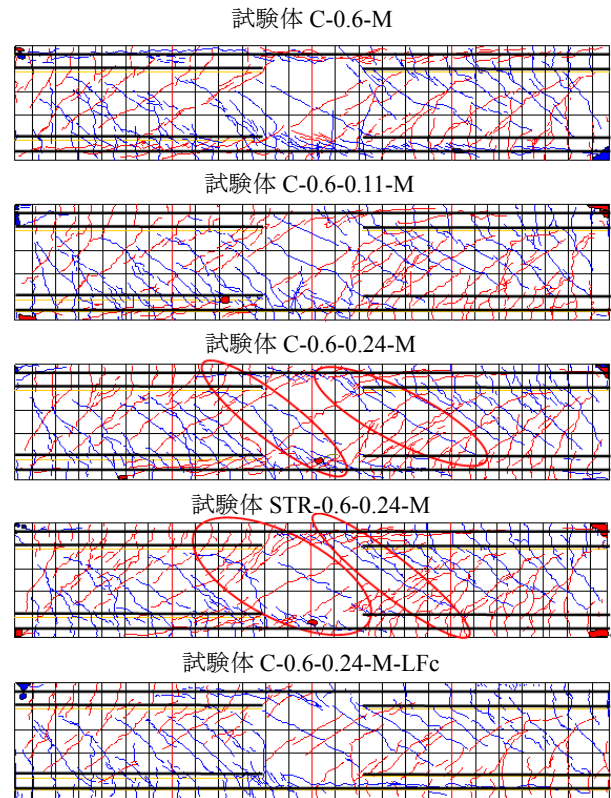


図-4 最大耐力時ひび割れ状況

表-3 最大耐力時にカットオフ近傍で発生した斜めひび割れ幅

試験体名	一段目左下 (mm)	二段目左下 (mm)	中央左下 (mm)	一段目右上 (mm)	二段目右上 (mm)	中央右上 (mm)
C-0.6-M	0.30	2.00	0.90	1.40	1.70	0.40
C-0.6-0.11-M	0.92	0.70			0.30	
C-0.6-0.24-M	0.30	0.60	0.13	0.40	0.50	0.42
STR-0.6-0.24-M	0.25	0.80	0.30	0.20	0.30	0.20
C-0.6-0.24-M-LFc	1.50	1.63				

5.2 ひび割れ幅測定

表-3に最大耐力時に発生したカットオフ近傍を斜めに横切るひび割れの幅をまとめた。測定は1/100感度のデジタルマイクロスコープを用い、測定箇所は引張側鉄筋である試験体右上と左下部分の一段筋、二段筋、と二段筋より100mm中部分とした。

試験体C-0.6-0.24-M-LFcの右上部に関しては斜めひび割れが見られる前に付着ひび割れが支配的となって破壊したために、対象となるひび割れを測定することが出来なかった。その他の試験体に関しては試験体C-0.6-0.11-Mの左下のひび割れを除いて二段筋カットオフ近傍でのひび割れが最大となった。二段筋カットオフ端部の付着・定着破壊によって斜めひび割れが大きく開いたと考えられる。

5.3 荷重-変形角関係

図-5に縦軸に最大耐力を、横軸に付加した付着割裂防止筋のせん断強筋比を示した。また図-6に各試験体の荷重-変形角曲線を示す。全試験体とも最大耐力時の変形角は2%(1/50rad)となった。付着割裂防止筋の補強筋比を高めることによって最大耐力が比例的に上昇することが分かる。これは横補強筋が付着耐力の上昇に寄与しているからである。

