

論文 付着損失が生じた RC 部材の曲げ耐力評価法に関する解析的研究

津野 将太郎*1・村山 八洲雄*2・大串 透*3

要旨：部分的に鉄筋とコンクリート間に付着損失を生じた RC 部材の曲げ耐力を推定する解析的方法を提案した。解析法は、コンクリートの応力-ひずみ関係に e 関数法を用い、棒部材として鉄筋とコンクリートの変位の適合条件を考慮する方法によった。解析は、被りの有無、鉄筋比を変化させた部材実験結果を概ねシミュレートすることができた。提案する方法によれば、簡易な計算によって部材耐力を評価できる。

キーワード：鉄筋コンクリート、曲げ耐力、付着損失、解析、変位の適合条件

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材（以下、RC 部材と呼ぶ）の鉄筋が腐食すると、鉄筋の降伏強度の低下とともに、コンクリートとの付着力が低下することが知られている。腐食が進行して被りコンクリートが剥離した状態では、付着力は著しく低下する。さらに、部材の補修過程で生じる鉄筋をはつり出した状態では付着はまったく期待できない。したがって、このような付着損失を生じた RC 部材の耐力を梁理論で評価しようとする場合、部材断面の平面保持の代わりに鉄筋の定着部における鉄筋とコンクリートの変形の適合条件を考慮する必要がある。

この変形の適合条件を用いた研究として、六車ら¹⁾の研究、Eyre ら²⁾の研究、他がある。六車らの研究はプレストレスコンクリートを対象としており、この種の部材を対象としたものではない。一方、Eyre はこの種の部材を対象としているが線形解析であるため、実際の部材の挙動説明に際し、難点がある。

このようなことから、本論では、非線形解析による付着損失 RC 部材の曲げ耐力算定の簡易的な解析手法について論じる。本解析では、Eyre らが線形解析でおこなったのと同様に、はり理論を基本とする理論式による展開を試みた。こうすることにより、曲げ挙動の特性をより明確に把握できると考えた。以下では、解析手法の紹介をするとともに、実験を実施した部材を対象とする解析結果を示し、考察を加えた。また、Eyre の線形解析とも比較検討した。

2. 解析法

解析の基本的な考え方は、鉄筋とコンクリートの応力-ひずみ関係、部材断面の釣合条件、変形の適合条件を用いて曲げ耐力を算定するものである。以下、解析で用いた諸仮定、部材モデル、計算方法、を述べる。

2.1 解析における仮定

(1) 材料の応力-ひずみ関係

鉄筋は完全弾塑性体と仮定した。鉄筋の応力度 σ_s は、降伏点 f_y まではひずみ量に比例し、それ以降はひずみ量に関係なく一定値 f_y とした。

コンクリートの応力-ひずみ関係は、式(1)に示す梅村らの e 関数法を採用した。応力-ひずみ関係を図-1 に示す。ここでは、 $\epsilon_c = 0.002$ のとき応力度を最大とした。また、コンクリートの引張応力は無視するものとする。

$$\sigma_c = 6.75 \times f'_c \times (e^{-406\epsilon_c} - e^{-609\epsilon_c}) \quad (1)$$

σ_c : コンクリート応力度(N/mm²)

f'_c : コンクリート圧縮強度(N/mm²)

ϵ_c : コンクリートひずみ

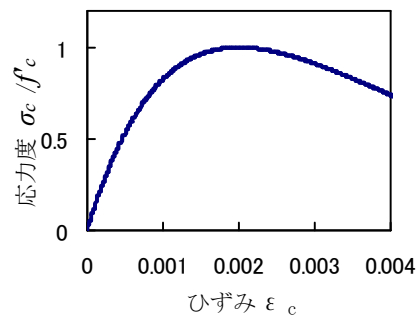


図-1 コンクリートの応力-ひずみ関係

(2) コンクリート断面

付着損失区間では部材の平面保持は成り立たないため、部材をコンクリートと鉄筋に分けて考えた。コンクリート部については平面保持が成り立つものとする。

(3) 曲げ終局時の定義

梁の曲げ破壊は、断面におけるコンクリート圧縮縁ひずみ $\epsilon_{c,max}$ が終局ひずみ ϵ_{cu} に到達した時に生じるものとし、従来からよく用いられているように $\epsilon_{cu} = 0.0035$ とし

