報告 鉄筋の付着損失がRC部材の曲げ耐荷性状に及ぼす影響

村山 八洲雄*1·金 相昊*2·武田 絵里*3·西村 伸一*4

要旨:鉄筋とコンクリート間の著しい付着損失を想定し、部分的にアンボンド化した鉄筋コンクリート部材の曲げ加力実験を行った。アンボンド長と鉄筋比をパラメータとした合計 12 体の試験体を用い、2 点載荷によりスパン中央部での曲げ破壊に着目して行った。実験の結果、破壊モードはいずれも引張り鉄筋の降伏が先行する破壊であった。曲げ耐力はアンボンド化により低下したが、健全試験体の90%を下回ることはなかった。また、アンボンド長が大きいと部材の弾性剛性は小さく、アンボンド化により終局変位は健全試験体に比べて小さくなることが分かった。

キーワード:アンボンド,付着,鉄筋コンクリート,曲げ耐力,弾性割線剛性,終局変位

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材の鉄筋が腐食すると、鉄筋の見かけ上の降伏点が低下するのみならず、鉄筋とコンクリート間の付着力が著しく低下することが知られている¹⁾。腐食が進行して被りコンクリートが剥落すると、付着力は殆ど期待できない状態となる。

鉄筋コンクリート部材(以下, RC 部材と呼ぶ。)のせん断耐力に対するこの付着損失の影響を調べた研究は行われているが,曲げ耐力に関するものは少ない。

森田ら²⁾は、鉄筋の断面減少と付着 損失を同時に考慮した模擬腐食鉄筋 によるRC部材の実験と解析を行い、

曲げ耐力低下とひびわれ性状について検討している。海外では Eyre 6^{3})が弾性解析により部分アンボンドRC 部材の曲げ耐力を求めており,健全部材に対して耐力が 50%に低下するようなケースも示している。Cairns 6^{4})および Raoof 6^{5})は,鉄筋を露出させたRC部材の曲げ耐力の実験を行い,それぞれ 50%および 70%に低下するようなケースの結果も得ている。

しかし、曲げ耐力に対するコンクリート中の鉄筋の付着損失の影響という点では必ずしも明確になっておらず、また鉄筋を露出させたものにおいては異なる破壊モードの混在などのため、検討の余地が残されている。

本報告はそのうち、コンクリート中にある鉄筋の付着 損失が曲げ耐荷性状に及ぼす影響に着目したものであ り、スパン中央部での曲げ破壊に着目した実験結果につ いて述べる。

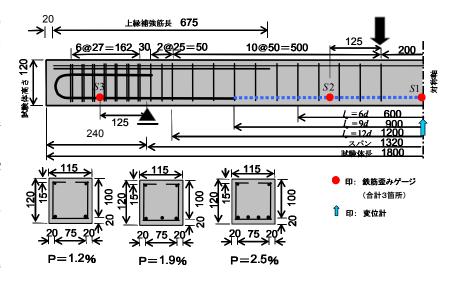


図-1 試験体諸元

2. 実 験

2.1 試験体寸法と試験体の種類

実験では、引張り鉄筋の付着力が部分的に喪失した状態を想定し、部分アンボンド RC はり試験体を用いた。 スパン中央部での曲げ破壊に着目していることから、支点付近の部材上縁引張り(下縁圧縮)破壊や鉄筋の定着破壊および部材のせん断破壊が生じないように、試験体の配筋で配慮した。

試験体諸元を**図-1**に示す。試験体の外形寸法は幅 115mm, 高さ120mm, 長さ1800 mm である。引張り鉄筋比が大きいときに付着損失の影響が大きいとの考えもある³⁾ことから, 鉄筋比は大きめの範囲とし, 1.2%, 1.9% および 2.5%の 3 種類とした。付着損失長の影響を調べるため, アンボンド長を 600mm, 900mm, 1200mm の 3 種類

^{*1} 岡山大学大学院 環境学研究科社会基盤環境学専攻 教授 工博 (正会員)

