

論文 スラブ付き折れ曲がり梁の曲げせん断性状に関する研究

戸田敬司^{*1}・田才 晃^{*2}・倉本 洋^{*3}・長田正至^{*4}

要旨: 梁の中央部において順梁と逆梁が結合した折れ曲がり梁の施工性向上と配筋法の有効性を調べる事を目的として、構造実験を行い安全性について検討した。その結果、折れ曲がり部は、曲げ終局時のせん断力に対して全補強しておけば、部材全体の構造性能に影響を及ぼすような有害な損傷は生じないこと、梁主筋を折れ曲がり部で折り曲げ定着する場合、余長を梁せい内に留めることができること、折れ曲がり部の梁端部を機械式定着にした場合、最大耐力時以降の耐力低下が折り曲げ定着した場合よりも若干大きいが、実用的な変形の範囲では構造性能に問題は無いことなどが判明した。

キーワード: 折れ曲がり梁、せん断、定着、スラブ、機械式定着、付着割裂

1. はじめに

折れ曲がり梁は、梁の中央部において順梁と逆梁が結合した梁で、集合住宅等において計画上の自由度や居住性の向上等を意図して考案されたものである。直線型の梁と比較して最大耐力や変形性能に大きな違いがないとの報告¹⁾があるが、構造性能に関する研究的蓄積はほとんどない。また、実構造物に用いる際、順梁から逆梁に切り換わる折れ曲がり部の配筋は、施工性を考慮してできるだけ簡素であることが望まれる。そこで本研究では、折れ曲がり部における補強方法、梁主筋の定着方法、および折れ曲

がり部の重なり長さ等をパラメータとした静的載荷実験を行い、折れ曲がり部に有害な損傷を生じさせず、直線型の梁と同様梁端部の曲げ降伏によるエネルギー吸収性能を確保する配筋方法を検討した。

2. 実験概要

2. 1 試験体概要

試験体諸元を表-1に示す。試験体は全5体で、15階建てRC造集合住宅の2階における梁を想定し、7/16に縮小したものである。試験体CR-1の配筋を図-1に示す。同図(b)右部の順

表-1 試験体諸元

試験体名	CR-1	CP-1	HR-1	HP-1	CP-0.5
断面形状	bxD (mm)		350×350		
直線部	主筋 SD390		6+2-D16		
	スタ-ラップ [°] SD785		4-D6@100 (0.37%)		
	スタ-ラップ [°] SD785		4-D6 3組		
	水平横補強筋 SD785	2-D6 6組	無	2-D6 6組	無
折れ曲がり部	縦筋	無	4-D16	無	
	斜め筋		無		4-D16
	梁主筋の定着	折り曲げ定着 余長27d _b	折り曲げ定着 余長10d _b	機械式定着	折り曲げ定着 余長10d _b
	重なり長さ/D		1		0.5

*1 前田建設工業株式会社（正会員）

*2 横浜国立大学大学院助教授 工学研究院・建築学 工博（正会員）

*3 國土交通省國土技術政策総合研究所 工博（正会員）

*4 横浜国立大学大学院教授 工学研究院・建築学 工博（正会員）

梁および同図(b)左部の逆梁（以下、直線部）の配筋は全試験体共通で、引張主筋は上端、下端とも 8-D16（全てネジ鉄筋）とし、順梁上端一段目主筋と逆梁下端一段目主筋（共に 6-D16）は共通として全長にわたり直線通し配筋とした。スターラップは梁端曲げ終局時のせん断力に対して、全長にわたり直線梁と仮定し（文献 2）の方法で必要とされる量とした。また、折れ曲がり部の長さ L_b は直線部の全せい D と等しく 350mm を基本とし、試験体 CP-0.5 のみ 0.5D とした。実構造物の挙動に近くなるよう、全試験体共通に梁両側面に幅 175mm、厚さ 100mm のスラブを取り付けた。