*1 岡山大学大学院 環境学研究科社会基盤環境学専攻 修士課程 (正会員)

*2 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)

*3 (株)長谷工コーポレーション

た。e 関数法でも圧縮平均応力度と圧縮強度の比が最大となるときの縁ひずみは概ね 0.0035 となっている。

2.2 部材モデル

部材モデルを図-2 に示す。付着損失部材では変形の適合条件によって、定着位置での鉄筋とコンクリートの変位は等しい。変位はひずみの積分値であるから、付着損失区間における鉄筋位置でのコンクリート平均ひずみと鉄筋ひずみが等しいと言い換えることができる。この鉄筋位置でのコンクリート平均ひずみを求めるためにはコンクリートのひずみ分布が必要であり、コンクリートのひずみ分布は中立軸分布によって決まる。つまり、変位の適合条件の検討のために中立軸分布を求める必要がある。したがって Eyre の場合と同様に中立軸分布に着目して部材を 3 つのゾーンにわけて考えた。

また、被りコンクリートの有無によって計算方法は一部異なるが、基本的な考え方は同じである。よって、ここでは被りが無い部材について説明する。

- ゾーン 1 中立軸より上側が圧縮領域
- ゾーン 2 全断面圧縮領域
- ゾーン 3 中立軸より下側が圧縮領域

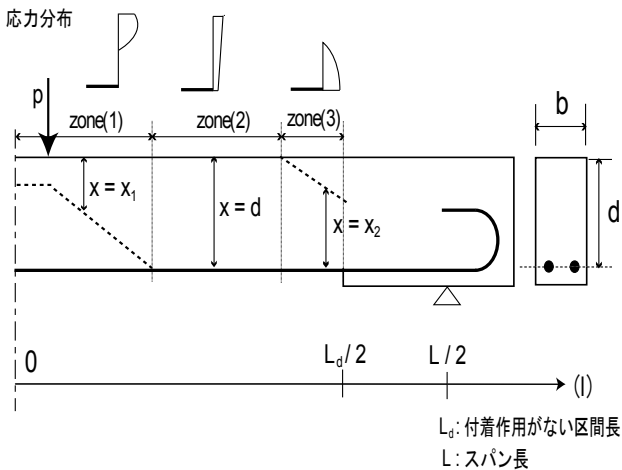


図-2 部材モデル

2.3 解析で用いる式の導出

ここでは、図-2 の部材モデルをもとに曲げ耐力算定のための関係式について説明する。

(1)破壊時の曲げモーメント

付着が健全な RC 部材では二点荷重をおこなった場合、曲げ破壊は部材中央（上縁破壊）で生じる。しかし、本解析対象の付着損失 RC 部材（図-2 参照）では、曲げ破壊を部材中央と支点側部材断面（下縁圧縮破壊）の両方について考えなくてはならない。これは、外力と内力の釣合上ゾーン 1 よりも先にゾーン 3 において終局ひずみに達する場合があるからである。ここではまず、部材

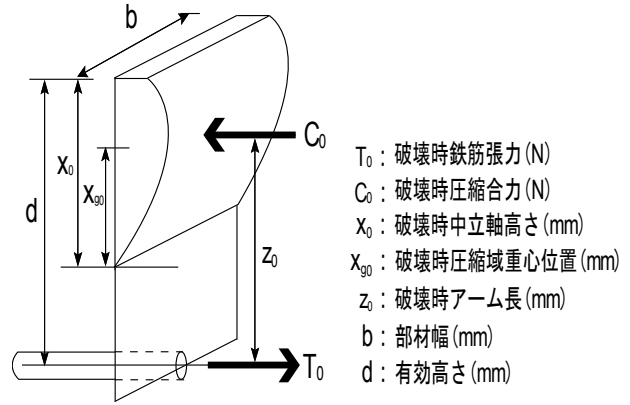


図-3 部材中央での応力状態

中央で曲げ破壊する場合を考える。（図-3）

式(1)よりコンクリートの破壊時の圧縮合力 C_0 は次のように求められる。

$$C_0 = \frac{x_0 \cdot b}{\varepsilon_{cu}} \int_0^{\varepsilon_{cu}} \{6.75 f_c (e^{-603\varepsilon} - e^{-906\varepsilon})\} d\varepsilon$$

$$= 0.8121 f_c \cdot b \cdot x_0$$

また、破壊時の鉄筋引張力 T_0 は

$$T_0 = A_s \cdot \sigma_s(\varepsilon_s)$$

A_s : 鉄筋断面積(mm²)