^{*2} 京都大学大学院工学研究科 修士課程

^{*3} 岡山県美作県民局 技師

^{*4} 岡山大学大学院 環境学研究科社会基盤環境学専攻 准教授 農博

表-1 試験体の種類

No.	ρ	l_u/d	f_c'	$\rho f_y / f_c'$	P_{y}	P_{ult}	P_{cal}	mod e	$\sum w_c$	\mathcal{E}_{sw}	\mathcal{E}_{scal}
B 12	1.2	0	30.6	0. 15	17. 1	18.9	17. 1	鉄筋降伏	_	_	15700
U12-6d		6	34. 5	0. 13	17. 3	18.4	17. 3	鉄筋降伏	5. 0	8300	18200
U12-9d		9	34. 3	0. 13	15.8	17. 4	17. 2	鉄筋降伏	3. 2	3600	18100
U12-12d		12	32. 3	0. 14	16.4	17.3	17. 2	鉄筋降伏	4. 3	3600	16800
B 19	1.9	0	35. 7	0. 19	26.0	27.8	25. 0	鉄筋降伏	_	_	11500
U19-6d		6	36. 2	0. 19	25. 1	25. 5	25. 1	鉄筋降伏	4. 9	8200	11700
U19-9d		9	36. 0	0. 19	24. 4	25. 5	25. 1	鉄筋降伏	2. 5	2800	11600
U19-12d		12	36. 0	0. 19	25.0	25. 3	25. 1	鉄筋降伏	2.9	2400	11600
B 25	2.5	0	34.8	0.26	32. 9	34. 7	32. 1	鉄筋降伏	_	_	7400
U25-6d		6	35. 5	0. 25	31. 7	33. 7	32. 2	鉄筋降伏	欠測	欠測	7700
U25-9d		9	35. 0	0. 26	30. 9	33. 5	32. 1	鉄筋降伏	2. 1	2300	7500
U25-12d		12	35. 0	0. 26	30.4	33. 1	32. 1	鉄筋降伏	2.8	2300	7500

備老

 ρ :鉄筋比 (%), lu/d:アンボンド長・有効高さ比, fc': 実験時コンクリート強度(N/mm²), ρ fy/ fc': 鉄筋係数, P_y : 降伏荷重(kN), P_{ult} :最大荷重(kN), P_{cal} :付着の健全な場合の曲げ耐力計算値(kN),mode: 破壊モード, Σ w_c:最大荷重時のアンボンド範囲の鉄筋位置ひびわれ幅合計(mm), ε sw: ひびわれ幅から求めた最大荷重時の鉄筋の平均ひずみ量(×10-6), ε scal: 平面保持の仮定で求めた終局時鉄筋ひずみ量(×10-6)

(それぞれ有効高さの 6, 9, 12 倍, スパン長の 0.45, 0.68, 0.91 倍) とした。比較のための付着の健全な試験体(以下, 健全試験体と呼ぶ。) も含めて, 合計 12 体の試験体を用いた。

試験体の種類を表-1に示す。試験体番号を表す記号の意味は次のとおりである。最初のアルファベットは付着の有無(B:付着が健全,U:アンボンド)を,次の数値は鉄筋比の大きさ(鉄筋比の1000倍で表示)を,ハイフンのあとの数値はアンボンド長(部材断面有効高さに対する比として)を,最後の"d"は有効高さを表している。

2.2 材料, 配筋, 養生

引張り鉄筋には明確な降伏棚を有する D10 鉄筋(降伏点 $363N/mm^2$, 引張り強さ $503~N/mm^2$)を使用した。鉄筋のアンボンド化は、鉄筋にグリスを塗布したのち 0HP フィルムで包み、更にその上をビニルテープで被覆する方法によった。定着部補強とせん断補強には D4 鉄筋(降伏点 $347N/mm^2$)を、また、支点付近上縁側補強には引張り鉄筋と同数の D6 鉄筋(降伏棚なし、引張り強さ $540~N/mm^2$)を配置した。

コンクリートには、充填性を考慮して最大骨材寸法 15mm のレディミクストコンクリート (18-15-10 N。本報告では配合表をもとに Gmax15 と記述。)を使用した。試験体は同一バッチのコンクリートを用いて打設した。打設後、木製型枠のまま湿布養生して材齢7日で脱型し