実験の主変数は図-2 に示すように、中央折れ曲がり部の配筋方法とした。この構造方式においても通常の直線型の梁と同様端部での曲げ降伏を実現し、中央折れ曲がり部におけるせん断による破壊、順梁と逆梁の分離、梁主筋の定着破壊等を防ぐことが必要である。加えて、施工に支障を来たすような過密な配筋も避ける必要がある。地震時における折れ曲がり部の応力状態を模式的に示すと図-3 のようになる。折れ曲がり部がスパン中央にあるため、モーメントは部材端に比べ小さい。そこで、曲げ終局時のせん断力に対して、せん断破壊および順梁と逆梁の分離を防ぐよう、折れ曲がり部をスターラップにより全補強することを基本とした（試験体 CR-1, CP-1, HR-1 および HP-1 : SD785, 4-D6, 3 組）。折れ曲がり部の応力状態は不明であるため試験体 CR-1 および HR-1 では、折れ曲がり部のせん断補強レベルを上げて、さらに水平横補強筋を付加した（SD785, 2-D6, 6 組）。順梁下端主筋および逆梁上端主筋の折れ曲がり部における定着方法は、折り曲げ定着により余長を互いに相手方の梁せい内まで延長したもの（試験体 CR-1），余長を自身の梁せい内に留めたもの（試験体 CP-1 および CP-0.5），主筋端部を機械式定着としたもの（試験体 HR-1 および HP-1）の 3 種類とした。なお、水平横補強筋は、試験体 CR-1 では主筋の余長部を囲んで、試験体 HR-1 では折れ曲がり部四隅に配した縦

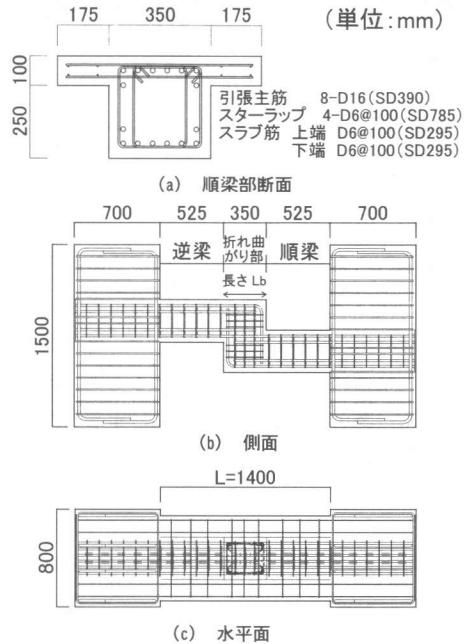


図-1 試験体配筋図 (CR-1)

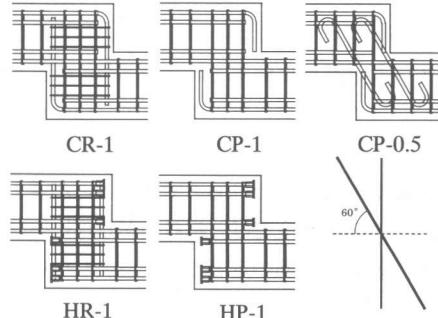


図-2 中央折れ曲がり部の配筋

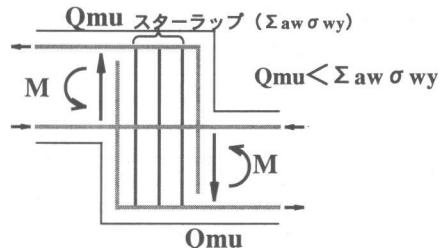


図-3 折れ曲がり部の応力状態
(負方向加力時)

筋 (4-D16) を囲んで配筋した。

折れ曲がり部の施工性からは試験体 CP-1 および HP-1 の配筋がよい。試験体 CP-0.5 は折れ

曲がり部の長さ L_b を短くしたことにより、スターラップによる全補強が困難であったため、不足分を梁材軸に対し 60° の角度で配筋したフック付き斜め筋(4-D16)で補った。

コンクリートおよび鉄筋の材料特性を表-2に示す。コンクリートは実部材と同様、全試験体共通に、スラブ上面を境に2回に分けて打ち継いだ。HP-1以外は順梁部を1バッチ目、逆梁部を2バッチ目とし、HP-1は両部共に2バッチ目を用いた。

表-2 材料特性

(1) 鉄筋

鋼種	部位	降伏ひずみ ε_y (%)	降伏強度 σ_y (MPa)	引張強度 σ_u (MPa)
D16 (SD390)	梁	0.273	449	668
D6 (SD295)	スラブ	0.228	438	574
D6 (SD785)	梁	0.771	1040	1180

