

鉄筋コンクリート曲げ部材の長期変形挙動 およびその解析法に関する研究

佐藤良一¹・氏家 勲²・鈴木雅博³・北條泰秀⁴

¹正会員 工博 広島大学教授 工学部第四類(建設系)(〒739-8527 広島県東広島市鏡山1丁目4-1)

²正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科(〒790-8577 愛媛県松山市文京町3)

³正会員 工修 株式会社ピー・エス 土木技術部(〒170-0004 東京都豊島区北大塚1-13-17)

⁴正会員 工修 太平洋セメント株式会社 佐倉研究所(〒285-0802 千葉県佐倉市大作2-4-2)

本研究は等曲げモーメントが作用する使用状態での鉄筋コンクリート部材の長期変形挙動に関する鉄筋とコンクリートの付着に基づいた解析法を提案している。本解析法は付着の基礎方程式を定式化する際に、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮に加えて付着のクリープを取り込むとともに、諸変数の物理的な意味づけもなされている。さらに、鉄筋コンクリート曲げ部材の持続荷重実験を行い、実験結果と比較し本解析法の有用性を確認するとともに、本解析法および実験結果に基づいて、圧縮鉄筋と引張鉄筋、コンクリートのクリープ、乾燥収縮および付着応力の緩和が鉄筋コンクリート部材の長期変形に及ぼす影響について検討している。

Key Words : reinforced concrete flexural member, bond equation, creep, drying shrinkage, creep of bond, curvature

1. まえがき

限界状態設計法において使用限界状態の主たる検討項目は変形(たわみ)とひび割れである。たわみはコンクリート構造物の使用性や機能性の確保、ひび割れは耐久性、美観あるいは水・気密性の確保の観点から制限される。鉄筋コンクリート(RC)曲げ部材の使用状態でのたわみやひび割れの挙動を正確に予測するためには引張部コンクリートの寄与(テンションスティフニング)を適切に評価する必要がある。さらに、鉄筋コンクリート部材では短期変形が生じた後、永久的荷重下でコンクリートのクリープと乾燥収縮および鉄筋とコンクリートとの間の付着応力の緩和により長期変形が付加されることが知られており¹⁾、長期変形を正確に予測するためにはこれらの影響も適切に取り込む必要がある。

鉄筋コンクリート部材の長期変形予測におけるクリープの影響の主な取り入れ方の代表的なものに有効弾性係数法、材齢係数法などがある¹⁾。有効弾性係数法は短期変形と同様な扱いができ簡便な方法である上、一定持続荷重を受ける場合の変形予測精度はかなり良いと言われている²⁾。このため、長期たわみの予測に用いられるほか³⁾、土木学会示方書の長期有効曲げ剛性式に採用されている⁴⁾。経時的に変動する応力の影響を考慮する方法に材齢係数法がある。この方法は変化応力に対し、クリープ係数に材齢係数を掛けて有効弾性係数と同様な取り

扱いができるもので、CEB Manual⁵⁾、CEB-FIP Model Code 90⁶⁾、Ghaliら⁷⁾、猪俣⁸⁾などが用いている。しかし、有効弾性係数法よりは面倒であり、持続荷重の履歴が問題となるときには、材齢係数を予め応力の経時変化を仮定して定める必要がある。しかしながら、これらの方法は荷重履歴が問題となるときには本質的に取り扱えず、変動する荷重履歴の影響を取り扱える方法にはstep-by-step法があり⁴⁾、重ね合わせの原理に基づき、経時的に変化する荷重を適切な時間間隔で分割し、各時間間隔における変動荷重に対する弾性ひずみとクリープひずみを求め、それらを合計してコンクリートひずみとする方法である。しかしながら、step-by-step法ではひび割れが生じた部材を対象とする場合、計算が極めて煩雑となる。そのため、一定の持続荷重を受ける場合のように変動応力があまり大きくない場合には、実用上得策でない面もある。

コンクリートに乾燥収縮が生じた場合、その進行により変形が付加されることは既に知られている。この曲げ変形の評価方法には3方法ある。一つ目はACI⁹⁾やYuら¹⁰⁾のように、クリープと抱き合わせる形で乾燥収縮の影響を考慮する方法であるが、これらの方法は実験式によるものであり、クリープと乾燥収縮を別々に取り扱うことができない。二つ目は、クリープと乾燥収縮により付加される変形をそれぞれ独立して求める方法であり、原ら³⁾、CEB Manual⁵⁾によって採用されている。

クリープ変形と乾燥収縮変形の算定に用いられている曲率係数⁵⁾は、クリープと乾燥収縮による中立軸の変化が生じないと仮定して求められている⁷⁾。三つ目は全ひずみを弾性ひずみ、クリープひずみ、乾燥収縮ひずみを重ね合わせて構成し、これに基づいて変形を求める方法であり^{7), 8)}、最も一般性のある方法といえよう。

鉄筋コンクリート部材の変形評価には、鉄筋とコンクリートとの付着に起因するコンクリートの引張剛性、すなわちテンションスティフニングの評価が重要となる。この評価方法は全断面とひび割れ断面での断面剛性や曲率を按分する方法、テンションスティフニングをコンクリートの引張軟化でモデル化し断面で代表する方法および付着解析を行い引張剛性を考慮する方法に分けられる。按分する方法には土木学会示方書³⁾、CEB-FIP Model Code 90⁶⁾などが代表的なものとしてある。土木学会示方書はBransonの提案する按分方法を採用しているが、経時変化の影響は無視されており、引張剛性を大きく評価する可能性がある。CEB-FIP Model Code 90はひび割れ断面での曲率からテンションスティフニングによる曲率を差し引くことで平均曲率を求めている。曲率と曲げ剛性の違いはあるが全断面とひび割れ断面での結果を按分するという点はBransonと同じであるが、経験的に載荷期間の影響を表す係数を静的載荷時より小さくし、付着応力の緩和を取り込んでいる。断面で代表する方法にBazantら¹¹⁾の方法がある。Bazantらはbilinearで表したテンションソフトニングモデルを用いてテンションスティフニングの影響を考慮した断面解析を行っているが、部材軸方向の応力伝達を断面で表そうとするため、簡便である反面、実際の現象との対応が不明確である。付着解析に基づいてRCはりの変形やひび割れの解析を行ったものに原ら³⁾や李ら¹²⁾の研究がある。それらの解析では付着応力の緩和を解析で用いる付着応力一すべり関係の剛性を低下させることにより取り入れている。しかしながら、これらの解析では曲げ部材を対象としているが、付着の基礎方程式は一軸引張部材において定式化されたものを用いており、さらに、平均鉄筋ひずみに大きく影響を及ぼすひび割れ近傍の付着の劣化に関しても考慮されていない。

以上のように、既往のRC部材の長期変形の予測方法は、クリープ、乾燥収縮およびテンションスティフニングを経験的あるいは部分的に解析的に考慮したものといえ、実用性が高い反面、現象との対応性や発展性に劣る欠点がある。

そこで本研究はコンクリートのクリープと乾燥収縮、鉄筋とコンクリートとの付着とそのクリープ特性を分離独立して取り入れて定式化した付着の基礎方程式に基づく長期変形解析法を提案する。さらにその妥当性について持続載荷実験結果と比較しながら検討するとともに、

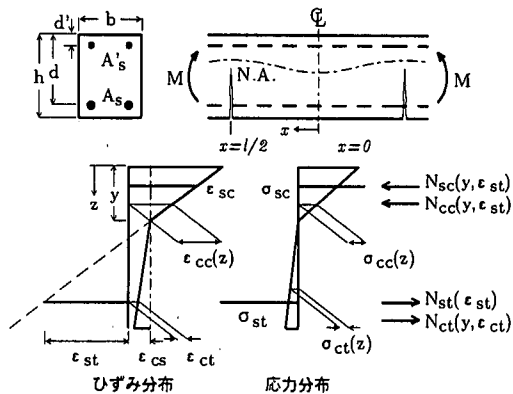


図-1 任意断面におけるひずみおよび応力分布

RC曲げ部材の長期変形に及ぼす圧縮鉄筋と引張鉄筋の影響やコンクリートのクリープと乾燥収縮および付着応力の緩和の影響についても解析および実験により検討するものである。

2. 解析方法

本研究では著者らが既に提案しているRC曲げ部材のひび割れ間要素に関する付着の基礎方程式に基づく長期変形解析法を用いる¹³⁾。以下に本解析法の基礎方程式の誘導過程の概要を述べる。

(1) 仮定

付着の基礎方程式を定式化するに当たり、持続等曲げモーメントが作用する鉄筋コンクリート部材の2つの隣接するひび割れ間要素を取り出し、このひび割れ間要素に関して以下の仮定を設けた。

- 1) ひび割れ断面ではコンクリートは引張応力を負担しない。
- 2) 圧縮応力域のコンクリートひずみと圧縮および引張鉄筋ひずみとの間には平面保持の仮定が成り立つ。
- 3) 引張応力域のコンクリートは面外変形することなく、そのひずみは応力に関する中立軸からの距離に比例する。
- 4) 乾燥収縮ひずみは全断面にわたり一様である。
- 5) 要素はひび割れ間の中央断面に関して対称である。

上記の仮定に基づいて、ひび割れ間要素の任意断面でのひずみ分布と応力分布を示すと図-1のとおりである。なお、GhaliらやParkらはひび割れ断面のクリープ解析に上記仮定2)を適用している^{7), 14)}。本論文でもこれを準用し、ひび割れ間の任意断面においても仮定2)が成立するものとした。任意断面の曲率はこの仮定による断面ひずみ分布によって得られる。仮定3)はBSにおいても

用いられており¹⁵⁾、部材高さが低い場合には適正であると考えられる。この仮定3)に基づき、コンクリートと鉄筋との間にすべりが生じると考えることができるので、引張部コンクリートの断面ひずみ分布に対しては平面保持の仮定は成立しない。引張部コンクリートのひずみの材軸方向分布は、付着特性に依存し、これに応じてテンションスティフニングが発揮される。本解析では2つの隣接するひび割れ間要素を取り扱っているが、解析対象とする部材の平均ひび割れ間隔を要素の大きさとして用いれば、解析対象部材の平均ひび割れ幅と平均曲率を求めることができる。