たのちビニルシートでラップし、材齢 28 日にラップを除去しその後実験日まで室内気乾養生とした。圧縮試験用テストピースの養生も試験体と同様とした。実験は材齢 29 日~材齢 51 日で行った。

2.3 加力方法と測定

加力は、スパン中央部にフレームを介して間隔 200mm の 2 点載荷(図-1) により行った。載荷部と支点部には、それぞれ直径 30mm と直径 50mm の鋼棒および幅 50mm,厚さ 20 mm の支圧板(鋼板)を使用し、加力点と支点で部材の回転と水平変位を拘束しないよう(加力点:テフロン、支点:ローラー)配慮した。能力 100kN のアクチュエータを用いて変位制御方式で加力した。

実験では荷重,変位,鉄筋ひずみ,コンクリートひずみ,ひびわれ分布,ひびわれ幅を測定した。

荷重はアクチュエータに組み込まれたせん断ひずみ 測定型ロードセルで、変位はひずみゲージ式変位計で測 定した。

鉄筋ひずみは、ゲージ長 5mm の一般応力測定用の箔ゲージを各試験体の鉄筋 1 本に限定して 3 箇所(図ー 1 参照、S1、S2、S3)貼り付けて測定した。実験時の部材変形に伴うゲージの損傷を防止するためにゲージを鉄筋の側面に貼付し、相対して 2 枚とした。そのため、鉄筋曲げ加工との関係から縦リブの一部を長さ 15 mm 前後切除した。その影響を調べるため実験後、実験で使用した鉄筋と同じ工場で製造された同じ呼び径(D10)の鉄筋を

使い,大ひずみ測定用箔ゲージ(ゲージ長 5 mm)と棒鋼用伸び計(ゲージ長 50 mm, ひずみゲージ位置を避けて配置)を用いて引張り試験を行った。その結果によれば,ゲージ貼り付け部(縦リブ切除部)は一般部に比べて2%程度低い荷重で降伏し,この部分がすぐにひずみ硬化点(ひずみ量約3%)に達したあと荷重が増加して鉄筋の他の部分が降伏するという状況であった。

コンクリートのひずみの測定は、ゲージ長 30 mm の箔 ゲージを用い、アンボンド区間の鉄筋位置に沿って貼り付け、部材軸方向ひずみを測定した。ひびわれ幅は、クラックスケールを用いて測定した。

3. 実験結果と考察

表-1に、降伏荷重、最大荷重および破壊モードを示す。降伏荷重は、鉄筋の同一断面の2点のひずみ測定値の平均値が荷重の増加なく急増したときの値である。表には付着が健全の場合の曲げ耐力の計算値も併記した。計算には平面保持を仮定し、コンクリートおよび鉄筋の応力ひずみ関係にはコンクリート標準示方書⁶⁾に示されるものを用いた。ただし、材料係数および最大応力比の値k。はいずれも1、終局ひずみは3,500×10⁻⁶とした。

荷重とスパン中央部鉛直変位の関係を**図-2**に、代表的なひびわれ分布を**図-3**に示す。

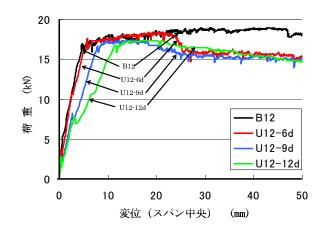
(1) 弾性割線剛性

図-2の荷重-変位関係に示されるように、部材降伏前の部材剛性は、いずれの鉄筋比においてもアンボンド長が大きいほど小さくなっていることが分かる。各鉄筋比毎に部材降伏前の共通の荷重値を設定(1.2%, 1.9%, 2.5%に対してそれぞれ 16.5kN, 24.5 kN, 32.5kN) し、その割線剛性とアンボンド長との関係を整理して図-4に示す。アンボンド長がスパン長の 91%(12d)と大きいと、剛性は健全試験体のおよそ 1/2 まで低下している。これは、付着が健全なときはコンクリートと鉄筋が一体になって変形するが、アンボンド化すると協同作用がなくなってテンションスティフニングが喪失するためである。