(2) コンクリート

気中 養生	Fc (MPa)	圧縮強度 σ_c (MPa)		割裂強度 σ_t (MPa)	
		1batch	2batch	1batch	2batch
	36	29.6	32.2	1.99	2.24

* 強度は加力期間の平均値

2. 2 加力方法および加力履歴

加力装置を図-4に示す。加力は軸力用 1000 kN 油圧ジャッキ 2 台と水平載荷用 500 kN 油圧ジャッキ 2 台により、スタブを平行に、また過大な軸力が作用しないよう(0~30kN の範囲となるよう)調整しながら正負交番繰り返し載荷とした。加力は変位制御とし、部材変形角 $R = \pm 1/400\text{rad}$ を1回行った後、 $R = \pm 1/200, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33, 1/25\text{rad}$ を各2回、その後 $R = +1/100\text{rad}$ を行った後、負加力方向に単調載荷した。なお、スラブ引張となる方向を正方向載荷とした。すなわち負方向の載荷で、折れ曲がり部の順梁と逆梁を引き離そうとする方向にせん断力を作用させた。

3. 実験結果

3. 1 損傷状況と復元力特性

各試験体の最終ひび割れ状況を図-5に、荷重変形関係を図-6に示す。

(1) 試験体 CR-1 および CP-1

両試験体とも、変形角 $R = \pm 1/400\text{rad}$ に達する前に両端危険断面に曲げひび割れが、また $R =$

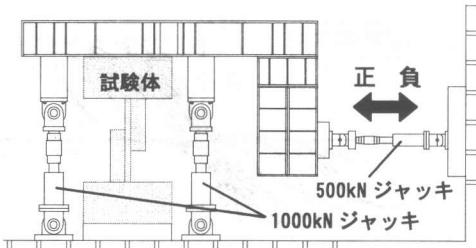


図-4 加力装置

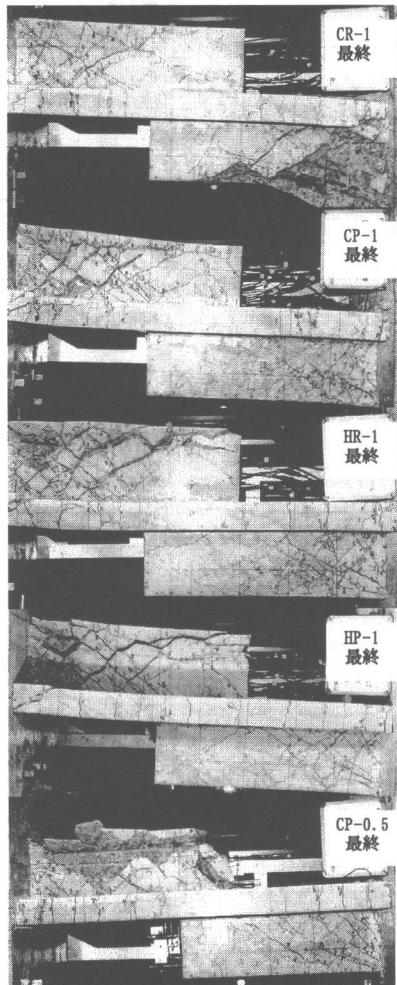


図-5 最終ひび割れ状況

$\pm 1/200\text{rad}$ に達する前に危険断面付近にせん断ひび割れが発生し、変形の増大と共に両端部付近のひび割れの数と幅が増加していった。

折れ曲がり部の損傷について、試験体 CR-1 では加力開始以前に初期ひび割れが観察されたため、加力による初期ひび割れ発生を捕らえられなかっ

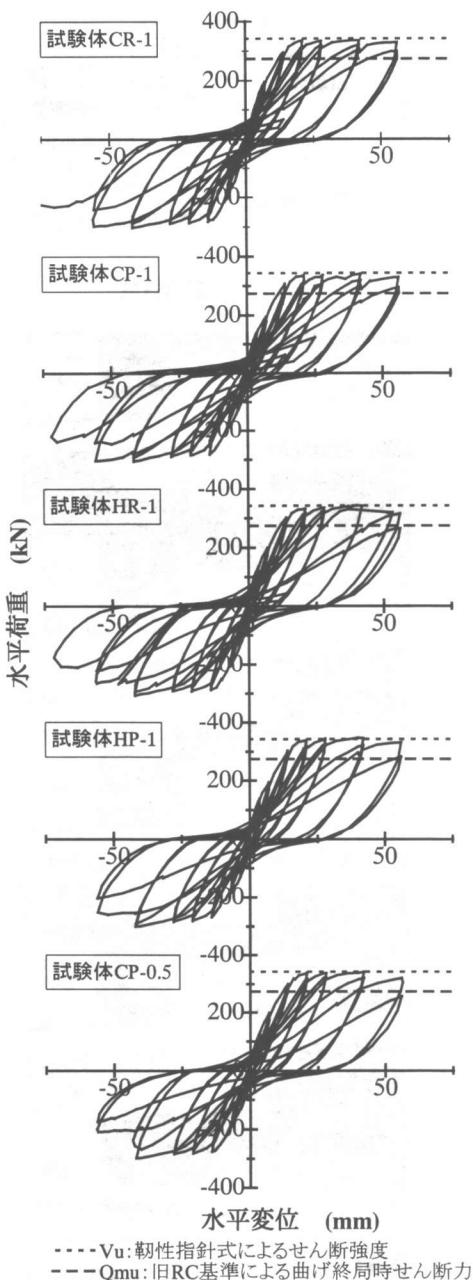


図-6 荷重変形関係

たが、CP-1 では $R = -1/100 \text{ rad}$ のサイクルのピークで幅 0.1mm の斜めひび割れとスラブと梁との境界に幅 0.3mm のひび割れが観察された。折れ曲がり部の損傷を $R = -1/50 \text{ rad}$ のピークで比較すると、試験体 CR-1 では幅 0.2mm の斜めひび割れのみが観察されたのに対し、CP-1 では幅 0.6mm の斜めひび割れに加え、スラブと梁との境界に幅

