

論文 露出鉄筋を有する鉄筋コンクリート部材の曲げ耐力に関する実験的研究

村山 八洲雄^{*1}・津野 将太郎^{*2}・井ノ口 諭^{*3}・鎌田 光^{*4}

要旨：腐食劣化した部材の補修作業の過程で生じる鉄筋をはつり出した鉄筋コンクリート部材を想定し、鉄筋比、鉄筋露出長および露出部のコンクリート断面高さを变化させた曲げ加力実験を行い、その耐荷性状を調べた。その結果、露出長が大きいほど、鉄筋比が大きいほど、またコンクリート断面高さが小さい方で、耐力低下が著しいことが分かった。耐力低下の原因を、露出鉄筋とコンクリートの相対鉛直変位および露出鉄筋定着部付近で生じるコンクリート梁の負曲げによる変形の視点から考察した。

キーワード：鉄筋コンクリート、露出鉄筋、付着損失、曲げ耐力、破壊モード、はつり出し

1. はじめに

腐食劣化した鉄筋コンクリート部材の補修作業の過程で、鉄筋のはつり出しが行われる。その場合、かぶりコンクリートのみならず、鉄筋の裏側のコンクリートも除去され、鉄筋とコンクリート間の付着力は全くない状態となる。この種の鉄筋コンクリート部材の曲げ耐力については、Cairnsら¹⁾およびRaofら²⁾の実験研究があり、それぞれ曲げ耐力が健全部材に比べて50%および70%に低下する場合もあることが報告され、その理由も明らかにされつつある。しかし、破壊モードの性状、露出鉄筋とコンクリートの相対変位の影響および部材端部の変形の影響など、基本性状については必ずしも十分明らかになっていない。

そこで、鉄筋の露出長および鉄筋比をパラメータとした梁部材の一連の実験を行い、鉄筋やコンクリートのひずみおよび鉄筋とコンクリート間の部材直角方向の相対変位等の測定値をもとに、耐力低下に関する部材特性について実験的に検討したので報告する。