(2) 基礎方程式の誘導

図-1 に示すようにひび割れ間要素の中央断面を材軸方向の原点とし、任意の位置 x での断面において、圧縮縁を原点としてそこからの距離 z における圧縮域のコンクリートの全ひずみ $\varepsilon_{cc}(z)$ と応力 $\sigma_{cc}(z)$ および引張域のコンクリートの全ひずみ $\varepsilon_{ct}(z)$ と応力 $\sigma_{ct}(z)$ 、ならびに、圧縮鉄筋のひずみ ε_{sc} と応力 σ_{sc} および引張鉄筋の応力 σ_{st} は仮定2), 3), 4) から以下のように表される。ただし、全ひずみは弾性ひずみ、クリープひずみおよび乾燥収縮ひずみの和を意味する。

$$\varepsilon_{cc}(z) = \frac{\varepsilon_{st} - \varepsilon_{cs}}{d - y}(z - y) + \varepsilon_{cs} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{ct}(z) = \frac{\varepsilon_{ct} - \varepsilon_{cs}}{d - y}(z - y) + \varepsilon_{cs} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{sc} = \frac{\varepsilon_{st} - \varepsilon_{cs}}{d - y}(d' - y) + \varepsilon_{cs} \quad (3)$$

$$\sigma_{cc}(z) = E_e \{ \varepsilon_{cc}(z) - \varepsilon_{cs} \} \quad (4)$$

$$\sigma_{ct}(z) = E_e \{ \varepsilon_{ct}(z) - \varepsilon_{cs} \} \quad (5)$$

$$\sigma_{sc} = E_s \varepsilon_{sc} \quad (6)$$

$$\sigma_{st} = E_s \varepsilon_{st} \quad (7)$$

ここで、

y : 圧縮縁から応力に関する中立軸までの距離

ε_{st} : 引張鉄筋ひずみ

ε_{ct} : 引張鉄筋位置のコンクリートひずみ

ε_{cs} : 材齢 t_0 から材齢 t までの乾燥収縮ひずみ

d, d' : 圧縮縁から引張および圧縮鉄筋までの距離

E_s : 鉄筋の弾性係数

$E_e = E_c(t_0) / (1 + \phi(t, t_0))$, 材齢 t_0 で載荷されたコンクリートの材齢 t における有効弾性係数

$E_c(t_0)$: 材齢 t_0 におけるコンクリートの弾性係数

$\phi(t, t_0)$: 材齢 t_0 で載荷されたコンクリートの材齢 t におけるクリープ係数

t_0 : 載荷時および乾燥開始時のコンクリートの材齢

t : 解析を行う時点のコンクリートの材齢

である。コンクリート応力は静的載荷と同様な取扱いができ、簡便で、荷重変動の小さい場合はクリープの影響を適切に取込める有効弾性係数を用いて求めている⁴⁾。

次に、圧縮域におけるコンクリートの合力 $N_{cc}(y, \varepsilon_{st})$ と圧縮鉄筋の合力 $N_{sc}(y, \varepsilon_{st})$ および引張域におけるコンクリートの合力 $N_{ct}(y, \varepsilon_{ct})$ と引張鉄筋の合力 $N_{st}(\varepsilon_{st})$ 、それぞれの軸方向に関する合力は以下ようになる。

$$N_{cc}(y, \varepsilon_{st}) = E_e(\varepsilon_{st} - \varepsilon_{cs}) \frac{G'_c(y)}{d - y} \quad (8)$$

$$N_{sc}(y, \varepsilon_{st}) = E_e(\varepsilon_{st} - \varepsilon_{cs}) \frac{n_e G'_s(y)}{d - y} + A'_s E_s \varepsilon_{cs} \quad (9)$$

$$N_{ct}(y, \varepsilon_{ct}) = E_e(\varepsilon_{ct} - \varepsilon_{cs}) \frac{G_c(y)}{d - y} \quad (10)$$

$$N_{st}(\varepsilon_{st}) = E_e(\varepsilon_{st} - \varepsilon_{cs}) \frac{n_e G_s(y)}{d - y} + A_s E_s \varepsilon_{cs} \quad (11)$$

ここで、

$G'_c(y), G'_s(y)$: 圧縮域におけるコンクリートと鉄筋の中立軸に関する断面1次モーメント

$G_c(y), G_s(y)$: 引張域におけるコンクリートと鉄筋の中立軸に関する断面1次モーメント

A'_c, A'_s : 圧縮域におけるコンクリートと鉄筋の断面積

A_c, A_s : 引張域におけるコンクリートと鉄筋の断面積

$n_e = E_s / E_c$

である。また、圧縮域におけるコンクリートの抵抗曲げモーメント $M_{cc}(y, \varepsilon_{st})$ と圧縮鉄筋の抵抗曲げモーメント $M_{sc}(y, \varepsilon_{st})$ ならびに引張域におけるコンクリートの抵抗曲げモーメント $M_{ct}(y, \varepsilon_{ct})$ と引張鉄筋の抵抗曲げモーメント $M_{st}(y, \varepsilon_{st})$ 、それぞれは以下ようになる。

$$M_{cc}(y, \varepsilon_{st}) = E_e(\varepsilon_{st} - \varepsilon_{cs}) \frac{I'_c(y)}{d - y} \quad (12)$$

$$M_{sc}(y, \varepsilon_{st}) = E_e(\varepsilon_{st} - \varepsilon_{cs}) \frac{n_e I'_s(y)}{d - y} + A'_s E_s \varepsilon_{cs}(d' - y) \quad (13)$$

$$M_{ct}(y, \varepsilon_{ct}) = E_e(\varepsilon_{ct} - \varepsilon_{cs}) \frac{I_c(y)}{d - y} \quad (14)$$

$$M_{st}(y, \varepsilon_{st}) = E_e(\varepsilon_{st} - \varepsilon_{cs}) \frac{n_e I_s(y)}{d - y} + A_s E_s \varepsilon_{cs}(d - y) \quad (15)$$

ここで、

$I'_c(y), I'_s(y)$: 圧縮域におけるコンクリートと鉄筋の中立軸に関する断面2次モーメント

$I_c(y), I_s(y)$: 引張域におけるコンクリートと鉄筋の中立軸に関する断面2次モーメント

である。圧縮鉄筋および引張鉄筋に関する式(9)と式(13)および式(11)と式(15)において、第1項目は外力曲げモーメントの作用によって生じる軸方向力であり、その軸方向力による抵抗モーメントである。第2項目は乾燥収縮により、コンクリートと鉄筋の応力ひずみを求める基準が自由乾燥収縮面が変わったために生じる軸方向力とそれによる抵抗曲げモーメントである。

軸方向力と曲げモーメントに関するそれぞれの釣合条件から次式が得られる。

$$N_{cc}(y, \varepsilon_{st}) + N_{sc}(y, \varepsilon_{st}) + N_{ct}(y, \varepsilon_{ct}) + N_{st}(\varepsilon_{st})$$

$$= \frac{E_e}{d-y} \{G_{cr}(y) (\varepsilon_{st} - \varepsilon_{cs}) + G_c(y) (\varepsilon_{ct} - \varepsilon_{cs})\} + (A'_s + A_s) E_s \varepsilon_{cs} = 0 \quad (16)$$

$$M_{cc}(y, \varepsilon_{st}) + M_{sc}(y, \varepsilon_{st}) + M_{ct}(y, \varepsilon_{ct}) + M_{st}(y, \varepsilon_{st}) = \frac{E_e}{d-y} \{I_{cr}(y) (\varepsilon_{st} - \varepsilon_{cs}) + I_c(y) (\varepsilon_{ct} - \varepsilon_{cs})\} + A'_s (d'-y) + A_s (d-y) E_s \varepsilon_{cs} = M \quad (17)$$

ここで、

$$G_{cr}(y) := G'_c(y) + n_e G'_s(y) + n_e G_s(y)$$

$$I_{cr}(y) := I'_c(y) + n_e I'_s(y) + n_e I_s(y)$$

M : 外力曲げモーメント

である。これらを連立して解くことにより、引張鉄筋ひずみと引張鉄筋重心位置の引張コンクリートひずみが中立軸位置 y の関数として次式のように表される。

$$\varepsilon_{ct} - \varepsilon_{cs} = - \frac{G_{cr}(y) M + \Delta M_{sc}(y) + \Delta M_{st}(y)}{G_c(y) E_e I_e(y)} (d-y) - \frac{G_{ss}(y)}{G_c(y)} \varepsilon_{cs} \quad (18)$$

$$\varepsilon_{st} - \varepsilon_{cs} = \frac{M + \Delta M_{sc}(y) + \Delta M_{st}(y)}{E_e I_e(y)} (d-y) \quad (19)$$

ここで

$I_e(y) := I_{cr}(y) - G_{cr}(y) y_{ct}$, 引張部コンクリートの応力負担を考慮した全断面の断面 2 次モーメント

$y_{ct} := I_c(y) / G_c(y)$, 中立軸から引張部コンクリートの合力作用位置までの距離

$$G_{ss}(y) := n_e (A'_s + A_s) (d-y)$$

$\Delta M_{sc}(y) := (y_{ct} - (d'-y)) A'_s E_s \varepsilon_{cs}$, 乾燥収縮と圧縮鉄筋の拘束による見かけの曲げモーメント

$\Delta M_{st}(y) := (y_{ct} - (d-y)) A_s E_s \varepsilon_{cs}$, 乾燥収縮と引張鉄筋の拘束による見かけの曲げモーメント

あり、 $E_e I_e(y)$ は持続曲げモーメントの大きさ、クリープ、乾燥収縮、引張部コンクリートの応力負担の程度により決まる曲げ剛性である。

式(19)の両辺を $(d-y)$ で除せば曲率を表す式(20)が得られる。本式は y の関数であり、任意断面の y が求められれば、任意断面での曲率 $1/\rho(y)$ が得られることを示す。また、曲率は作用曲げモーメントに乾燥収縮に起因する見かけのモーメントを加えた全曲げモーメントに比例し、曲げ剛性に反比例するという、従来と同様の形の式となっている。

$$\frac{1}{\rho(y)} = \frac{\varepsilon_{st} - \varepsilon_{cs}}{d-y} = \frac{M + \Delta M_{sc}(y) + \Delta M_{st}(y)}{E_e I_e(y)} = \left\{ \frac{1}{\rho(y)} \right\}_M + \left\{ \frac{1}{\rho(y)} \right\}_{A'_s} + \left\{ \frac{1}{\rho(y)} \right\}_{A_s} = \frac{E_e I_e(y)}{1 + \Delta M_{sc}(y)/M + \Delta M_{st}(y)/M} \quad (20)$$