最大耐力に関しては単筋型補強では中子筋型補強と同程度の補強効果があることが分かった。同様に後述する最大平均付着応力度に関してもほぼ同様の値を示した。

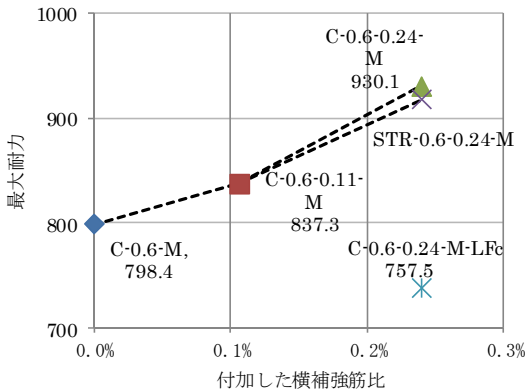


図-5 最大耐力-横補強筋比関係

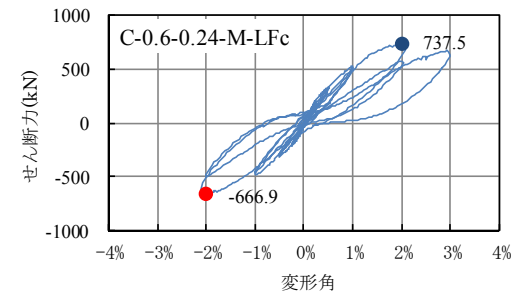
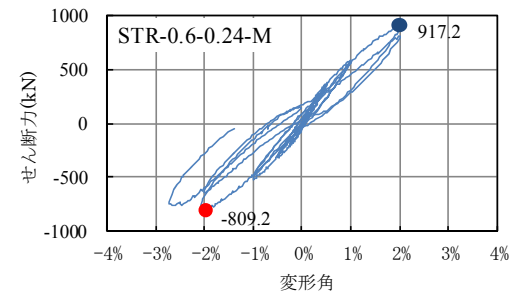
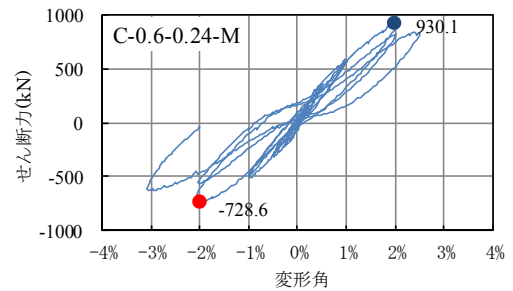
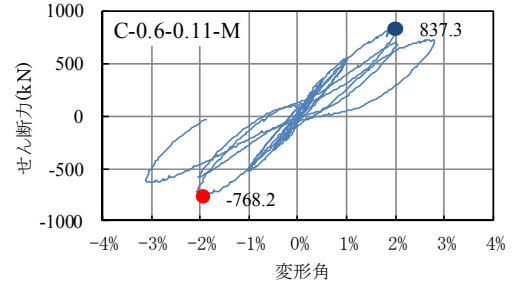
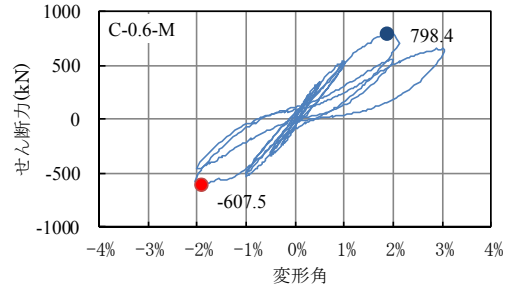
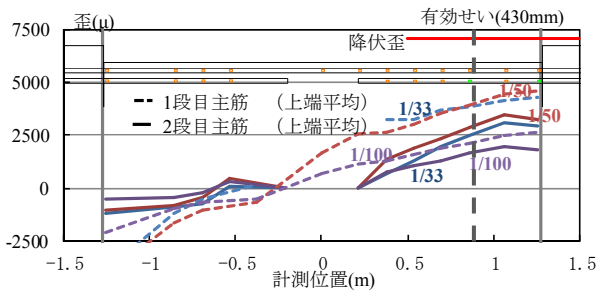
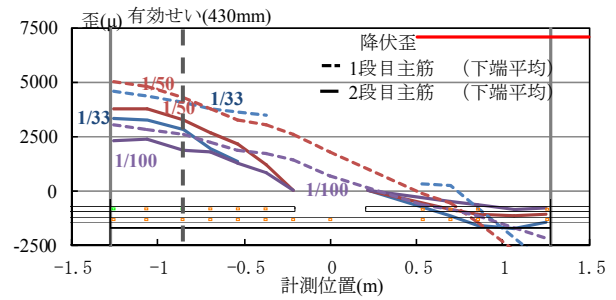