$\sigma_s(\varepsilon_s)$: 鉄筋応力度(N/mm²)

であり、断面の釣合より破壊時の中立軸高さ x_0 は

$$x_0 = \frac{A_s \cdot \sigma_s(\varepsilon_s)}{0.8121 f_c \cdot b} \quad (2)$$

となる。また、図-3 より破壊時のアーム長 z_0 は

$$z_0 = (d - x_0) + x_{g0} \quad (3)$$

で表され、 $\varepsilon_{cu} = 0.0035$ のときの x_{g0} と x_0 の関係は、e 関数法から

$$x_{g0} = 0.5592 x_0 \quad (4)$$

となる。一方、破壊断面の釣合条件より破壊断面モーメント M_0 は

$$M_0 = T_0 \cdot z_0 \quad (5)$$

で表されるので式(2)(3)(4)(5)より

$$M_0 = \Phi(1 - 0.543\Phi) f_c' b d^2 \quad (6)$$

$$\Phi = \frac{p \cdot \sigma_s(\varepsilon_s)}{f_c'}$$

p : 鉄筋比

が導かれる。

破壊時の鉄筋ひずみ ε_s は未知であり、式(6)の M_0 は、仮定された ε_s から求めたものである。Eyre の場合と同様に、 $\phi(l)$ をモーメント分布関数とすると、終局時の部材中央からの距離 l における曲げモーメント分布 $M_1(l)$ は

$$M_1(l) = M_0 \cdot \phi(l) \quad \left(0 \leq l \leq \frac{L}{2}\right) \quad (7)$$

となる。

ゾーン 3 の部材下縁部で曲げ圧壊が生じるときの破壊

断面モーメント M'_0 および位置 l における終局曲げモーメント $M_2(l)$ は同様にして求められる。

$$M'_0 = 0.543\Phi^2 \cdot f'_c \cdot b \cdot d^2$$

$$M_2(l) = M'_0 \cdot \phi(l) \quad \left(0 \leq l \leq \frac{L}{2}\right) \quad (8)$$

(2) 終局時の中立軸分布 $x(l)$

図-2 で示したゾーンごとに終局時の中立軸分布 $x(l)$ を求める。まず、ゾーン1 について考えると、このゾーンでは中立軸より上側が圧縮領域であり、ゾーン内任意点の部材断面の応力状態は図-4 に示すとおりである。

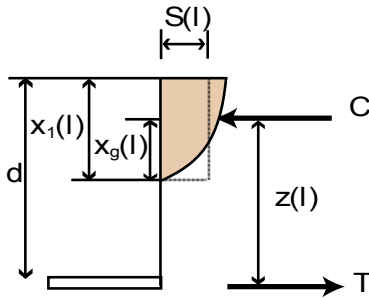


図-4 ゾーン1での応力状態

図-4 からアーム長 $z(l)$ および曲げモーメント $M(l)$ は

$$z(l) = d - \{x_1(l) - x_g(l)\}$$

$$M(l) = T \times z(l)$$

であり、 $\bar{x}_g = x_g/x$, $\bar{x}_1 = x_1/d$ とすると

$$\bar{x}_1(l) \{1 - \bar{x}_g(l)\} = 1 - \frac{M(l)}{T \cdot d} \quad (9)$$

と表せる。

一方、付着作用がない区間では位置 l に関係なく圧縮力 C は一定なので平均応力度・強度比を $S(l)$ とすれば

$$C = S(l) \cdot f'_c \cdot b \cdot x_1(l) = \text{const}$$

が成り立ち、平均応力度・強度比は

$$S(l) = \frac{S_0 \cdot \bar{x}_0}{\bar{x}_1(l)} \quad (10)$$

$S(l)$: 位置 l における平均応力度・強度比
 S_0 : 破壊断面における平均応力度・強度比

と表すことができる。e 関数法をもとにした圧縮縁コンクリートひずみ ϵ_{cmax} , 圧縮域重心高さ \bar{x}_g および平均応力度・強度比 S の関係を図-5 に示す。ここで、平均応力度・強度比 $S(l)$ と圧縮域重心高さ $\bar{x}_g(l)$ の関係を放物線近似した式(11)を用いると、圧縮域重心高さ $\bar{x}_g(l)$ と中立軸高さ $\bar{x}_1(l)$ の関係が式(12)のように導かれる。