式(20)は鉄筋を配置することにより、断面内で均一な分布の乾燥収縮ひずみであっても、乾燥収縮による曲げ変形が生じることを表している。乾燥収縮が生じた場合、

$\Delta M_{sc}(y)$ は外力曲げモーメントと反対の符号となり、 $\Delta M_{st}(y)$ は外力曲げモーメントと同じ符号となる。すなわち、圧縮鉄筋は乾燥収縮により曲げ変形を抑制する方向に、一方、引張鉄筋は反対に曲げ変形を促進する方向にそれぞれ作用することになる。さらに、圧縮鉄筋と引張鉄筋の断面積が同じであれば、モーメントのアーム長である $(y_{ct} - (d'-y))$ が $(y_{ct} - (d-y))$ より長いことから、圧縮鉄筋のほうが引張鉄筋よりその影響の程度は大きい。なお、式(20)は乾燥収縮が生じないとき、見かけのモーメントが 0 となり、テンションスティフニングを考慮した静的時の曲率を与える式になる。

釣合条件から、中立軸深さ y が与えられれば、任意断面の鉄筋ひずみ、鉄筋と同位置のコンクリートひずみおよび曲率が求められることがわかった。さらに、任意断面 x での鉄筋とコンクリートとのすべり量 s の勾配は式(21)に示すように、鉄筋ひずみと鉄筋と同じ位置でのコンクリートひずみとの差で与えられる。

$$ds/dx = \varepsilon_{st} - \varepsilon_{ct} \quad (21)$$

上式に式(18)と式(19)を代入すれば次式が得られ、すべり勾配は作用モーメントと y によって決まる。

$$\frac{ds}{dx} = \frac{\{1 + G_{cr}(y)/G_c(y)\} \{M + \Delta M_{sc}(y) + \Delta M_{st}(y)\}}{E_e I_e(y)} (d-y) + \frac{G_{ss}(y)}{G_c(y)} \varepsilon_{cs} \quad (22)$$

上述の釣合条件は軸方向に微小変化した位置 $x+dx$ の位置においても成立し、以下の各合力とモーメントの微小増分の釣合式が成り立つ。

$$dN_{cc}(y, \varepsilon_{st}) + dN_{sc}(y, \varepsilon_{st}) + dN_{ct}(y, \varepsilon_{ct}) + dN_{st}(y, \varepsilon_{st}) = 0 \quad (23)$$

$$dM_{cc}(y, \varepsilon_{st}) + dM_{sc}(y, \varepsilon_{st}) + dM_{ct}(y, \varepsilon_{ct}) + dM_{st}(y, \varepsilon_{st}) = 0 \quad (24)$$

これらの増分式の釣合いから得られる鉄筋ひずみおよび同位置のコンクリートひずみの増分量は、式(18)、(19)から以下のように示される。

$$\frac{d\varepsilon_{st}}{dx} = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{M + \Delta M_{sc}(y) + \Delta M_{st}(y)}{E_e I_e(y)} (d-y) \right\} \frac{dy}{dx} \quad (25)$$

$$\frac{d\varepsilon_{ct}}{dx} = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ - \frac{G_{cr}(y) M + \Delta M_{sc}(y) + \Delta M_{st}(y)}{G_c(y) E_e I_e(y)} (d-y) \right\} - \frac{G_{ss}(y)}{G_c(y)} \varepsilon_{cs} \frac{dy}{dx} \quad (26)$$

これらから、鉄筋ひずみと同位置のコンクリートひずみは以下のように関係づけられる。

$$\frac{d\varepsilon_{ct}}{dx} = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ - \frac{G_{cr}(y) M + \Delta M_{sc}(y) + \Delta M_{st}(y)}{G_c(y) E_e I_e(y)} (d-y) - \frac{G_{ss}(y)}{G_c(y)} \varepsilon_{cs} \right\} \frac{d\varepsilon_{st}}{dx} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{M + \Delta M_{sc}(y) + \Delta M_{st}(y)}{E_e I_e(y)} (d-y) \right\} \quad (27)$$

表-1 解析に用いた付着特性

付着応力-すべり量曲線	$\tau_b(s, x) = \tau_{b, max}(x) e^{-\frac{\ln\{(e-1)s/s_{max}(t, t_0)+1\}}{(e-1)s/s_{max}(t, t_0)+1}}$
付着強度	$\tau_{b, max}(x) = \tau_{b, max} = 13.7 \text{ MPa} \quad (0 \leq x \leq \ell/2 - \alpha) \quad (\text{D13: } \alpha = 3.0 d_s, \text{ D19: } \alpha = 1.5 d_s)$
$\tau_{b, max}(x)$ でのすべり量	$s_{max}(t_0, t_0) = 0.15 \text{ mm} [\text{D13, A}]^*, 0.13 \text{ mm} [\text{D19, A}]^*, 0.24 \text{ mm} [\text{D19, B}]^*$
付着強度の劣化	$\tau_{b, max}(x) = \frac{\ell/2 - x}{\alpha} \quad (\ell/2 - \alpha \leq x \leq \ell/2)$
付着のクリープ係数	$\phi_b(t, t_0) = 0.32(t - t_0) \quad (0 \leq t - t_0 \leq 1 \text{ 日})$ $= 0.32 + \frac{1.32\{(t - t_0) - 1\}}{1.64\{(t - t_0) - 1\} + 134} \quad (1 \text{ 日} \leq t - t_0)$

ℓ : ひび割れ間隔, α : 鉄筋径(d_s)の倍率で表したひび割れ断面からの付着強度の劣化範囲

t, t_0 : 載荷時および乾燥開始時材齢, 解析を行う時点の材齢, []*: [使用鉄筋の呼び名, 断面の種類(図-2参照)]

ところで, 鉄筋ひずみやコンクリートひずみは付着の作用により軸方向に変化し, 鉄筋ひずみ勾配は付着応力 $\tau_b(s, x)$ と以下の関係があることが知られている。

$$\frac{d\epsilon_{st}}{dx} = \frac{U_s}{A_s E_s} \tau_b(s, x) \quad (28)$$

ここで, U_s は引張鉄筋の周長である。付着応力はすべりと位置の関数であるので, 式(25)と式(27)をすべりと関係づければよく, これは式(21)の両辺を x で微分することによって次のように得られる。

$$\frac{d^2 s}{dx^2} = \frac{d\epsilon_{st}}{dx} - \frac{d\epsilon_{cs}}{dx} \quad (29)$$

上式に式(25), (27)を代入し, さらに式(28)を代入すれば最終的に, クリープ, 乾燥収縮を取り入れた付着の基礎方程式が以下のように得られる。

$$\frac{d^2 s}{dx^2} = \left[1 + \frac{\frac{\partial}{\partial y} \left\{ -\frac{G_{cr}(y)M + \Delta M_{sc}(y) + \Delta M_{st}(y)}{G_c(y)} (d-y) - \frac{G_{ss}(y)}{G_c(y)} \epsilon_{cs} \right\}}{\frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{M + \Delta M_{sc}(y) + \Delta M_{st}(y)}{E_e I_e(y)} (d-y) \right\}} \right] \times \frac{U_s}{A_s E_s} \tau_b(s, x) \quad (30)$$

上式において付着応力はすべり量 s と位置 x の関数であり, s と y が未知変数である。式(22)と式(30)の連立方程式は, 式(30)が2階の微分方程式であるので, 以下の境界条件に基づいて数値解析することができる。数値解析により任意断面の s, y が求まれば, 式(18), 式(19)に代入して, 任意断面における鉄筋位置のコンクリートおよび鉄筋ひずみがそれぞれ得られ, これを用いて式(20)より任意断面の曲率が得られる。さらに, 所要のひずみを式(4)~式(7)に代入すれば任意断面のコンクリートおよび鉄筋の応力が得られることになる。なお, ひび割れ断面においては引張部コンクリートを無視して釣合条件を適用すれば, 鉄筋ひずみと中立軸深さ y の連立方程式となり, 容易に解くことができる。

(3) 境界条件

仮定5)により中央断面ではすべりは0である。また, 仮定1)から, 式(21)において $\epsilon_{ct} = \epsilon_{cs}$ とおけば, ひび割れ断面での引張鉄筋ひずみ $\epsilon_{st} (= \epsilon_{st, cal})$ と中立軸位置 y が計算で得られ, ひび割れ断面でのすべり勾配の境界条件が与えられる。この2つの境界条件は以下のように表される。

$$x = 0 \text{ (要素の中央断面)} \quad s = 0$$

$$x = \ell/2 \text{ (ひび割れ断面)} \quad ds/dx = \epsilon_{st, cal} - \epsilon_{cs}$$

ここで, ℓ はひび割れ間要素の長さ, すなわちひび割れ間隔である。また, ひび割れ断面ではコンクリートのひずみは自由乾燥収縮ひずみとなり, すべりが乾燥収縮の影響により大きくなるのが理解される。

(4) 解析に用いた付着特性

式(30)の基礎方程式を数値解析するためには付着応力-すべり量関係を与える必要がある。付着応力-すべり量関係を表す一般式は得られていないので, 本解析では表-1に示す六車らにより提案されている関係式を用いた¹⁶⁾。六車らの式は比較的長い両引供試体において計測された鉄筋ひずみ分布に基づいて得られたもので, 付着強度 $[\tau_{b, max}(x)]$ とその時のすべり量 $[s_{max}(t_0, t_0)]$ によって付着応力-すべり量関係が与えられる。

本解析では鉄筋径が異なる2種類の鉄筋に対して, 静的載荷時に実測された鉄筋ひずみ分布からコンクリートひずみを無視して得られた付着応力-すべり量関係に一致するように六車らの式の付着強度とその時のすべり量を決定した。従って, この付着強度は便宜上利用した値であり, 実際の付着強度を意味するものではない。これらの議論はひび割れ近傍を除く領域に対するものであり, ひび割れ近傍には適用できない。

付着応力はひび割れ断面に近づくにつれてコンクリートの内部ひび割れに伴う鉄筋周囲のコンクリートのゆるみのため低下することが報告されている¹⁷⁾。このひび割れ断面近傍での付着応力の低下の現象を林らの実験結果を参考にし¹⁸⁾, 付着応力-すべり量関係を決定するため