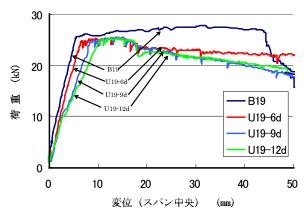
(2) 破壊モード

どのアンボンド試験体でも,最大荷重に至る前に部材中央の鉄筋ひずみゲージ(図-1の S1)がひずみ量 2,000~2,100×10 $^{-6}$ 以降,図-5に示すように急激なひずみ増加を示した。このことから,アンボンド試験体においても破壊モードは健全試験体と同様,鉄筋降伏先行の曲げ破壊モードと考えられる。ただし,せん断スパンにあるゲージ(S2)はひずみ量が約 2,100×10 $^{-6}$ まで増加したものの最大荷重に達しても降伏を示さないものが多かった。

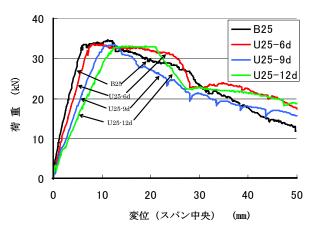
アンボンド区間に発生した鉄筋位置のひびわれ幅 (水



(1) 鉄筋比 1.2%の場合



(2) 鉄筋比 1.9%の場合



(3) 鉄筋比 2.5%の場合

図-2 荷重-変位関係

平方向測定値)の合計値を荷重ステップ毎に測定し(図 -6)、これをもとに最大荷重時のアンボンド区間の鉄筋の平均ひずみ量を推定した。その結果を表-1に示した。これによると平均ひずみ量(以下、 ϵ_{sw} と呼ぶ。)は 2, 300 $\times 10^{-6} \sim 8,300 \times 10^{-6}$ の範囲にあり、計算上の鉄筋降伏ひずみ量(以下、 ϵ_{veal} と呼ぶ。)1,815 $\times 10^{-6}$ を超えてい

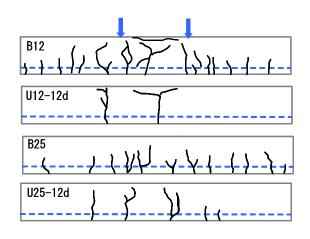


図-3 ひびわれ分布 (破線は鉄筋位置を示す)

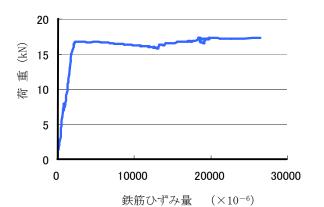


図-5 荷重-鉄筋ひずみ量関係 (U12-12d 試験体、S1 ゲージ)

る。しかし,ひずみ硬化点ひずみ量 ε_h の一般的な値 1.5 ~3%に比べるとかなり小さい値となっている。このことから,最大荷重は鉄筋がその長さ方向に降伏を伝播 7 させつつある段階で生じたと推定される。アンボンド長が大きいと最大荷重時の $\varepsilon_{\rm sw}$ は小さく, $\varepsilon_{\rm ycal}$ に近い値であることから,鉄筋の降伏点の大きさ $f_{\rm y}$ や腐食鉄筋の応力ーひずみ関係の違いによっては,破壊挙動が若干異なってくることは想定される。

なお、2.3 節で述べた鉄筋の引張り試験結果から、部材内鉄筋が降伏した場合、ひずみゲージ貼り付け部(断面欠損部)が局部的に降伏棚で伸びることになるが、縦リブ切削長が 15mm 前後であるので、ひずみ硬化点ひずみ量を大きめの3%とすれば、その伸び量は0.45mm 程度となる。表-1のひびわれ幅の合計値には、その分が含まれていると見なされる。また、アンボンド長が大きいものでは支点付近の部材下縁側コンクリートに部材軸方向の圧縮ひずみが生じる3)。最も顕著となる U25-12d 試験体のひずみ分布は図-7に示すとおりで、アンボンド区間内の鉄筋位置での圧縮領域は片側約 360mm、圧縮ひずみ量の平均値は-450×10-6程度であった。これによる両支点付近の鉄筋位置でのコンクリート収縮量は