2. 実験

2.1 試験体寸法と試験体の種類

実験では、引張り鉄筋を部材軸方向に部分的にはつり出した部材を想定し、予めコンクリートに断面欠損を設けて鉄筋を露出させた試験体を用いた。ここではスパン

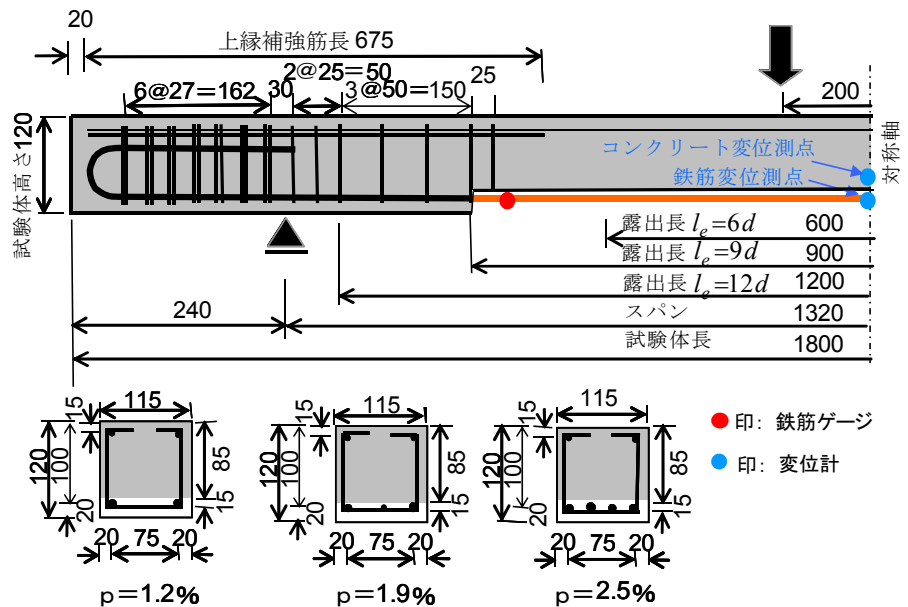


図-1 試験体諸元

中央での曲げ破壊に着目していることから、鉄筋の定着破壊、部材のせん断破壊および支点付近の部材上縁引張り（下縁圧縮）破壊が生じないように、配筋で考慮した。

試験体諸元を図-1に示す。試験体の基本外形寸法は、幅115mm、高さ120mm、長さ1800mmである。引張り鉄筋比が大きいときに曲げ耐力に対する鉄筋露出の影響が大きいと考えられることから、鉄筋比は大きめ（ただし、釣合鉄筋比以下）のものを含め、1.2%、1.9%および2.5%の3種類とした。鉄筋露出長の影響を調べるため、露出長が0mm、600mm、900mm、1200mmの4種類（それぞれ断面有効高さの0, 6, 9, 12倍、スパン長の0, 0.45, 0.68, 0.91倍）とした。露出長が0のものは、付着の健全な試験体（以下、健全試験体と呼ぶ。）である。鉄筋露出に

*1 岡山大学 大学院環境学研究科教授 工博（正会員）

*2 岡山大学 大学院環境学研究科修士課程（正会員）

*3 静岡県東部農林事務所御殿場支所

*4 伊予銀行

表-1 試験体の種類

No.	p	l_e/d	f'_c	$\rho f_y/f'_c$	P_{exp}	P_{cal}	ϵ_{smax}	mode	δ_s
B12	1.2	0	26.5	0.171	18.0	17.1	2000<	Y	—
E12-6d		6	28.0	0.162	16.4	17.3	1950	C, Y	2.1
E12-9d		9	28.1	0.159	16.0	17.5	1950	C	7.2
E12-12d		12	28.1	0.159	14.8	17.2	2090	C	12.1
E12-12d(75)		12	28.4	0.157	13.2	17.6	1850	C	11.8
B19	1.9	0	27.7	0.243	26.1	24.5	6820<	Y	—
E19-6d		6	27.7	0.241	24.0	24.7	2010	C	2.6
E19-9d		9	27.9	0.239	22.8	25.1	2000	C	9.7
E19-12d		12	28.0	0.243	19.7	24.7	1910	C	12.0
B25	2.5	0	27.3	0.333	32.4	31.0	2090<	Y	—
E25-6d		6	27.4	0.332	30.3	31.0	1980	C	4.9
E25-9d		9	27.6	0.334	23.5	30.6	1580	C	6.3
E25-12d		12	27.7	0.331	19.0	30.7	1310	C	10.2
備考	p : 鉄筋比, l_e/d : 露出長・有効高さ比, f'_c : コンクリート強度 (N/mm ²), $\rho f_y/f'_c$: 鉄筋係数, P_{exp} : 最大荷重 (kN), P_{cal} : 曲げ耐力計算値 (kN), ϵ_{smax} : 最大荷重時鉄筋ひずみ量 (全引張り鉄筋の平均値), mode : 破壊モード, Y : 鉄筋降伏先行, C : コンクリート圧壊先行, δ_s : 最大荷重時の鉄筋とコンクリートの相対鉛直変位 (mm)								

伴うコンクリート欠損断面位置でのコンクリート断面高さは 85mm (引張り鉄筋の上側クリアランスが 10mm) を基本とし、これが 75mm (クリアランス 20mm) の試験体 1 体を含めて合計 13 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、付着が健全か鉄筋露出かの違い (B : 付着健全, E : 鉄筋露出) を、次の数値は鉄筋比の大きさ (鉄筋比の 100 倍で表示) を、ハイフンのあとの数値は露出長 (部材断面高さに対する比として) を、そのあとの “d” は有効高さを表している。カッコ内の 75 は欠損断面位置でのコンクリート高さが 75mm と小さいことを表している。