表-2 供試体一覧

供試体	断面	使用鉄筋 引張-圧縮	引張鉄筋 断面積 (cm ²)	引張 鉄筋比 (%)	圧縮鉄筋 断面積 (cm ²)	圧縮 鉄筋比 (%)	引張鉄筋 応力度 (MPa)	載荷時 圧縮強度 (MPa)	載荷時 引張強度 (MPa)
D13-0(A)	A	D13-0	2.53	0.94	0	0	200.0	53.9	3.90
D13-6(A)	A	D13-D6	2.53	0.94	0.63	0.23	200.2	53.9	3.90
D13-10(A)	A	D13-D10	2.53	0.94	1.43	0.53	216.1	53.9	3.90
D13-13(A)	A	D13-D13	2.53	0.94	2.53	0.94	216.6	53.9	3.90
Dm13-13(A)	A	D13-D13	1.77	0.66	1.77	0.66	283.3	53.9	3.90
D19-0(A)	A	D19-0	5.73	2.12	0	0	177.0	53.9	3.90
D19-10(A)	A	D19-D10	5.73	2.12	1.43	0.53	177.0	53.9	3.90
D19-13(A)	A	D19-D13	5.73	2.12	2.53	0.94	177.0	53.9	3.90
D19-19(A)	A	D19-D19	5.73	2.12	5.73	2.12	177.0	53.9	3.90
D19-0(B1)	B	D19-0	5.73	1.36	0	0	197.3	39.0	3.11
Dm19-16(B1)	B	D19-D16	4.86	1.16	3.97	0.95	222.4	39.0	3.11
D19-0(B2)	B	D19-0	5.73	1.36	0	0	148.0	39.0	3.11
Dm19-16(B2)	B	D19-D16	4.86	1.16	3.97	0.95	166.7	39.0	3.11
D19-0(B3)	B	D19-0	5.73	1.36	0	0	98.7	39.0	3.11
Dm19-16(B3)	B	D19-D16	4.86	1.16	3.97	0.95	111.2	39.0	3.11

に与えた付着強度を所定の位置からひび割れ断面に向かって直線的に低下させて解析に取り入れた。その所定の位置は実測された引張鉄筋ひずみ分布より計算された付着応力分布に基づき、表-1にも示すように、ひび割れ断面からD13の場合は $\alpha=3.0d_s$ 、D19の場合は $\alpha=1.5d_s$ の位置とした。

さらに、本解析では経時的な付着応力の緩和を付着クリープ係数 $[\phi_s(t, t_0)]$ を用いて考慮している。ここで付着クリープ係数は静的載荷時の付着強度に対応するすべり量に対する時間の経過によって増加したすべり量の割合で定義している。本解析では高橋らの実験結果に基づいて¹⁹⁾、付着クリープ係数を表-1に示す式で与えた。すなわち、コンクリートにおけるクリープの影響を考慮する有効弾性係数法と同じ考え方で、付着応力の緩和は付着応力-すべり量関係を決定する付着強度でのすべり量を付着クリープ係数により増加し、付着剛性を低下させて解析を行っている。表-1に示す付着強度の劣化を考慮したひび割れ近傍の範囲では付着強度と付着剛性をともに低下させていることになる。

3. 実験概要

(1) 供試体

本研究では圧縮鉄筋と引張鉄筋を変えて配筋した長さ240cmの矩形断面RCはりを用いている。はりの断面形状は図-2に示すようにA、Bの2種類である。また、供試体の一覧を表-2に示す。なお、表中の載荷時の圧縮強度および引張強度ははり供試体と同じように現場養生したテストピースから得られた強度である。引張鉄筋応度は載荷荷重に対して載荷時に測定したコンクリートの弾性係数と鉄筋の弾性係数を用いてコンクリートの引

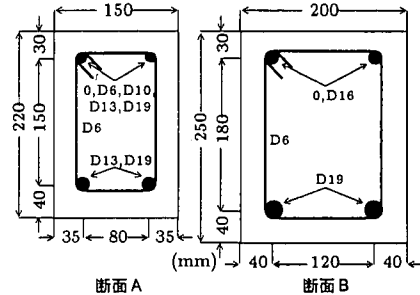


図-2 断面図

張応力を無視して求めた計算値である。ちなみに、その時のコンクリートの弾性係数は31.3~35.2GPa、鉄筋は204GPaであった。断面Aの供試体は47日間、断面Bの供試体は35日間湿布養生を行った後、持続荷重を与え、同時に乾燥を開始した。供試体は温度20℃、湿度60% R.H. (断面Bの場合には載荷日数700日以降湿度70% R.H.)の恒温恒湿室に静置した。

(2) 載荷および計測

載荷は図-3に示すように、スパン2100mm、せん断スパン長650mmの2点載荷とした。載荷荷重は使用状態のはり部材の長期挙動を検討するために、引張鉄筋応力度の計算値が表-2の値となるようにPC鋼棒を緊張することにより与えた。たわみ進行に伴う荷重の減少はバネを用いて緩和し、かつ必要に応じてPC鋼棒を再緊張して、持続荷重の設定値の±2%の誤差範囲内の一定値に保持した。試験区間は等曲げモーメントが作用している部材中央800mmの区間とし、試験区間においてたわみ、コンクリートの圧縮ひずみ、鉄筋ひずみを計測した。試験区間ではひび割れが4本あるいは5本以上発生し、試験区間は平均ひび割れ間隔に比べ十分長いので、たわみ

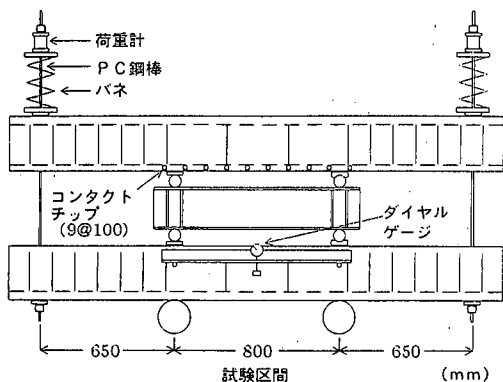


図-3 荷重状況

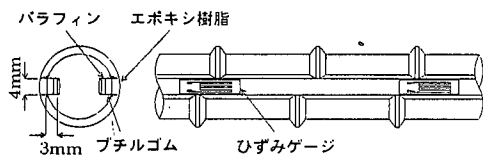


図-4 鉄筋ひずみの計測方法

やひずみに及ぼすひび割れの影響を平均的に捉えることができると考えられる。

平均曲率は試験区間の中央断面でダイヤルゲージ (精度 1/100mm) により計測されたたわみ量から求めた。コンクリートの圧縮ひずみは圧縮縁から 1cm の位置で標点距離を 10cm としてコンタクトゲージ (精度 1/1000 mm) で計測した。

さらに、表中の Dm の供試体の引張鉄筋には図-4 に示すように縦リブの位置に幅 4mm、深さ 3mm の溝を切削した鉄筋を用いている。これはひずみゲージ貼付による付着のみだれをなるべく少なくして鉄筋のひずみ分布とそれに基づいて付着応力分布を得るためである。ひずみゲージは片側 40mm 間隔で左右互い違いに両側で 20mm 間隔で貼付した。貼付位置は試験区間中央断面から両側へ、断面 A では 100mm、断面 B では 200mm とした。付着応力は隣り合うひずみゲージの間隔とひずみゲージから得られた鉄筋ひずみの差から鉄筋ひずみ勾配を求め、式 (28) を用いて計算した。付着応力はひずみゲージ間中央位置の値とし、測定区間の各値からその分布を求め、また、後述の平均鉄筋ひずみおよび平均付着応力はそれぞれこの区間で平均したものである。後述の図-8 に示すように、平均ひび割れ間隔は 80~160mm であるので、ひずみの測定区間長は平均ひび割れ間隔の 2.5~5 倍となり、おおむね試験区間の平均値を与えるものと思われる。なお、ひずみゲージを貼付する際にはポリエステル樹脂系接着剤を用い、加圧接着し、約 80°C で 12 時間養生を行い、長期の計測を可能とした。

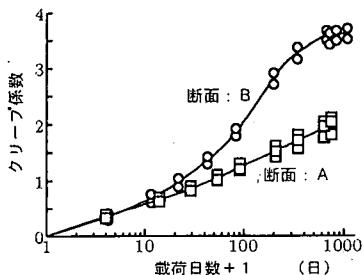


図-5 クリープ係数

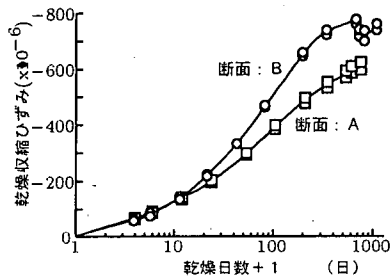


図-6 乾燥収縮ひずみ

解析に用いたクリープ係数と乾燥収縮ひずみは供試体と同断面で長さ 50cm の供試体に埋設した埋込型ひずみ計から得られたひずみより求めた。得られたクリープ係数および乾燥収縮ひずみを図-5 と図-6 にそれぞれ示す。なお、はり供試体と同一条件のデータを得るために、はり供試体載荷時に乾燥収縮供試体では乾燥を、クリープ供試体ではコンクリート応力で 7.8MPa の応力を導入しかつ乾燥を開始した。また、クリープ実験では P C 鋼棒の再緊張は行わず、クリープ係数は減少した緊張力によるコンクリート応力を用いて、求める時点の単位応力あたりの弾性ひずみとクリープひずみから求めた。この場合、コンクリートの弾性係数は載荷時の値とし、経時的に変化しないとしている。クリープ係数は一般に載荷時材齢が若いほど大きくなることが知られているが、この場合のクリープひずみには算出する時点より若い材齢に生じた変動応力によるクリープひずみを含んでいるため、載荷時以降降応力が一定に保持されている場合よりクリープ係数は若干大きく評価されている。

4. 解析結果、実験結果および考察

(1) 実験結果と解析結果の比較

本解析法では解析の対象である鉄筋コンクリート部材の平均的な変形やひずみのみではなく、ひび割れ間の任意断面におけるコンクリートひずみや鉄筋ひずみを計算することができることから、それらの部材軸方向の分布のほか、中立軸位置、曲率、付着応力、すべり量などの分布も得ることができる。