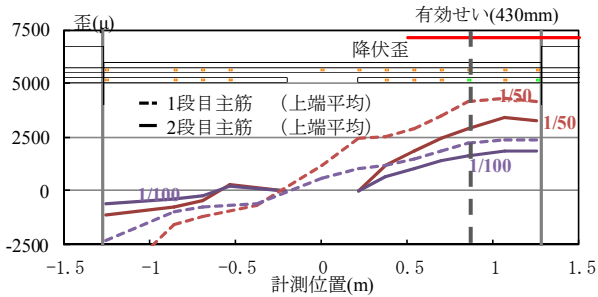
図-6 荷重-変形角関係



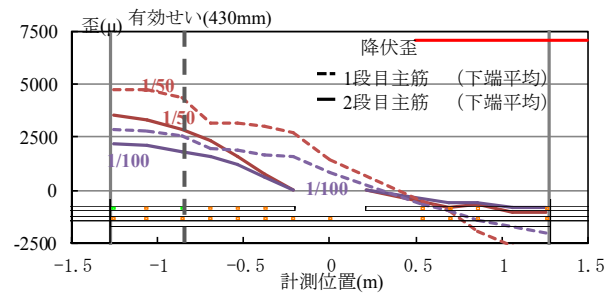
試験体 C-0.6-0.24-M(上端筋)



試験体 C-0.6-0.24-M(下端筋)



試験体 STR-0.6-0.24-M(上端筋)



試験体 STR-0.6-0.24-M(下端筋)

図-7 正載荷時の主筋歪分布

5.4 主筋歪分布

図-7に正載荷ピーク時の主筋歪分布を示す。破線は一段筋を、実線は二段筋を示しており、図中の数字は変形角を表している。全試験に共通して付着割裂破壊が先行するように主筋に焼き入れを行ったため、降伏に至ったものは無かった。また図に示す試験体については付着割裂防止筋の形状の違いによる歪分布の大きな違いは見受けられなかった。

全試験体においてカットオフ先端での二段筋の歪勾配が大きく、付着応力が集中していることが分かる。その一方で一段筋に関しては二段筋の存在しないカットオフ部において歪勾配が厳しくなる傾向が表れている。これは二段筋が負担している引張応力が一段筋へシフトしたためと考えられる。

このようにカットオフ位置周辺にて内部の応力状態に変化が生じることが見受けられ、このことがカットオフ筋端部に生じる斜めのひび割れを引き起こす一因になっていると推測できる。

またスタブに近い位置の歪に着目すると歪差が小さく、一段筋に関しては有効せい分の430mmにおいてひび割れの影響によって歪シフトが発生していることが確認できる。

しかし二段筋に着目すると、有効せい分の半分にあたる210mmから歪勾配が見られる。これは二段筋が一段筋に比べて、試験体の上下面から距離があるためひび割れによる付着力の低下を受けにくいと考えられる。

5.5 主筋の最大平均付着応力度

図-8に一例として試験体 C-0.6-0.24-M の一段筋、二段筋の平均付着応力度-変形角関係を示す。平均付着応力度は鉄筋に貼付した歪ゲージにより計測した歪差から計算した。ここでは一段筋、二段筋も同様に前述した歪シフトを考慮して有効せい分を差し引いた位置のゲージの値とし、一段筋は圧縮側鉄筋の端部との歪差を用いた。どの試験体に関しても多少の差異はあるが、図-8の平均付着応力度-変形角関係から見てとれるのと同様に、最大耐力を迎えたと同時に一段筋も二段筋も最大付着応力度を迎えた。