2.2 材料, 配筋, 養生

引張り鉄筋には明確な降伏点 (ひずみ硬化点 : 変位計測定で 2.7%) を有する D10 鉄筋 (降伏点 367N/mm²) を使用した。鉄筋の露出は、鉄筋組立時に発泡スチロールを予め型枠に埋め込んで箱抜きする方法によった。定着部補強とせん断補強には D4 鉄筋 (降伏点 328N/mm²) を、また、支点付近上縁側補強には 4 本の D6 鉄筋 (降伏棚不明確, 引張り強さ 533 N/mm²) 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 (18-15-15N) を使用し、試験体には同一バッチのコンクリートを用いて打設した。特に露出鉄筋を有する試験体では、ひびわれ発生位置に起因する不確定要素を取り除くために、部材中央にコンクリート断面高さの 10% のひびわれ誘発目地を設けた。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、実験の 1 ~ 2 日前にラップを取り除いた。加力実験は材齢 35 日 ~ 材齢 70 日で実施した。

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 20mm 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, 部材変位, 露出鉄筋の鉛直変位, 部材回転角, 支点移動量, 鉄筋ひずみ, コンクリートひずみ, ひびわれ分布を測定した。荷重はアクチュエータに組み込まれたせん断ひずみ型ロードセルで、変位はひずみゲージ式変位計で、傾斜はポータブル傾斜計で測定した。

鉄筋のひずみは、ゲージ長 5mm の一般応力測定用の箔ゲージを各試験体の全ての露出鉄筋に、1 測点につき上下 2 枚貼り付けて測定した。コンクリートのひずみ測定には、ゲージ長 30mm の箔ゲージを用いた。

3. 実験結果と考察

表-1 に各試験体における最大荷重 P_{exp} , 最大荷重時鉄筋ひずみ量 ϵ_{smax} , 破壊モードおよび露出鉄筋とコンクリート間の相対鉛直変位量 δ_s を示す。 δ_s は、図-1 に示したコンクリート変位測点と鉄筋変位測点での測定値の差を意味している。表には付着が健全な場合の曲げ

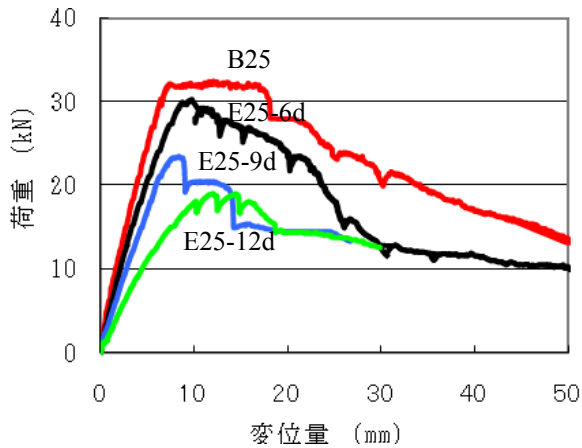
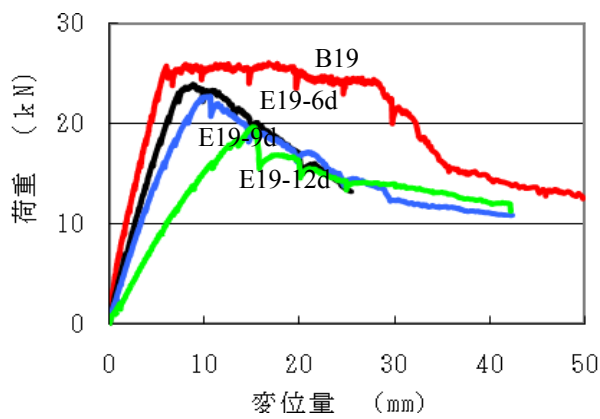
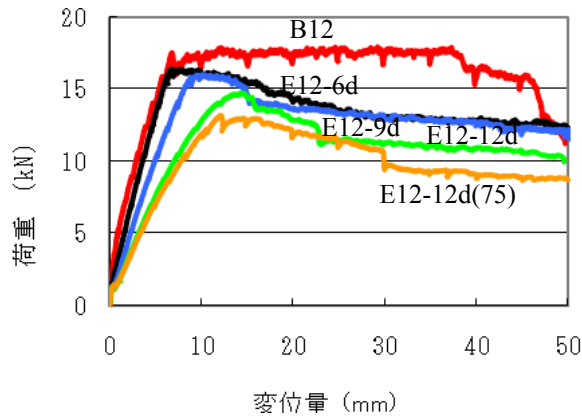