0.5mm のひび割れが観察された。ただし続く除荷時には、CP-1 のこれらのひび割れ幅は 0.1~0.2mm に減少した。両試験体とも $R = -1/25 \text{ rad}$ を超える 1 方向載荷によって部材端ヒンジ領域で大きなせん断ずれを生じ破壊したが、折れ曲がり部の損傷は軽微に留まった。

試験体 CR-1 では $R = -1/104 \text{ rad}$ で、CP-1 では $R = +1/77 \text{ rad}$ で危険断面の梁主筋が引張降伏し、耐力低下を生じることなく、両試験体とも $R = \pm 1/33 \text{ rad}$ の繰り返しのピークで最大耐力に達した。降伏後の復元力特性はやや逆 S 字の性状を示したが、これはヒンジ領域にせん断ひび割れの卓越した短スパン梁であることによる。両試験体とも $R = -1/25 \text{ rad}$ の 2 回目の繰り返しのピークで最大耐力の 79% に耐力が低下した。両試験体の復元力特性は最終サイクルまでほとんど一致した。折れ曲がり部のスタートアップに降伏は生じなかった。このように、折れ曲がり部における補強方法と、梁主筋の定着余長に差異を設けた両試験体の構造性能にほとんど差は無く、折れ曲がり部の配筋は CP-1 の方法で十分であるといえる。

(2) 試験体 HR-1 および HP-1

梁主筋を折れ曲がり部で機械式定着とし、補強量に差異を設けた両試験体の損傷の進展状況は、 $R = \pm 1/50 \text{ rad}$ の繰り返しまでは、試験体 CR-1 および CP-1 の傾向と同様であった。すなわち部材両端部の曲げおよびせん断による損傷が進行し、折れ曲がり部のひび割れは補強量の少ない HP-1 の方が発生時期が早く、その本数と幅がやや卓越していたが、いずれも軽微に留まっていた。梁主筋の引張降伏は試験体 HR-1 で $R = -1/100 \text{ rad}$ 、HP-1 で $R = 1/77 \text{ rad}$ の変形角でみられた。降伏後の耐力は最大耐力を発生した $R = \pm 1/33$ の繰り返しまで維持され、このサイクルまでの復元力特性は試験体 CR-1 と差は見られず同等の性状を示した。両試験体の大変形時の最終破壊状況は、試験体 CR-1 および CP-1 とは異なり、 $R = \pm 1/25 \text{ rad}$ の繰り返しで、逆梁上端主筋が全長にわたって付着割裂破壊を生じ、これに伴って耐力低下を生じた。これは、