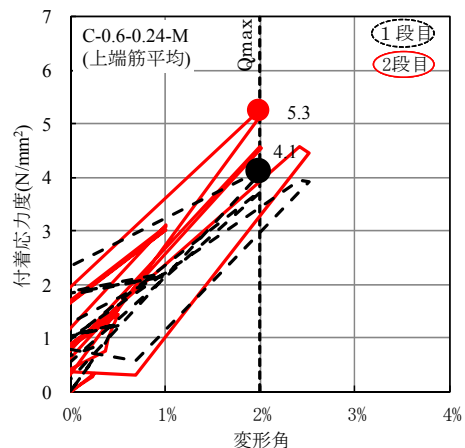


図-8 平均付着応力度-変形角関係

表-4 付着応力度一覧

試験体名	計算値[N/mm ²]		引張側鉄筋の最大平均付着応力度 [N/mm ²]								全平均 [N/mm ²]		内/外	
	t _{bu1}	t _{bu2}	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				
C-0.6-M	4.6	3.1	3.0	3.6	3.9	4.8	3.5	4.3	4.5	5.4	3.6	4.7	0.82	0.83
C-0.6-0.11-M	5.6	3.4	2.0	4.1	4.6	5.1	4.1	4.6	4.1	5.0	3.7	4.7	0.70	0.87
C-0.6-0.24-M	6.2	3.7	4.0	4.3	5.0	5.5	4.7	4.5	6.4	5.7	4.4	5.6	0.99	1.01
STR-0.6-0.24-M	6.2	3.7	4.3	4.7	5.1	5.6	4.8	3.9	5.6	5.1	4.4	5.4	1.06	1.00
C-0.6-0.24-M-LFc	5.7	3.4	3.6	4.0	4.3	4.6	3.3	3.5	4.2	4.8	3.6	4.5	0.92	0.91

表-5 昨年度試験体一覧

試験体名	σ _B (N/mm ²)	高強度 せん断 補強筋	付着割裂強度の補強		
			方法	補強筋	pwb
C-0.3-M	38.3	U-			
C-0.3-0.3-M	46.7	7.1@80	中子筋	D10 @140	0.30%
C-0.3-0.6-M	49.3	pw=0.3%		D10 @70	0.30%

付着応力度は表-4に一段筋、二段筋を以下で示す靱性指針式に基づいた(1)式、(2)式から求めた計算値を示す。(1)、(2)式ともに実験式の平均式とするために靱性指針式を安全率0.8で除している。また実験値については前述した方法で算出した。

$$\tau_{bu1} = \alpha_t \left\{ (0.085b_i + 0.10) \sqrt{\sigma_B + k_{st}} \right\} / 0.8 \quad (1)$$

$$\tau_{bu2} = \alpha_2 * \alpha_t \left\{ (0.085b_{st2} + 0.10) \sqrt{\sigma_B + k_{st2}} \right\} / 0.8 \quad (2)$$

付加する付着割裂防止筋が増えるにつれて内側、外側主筋共に付着耐力が上昇する傾向が得られた。また昨年度の実験結果²⁾と同様に外側主筋の最大平均付着応力度に対する内側主筋の最大平均付着応力度の比に着目すると、内側の耐力増分が顕著に見られた。これは高強度せん断補強筋が外周にのみ配された基本試験体であるC-0.6-Mを基準として中子筋型または単筋型と直接、内側主筋にかかる付着割裂補強筋量(Pwb=0.11%, 0.24%)が増えることに起因していると考えられる。また内側主筋、外側主筋と測定位置によって最大付着応力度が最大で24%異なった。