図-2 荷重-スパン中央変位関係

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³⁾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度とコンクリート強度の比 k_3 はいずれも 1、終局ひずみ量は $3,500 \times 10^{-6}$ とした。

荷重とスパン中央コンクリート部の鉛直変位との関係を図-2 に、代表的な試験体の最大荷重時のひびわれ分布を図-3 に示した。

(1) 弾性域の部材剛性

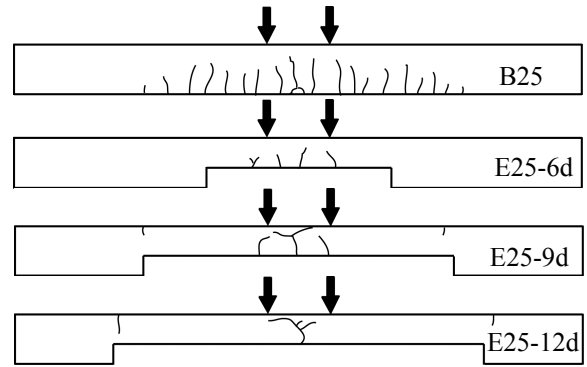


図-3 ひびわれ分布 (各最大荷重時)

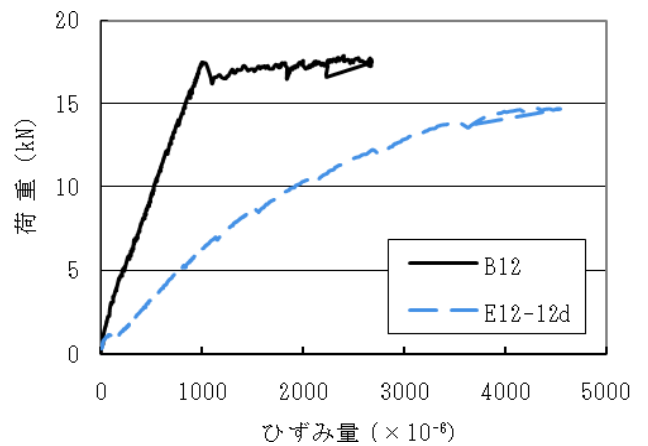


図-4 荷重-コンクリートひずみ関係

最大荷重に達する前の部材の割線剛性は、図-2 の荷重-変位関係から明らかなように、同一鉄筋比の場合、鉄筋露出長が大きいほど剛性は小さくなっている。これは、アンボンド鉄筋コンクリートにおける場合⁴⁾と同様、主として付着が健全なときに起きるテンションスチーフィングが喪失するためである。

(2) 破壊モード

図-2 からわかるように、健全試験体では変位の増加に対して荷重の増加が非常に小さいかまたは荷重増加が殆ど見られない明確な領域があり、引張り鉄筋は降伏したと判断される。一方、露出鉄筋を有する試験体ではそのような領域が見られず、鉄筋比の小さい E12-6d と E12-9d を除き、いずれも最大荷重以降の強度低下が大きい。健全試験体も含めどの試験体においても、最大荷重経過後の早い時期に、上縁側コンクリートの圧壊が観察された。

一方、引張り鉄筋の挙動についてみると、コンクリートのひびわれ発生以降の荷重とひずみの関係は、健全試験体を含むいずれの試験体においても、最大荷重付近までほぼ直線関係にあった。最大荷重時のひずみ量(全鉄筋の平均値)は表-1 に示すように、鉄筋比が 1.2% (た