コンクリートの打設方向の影響で逆梁上端主筋の付着強度が低いことに加え、主筋端部定着金物周囲のコンクリートが拘束されていないため、定着反力を十分発揮できなかったことによると考える。しかし、実用的な変形の範囲では両試験体とも CR-1 と同等の性能を発揮し、折れ曲がり部の損傷は軽微にとどまり、スターラップの降伏もみられなかったことから、折れ曲がり部を全補強とした HP-1 の実用性に問題はない判断する。

(3) 試験体 CP-0.5

変形増加に伴い、部材両端部の曲げおよびせん断による損傷が進行した状況は他の試験体と同様である。変形角 $R = -1/200\text{rad}$.のサイクルで折れ曲がり部において、梁とスラブの境界に沿うひび割れが発生した。 $R = -100\text{rad}$.で梁端部主筋が引張降伏し、折れ曲がり部においてスラブと直行方向にひび割れが発生したが、 $R = -1/50\text{rad}$.まではこれらのひび割れが顕著に拡大することはなかった。ところが、 $R = +1/33\text{rad}$.の2回目のサイクルで、折れ曲がり部逆梁側の斜め補強筋に沿ったひび割れが発生し、変形と共に逆梁上端主筋の余長部が引き起こされる様態でのひび割れが拡大し、最終的に逆梁上端主筋が全長にわたり付着割裂破壊を生じた。しかし、 $R = \pm 1/33\text{rad}$.の繰り返しまでの復元力特性は CR-1 と同等であり、折れ曲がり部の長さを梁せいの半分程度としても、実用に耐えうるを考える。ただし、最終破壊状況が脆的であったことから、主筋余長部の拘束を高めるなど折れ曲がり部の配筋詳細は改善する必要がある。

3.2 主筋のひずみ分布

部材全長にわたり通し配筋とした梁主筋のひずみ測定位置と、各サイクル正側1回目のピークすなわち主筋両端部が同時に引張となる変形時のひずみ分布を試験体 HP-1 を例に図-7 に示す。主筋両端部が降伏した後も中央の折れ曲がり部では降伏に達しておらず、大変形時まで付着が保持された。梁の外側主筋においても折れ曲がり部では弾性範囲に留まった。特にスラブ内主筋の中央のひずみは加力前から殆ど変化し

なかつた。これらの傾向は折れ曲がり部における配筋が異なる5体の全試験体で同様であった。

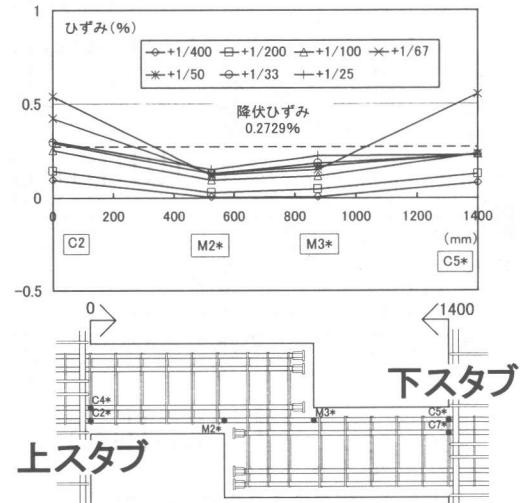


図-7 主筋のひずみ分布 (HP-1)

3.3 折れ曲がり部でのせん断変形の比率

各部分のせん断変形測定位置を図-8 に、全体の水平変形に占める折れ曲がり部のせん断変形の比率を図-9 に示す。ここで折れ曲がり部のせん断変形とは、試験体の梁中央に近い部分(3つのゾーン)のせん断変形の和とし、これを全体の水平変形で除して求めた。各試験体において、変形が進むに従い折れ曲がり部におけるせん断変形の比率が減少する傾向があった。これは折れ曲がり部の変形よりも材端部の変形が進んでいった現象と対応する。負側のせん断変形の比率が正側より大きい傾向は、負方向の加力が折れ曲がり部のひび割れを拡大する方向に作用するためと考えられる。