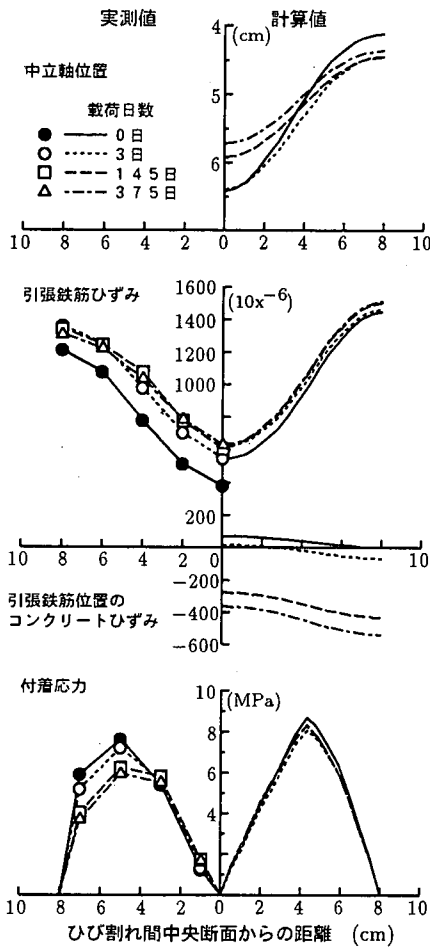


図-7 中立軸位置、ひずみ分布および付着応力分布の解析結果

図-7はDm13-13(A)に対して解析した中立軸位置、引張鉄筋ひずみと引張鉄筋位置のコンクリートひずみおよび付着応力の分布を示したものである。図-7には実測された引張鉄筋ひずみと付着応力も併せて示してある。鉄筋ひずみの実測値は静的載荷後初期にほぼ平行に大きく増加し、解析値とは異なった挙動を示しているが、これは載荷後初期にひび割れ断面においても引張応力がコンクリートに負担され、その後急激に消失するためである。解析では仮定1)を設けているためこの現象は考慮していないが、この点を除けば、解析された鉄筋ひずみや付着応力は実測値とよく一致していると言える。また、ひび割れ幅は鉄筋ひずみと鉄筋位置でのコンクリートひずみで囲まれた面積であり、経時的なひび割れ幅の増加が主としてコンクリートの乾燥収縮によることが報告されているが¹²⁾、本解析においてもそのことが示されている。

図-7は実測ひび割れ間隔を用い、この間隔に対応させ境界条件を設定することにより解析したものであるが、より一般性のある解析を行うためにはひび割れ間隔の評価

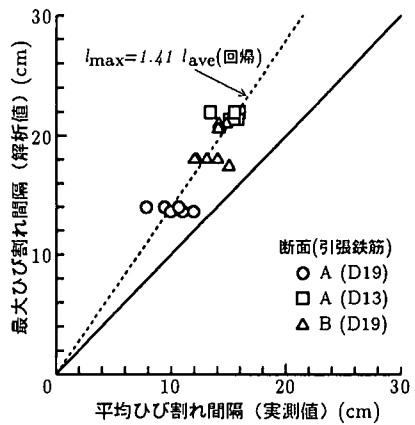


図-8 ひび割れ間隔の解析値と実測値の比較

が必要となる。本解析では2.(2)で述べたように任意断面の引張部コンクリートの応力が得られる。これを利用し、ひび割れ間隔の仮定、境界条件の設定、ひび割れ間中央断面下縁の引張応力の計算、引張応力が引張強度に達したか否かの判定を順次行う。引張応力が引張強度より小さい場合はひび割れ間隔を増大させ、大きい場合には間隔を小さくして再度計算を行う。解析したコンクリート応力が引張強度に一致するまで繰り返して行い、一致した場合のひび割れ間隔を最大ひび割れ間隔とした。実測値の場合、ひび割れの分散の仕方によっては、最大ひび割れ間隔であってもひび割れ間中央断面下縁応力が引張強度に達しているとは限らないため、解析値とは必ずしも一致しない。

そこで解析によって得た最大ひび割れ間隔と実測平均ひび割れ間隔の関係を検討した結果を図-8に示す。解析された最大ひび割れ間隔は実測された平均ひび割れ間隔と比較的良好な相関関係にある。図中の破線は原点を通るように回帰したものであるが、解析された最大ひび割れ間隔は平均ひび割れ間隔の約1.4倍となっており、既往の研究での1.5倍²⁰⁾やCEBの1.7倍⁵⁾に比べてやや小さく、それらの80~95%となっている。

この理由の一つに解析に用いた割裂引張強度がRC部材のひび割れ発生時の下縁引張応力より15体の平均でおよそ10%小さいことが挙げられる。二つ目に引張部コンクリートのひずみ分布を直線と仮定したことにより得られる下縁応力が、鉄筋が拘束される実際のひずみ分布による下縁応力より大きい可能性が考えられる。すなわち、付着応力が生じている領域では引張部コンクリートのひずみは鉄筋との接触部が最も大きく²¹⁾、また、内部ひび割れも生じて表面部に最大ひずみが生じるとは限らないのである。この傾向は鉄筋ひずみが大きくなるにつれて顕著となる。ひび割れ間隔を精度良く予測することは今後の検討事項であるが、本解析で用いた引張部コンクリートひずみを直線分布と仮定することはテンションステ

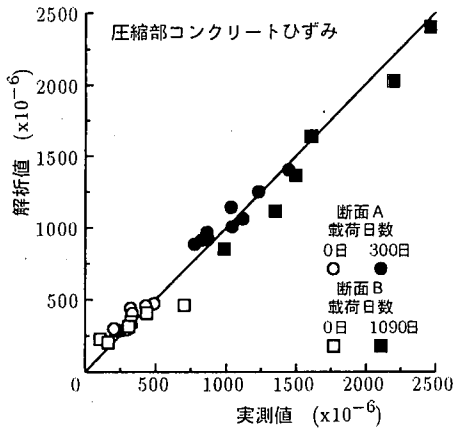


図-9 圧縮部コンクリートひずみの解析値と実測値の比較

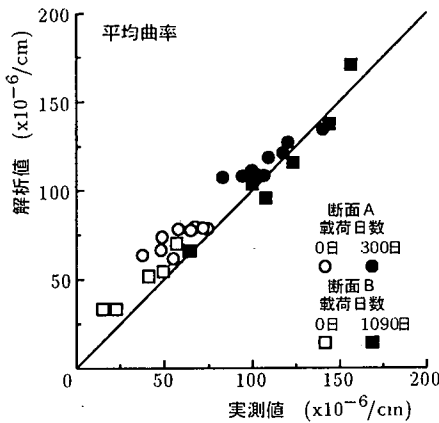


図-10 平均曲率の解析値と実測値の比較

ィフニングが鉄筋からコンクリートへの力の伝達に支配されるので、その評価には影響しない。なお、最大あるいは平均ひび割れ間隔どちらを用いるかは使用状態でのRC部材の長期挙動の評価しようとする対象によるが、以降の考察においては、本研究が特にひび割れ間要素の評価に力点を置いているため、解析値と実測値を比較する場合には実測平均ひび割れ間隔を用いた。そのためにひび割れ間隔は実測の平均ひび割れ間隔を用いた。ただし、長期変形に及ぼす各種要因の影響評価においては、ひび割れ間隔のばらつきの影響を排除し、また実測をしていない場合もあるため、図-8に示す回帰直線より得られた平均ひび割れ間隔を用いている。

次に、図-9、図-10は圧縮部コンクリートひずみおよび平均曲率に関して、静的載荷後と持続載荷後(断面Aでは載荷後300日、断面Bでは載荷後1090日)の実測値と解析値を比較したものである。解析値はひび割れ間要素長さに関する平均値であり、その要素長さとして実測された平均ひび割れ間隔を用いている。既に述べた様に試験区間の長さは平均ひび割れ間隔に比べ十分長い

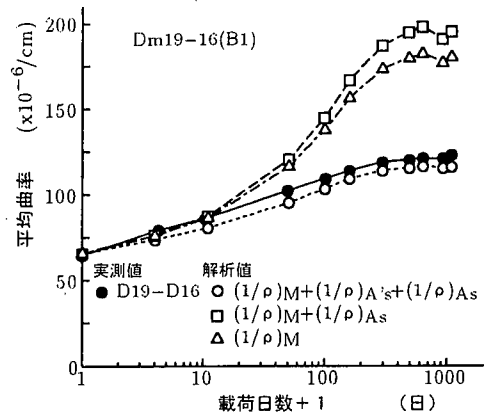


図-11 平均曲率の経時変化(圧縮鉄筋有り)

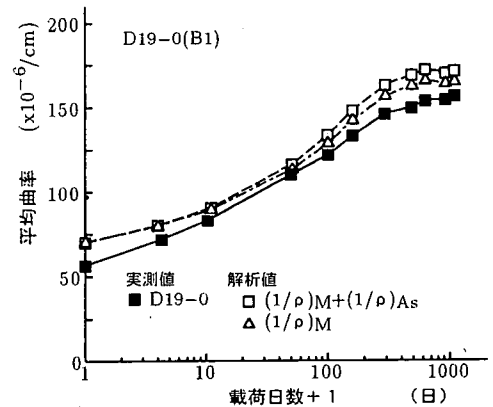


図-12 平均曲率の経時変化(圧縮鉄筋有り)

ので、解析値は試験区間の平均値を表すと考えられる。

圧縮部コンクリートひずみにおいては静的載荷時および長期持続載荷後どちらにおいても、解析値は実測値と良く一致している。

平均曲率においては静的載荷時に上述したひび割れ断面でのコンクリートの引張応力の負担により解析値は実測値をやや過大評価する傾向が見られるが、この影響は載荷後早期に消失することから、長期持続載荷後においては解析値は実測値と良く一致している。以上のことから、本解析方法はRC曲げ部材の長期変形の予測に関して妥当であると考えられる。

(2) 圧縮鉄筋および引張鉄筋の影響

図-11、図-12は乾燥収縮が平均曲率の経時変化に及ぼす影響に対し、鉄筋がどのように制御あるいは進行させるかを、実験値との比較も併せて示したものである。平均曲率の経時変化における圧縮鉄筋および引張鉄筋の役割は式(20)によって評価している。有効弾性係数法は圧縮鉄筋がある場合、一般に応力の再分配があまり行わ

