

論文 応力履歴を考慮した高強度 PRC 部材のクリープ解析について

安齋慎介*¹・廣河和男*²・袖山隆行*³・佐藤良一*⁴

要旨: 打込み直後からの自己収縮, プレストレス導入, 短期載荷等を経て持続荷重下における長期材齢に至るまでの, 高強度 PRC 部材の時間依存性変形挙動の解析方法と解析結果を提示している。解析方法では, 材齢と共に変化するヤング係数, クリープ係数, 収縮を取り入れ, さらに重ね合わせの原理を適用してコンクリートおよび付着すべり関係における応力履歴を考慮している。解析の結果, 自己収縮を無視すると変形を小さく評価すること, また一定持続荷重下の高強度 PRC 部材の鉄筋ひずみ, 曲率等と比較した結果, 変形を大きく評価することを明らかにし, その原因を考察した。

キーワード: 高強度 PRC 部材, 自己収縮, クリープ, 付着すべり, 時間依存性解析

1. はじめに

PRC 構造物は, プレストレス力の導入や異形鉄筋の配置により, 変形やひび割れ幅に対して優れた制御機能を有するコンクリート部材である。このような点から, 最近, PRC は実構造物に多く用いられている。この PRC に高強度コンクリートを用いることは, 普通コンクリートを用いた時に比べ大きなプレストレス力を導入することを可能にする。しかし, 高強度コンクリートには, 若材齢時からかなり大きな自己収縮ひずみが生じることが知られており, 精度良く高強度 PRC 部材の時間依存性挙動を予測するためには, 打込み直後からの自己収縮を考慮したクリープ解析が不可欠であると筆者らは考えている。

このような観点から, 本研究は高強度 PRC 部材のクリープ解析を, 打込み直後から自己収縮発生, ヤング係数発現等の若材齢の特性を取り込み, プレストレス導入, 短期載荷を経て長期材齢に至るまで連続的に行う方法の開発, 解析精度の検証, 自己収縮の影響等を明らかにすることを目的とした。なお本解析法は, 普通コン

クリートを用いた PRC 部材に対して開発された解析方法¹⁾を高強度コンクリートの自己収縮の影響を考慮できるように拡張したものである。

2. 解析方法¹⁾

本解析の基本仮定は, 断面におけるひずみの直線性である。ひび割れ後では, 圧縮部コンクリート, 圧縮鉄筋および引張鉄筋それぞれのひずみと PC 鋼材の増分ひずみの直線性であり, ひび割れ間の引張コンクリートひずみは中立軸 (NA) からの距離に比例して増大する仮定を設けている。従って, ひび割れ前はたとえば中立軸位置 y と鉄筋ひずみ ε_s の 2 変数が, ひび割れ後はそれらに加えて鉄筋位置のコンクリートひずみ ε_{cr} の 3 変数がわかれば任意断面のひずみと応力分布が得られる。任意断面においては軸方向力と曲げモーメントに対し 2 つの釣り合い式が得られるので, ひび割れ前およびひび割れ断面では釣り合い条件から断面のひずみと応力が決まる。ひび割れ後のひび割れ間任意断面では, 付着すべり関係と関係づけることにより上記 3 変数を決めることができる。

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻 (正会員)
 *2 広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻 (正会員)
 *3 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻 (正会員)
 *4 広島大学教授 工学部第四類 (建設系) 工博 (正会員)

自己収縮が生じた状態から持続荷重下までの断面のひずみ分布の変化の概念を図-1および図-2に示す。図中の $\varepsilon_n(y_i)$ は中立軸位置のひずみを示し、自由収縮ひずみ $\varepsilon_{fr,i}$ と過去にその位置で受けた応力履歴によるひずみとの和である。