各試験体の全体変形に占める折れ曲がり部のせん断変形は非常に小さく、変形すなわち損傷が折れ曲がり部ではなく、材端部に集中していたことが数値的に裏付けられた。

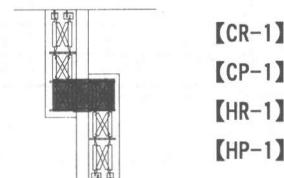


図-8 せん断変形測定位置

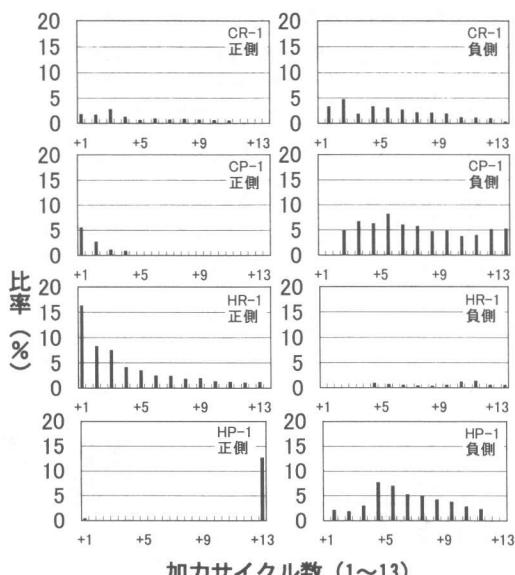


図-9 全体に占めるせん断変形の比率

3.4 実験値と計算値との比較

材料試験結果に基づいて既往の算定式により算出した耐力の計算値と実験結果を比較して表-3に示す。各試験体の実験から得られた最大耐力とその時の変形にはほとんど差が無く、折れ曲がり部の配筋の違いは終局時の性能に影響しなかった。また最大耐力の実験値は曲げ終局時の計算耐力を10%程度上回っていたが、せん断終局強度の計算値には達しておらず、梁曲げ降伏が確保された実験結果と整合した。機械式定着を適用した試験体では途中までは問題はないが、最終的には定着破壊の様相を呈した。

4. まとめ

短スパンの折れ曲がり梁の構造実験により、地震時の弾塑性性状に関して以下の知見を得た。

- (1) 折れ曲がり部を、曲げ終局時のせん断力に対して全補強したことによって、折れ曲がり部に顕著な損傷は生じなかった。
- (2) 梁主筋を折れ曲がり部で折り曲げ定着する場合、余長を梁せい内に留めることが可能である。
- (3) 折れ曲がり部の梁端部を機械式定着にした場合、最大耐力時以降の耐力低下が折り曲げ定着した場合よりも若干大きいが、実用的な变形の範囲では構造性能に問題は無い。
- (4) 折れ曲がり部の長さを梁せいの半分程度とした場合でも、順梁と逆梁が分離する破壊を防ぐことができるが、主筋余長部の拘束を高めるなど配筋詳細を検討する必要がある。

謝辞

本研究は(社)建築研究振興協会の「高層ラーメン構造の一般取得に関する技術検討委員会」内に設けられた「Z梁実験 SWG(主査:倉本洋)」の研究課題として行われたものである。関係各位に記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 西村勝尚ほか:折れ曲がり梁の構造性能に関する実験的研究(その1)(その2),日本建築学会大会学術講演梗概集(東北),C-2,pp.477-480,2000.9
- 2) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の韌性保証型耐震設計指針(案)・同解説,1997

表-3 実験結果と計算値

試験体名	実験値				計算値				$\frac{V_u}{Q_{mu}}$	$\frac{\tau_{bcal}}{\tau_f}$	$\frac{Q_{max}}{Q_{mu}}$
	Qy (kN)	Ry (rad.)	Qmax (kN)	Ru (rad.)	Qmu (kN)	Vu (kN)	τ_f (N/mm ²)	τ_{bcal} (N/mm ²)			
CR-1	276	1/104	301	1/33							1.10
CP-1	244	1/100	305	1/33							1.11
HR-1	287	1/100	306	1/33	274	353	3.12	4.01	1.29	1.28	1.12
HP-1	262	1/86	300	1/33							1.12
CP-0.5	275	1/100	298	1/33							1.09

※表中の数値は負方向載荷時の値

Qy: 部材降伏時荷重 Ry: 部材降伏時変形角

Qmax: 最大荷重

Ru: 最大荷重時部材変形角

τ_f : 付着応力度

Qmu: 旧RC基準の付録式による曲げ終局強度

Vu: $R_p = 1/50 \text{ rad.}$ とした韌性保証指針式によるせん断強度

τ_{bcal} : 文献2) 解説の式による付着割裂強度 (1段目のみ)