$$S(l) = -69.700\bar{x}_g(l)^2 + 77.925\bar{x}_g(l) - 20.968 \quad (11)$$

$$1 - \bar{x}_g(l) = A + B \sqrt{C + D \frac{\bar{x}_0}{\bar{x}_1(l)}} \quad (12)$$

$$A = 0.44097 \quad B = -0.007174$$

$$C = 226.4833 \quad D = -226.386$$

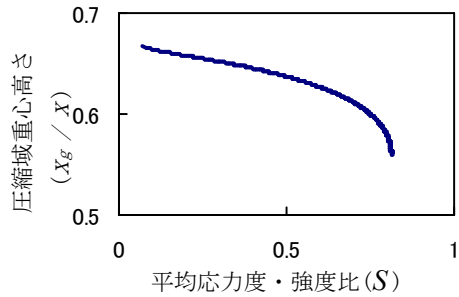
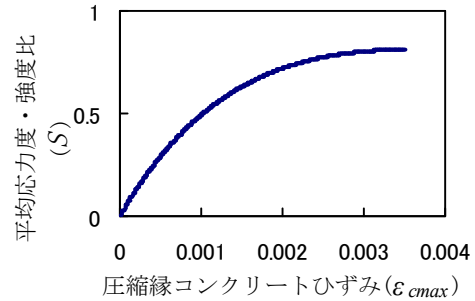
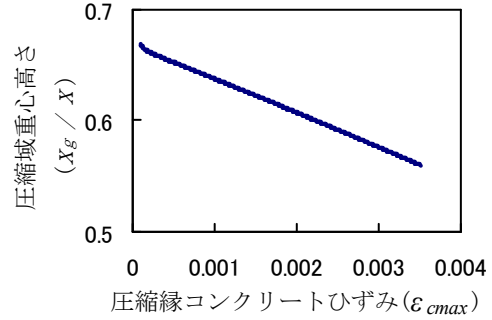


図-5 圧縮縁コンクリートひずみ ϵ_{cmax} , 圧縮域重心高さ \bar{x}_g , 平均応力度・強度比 S の関係

したがって、式(9)(12)よりゾーン1の中立軸分布 $\bar{x}_1(l)$ が曲げモーメント分布 $M(l)$ の関数として式(13)で表される。また、ゾーン3の中立軸 $\bar{x}_2(l)$ も同様にして求められる。

$$\bar{x}_1(l) = \frac{(2AE_1 - B^2D \cdot \bar{x}_0) \pm \sqrt{(2AE_1 - B^2D \cdot \bar{x}_0)^2 - 4(A^2 - B^2C)E_1^2}}{2A^2 - B^2C} \quad (13)$$

$$\bar{x}_2(l) = \frac{(2AE_2 - B^2D \cdot \bar{x}_0) \pm \sqrt{(2AE_2 - B^2D \cdot \bar{x}_0)^2 - 4(A^2 - B^2C)E_2^2}}{2A^2 - B^2C} \quad (14)$$

$$E_1 = 1 - \frac{M(l)}{T \cdot d} \quad E_2 = \frac{M(l)}{T \cdot d}$$

(3)変位の適合条件

ゾーン1, 3において中立軸分布 $\bar{x}(l)$ が求まると式(10)より平均応力度・強度比分布 $S(l)$ が求まる。さらに、図-5の平均応力度・強度比分布 S と圧縮縁コンクリートひずみ ϵ_{cmax} の関係から曲げモーメントに対応した圧縮縁コンクリートひずみ分布 $\epsilon_{cmax}(l)$ を求めることができる。平均応力度・強度比分布 $S(l)$ と圧縮縁コンクリート