重ね合わせの原理に基づくと、上縁から z の位置における考慮している時点 t_i での、変動応力下のコンクリートひずみは一般に式(1)で表すことができる。

$$\varepsilon_{c,i}(z) = \sum_{j=2}^i \frac{\Delta\sigma_{c,j-1}(z)}{E_c(t_i, t_{j-1})} + \varepsilon_{fr,i}(z) \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\sigma_{c,j-1}(z)$ は t_j と t_{j-1} 間の変動応力であり、 $\Delta\sigma_{c,j-1}(z) = \sigma_{c,j}(z) - \sigma_{c,j-1}(z)$ で表される。また、 $E_c(t_i, \bar{t}_{j-1}) = \frac{\bar{E}_{c,j-1}}{1 + (\bar{E}_{c,j-1}/E_{28})\varphi(t_i, \bar{t}_{j-1})}$ である。

$\bar{t}_{j-1}$ は t_j と t_{j-1} の中間時点であり、 $\bar{E}_{c,j-1}$ は $\bar{t}_{j-1}$ におけるコンクリートのヤング係数で、それぞれ、 $\bar{t}_{j-1} = (t_j + t_{j-1})/2$ 、 $\bar{E}_{c,j-1} = (E_{c,j} + E_{c,j-1})/2$ である。 E_{28} は標準養生材齢28日のコンクリートのヤング係数である。また、 $\varphi(t_i, \bar{t}_{j-1})$ は、時点 $\bar{t}_{j-1}$ に生じた変動応力に対する時点 t_i におけるクリープ係数である。第1項は各ステップ間の変動応力によるひずみの成分である。第2項は温度変化ひずみ、乾燥収縮ひずみ、自己収縮ひずみから構成される自由ひずみ成分である。式(1)を $\sigma_{c,i}(z)$ について表示すると次のようになる。
$$\sigma_{c,i}(z) = E_{c,i}(t_i, \bar{t}_{i-1}) \{ \varepsilon_{c,i}(z) - \varepsilon_{c,sum,i-1}(z) - \varepsilon_{fr,i} \} \quad (2)$$
ここで、 $\varepsilon_{c,sum,i-1}(z)$ は、時点 t_{i-1} までの弾性ひずみとクリープひずみからなる、応力履歴により生じたひずみである。

検証を要することであるが、付着すべり関係においても重ね合わせの原理が成立すると仮定すれば任意材齢におけるすべり量は式(3)のように、また付着応力は式(4)のように表される。

$$\delta_{x,i} = \sum_{j=2}^i \frac{\Delta\tau_{x,j-1}}{K_e(t_i, t_{j-1})} \quad (3)$$

$$\tau_{x,i} = K_e(t_i, \bar{t}_{i-1}) \{ \delta_{x,i} - \delta_{x,sum,i-1} \} \quad (4)$$

ここで、 $K_e(t_i, \bar{t}_{j-1}) = \frac{\bar{K}_{j-1}}{1 + (\bar{K}_{j-1}/K_{28})\varphi_b(t_i, \bar{t}_{j-1})}$ であ

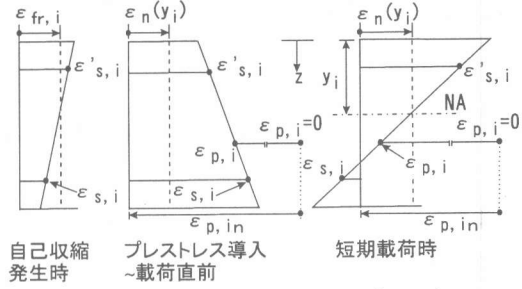


図-1 全断面有効時のひずみ分布

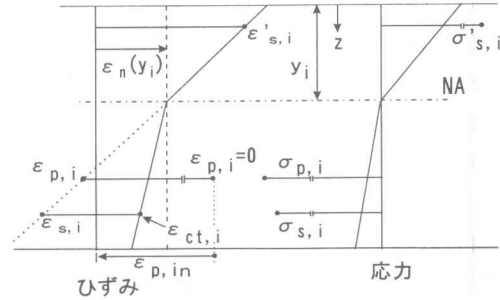


図-2 任意断面のひずみ・応力分布

る。変数の意味は、付着すべり関係の場合もコンクリートのひずみ応力関係と同様であるので、割愛する。

これらの式にみられるように、本解析法はヤング係数、付着剛性、クリープ係数、収縮等の材齢の経過に伴う変化を考慮できることがわかる。

自己収縮発生から所定の材齢における任意断面の $\varepsilon_s, \varepsilon_{ct}, y$ を記憶しておけば考慮している時点以前の応力分布がわかるので、自己収縮、プレストレスなどによって生じる過去の応力履歴を考慮して解析できるのである。詳細は文献1)を参照されたい。