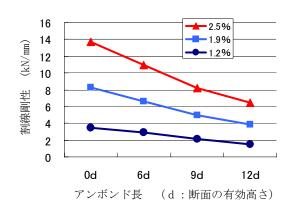


図-4 弾性割線剛性

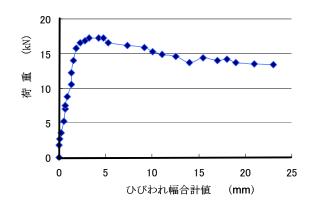


図-6 荷重-ひびわれ幅合計値関係(U12-12d 試験体)

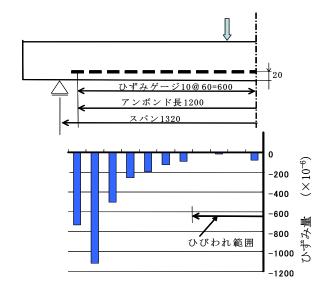


図-7 鉄筋位置でのコンクリートひずみ分布 (U25-12d 試験体)

0.32 mm となり、アンボンド長が 1200 mm であることから、前述 ϵ_{sw} への影響としての換算値は -270×10^{-6} 程度に相当している。また、アンボンド長 12d の試験体における鉄筋定着部のひずみゲージ(S3)の測定値はいずれ

も小さく、測定誤差の範囲であった。したがってこれらが前述の鉄筋の平均ひずみ量(ϵ_{sw})に関する議論に大きな影響を与えるものではないといえる。

健全試験体も含めどの試験体でも、最大荷重を迎える のはスパン中央部の上縁においてコンクリートが圧壊 を始める頃であった。

(3) 耐力

実験結果には材齢によるコンクリート強度の違いの 影響も含まれるので、その影響を除去するために各試験 体の曲げ耐力の計算値(付着が健全と仮定)を求め、実 験値と計算値の比を指標(以降、耐力比と呼ぶ。)にし て、付着損失に伴う曲げ耐力の変化を調べた。

この耐力比とアンボンド長との関係を**図-8**に示す。 図より鉄筋の付着損失があるものは、健全試験体に比べ て曲げ耐力が低下していることがわかる。しかし、耐力 の低下量は10%程度以下であった。

健全試験体では、図-2の荷重-変位関係の特徴から、 鉄筋は概ねひずみ硬化域に達していると推定される(ちなみに、ひずみゲージの位置がひびわれ位置とは限らないが、B12、B19、B25 試験体の最大荷重時のひずみ測定値はそれぞれ2.7%以上、1.2%、2.2%以上であった。)。 そのため、前述の破壊モードと併せ考えると、健全試験体とアンボンド試験体の曲げ耐力の相違は、主に鉄筋がひずみ硬化に至ったかそうでないかの違いによると考えられる。アンボンド試験体がひずみ硬化に達しにくいのは、付着の健全な試験体の場合とは異なり鉄筋コンクリートとしての断面の平面保持の性状が成り立たない3)ためコンクリートの圧縮ひずみの進行が速く、その結果コンクリートが先に終局に至ることによると考えられる。

アンボンド RC 部材の耐力低下に対する鉄筋比の影響 については、明確ではなかった(図-9)。

なお、**図-2**よりひずみ硬化領域に達したと推定されるU12-6d試験体などで ϵ_{sw} が 1%を下回っている理由として、ひびわれ位置での鉄筋の曲がりの影響やわずかな付着力(摩擦力)などが考えられる。

(4) 部材の軟化と終局変位

いずれの試験体も荷重一変位関係における部材の軟化は、コンクリートが圧壊を始めた頃から明確となった。鉄筋比が 1.2%と 1.9%の場合には、健全試験体に比べてアンボンド試験体では小さい変位量で軟化を示した(図-2)。降伏荷重(鉄筋ゲージが降伏を示した荷重)まで荷重が低下したときの変位(これを、終局変位と呼ぶものとする。)は図-10に示すようにアンボンド試験体では健全試験体に比べ総じて小さくなった。この理由としては、アンボンド試験体ではスパン中央部にひびわれが集中し、コンクリートにおいては部材変位の殆どをスパン