ひずみ分布 $\varepsilon_{c \max}(l)$ の関係は、近似式(15)を用いる。

$$\varepsilon_{c \max}(l) = \frac{-\ln\{1-S(l)/0.856\}}{850} \quad (15)$$

コンクリート部の平面保持の仮定よりゾーン1,3の鉄筋位置でのコンクリートひずみ分布 $\varepsilon_{cl}(l)$ は

ゾーン1

$$\varepsilon_{cl}(l) = \frac{1-\bar{x}_1(l)}{\bar{x}_1(l)} \cdot \varepsilon_{c \max}(l)$$

ゾーン3

$$\varepsilon_{cl}(l) = \varepsilon_{c \max}(l)$$

なお、ゾーン2では、応力が小さく鉄筋位置でのひずみの影響が小さいため、応力-ひずみ関係を線形と仮定した。このことから、ゾーン2の鉄筋位置でのコンクリートひずみは断面での力の釣合およびコンクリート部の平面保持を用いて求めた。

以上より、部材中央からの付着損失長 l_d における鉄筋位置でのコンクリート平均ひずみ ε_{clmean} は

$$\varepsilon_{clmean} = \frac{\int_0^{l_d} \varepsilon_{cl}(l) dl}{l_d}$$

仮定した鉄筋ひずみ ε_s が正しければ、変位の適合条件より l_d 区間における鉄筋位置コンクリート平均ひずみ ε_{clmean} は鉄筋ひずみ ε_s と等しくなる。

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{clmean} \quad (16)$$

(4)計算の手順

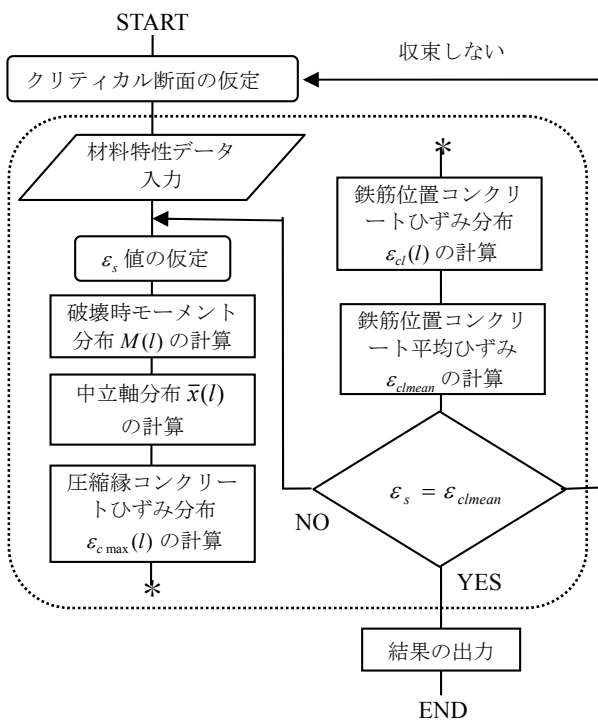


図-6 解析フローチャート

解析では、まず、クリティカル断面を仮定する。これは、部材中央で破壊する場合と支点側ゾーン3で破壊す

る場合とでは式(7)(8)で示すように曲げモーメント分布が異なるためである。次に、終局時の鉄筋ひずみ ε_s を仮定し、項(1)~(3)で示した理論式を用いて式(16)を満たすまで繰り返し計算をおこなう。式(16)を満たせば計算を打ち切り、曲げモーメント $M(0)$ または $M'(0)$ が解となる。繰り返し計算をおこなっても式(16)に収束しない場合は、クリティカル断面を再仮定し、同様の計算を繰り返しおこなう。以上の手順を図-6に示す。