3. 実験概要²⁾

3.1 供試体の作製

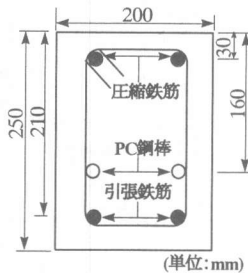
供試体の形状は、断面が $20 \times 25\text{cm}$ 、長さが 240cm の矩形断面はりである。供試体の種類は断面を図-3に示すような鋼材の構成により、表-1に示すように引張鉄筋比、圧縮鉄筋比およびプレストレス量をパラメータとした高強度PRC部材6種類である。またこの他に同断面のクリープおよび収縮計測用のプレーンコンクリ

表－１ 供試体一覧

供試体 名称	呼び名 引張鉄筋 (PC 鋼棒) －圧縮鉄筋	引張鉄筋		PC 鋼棒		圧縮鉄筋		PC 鋼棒 緊張 応力 (N/mm ²)	持続 荷重 モーメ ント (kN・m)
		断面積 As (mm ²)	鉄筋比 ρ_s (%)	断面積 Ap (mm ²)	鋼材比 ρ_p (%)	断面積 As' (mm ²)	鉄筋比 $\rho_{s'}$ (%)		
HL20	D16(7.1)－0	397.2	0.79	80	0.16	-----	-----	900	22.1
HL22	Dm16(7.1)－D16	317.5	0.64	80	0.16	397.2	0.79	900	22.1
HL30	D13(9.0)－0	253.4	0.51	128	0.26	-----	-----	940	22.2
HL32	Dm13(9.0)－D16	184.9	0.37	128	0.26	397.2	0.79	940	22.2
HL40	D10(10.7)－0	146.7	0.29	180	0.36	-----	-----	940	23.5
HL42	Dm13(10.7)－D16	184.9	0.37	180	0.36	397.2	0.79	940	23.5

(引張鉄筋 Dm は溝切り加工した鉄筋，鉄筋比および鋼材比は全断面に対する比率を表す。)

ート供試体を作製した。供試体の荷重条件は，材齢 9 日(有効材齢 12 日)でプレストレスを導入し，材齢 16 日(有効材齢 20 日)で持続荷重を荷重した。荷重期間はおよそ 700 日間である。養生は，プレストレス導入時まで湿潤養生を行い，導入後直ちに乾燥を開始した。



図－３ 供試体断面

表－２ 強度特性

試験時期 [材齢]	プレストレス 導入時 [9 日]	持続荷重 荷重時 [16 日]	標準 養生 [28 日]
f'_c (N/mm ²)	95.4	100.0	105.4
f_{ct} (N/mm ²)	-----	4.27	6.43
E_c (kN/mm ²)	35.2	36.6	38.7

の値を用いた。

クリープ係数は本実験の実測値²⁾と荷重時材齢が極若材齢の実測値³⁾に基づいて，文献²⁾を参考に CEB- FIP MODEL CODE 1990 の予測式を修正した次の回帰式により求めた。

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \times \left[\frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right]^{0.3} \quad (6)$$

$$\varphi_0 = 1.063 \times [1 + (t_0 + 0.33)^{-3.08}]$$

$$\beta_H = 194.7 \times (t_0/28) \times [2 - (t_0/28)]$$

ただし， $t_0 \geq 28$ のとき $\beta_H = 194.7$

ここで， $\varphi(t, t_0)$ は荷重時有効材齢が t_0 の有効材齢 t 日におけるクリープ係数，また $t_1 = 1$ 日である。図－４に実測値と修正式による値を示す。

3.2 荷重方法および計測項目

荷重はスパン 210cm，せん断スパン長 65cm の 2 点荷重とした。純曲げ区間 80cm を試験対象区間として平均曲率を計測し，HL22，HL32，HL42 の 3 体については，あわせてスパン中央部 52cm の区間で鉄筋ひずみも計測した。