だし、E12-12(75)を除く)と1.9%の鉄筋露出試験体では、鉄筋引張り試験での降伏時ひずみ測定値(およそ $2,050 \times 10^{-6}$ 前後)に近い値を示したが、圧壊後の変位の増加に伴い鉄筋が降伏したE12-6d試験体を除き、いずれも急激なひずみ増加は見られなかった。

鉄筋比が2.5%の試験体では、露出長が小さいE25-6dでは上記と同様であったが、露出長の大きいE25-9dとE25-12dでは、降伏時ひずみ量よりも明らかに小さい鉄筋ひずみ量で最大荷重を迎えた。

また、スパン中央上縁コンクリートのひずみに着目すると、図-4に示すように、健全試験体ではひびわれ発生後ひずみは概ね荷重に比例して増加しているが、露出鉄筋を有するものは比較的小さい荷重でもひずみ量が大きく、かつ荷重の増加に対して2次曲線的に増加している。その結果、露出鉄筋を有するものは、早期にコンクリートの圧壊につながったことがうかがえる。露出試験体でひずみが大きいのは、別途行ったアンボンド鉄筋コンクリートの実験結果と同様であり、“鉄筋コンクリート”においてヤング係数の小さい補強材を用いた場合の挙動と類似している。2次曲線的に増加するのは、後述の露出鉄筋とコンクリートの鉛直相対変位ならびに支点側の部材変形に起因すると考えられる。

露出鉄筋の両端部付近で鉄筋に生じる曲げのため、E12-6dとE12-9dなど一部の試験体で鉄筋降伏が先行した可能性もあるが、露出試験体の破壊モードは総じて、コンクリート圧壊先行であったといえる。

なお、健全試験体の最大荷重時に鉄筋のひずみ量が必ずしも降伏時ひずみ量を超えていないのがあるのは、ひずみゲージ取付位置とコンクリートひびわれ位置とが一致していないことによる。

(3) 曲げ耐力

各試験体の最大荷重は表-1に示したとおりであり、同一鉄筋比の場合、露出長の増大に伴い耐力低下が生じている。これらの値には、試験体の材齢差に伴うコンクリート強度の相違と若干の試験体製作誤差も含まれることから、これらを考慮した計算値に対する最大荷重の比を指標として、鉄筋露出長が曲げ耐力に及ぼす影響を調べた。ここで、脱型後の出来形測定の結果によれば、露出鉄筋を有する試験体の一様曲げ区間での製作誤差は、断面有効高さで最大2.2%、断面幅で最大1.6%であった。

曲げ耐力の実験値と計算値の比を、図-5に示す。どの鉄筋比の場合も、露出長が大きくなるにしたがって曲げ耐力は低下しているといえる。そして、鉄筋比が大きいほど、耐力低下が顕著になっている。

これらの耐力低下の理由を、露出鉄筋とコンクリートの鉛直方向変位の違いおよび部材変形の観点から、以下

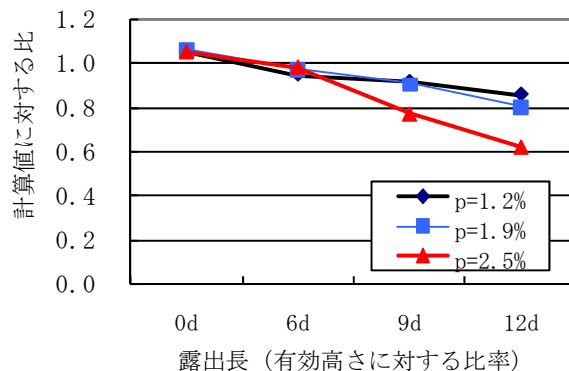


図-5 曲げ耐力 (計算値に対する比)