3. 部材試験体の解析

鉄筋比と付着の有無に着目した解析を部材実験結果³⁾と比較した。解析の対象とした試験体諸元と実験結果、曲げ耐力の特性および解析結果について以下に述べる。

3.1 試験体緒元と実験結果

表-1 試験体の種類と実験結果

No.	p	l_d/d	f_c	P_{ult}	mode	
B 12(U)	1.2	0	30.6	18.9	Y	文献 3)
U12-6d		6	34.5	18.4	Y	
U12-9d		9	34.3	17.4	Y	
U12-12d		12	32.3	17.3	Y	
B 25(U)	2.5	0	34.8	34.7	Y	新規 実験
U25-6d		6	35.5	33.7	Y	
U25-9d		9	35	33.5	Y	
U25-12d		12	35	33.1	Y	
B 12(NC)	1.2	0	22.7	19.1	Y	新規 実験
NC12-12d		12	22.8	17.4	Y→C	
B 25(NC)	2.5	0	22.6	33.1	Y	新規 実験
NC25-9d		9	22.8	28.3	C→Y	
NC25-12d		12	22.7	25.5	C→Y	
備考	l_d/d : 付着損失長・有効高さ比 P_{ult} : 最大荷重 (kN) Y : 降伏先行, C : 圧壊先行 降伏点 363N/mm ² , 367N/mm ²					

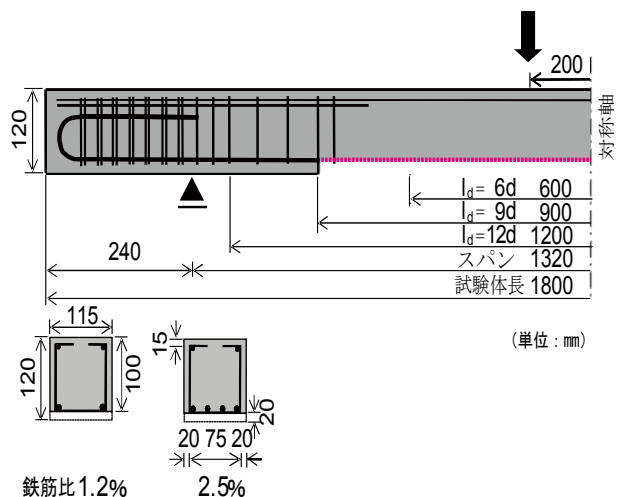


図-7 試験体諸元 (NC 試験体)

試験体諸元を図-7に、試験体の種類と実験結果を表-1に示す。試験体番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および被りの有無（B：付着健全、U：付着無・被り有、NC：付着無・被り無）を、次の数値は鉄筋比の大きさ（1000倍で表示）を、ハイフンのあとの数値とdは付着損失長（dは有効高さ）を表している。なお、今回の解析では、図-7で示す部材上側に配筋した鉄筋は考慮に入れていない。（NC25-12d試験体は、上側鉄筋なし、上側ひび割れあり。それ以外の試験体は、上側鉄筋あり、上側ひび割れなし）

3.2 解析例

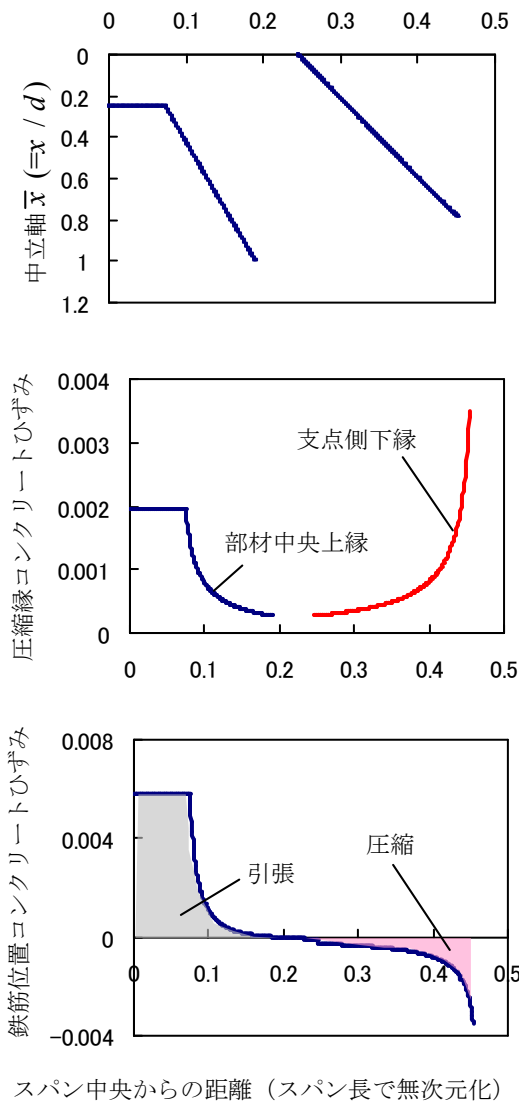


図-8 計算結果とスパン中央からの距離の関係 (NC25-12d 試験体)