4. 材料特性

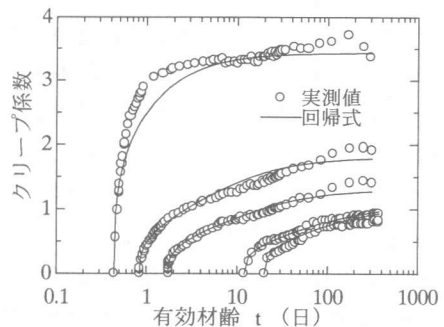
コンクリートの圧縮強度 f'_c ，引張強度 f_{ct} ，ヤング係数 E_c を表－２に取りまとめて示す。

若材齢からの任意材齢におけるコンクリートのヤング係数は，実測値³⁾を回帰して得られた次式により求めた。

$$E(t)/E_{28} = \exp \left[s \left\{ 1 - \left\{ (28 - a)/(t - a) \right\}^{0.5} \right\} \right] \quad (5)$$

ここで， $s = 0.0654$ ， $a = 0.300$ である。

有効材齢 28 日以前の入力値には式(5)の値を，それ以降のものについては標準養生材齢 28 日



図－４ クリープ係数

収縮ひずみの測定結果を図-5に示す。自己収縮の有無の影響を検討するために、乾燥開始時を0とした収縮もあわせて図に示している。

付着剛性については、袖山らの研究⁴⁾で得られた高強度コンクリートと異形鉄筋の付着応力-すべり量関係から求めた。得られた関係を図-6に示す。図中に供試体の配筋状態と付着剛性 K の値を示しているが、この値を28日における付着剛性とした。ひび割れ近傍の付着劣化領域は、ひび割れ断面から鉄筋径の1.5倍離れた断面からひび割れ断面に向かって付着剛性を線形に低下させることにより評価し、この範囲は経時的に変化しないものとしている。

高強度コンクリートを用いた場合の付着クリープのデータは不明であるので、ここでは普通強度のコンクリートと同じと仮定した⁵⁾。載荷時材齢の影響は、ひび割れ後の経過日数とともに付着クリープ係数が直線的に低下するとした。

5. 解析結果と考察

解析は各供試体について自己収縮の有無の2ケース行った。以下にその結果と考察を述べる。

5.1 引張鉄筋ひずみ

図-7, 8, 9にそれぞれ HL22, HL32, HL42 供試体で計測された引張鉄筋ひずみの平均値および最大値を各解析値とあわせて示す。自己収縮を考慮した解析値はいずれも、打込み後からの自己収縮による鉄筋の圧縮ひずみの増加、その後湿潤養生により収縮の進行が抑制されることに起因する鉄筋の圧縮ひずみの停滞、プレストレスが導入された後、持続荷重載荷直前までに進行するクリープによる鉄筋の圧縮ひずみの増加がよく評価されている。自己収縮を考慮しない解析値と比較すると、持続荷重載荷直前までに鉄筋に蓄積される圧縮ひずみに差が生じている。持続荷重載荷後の平均鉄筋ひずみの挙動は、いずれも解析値は実測値を過大評価しているものの定性的に長期挙動を評価していると考えられる。載荷直後の最大鉄筋ひずみの解析値と実測値に着目すると、プレストレス量が大きくなる