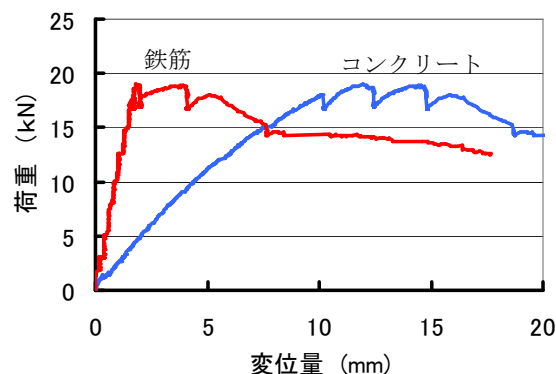


図-6 荷重-スパン中央変位関係 (E25-12d)

に考察する。

(4) 有効高さの変化の影響

露出鉄筋を有する部材では、加力実験中、部材の鉛直変位の増加に伴い、露出鉄筋とコンクリートとの間に相対鉛直変位が生じた。図-6は、E25-12d試験体の場合の鉛直変位と荷重の関係を、コンクリートと鉄筋について描いたものである。ここで、コンクリートの荷重-変位関係は図-2に対応している。部材の変形はひびわれ後、コンクリート部が概ねスパン中央を折れ点とした形状で変位が進むのに対し、露出鉄筋は両端の定着部を結ぶ直線状態で鉛直変位が進行した。図-6の例では、実験開始前のコンクリートと鉄筋の間のクリアランスがなくなるまでは両者の相対変位が増加し(クリアランスが減少し)、最大荷重を迎えるとともにスパン中央で鉄筋がコンクリートに接し、その後はこの部分で一体となって変位が進行した。

以上のように、露出鉄筋を有する部材では加力前の初期状態に対して両者に相対変位が生じるため、部材変位の増加に伴ってクリチカル断面の有効高さが減少する。

各試験体の最大荷重時の鉄筋とコンクリートの相対変位量を表-1に示した。ここで、試験体設計上はクリアランスを10mm(E12-12d(75))では20mmとしたが、鉄筋の節や試験体製作誤差等の影響で、鉄筋とコンクリー

トが接した場合でも必ずしも設計クリアランスの値になっていない場合があることを付記する。

最大荷重時の鉄筋とコンクリート間の相対変位量を部材の有効高さの減少と捉え、これを考慮した曲げ耐力計算値に対する実験値の比を新たな指標とし、鉄筋露出長との関係を図-7 に示した。図-5 と比較すると、露出長の大きい方で最大 10%程度の耐力変化があり、この量が鉄筋とコンクリート間の相対変位の影響であるといえる。

一般に断面幅と鉄筋比が一定の健全部材では、曲げ耐力は断面の有効高さの2乗に概ね比例するが、本実験のように引張り鉄筋が相対移動する場合は、有効高さの減少に反比例して鉄筋比が増加するので、耐力への影響は有効高さの概ね1乗に比例する。上述の影響量はこれに符合している。

(5) 支点側の部材変形の影響

露出鉄筋を有する試験体の最大荷重時の鉄筋ひずみ量と露出長の関係を図-8 に示す。鉄筋ひずみが降伏時ひずみ量（およそ $2,050 \times 10^{-6}$ 前後）に近い値を示した鉄筋比 1.2%と 1.9%の場合の耐力低下は、図-7 に示したように有効高さの減少としてほぼ説明できたが、小さい鉄筋ひずみを示した鉄筋比 2.5%の露出長 9d と 12d の場合 (E25-9d, E25-12d) およびコンクリート欠損断面位置でのコンクリート高さが小さい E12-12d(75) の場合は、有効高さの減少で説明できない。この量が、鉄筋露出の直接的な影響と考えられ、露出長 12d の場合の耐力は、健全試験体の約 70%であったといえる。

最大荷重時の、部材支点より外側部分での部材の傾斜角の測定値とスパン中央変位から求めた半スパンの平均部材角との比を求め、露出長 12d の試験体について比較したものを図-9 に示す。健全試験体では上記の値は 1 より大きいと考えられるが、鉄筋が露出した試験体では総じて 1 より小さく、鉄筋比が大きいものあるいはコンクリート断面高さが小さいもので、より顕著になっていることが分かる。