解析結果の例として、NC25-12d試験体の場合の中立軸分布 $\bar{x}(l)$ 、圧縮縁コンクリートひずみ分布 $\varepsilon_{c,max}(l)$ 、鉄筋位置コンクリートひずみ分布 $\varepsilon_{cd}(l)$ を図-8に示す。こ

の試験体では、クリティカル断面をゾーン3 支点側下縁と仮定したときに式(16)が収束した。このとき鉄筋のひずみは 810×10^{-6} であった。

中立軸分布 $\bar{x}(l)$ をみると図-2で示したように3つのゾーンを確認することができる。また、中立軸は部材軸方向に直線変化しているがこれは図-5の圧縮域重心比 \bar{x}_g と平均応力度・強度比 S の関係の非線形性が小さいからである。圧縮縁コンクリートひずみ分布では、仮定した通りゾーン3 支点側下縁で終局ひずみに達しているのに対し、部材中央上縁では終局ひずみまで達していないことが確認できる。また、鉄筋位置コンクリートひずみ分布 $\varepsilon_{cd}(l)$ から、2点荷重条件下において、部材中央一様曲げ区間の引張ひずみが大きいことがわかる。しかし、その一方で支点側の圧縮ひずみが局部的に大きく両者が相殺し、平均ひずみは 810×10^{-6} と小さくなった。

3.3 曲げ耐力

鉄筋比と被りの有無に着目した解析の結果を、実験結果とともに図-9に示す。

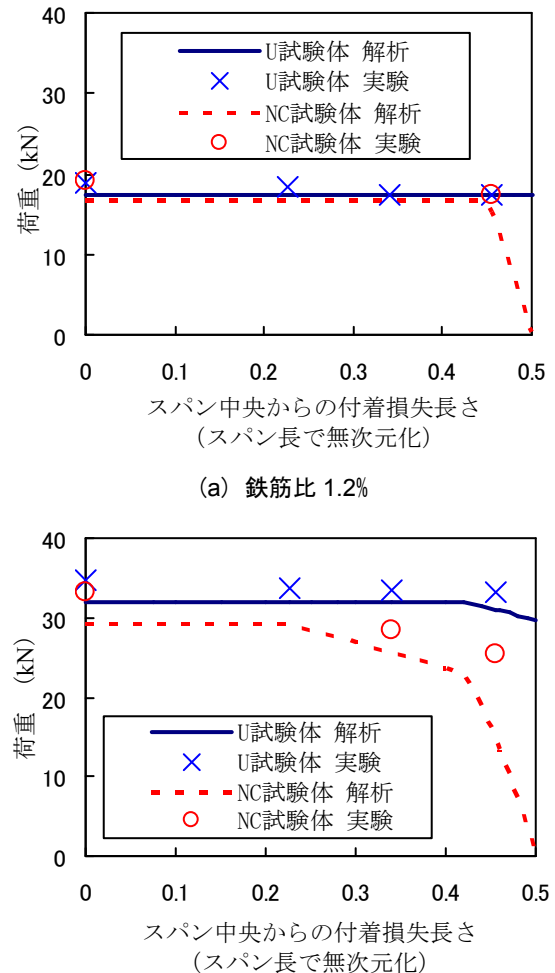


図-9 最大荷重と付着損失長さの関係

解析によれば、鉄筋比が小さい場合は、かぶりコンクリートの有無にかかわらず、また付着損失長が広範囲に及んでも耐力が低下しない。これは実験結果を概ね説明できている。鉄筋比が大きい場合は、被りがあるときには耐力低下はほとんどないが、被りがないと耐力低下が生じる解析結果となった。これは、被りがないとコンクリート部の断面高さが小さくなるとともに定着反力の偏心量が大きくなるため、ゾーン3でより大きな圧縮ひずみが生じたからである。実験結果と比較すると傾向的にはあっているが、解析は過小評価となった。その理由として、実際の場合、コンクリート断面高さの不連続に伴う応力の乱れなどが考えられる。