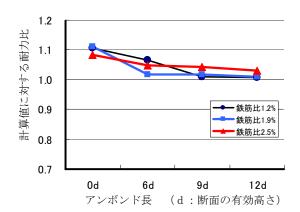


図-8 曲げ耐力とアンボンド長の関係

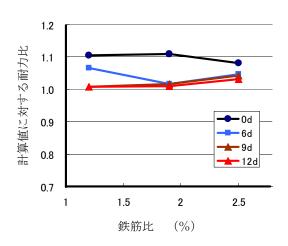


図-9 曲げ耐力と鉄筋比の関係

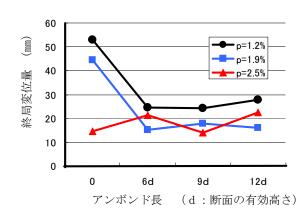


図-10 終局変位量とアンボンド長の関係

中央部の塑性化だけで受け持つためと推定される。

鉄筋比が 2.5%の場合は、健全試験体との相違は明確ではなかったが、その理由としてより釣り合い鉄筋比に近いため健全試験体でも圧壊が起こりやすいことが関係していると思われる。

(5) ひびわれ

鉄筋比 1.2%と 2.5%の場合のひびわれ分布は**図-3**に示したとおりである。アンボンド試験体では健全試験体に

比べてひびわれが集中し、特に鉄筋比の小さい方で顕著 であった。

支点付近の部材上縁のひびわれは目視観測の範囲で 認められなかった。

4. 結 論

降伏点 363N/mm² の鉄筋を用い, 鉄筋比 1.2%, 1.9%, 2.5% で, アンボンド長をスパン長の 0.45 倍, 0.68 倍, 0.91 倍に変化させた鉄筋コンクリート部材の, スパン中央部での破壊に着目した曲げ加力実験を行った。その結果, 得られた結論は次のとおりである。

- (1) アンボンド部材においても、破壊モードは鉄筋降 伏先行型であった。
- (2) アンボンド部材の曲げ耐力は、付着の健全な部材に比べて小さくなった。しかし、健全な部材の 90%を下回ることはなかった。曲げ耐力低下に対する鉄筋比の影響は明確ではなかった。耐力低下の原因は、部材断面の平面保持が成り立たないため、鉄筋がひずみ硬化域に達しないためと考えられる。
- (3) アンボンド部材の割線弾性剛性は付着が健全なものに比べて小さくなり、健全な場合の 1/2 程度に低下する場合がある。
- (4) アンボンド部材の軟化は、付着が健全なものに比べて小さい変位で生じる場合が多い。最大荷重到達後、荷重が降伏荷重まで低下するときの変位量は、付着が健全なものに比べて小さくなる場合が多い。

謝辞

本報告の実験は、ウエスコ学術振興財団の助成金により行いました。実験を行うにあたり岡山大学・阪田憲次教授にお世話になりました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- Al-Sulaimani, M.Kaleemullah, I.A.Basunbul, and Rasheeduzzafar: Influence of Corrosion and Cracking on Bond Behavior and Strength of Reinforced Concrete Members, ACI Structural Journal, pp.220-231, March-April 1990
- 2) 森田祐介・森川英典・礒谷哲也・小林秀恵:模擬腐食鉄筋を用いたRCはりの曲げ破壊性状と性能低下の評価, 土木学会第 57 回年次学術講演会, V-561 pp.1121-1122, 2002.9
- J.R.Eyre and M.-A.Nokhasteh: Strength assessment of corrosion damaged reinforced concrete slabs and beams.
 Pro. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs, pp.197-203, 1992
- J.Cairns and Z.Zhao: Behaviour of concrete beams with exposed reinforcement. Pro. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs, pp.141-154, 1993
- M.Raoof and Z.Lin: Structural characterisitics of RC beams with exposed main steel, Proc.Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs, 122, pp.35-51, Feb., 1997
- 6) 土木学会 2002 年制定コンクリート標準示方書
- 7) 小柳・六郷・岩瀬: コンクリート中の鉄筋の応力ー ひずみ関係と曲げを受けるRCはりの終局挙動, 土 木学会論文集 第 384 号/V-7, pp. 83-92, 1987 年