また、E25-12d 試験体の最大荷重に近い 18kN 時のコンクリートひずみの測定結果をひずみ分布として整理し図-10 に示す。このひずみ分布から、露出鉄筋の定着部付近のコンクリートでは、上縁側で引張り、下縁側で圧縮ひずみが生じており、下縁側の圧縮ひずみは特に鉄筋定着部付近で 2000×10^{-6} を超える大きな値になっている。上述の支点外側コンクリートの傾斜角の特性からいえることであるが、露出試験体のうち鉄筋比の大きいものあるいはコンクリートの断面高さが小さい試験体では模式的に図-11 に示すように、スパン中央部で下向きに凸であるのに対し、露出鉄筋の定着部付近で上向き凸の変形が顕著なっているといえる。この変形は目視によ

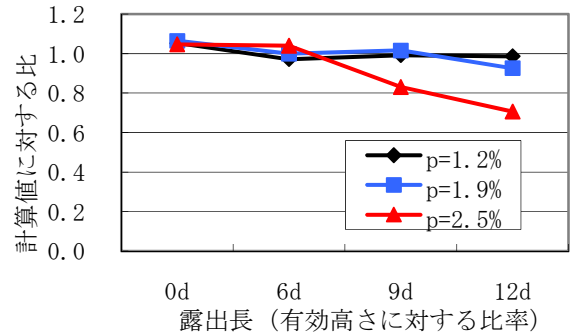


図-7 曲げ耐力 (有効高さ補正後)

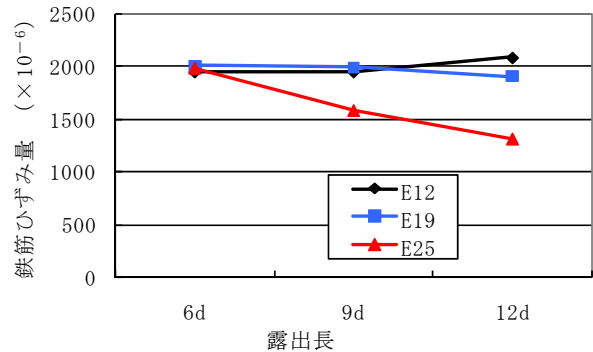


図-8 最大荷重時の鉄筋ひずみ量

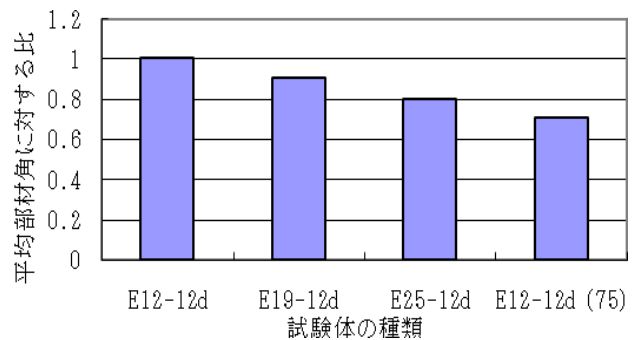


図-9 最大荷重付近での部材端回転角

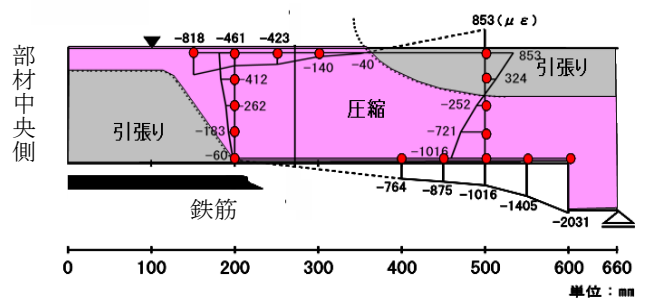


図-10 コンクリートひずみ分布 (E25-12d)