表-3 解析による長期変形の各成分

供試体	引張鉄筋 応力度 (MPa)	曲げ モーメント (kNm)	平均曲げ剛性 (kNm ²)		平均曲率 (10 ⁻⁶ /cm)		平均曲率の各成分 (10 ⁻⁶ /cm)		
			$E_c I_e(y)$	$E_c I_e(y)$	(1/ρ)	(1/ρ)	(1/ρ) _M	(1/ρ) _{A_s}	(1/ρ) _{A_s}
			静的時	1090日	静的時	1090日	1090日		
D19-0(B1)	197.3	20.2	3050	1253	66	166(2.51)	161[95]	0	5
D19-0(B2)	148.0	15.2	3192	1196	48	133(2.79)	127[79]	0	6
D19-0(B3)	98.7	10.1	3618	1127	28	97(3.46)	90[62]	0	7
Dm19-16(B1)	222.4	20.2	2922	1090	69	199(1.71)	186[117]	-82	15
Dm19-16(B2)	166.7	15.2	3078	916	49	91(1.85)	166[117]	-95	21
Dm19-16(B3)	111.2	10.1	3560	686	28	61(2.13)	147[119]	-122	35

() : 静的時に対する増加率, [] : 静的時から増加量, $(1/\rho) = (1/\rho)_M + (1/\rho)_{A_s} + (1/\rho)_{A_s}$

れていないときの高い応力を、考慮している時点で取り入れることができないため、変形を小さくすることになるが、解析値は実測値と比較的良く一致している。図からわかるように、平均曲率はモーメントが作用しコンクリートのクリープと乾燥収縮により経時的に大きくなるが、さらに乾燥収縮と引張鉄筋の拘束による見かけの曲げモーメントは外力曲げモーメントと作用方向が同じで変形を促進するが、乾燥収縮と圧縮鉄筋の拘束による見かけのモーメントは逆であり変形を抑制している。その程度は圧縮鉄筋のほうが引張鉄筋より極めて大きい。

表-3 は引張鉄筋応力度が異なる場合の平均曲げ剛性、平均曲率および式(20)で計算される平均曲率の各成分の解析結果を示したものである。表中の平均曲率の各成分は持続荷重載荷後の増加量を示し、クリープおよび乾燥収縮に起因するものである。経時的な平均曲率の増加率は圧縮鉄筋のない方が、また作用モーメントの小さい方が大きい。後者は乾燥収縮量がモーメントの大きさに依存せず同一であり、モーメントの小さい方が乾燥収縮に起因する変形が相対的に大きいためである。載荷日数の経過に伴う変形増加は式(20)に示すように荷重、クリープ、乾燥収縮によって小さくなる曲げ剛性 $E_c I_e(y)$ によるものであり、変形増加を外力モーメント、圧縮および引張鉄筋によるみかけのモーメントそれぞれの成分による変形として表の右欄に示している。圧縮鉄筋がない場合、式(20)の第1項目すなわち外力モーメント成分の増加量が変形のもとである。圧縮鉄筋のある場合は圧縮鉄筋の変形抑制効果は[]内に示す外力モーメント成分の変形の増加量の70~100%に達し、極めて大きいことがわかる。[]に示す外力モーメント成分の変形増加量は圧縮鉄筋のある場合の方が大きい、これは圧縮鉄筋があることにより、中立軸が圧縮縁から浅い位置にあり、このために中立軸回りの断面2次モーメントが小さくなるためである。作用モーメントが小さい場合には、コンクリート圧縮部の応力も小さいためにさらに中立軸位置が浅くなり、その結果荷重による変形の増加も荷重が小さいことに対応せず、大きくなる。しかし、クリープ、乾燥収縮、圧縮鉄筋の影響すべてを含んだ断面2次モーメントは、作用モーメントの小さい方が小さいため、

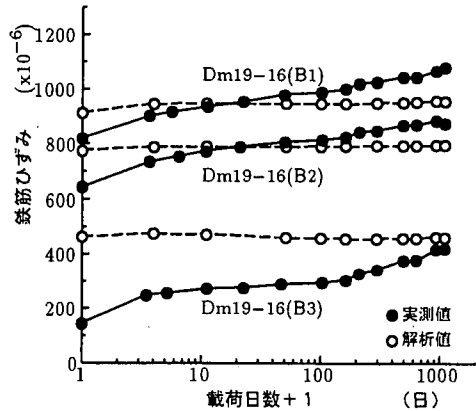


図-13 平均引張鉄筋ひずみの経時変化

圧縮鉄筋による抑制効果も高まるために、結果としては、小さい変形増加を示す一方、静的載荷時の変形が小さいために大きな増加率を示すことになる。

平均曲率を構成する因子は平均引張鉄筋ひずみと平均圧縮部コンクリートひずみである。図-13 は平均引張鉄筋ひずみの経時変化の実測値と解析値を比較したものである。Dm19-16(B1)、Dm19-16(B2)では実測値と解析値は概ね一致している。しかし、解析された鉄筋ひずみはほとんど増加していないが、実測値は徐々に増加していく傾向がみられる。載荷後早期の増加は既に述べたようにひび割れ断面でのコンクリートが負担していた引張応力の消失によるものである。また、その後における平均引張鉄筋ひずみの増加は後述するひび割れ間中央部付近での内部ひび割れの発生、ひび割れ近傍の付着劣化ゾーンの増大などによるものと思われる。特に、鉄筋応力度が小さいDm19-16(B3)にみられる顕著な平均ひずみの増加はひび割れ断面の引張応力負担が載荷後初期の段階ではかなりあり、その後経時的に喪失することおよび持続載荷中に新しいひび割れが生じることによるものである。実測値と解析値の相違をもたらす原因のうち、新たなひび割れの発生の影響については、持続引張応力下における経時的引張強度の低下の評価に基づいてひび割れ発生の判定を行い、発生した場合には発生した時点から、増加したひび割れを取り入れた新しい平均ひび割

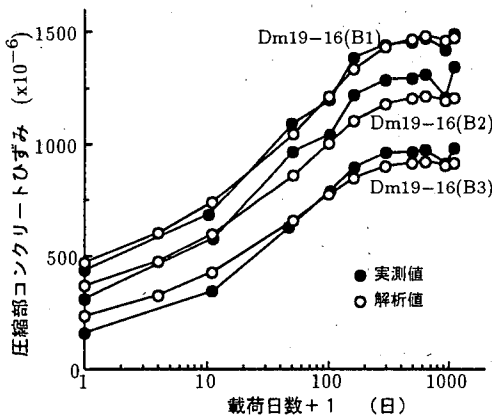


図-14 平均圧縮部コンクリートひずみの経時変化

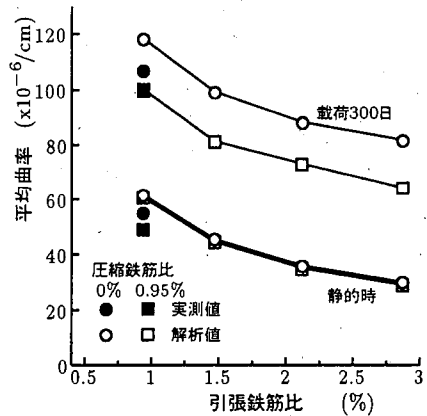


図-16 平均曲率に及ぼす引張鉄筋比の影響

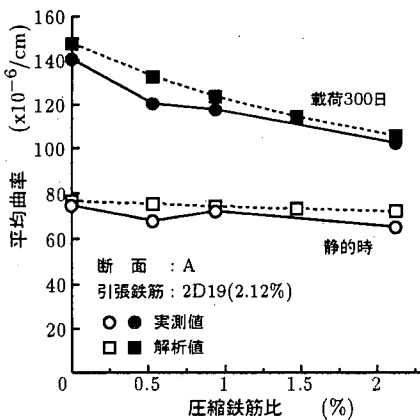


図-15 平均曲率に及ぼす圧縮鉄筋比の影響

れ間隔を用いて解析すれば、解析精度は改善されると思われる。しかし、過去の応力履歴が考慮できない点で改善には限界があり、また引張強度の経時的低下も明らかにする必要はある。

一方、図-14 は圧縮部コンクリートの平均ひずみの経時変化を示している。有効弾性係数を採用しているため、載荷日数が経過しコンクリート応力が低下するほどにひずみを過小評価することになるが、本実験の範囲においては、図に示すように若干小さく評価する傾向がみられるが、おおむね解析値は実測値に近い。また、圧縮部コンクリートひずみの増加は引張鉄筋ひずみの増加に比べて非常に大きく、平均曲率の増加に対して支配的に影響していることが予測される。

そこで、図-15 に圧縮鉄筋比の違いが平均曲率の経時変化に及ぼす影響を示す。静的載荷時においては圧縮鉄筋比が増加すると平均曲率は小さくなるが、その量はわずかである。しかし、経時的な平均曲率の増加量に及ぼす圧縮鉄筋比の影響が大きいことは本研究で行った実験および解析でも確認され、圧縮鉄筋のない場合の平均

曲率の増加量に対して、圧縮鉄筋を約 2%配筋することにより増加量が約 40%に低下している。これは上述したように平均曲率には圧縮部コンクリートひずみの増加が大きく影響を及ぼすことから、圧縮鉄筋を配筋することは直接的に圧縮部コンクリートひずみの増加を抑制するためである。

これに対し、平均曲率に及ぼす引張鉄筋比の影響を示したのが図-16 である。図に示すように作用モーメントが同一である場合、引張鉄筋比を大きくすると、引張鉄筋応力が小さいため、静的載荷時および載荷日数 300 日における場合ともに平均曲率は小さくなる。持続荷重による増加量は、解析によれば引張鉄筋比の影響を受けず、いずれの鉄筋比の場合もほぼ等しい。従って静的時の曲率に対する増加率は引張鉄筋比の大きい方が大きい。解析では、内部ひび割れの発生など経時的な損傷は考慮していないので、実測によればこれと異なる可能性はあるが、引張鉄筋ひずみの経時変化が曲率に及ぼす影響は、圧縮部コンクリートほど大きくないので、その相違は小さいと考えられる。

(3) コンクリートのクリープと乾燥収縮の影響

図-17 はコンクリートのクリープによる平均曲率の増加量を数値解析によって得たものを示している。解析では Dm19-16(B1)の供試体に関してコンクリートのクリープのみの影響を検討するため乾燥収縮と付着クリープは無視している。平均曲率は当然ではあるが、クリープ係数の増加とともに増加しており、さらに、圧縮鉄筋の無いほうが大きい。圧縮鉄筋のない場合は平均曲率はクリープの進行に対して線形的に増大するが、圧縮鉄筋がある場合は必ずしも線形的には増大しない。これはクリープの進行により中立軸が移動しながら、コンクリートの圧縮力が鉄筋に移行し、クリープ係数が大きくとともにそれに応じて鉄筋の変形抑制効果が高まるためであると