図-10は、被りあり試験体における終局時の鉄筋位置コンクリート平均ひずみ ϵ_{clmean} と付着損失長の関係を示したものである。実験値はひび割れ幅から求めた鉄筋位置での平均ひずみ³⁾である。解析は概ね実験結果をシミュレートできているといえる。

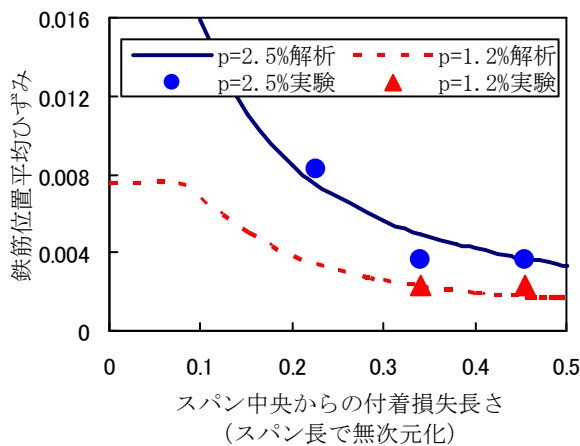


図-10 鉄筋位置平均ひずみと付着損失長さの関係

4. 線形解析との比較

図-11は、Eyre²⁾の解析と本解析結果を比較したものである。鉄筋の降伏点やコンクリート強度の値は両解析で同じであるが、先に述べたようにコンクリートの応力-ひずみ関係の仮定をEyreは線形とするのに対し、本解析では非線形としている。本解析ではEyreの解析に比べて耐力低下が少なかった。ゾーン1において、非線形仮定の場合は、線形仮定の場合に比べて中立軸が上縁側に位置するため、鉄筋位置での平均ひずみが大きくなった。その結果、本解析では鉄筋が降伏しやすくなり耐力低下が小さくなったと考えられる。

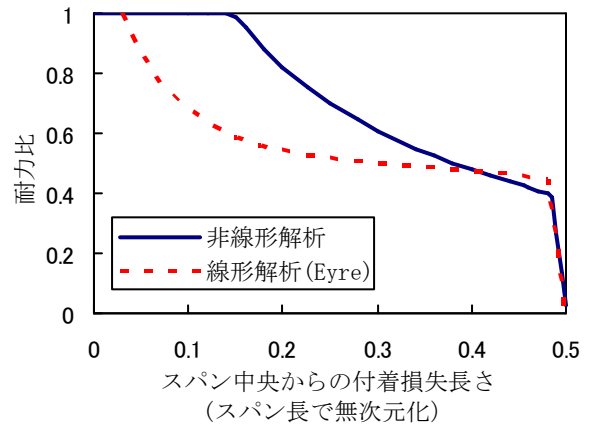


図-11 線形解析と非線形解析の比較
(線形解析：文献²⁾引用)

5. 結論

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- (1)終局時の鉄筋ひずみと付着損失区間におけるコンクリート平均ひずみが等しくなるという変形の適合条件をもとに、鉄筋とコンクリートの付着がない部材の終局曲げモーメントを求める解析手法を提案した。
- (2)付着損失部材において、被りコンクリートの有無が耐力低下に影響を与えることが解析で確認できた。鉄筋比の小さい梁部材では、付着損失が耐力低下に与える影響は小さいが、鉄筋比が大きいときその影響が大きい。
- (3)応力-ひずみ関係を線形と仮定したEyreの解析に比べ非線形と仮定した本解析では付着損失が耐力低下に与える影響は小さい結果になった。

謝辞

本研究の実施にあたり、鹿島学術振興財団の助成を受けました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 六車熙, 渡辺史夫, 西山峰広: アンボンドPC部材の曲げ終局耐力に関する研究, プレストレスコンクリート, Vol.26, No.1, pp10-16, 1984
- 2) 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
- 3) 村山八洲雄, 金相昊, 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, pp733-738, 2008