次に図-9と図-10にそれぞれ中子筋型補強を行った最大平均付着応力度の平均値と最小値を靱性指針式によって求めた計算値との比較を示している。四角マークは今年度、ダイヤモンドは昨年度試験体である。塗りつぶしは(2)式で、白抜きは設計式である靱性指針式を表す。高強度せん断補強筋比(pw=0.3%)と中子筋型による付着割裂防止筋の補強筋比(pwb=0.3%, 0.6%)が今年度試験体と異なる。昨年度は主筋径D22を共通して使用し、今年度と同様に主筋には付着割裂破壊先行型とするために焼き入れを施している。図中の数字は実験値による最大平均付着応力度を示している。図-9、図-10と両図ともに実験値は現行の設計式から求めた値から大きく安全側に評価されている傾向にあり、その詳細を6章に示す。

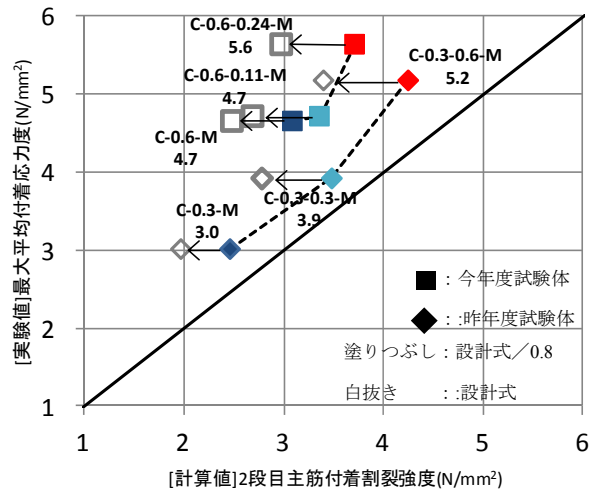


図-9 二段目主筋の最大付着応力度関係 (平均値)

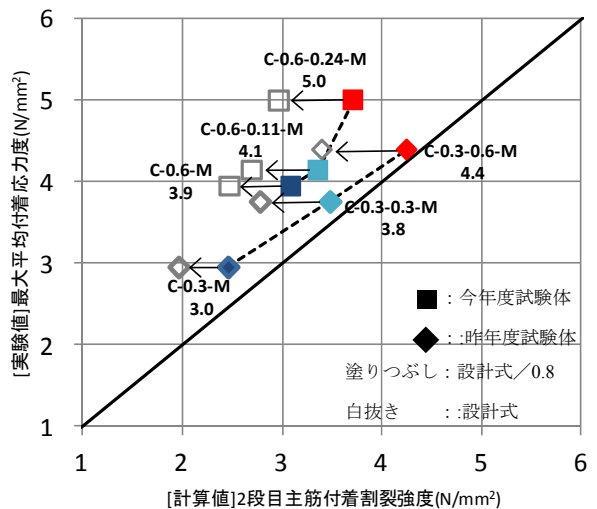


図-10 二段目主筋の最大付着応力度関係 (最小値)

表-6 二段目主筋における付着余裕度一覧

試験体名	二段目最大主筋付着応力度の余裕度			
	設計式からの余裕度		平均値式からの余裕度	
	内側	外側	内側	外側
C-0.6-M	1.71	2.06	1.37	1.65
C-0.6-0.11-M	1.63	1.87	1.30	1.50
C-0.6-0.24-M	1.92	1.89	1.53	1.51
STR-0.6-0.24-M	1.80	1.81	1.44	1.45
C-0.6-0.24-M-LFc	1.57	1.71	1.25	1.37
C-0.3-M	1.51	1.55	1.20	1.24
C-0.3-0.3-M	1.43	1.34	1.15	1.07
C-0.3-0.6-M	1.70	1.34	1.36	1.07