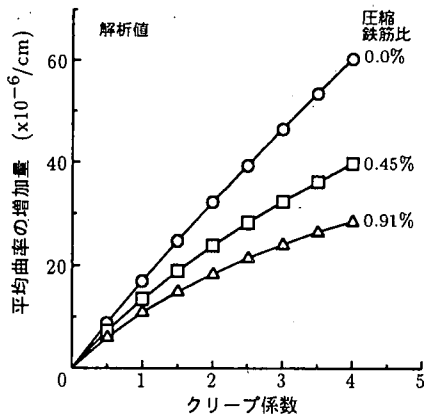


図-17 平均曲率の経時変化に及ぼすクリープの影響

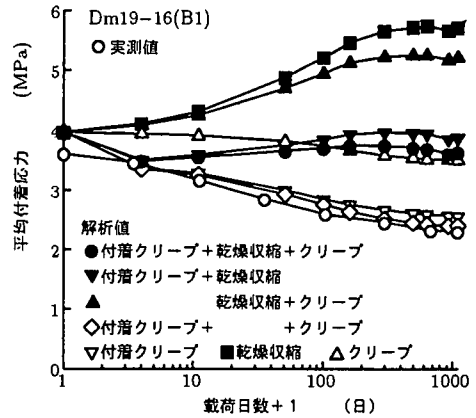


図-19 平均付着応力の実測値と解析値の比較

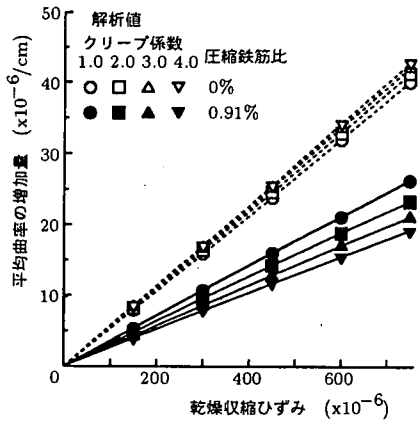


図-18 平均曲率の経時変化に及ぼす乾燥収縮の影響

考えられる。

図-18は解析より求めた平均曲率の経時変化において乾燥収縮による平均曲率の増加量を取り出して示したものである。乾燥収縮による平均曲率の経時的な増加量は全て(クリープ、乾燥収縮、付着クリープ)を考慮した解析結果と乾燥収縮を0とした場合の解析結果との差より求めている。乾燥収縮による平均曲率の増加量は圧縮鉄筋の有無によらず乾燥収縮ひずみと比例関係にある。クリープ係数が増加すると、圧縮鉄筋のない場合はその傾きは増加しているがその程度はわずかである。従って圧縮鉄筋のない場合にはクリープと乾燥収縮による変形を個々に求めて重ね合わせてもその影響は小さいと考えられる。一方、圧縮鉄筋のある場合にはクリープ係数が増加すると乾燥収縮による平均曲率の増加割合は減少している。このことは乾燥収縮を有効高さで除して求める曲率に、クリープ、圧縮鉄筋の影響を考慮した曲率係数を掛けて乾燥収縮による曲率を算定する方法¹⁷⁾と、乾燥収縮に比例する点で一致していることを示している。

(4) 鉄筋とコンクリートの付着応力の緩和

鉄筋コンクリート部材の長期変形にはコンクリートのクリープと乾燥収縮に加えて鉄筋とコンクリートとの間の付着応力の緩和も指摘されている¹⁾。この付着応力の緩和を付着のクリープとして解析に取り入れられることが多く^{3), 12), 22)}、本解析でも有効弾性係数法に準じ付着剛性を経時的に低下させることにより付着応力の緩和の影響を考慮している。

図-19は Dm19-16(B1) 供試体の平均付着応力の実測値と解析値の経時変化を示したものである。図-19には比較のために付着のクリープ、乾燥収縮およびコンクリートのクリープ全てを取り入れた解析値に加えて、1要因のみを考慮した場合と2要因を組み合わせた場合についても示してある。解析値によれば、乾燥収縮は平均付着応力を増大させ、付着クリープは減少させ、結果として実測値に近くなることがわかる。コンクリートのクリープは若干低下させるがその程度は小さい。この乾燥収縮による付着応力の増加は既往の研究においても観察されている²³⁾。これによれば、飽水状態と乾燥状態の供試体から付着力-すべり量関係を得ている。すなわち、飽水状態では載荷後1日で付着剛性が低下した後、その後の付着力-すべり量関係はほとんど変化していない。しかし、乾燥状態の供試体では載荷後1日では付着剛性は低下するが、その後乾燥によりすべりが大きくなる一方付着応力も大きくなり、その結果付着剛性が大きくなることが示されている。これは乾燥収縮によりすべり量が増大し、異形鉄筋の節へコンクリートがさらに食い込むことにより付着応力を増大させるためと考えられる。このように付着のクリープを考慮しないと乾燥収縮により平均付着応力が経時的に増加する、言い換えれば平均引張鉄筋ひずみが経時的に減少する解析結果となり、実際の現象とは異なることとなる。従って、付着のクリープは後述するように平均曲率の増加に関与する割合は小

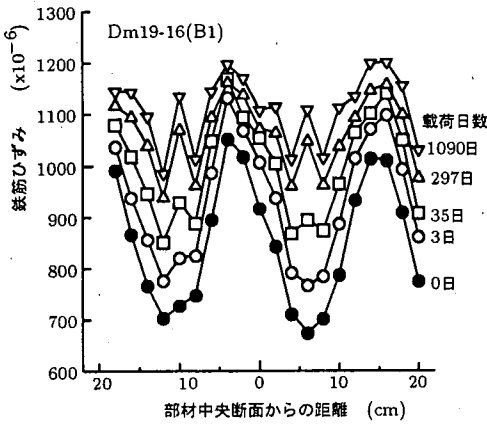


図-20 鉄筋ひずみ分布の経時変化

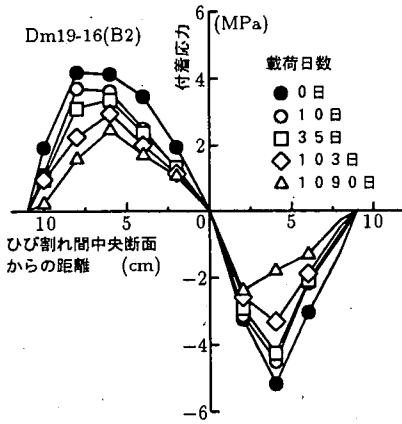


図-21 付着応力分布の経時変化

さいが、ひび割れ幅の経時変化を評価する際には無視し得ない要因になるものと考えられる。

実測値と解析値を比較すると、実測値が徐々に低下するのに対し、解析値は付着クリープを考慮しても経時的には変化せずほぼ一定の値を示している。この相違の大きな原因は図-20 に示す引張鉄筋ひずみ分布の経時変化により説明される。即ち、全体的には鉄筋ひずみは増加側に徐々に移行しているが、部材中央断面から 10cm と 6cm の位置の鉄筋ひずみが載荷日数 35 日以降急増している。これはコンクリートの乾燥収縮の進行とクリープによる強度低下により新たな内部ひび割れ（同じ位置の部材表面ではひび割れは観察されていない）の発生によるものと考えられ、主ひび割れ間のひずみがこれにより増大するが、解析では考慮していないためである。

図-21 は Dm19-16(B2) 供試体の一つのひび割れ間から得られた付着応力の材軸方向分布の経時変化を示したものである。付着応力は載荷日数の経過と共に小さくなっている。また、各載荷日数における付着応力の最大値の位置が載荷日数の経過によりひび割れ間中央断面の

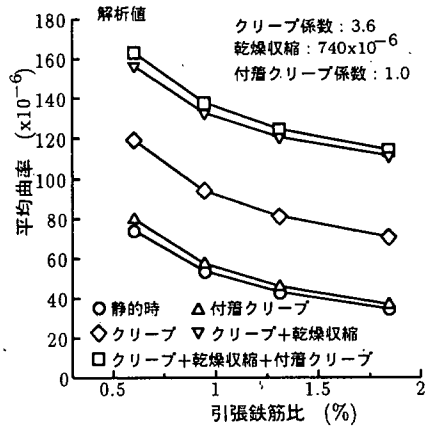


図-22 平均曲率の増加に及ぼす各要因の影響

ほうに移動している。付着のクリープ係数に及ぼす付着応力の大きさの影響について、Rostasyら²⁴⁾は載荷後早期においては付着応力の大きい場合のほうが付着のクリープ係数は大きくなるが、載荷日数145日以降では付着応力の大きさは付着のクリープ係数にほとんど影響しないと報告している。米山ら²⁵⁾も若材齢のコンクリートを対象としたものであるが、付着のクリープ係数は付着応力の大きさの影響を受けないと報告している。従って、付着応力の最大値が移動する現象は付着のクリープにおける作用付着応力の大きさの違いでは説明できず、この現象はひび割れ近傍の付着強度劣化域の進展によるものと考えられる。鈴木ら²⁶⁾はP R C部材ではあるが、持続載荷することにより主ひび割れ近傍の内部ひび割れの発生領域が拡大することを報告している。この内部ひび割れ発生領域の拡大により付着強度の劣化域が広がり、付着応力の最大値の位置が移動したものと考えられる。また、付着強度劣化域の進展により平均付着応力の低下が助長される。本解析においては付着強度劣化域の範囲を一定にしているため付着応力の最大値の位置は変化しないが、劣化域の範囲を経時的に進展させることは本解析において可能であり、図-21に示される現象を表すことができる。以上のように、付着応力は乾燥収縮により増加するが、経時的な付着応力の緩和には付着のクリープに加えて、新たな内部ひび割れの発生と付着強度劣化域の進展も考慮する必要があると考えられる。

(5) 平均曲率の増加における各要因の寄与

図-22 は断面Bの単鉄筋断面で引張鉄筋比を変えた解析結果より平均曲率の増加量をクリープ、乾燥収縮および付着クリープそれぞれの要因ごとに分けて示したものである。解析では作用モーメントはどの引張鉄筋比においても同じであり、解析に用いたクリープ係数と乾燥収縮ひずみは実測値を用いている。図からわかるように