っても確認され、また、露出鉄筋の定着部コンクリートの上縁側に図-2 に示すひびわれも観測された。

アンボンド鉄筋コンクリートでは前述のような大き

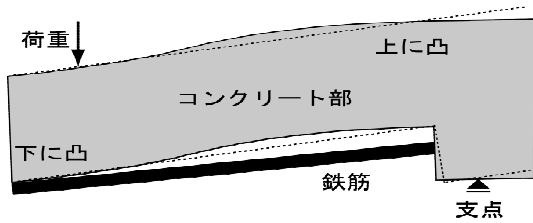


図-11 試験体変形の模式図

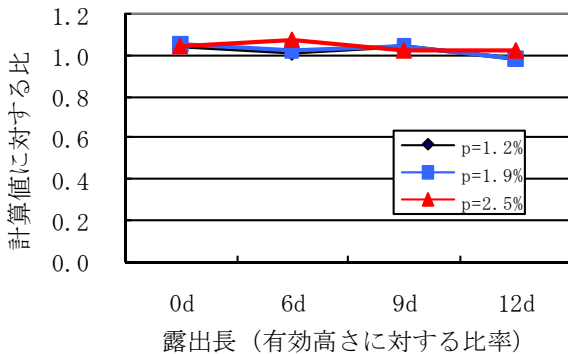


図-12 有効高さと鉄筋ひずみを補正した曲げ耐力比

な耐力低下は見られなかった⁴⁾。したがって、露出鉄筋を有する部材の耐力低下の原因としては、アンボンド鉄筋コンクリートに比べ、露出鉄筋の定着力の作用位置がコンクリート梁部にとって偏心量がより大きい位置にあること、およびコンクリート梁部の断面高さが小さいため曲げ剛性がより小さいことが挙げられる。その結果、定着部付近のコンクリート梁の変形が大きくなり、定着部が見かけ上バネ支持されたものとなる。そして鉄筋の引張り力に十分抵抗できないうちに、部材中央部の上縁コンクリートが圧壊したとみることができる。

なお、曲げ耐力計算値として、有効高さの減少を考慮し、かつ、最大荷重時の鉄筋ひずみ量から応力度を求めこれを鉄筋降伏点と見なすと、耐力の実験値と計算値の比は、図-12のように、全ての試験体でほぼ1となった。これは、鉄筋露出試験体でひびわれが集中しても、曲げ耐力に大きな影響がないことを示唆していると思われる。

4. 結論

降伏点 $367\text{N}/\text{mm}^2$ の鉄筋を用い、鉄筋比 1.2%, 1.9%, 2.5% で、鉄筋露出長をスパン長の 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) 鉄筋を露出させた鉄筋コンクリート部材の破壊モードは、一部で鉄筋降伏が先行した可能性もあるが、総じてコンクリート圧壊先行型であった。

(2) 鉄筋を露出させた部材の曲げ耐力は、露出長が大きくなるにしたがって低下し、鉄筋比が大きいほど顕著である。また、コンクリート断面高さが小さい方で耐力低下が著しい。

(3) 鉄筋露出部における鉄筋とコンクリートの鉛直相対変位は、部材の耐力低下の原因の一つであり、その影響は断面の有効高さの減少で定量的に説明できる。

(4) 著しい耐力低下は、鉄筋の引張り力によって定着部付近でコンクリート梁に負曲げの大きな変形が生じその結果、引張り力に十分抵抗できないうちに、スパン中央上縁でコンクリートの圧壊が生じたことによる。

謝辞

本研究は、鹿島学術振興財団およびウエスコ学術振興財団の助成金をもとに実施した実験に基づくものです。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

- 1) J.Cairns and Z.Zhao: Behaviour of concrete beams with exposed reinforcement. Pro. Instn Civ. Engrs Structs & Bldngs, pp.141-154, 1993
- 2) M.Raouf and Z. Lin: Structural characteristics of RC beams with exposed main steel, Proc. Instn Civ Engrs Structs & Bldgs, 122, pp.35-51, Feb., 1997
- 3) 土木学会 2007 年制定コンクリート標準示方書
- 4) 村山八洲雄, 金 相晃, 武田絵里, 西村伸一: 鉄筋の付着損失が RC 部材の曲げ耐荷性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 3, pp. 733-738, 2008