6. カットオフを有する二段目主筋の付着強度算定式

前章において現行の設計式が大きく安全側に評価されていることを示した。そこで表-6を用いて各試験体に対して設計式と実験の平均値式からの余裕度を示す。また試験体によっては5.5節で示したように内側主筋と外側主筋において余裕度が大きく異なるので分けて示す。実験式を0.8倍した現行の設計式からだとも最低でも34%、最大で2倍以上もの付着耐力を有していることとなる。また実験の平均値式からの余裕度を見ても今年度試験体に関しては最低でも25%と高い付着耐力を有していることが分かった。

また図-9, 10と表-6から考えると、今年度試験体と昨年度試験体ではそれぞれ計算値に対して対応が良いが、付着余裕度は大きく異なっており、今年度試験体の最大平均付着応力度が全体を通して大きな値を示す傾向が得られた。高強度せん断補強筋と付着割裂防止筋の総補強筋比の総量に大きな違いはないが、昨年度試験体の高せん断補強筋比が0.3%なのに対して、今年度は0.6%と高強度材料の使用率が高まったことが影響している可能性がある。現行の設計式では付着割裂防止筋は補強筋量のみ考慮されているが、その補強筋の強度も今後検討する必要がある。

次に各小区間での最大付着応力度を表-7に示す。前述したようにカットオフ先端位置から最も近い位置の160mmに貼付したゲージから求めた最大付着応力度は表-4の平均最大付着応力に比べ二倍前後となり、かなり大きな値を示した。また表中の端部とはスタブ端部を示しており、そこから210mmと420mmのゲージから最大付着応力度を算出した。前述したように有効せい分内での歪勾配の変化が見られたように端部から210mm前後の小区間において耐力の違いが表れた。しかし端部より210mm、端部210mm~420mmと両区間において平均最大付着応力度と比べるとかなり小さい値を示し、現行の有効付着長さの定義はカットオフ筋に関しても妥当だと考えられる。

表-7 各小区間における最大付着応力度一覧

試験体名	二段目最大主筋付着応力度 [N/mm ²]					
	カットオフ先端		端部より210mm		端部210mm~420mm	
	内側	外側	内側	外側	内側	外側
C-0.6-M	8.6	10.0	2.5	2.2	3.1	3.8
C-0.6-0.11-M	6.2	7.4	1.4	1.4	2.7	4.3
C-0.6-0.24-M	10.1	9.8	1.5	1.8	3.1	3.7
STR-0.6-0.24-M	7.1	8.8	1.5	1.7	2.7	3.2
C-0.6-0.24-M-LFc	6.5	7.2	1.6	1.6	3.8	3.7

7. 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、二段目カットオフ主筋の付着性状について以下の結論を得た。

- 1) カットオフ筋を配する場合、カットオフ先端での付着・定着破壊によって、全区間に生じているせん断ひび割れの中でカットオフ先端を横切る斜めひび割れを大きく開かせる傾向が得られた。
- 2) 二段筋の歪シフトは一段筋に比べるとひび割れの影響を受けづらく、小さいように見られる。しかし有効せい分内での小区間における付着耐力は有効せい分を差し引いた区間に比べるとかなり小さい値を示し、現行の有効付着長さの定義はカットオフ筋に関しても妥当だと考えられる。
- 3) 現行の靱性指針式ではカットオフをした二段目主筋に対して大きく安全側に評価している。そこで現在使われている靱性指針式(2)式における二段目主筋に対する低減係数($\alpha_2=0.6$)を緩和できる可能性を得られた。

謝辞

本研究を行うにあたり(株)高周波熱錬および高経年化技術評価高度化事業からの助成を得ました。ここに関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 篠原保二，近藤慶一，林静雄：二段目カットオフ筋の付着割裂補強方法，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，pp.577-582，2013.6
- 3) 長谷川桂亮，鈴木悠矢，伊藤彩夏，高橋之，市之瀬敏勝：二段目主筋をカットオフしたRC梁の付着既定の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)，No.23209，2013.8