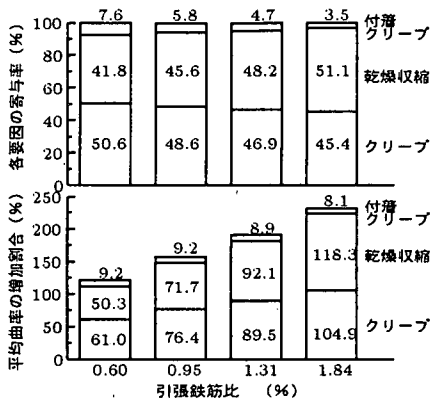


図-23 平均曲率の増加率と各要因の寄与率

平均曲率の増加に及ぼすクリープおよび乾燥収縮の影響は大きく、付着クリープによる増加は小さい。また、全てを考慮して解析した平均曲率とクリープと乾燥収縮のみを考慮した平均曲率の差は付着クリープのみを考慮した平均曲率の増加量とほぼ等しくなっており、付着クリープによる変形は重ね合わせができると考えられる。

図-23 は図-22 の解析結果を静的載荷時の曲率に対する各要因による平均曲率の増加量の割合と平均曲率の増加量における各要因の割合（寄与率）で示したものである。図-23 は実測されたコンクリートのクリープ係数と乾燥収縮ひずみの最大値を用いた解析結果であるが、クリープと乾燥収縮それぞれにより平均曲率は静的載荷時の約 50～120%増加している。また、クリープと乾燥収縮の平均曲率の増加量における寄与率は実測されたクリープ係数と乾燥収縮ひずみが経時的にその値が増加してもどちらも約 40～50%であった。引張鉄筋比が増加するにつれてクリープの寄与率が減少するとともに乾燥収縮の寄与率が増加している。これは作用モーメントが同じであるため、引張鉄筋比が大きくなると中立軸位置が下がり、コンクリートの圧縮応力が小さくなるためである。図示はしていないが、複鉄筋断面の場合もクリープと乾燥収縮の寄与率は単鉄筋断面の場合とほぼ同じであった。また、付着クリープによる増加割合は引張鉄筋比の増加とともに付着応力が小さくなるため若干低下しており、どの鉄筋比においても増加割合は 10%弱であり、寄与率としては 5%前後の値となっている。

5. 結論

本研究は付着の基礎方程式に基づいた等曲げモーメントを受ける RC 部材の長期変形挙動の解析法を提案し、実測結果と比較するとともに、平均曲率の経時変化に及ぼす要因について解析的および実験的に検討したものである。本研究の範囲で得られた結果をまとめると以下の

とおりである。

(1) 等曲げモーメントが作用する RC 部材のひび割れ間要素に関するコンクリートのクリープと乾燥収縮および付着のクリープを取り込んだ付着応力一すべり量関係に基づく基礎方程式を定式化し、RC 部材の変形に及ぼす圧縮鉄筋および引張鉄筋の影響を表現し得る曲率の算定式を誘導した。さらに、本方法によりひび割れ間の引張鉄筋ひずみ、圧縮部コンクリートひずみ等の軸方向分布を解析できることを示した。

(2) 所定の曲げモーメントが作用した際にコンクリート下縁の引張応力が引張強度に等しいという条件で解析された最大ひび割れ間隔は実測された平均ひび割れ間隔と線形関係にあり、解析による最大ひび割れ間隔は実測された平均ひび割れ間隔の 1.4 倍であった。この値はこれまで実験的に得られた値の 80～95% である。

(3) 実測平均ひび割れ間隔を用いて解析で求めた平均曲率、引張鉄筋ひずみ、圧縮部コンクリートひずみ等の経時変化は実測値とよく一致した。ただし、ひび割れ断面のコンクリートが引張応力を負担するため、持続荷重載荷後早期の引張鉄筋ひずみは過大評価した。

(4) 本解析では、圧縮鉄筋は乾燥収縮による曲げ変形を抑制し、引張鉄筋は促進することを定量的に評価することができた。これによる時間依存性平均曲率に及ぼす圧縮鉄筋の影響は実測値とよく一致した。

(5) 平均曲率の増加量は圧縮鉄筋のない場合はクリープ係数の増加により線形的に大きくなる。しかし、圧縮鉄筋がある場合は非線形となり、その増加割合はクリープ係数の増加とともに減少する。また、平均曲率の増加量はクリープ係数が増加しても圧縮鉄筋の有無に拘わらず、どちらも乾燥収縮ひずみの増加と比例関係にある。

(6) コンクリートの乾燥収縮は平均付着応力を増大させる。コンクリートのクリープは平均付着応力を低下させるが、その程度は小さい。付着のクリープが平均曲率の増加に及ぼす影響は小さいが、平均付着応力の低下に及ぼす影響は大きい。また、付着応力の緩和には付着のクリープに加えて、新たな内部ひび割れの発生と付着強度劣化域の進展も大きく影響する。

(7) 実測されたコンクリートのクリープと乾燥収縮を用いた解析結果では、静的載荷時からの平均曲率の増加量におけるクリープと乾燥収縮それぞれの寄与率はクリープと乾燥収縮が経時的に増加してもどちらも約 40～50%程度と平均曲率の増加に及ぼす影響は大きく、その残りが付着のクリープの寄与率であり、平均曲率の経時変化に及ぼす影響は小さい。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、当時宇都宮大学大学院生であった手塚政男氏(アサヒハイテック(株))に多大な協力を頂いた。ここに謹んで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 角田与史雄：曲げを受けるコンクリート部材のひびわれとたわみに関する研究の現状，土木学会論文集，第384号/V-7，pp.21-32, 1987.
- 2) Neville, A.M., Dilger, W.H. and Brooks, J.J. : *Creep of plain and structural concrete*, Construction Press, pp.207-215, 1983.
- 3) 原番，萩原忠治，中山康志，鈴木仙二，竹本周二：RC部材の長期たわみに関する解析的研究，竹中技術研究報告，第15号，pp.58-70, 1976.
- 4) コンクリート標準示方書(平成8年制定)設計編，土木学会，1996.
- 5) *CEB Manual on Cracking and Deformation*, Bulletin D'Information, No.158, 1985.
- 6) *CEB-FIP MODEL CODE 1990*, CEB-FIP, 1991.
- 7) Ghali, A. and Favre, R. : *Concrete Structures : Stresses and Deformations*, Chapman and Hall, pp.144-193, pp.225-267, 1986.
- 8) 猪俣俊司：構造コンクリート曲げ部材使用限界状態の統一設計計算法，コンクリート工学，Vol.26, No.12, pp.1-11, 1988.
- 9) *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, ACI Committee 318, 1983.
- 10) Yu, W.W. and Winter, G. : Instantaneous and Long-Term Deflections of Reinforced Concrete Beams Under Working Loads, *ACI Journal*, Vol.57, No.2, pp.29-50, 1960.
- 11) Bazant, Z.P. and Oh, B.H. : Deformation of Progressively Cracking Reinforced Concrete Beams, *ACI Journal*, Vol.81, No3, pp.268-278, 1984.
- 12) 李振宝，大野義照，鈴木計夫：RCはりの長期ひび割れ幅に及ぼす付着クリープと乾燥収縮の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16, No.2, pp.407-412, 1994.
- 13) Sato, R., Ujiike, I., Minato, H. and Dilger, W.H. : Basic Bond Equations in a Reinforced Concrete Flexural Element, *Proceedings of International Conference on Bond in Concrete*, Vol.1, pp.2-89-2-98, 1992.
- 14) Park, R. and Paulay, T. : *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons, pp.427-494, 1975.
- 15) *Structural use of concrete (BS8110)*, Part2, BSI, 1985.
- 16) 六車熙，森田司郎，富田幸次郎：鋼とコンクリートの付着に関する研究，日本建築学会論文報告集，第131号，pp.1-6，第132号，pp.1-8, 1967.
- 17) 黒正清治，滝口克己，長嶋俊雄，長縄裕行：異形鉄筋とコンクリートの付着に関する基礎的研究(その1)，(その2)，日本建築学会大会学術講演概要集，pp.1243-1244，pp.1245-1246, 1973.
- 18) 林静雄，黒正清治，吉田弘行：引き抜き力を受ける異形鉄筋の引き抜き近傍における付着性状，RC構造の有限要素解析に関するコロキウム論文集，pp.43-48, 1984.
- 19) 高橋久雄，小柳光生，竹田寿一：鉄筋とコンクリートの付着クリープ性状に関する研究，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.1, pp.465-468, 1979.
- 20) 六車熙，森田司郎，角徹三：異形鉄筋によるひびわれの分散について，コンクリートライブラリー，第14号，pp.115-120, 1965.
- 21) Nilson, A.H. : Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete by the Finite Element Method, *ACI Journal*, Vol.65, No.9, pp.757-766, 1968.
- 22) Eligenhausen, R., Kazic, M. and Sippel, T.M. : Creep and Fatigue Analysis of Reinforced Concrete Structures, *Proceedings of International Conference on Bond in Concrete*, Vol.2, pp.7-49-7-58, 1992.
- 23) 長瀧重義，佐藤良一，鯉淵芳伸：異形鉄筋とコンクリートの付着クリープ性状，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.6, pp.553-556, 1984.
- 24) Rostasy, F.S. and Kepp, B. : Time-dependent of bond, bond in concrete, *Proceedings of the International Conference on Bond in Concrete*, Applied Science Publishers, pp.183-192, 1982.
- 25) 米山敏一，米倉重州夫，宮澤伸吾，井上毅：若材令コンクリートにおける鉄筋付着の時間依存性，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.8, pp.341-344, 1986.
- 26) 鈴木計夫，大野照義，S.スリーソンボン，横谷隆幸：持続あるいは繰返し荷重を受けたPRCはりの内部のひびわれ状況，セメント技術年報，39，pp.416-419, 1985.

(1998.9.14 受付)

A STUDY ON LONG-TERM DEFORMATION AND ITS ANALYSIS METHOD OF REINFORCED CONCRETE FLEXURAL MEMBERS

Ryoichi SATO, Isao UJIKE, Masahiro SUZUKI and Yasuhide HOJO

The present study proposes a bond-based analysis method of flexural deformation of reinforced concrete members subjected to sustained pure bending. The basic bond equations are formulated based on bond stress-slip relationship taking into account creep and drying shrinkage of concrete as well as creep of bond. The curvature due to drying shrinkage restrained by reinforcement is derived in the analysis. The validity of the analysis is demonstrated by comparing computed and experimental curvatures, strain of concrete in compression zone, tension reinforcement strain, bond stress and so on. The effects of creep and drying shrinkage of concrete and relaxation of bond stress on long-term deformation is investigated numerically.