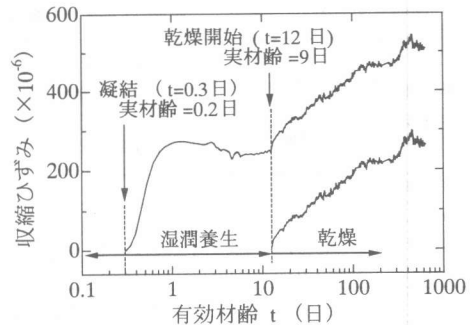


図-5 収縮ひずみの経時変化

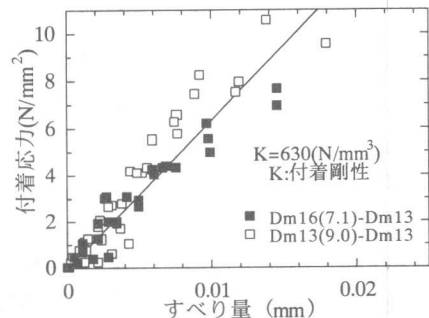


図-6 付着応力-すべり量関係

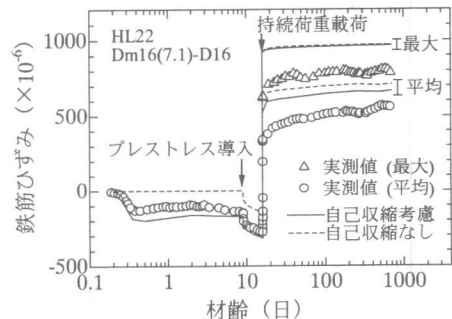


図-7 鉄筋ひずみの経時変化(HL22)

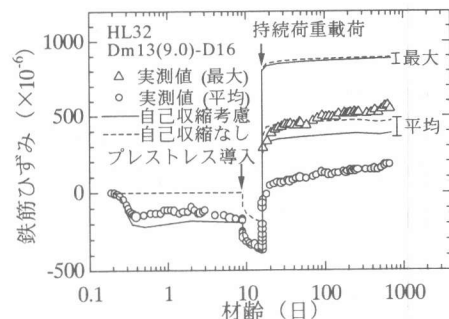


図-8 鉄筋ひずみの経時変化(HL32)

に伴いその差は大きくなることが認められる。これは、プレストレス量が大きい場合、ひび割れ幅が非常に小さいため、ひび割れ断面におい

て引張部コンクリートの応力負担があることが原因であると考えられる。また、特に HL42 について載荷後の実測値は時間とともに解析値に近づく傾向が認められるが、これは引張部コンクリートの応力負担が時間とともに減少することに起因するものと考えられる。さらに、精度良く解析を行うためには、ひび割れ断面における応力負担を考慮に入れる必要があり、今後の重要な課題であると考えている。

5.2 曲率

図-10, 11 に HL40, HL42 の平均曲率の実測値および解析値、さらにひび割れ断面における曲率(最大曲率)の解析結果をあわせて示す。実験において平均曲率はプレストレス導入直前から測定を開始しているため、比較するためにプレストレス導入直前において自己収縮を考慮した解析値に実測値をあわせて表示している。極若材齢において自己収縮により HL40 は正の曲率が生じ HL42 は逆に負の曲率が生じているが、これは圧縮鉄筋の有無による影響と考えられる。また、自己収縮を無視すると考慮したものに比べ変形を過小評価することがわかる。解析値は実測値を定性的に把握できているものの、過大評価する傾向がある。この原因の一つとして、先にも述べたようにひび割れ断面において引張応力負担があることが挙げられる。

5.3 ひずみ・応力分布

図-12 に HL30 の自己収縮を考慮した解析結果から得られたひずみ・応力分布を示す。プレストレス導入直前は、自己収縮のみによって生じたひずみ・応力分布を表している。鉄筋の拘束により部材下縁で $0.69(\text{N}/\text{mm}^2)$ の引張応力が生じているのが認められる。導入直後においてひずみ分布は、応力分布の傾きと反対になっている。これは、自己収縮による初期に蓄積されたひずみに起因している。載荷直前では収縮とともにプレストレス力によるクリープが進行し、PC 鋼棒応力が減少しているのがわかる。ひび割れ後は、ひび割れ間中央断面で鉄筋が圧縮を受けながらひび割れ断面では引張応力を受けて

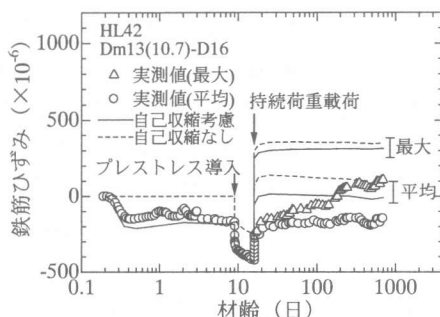


図-9 鉄筋ひずみの経時変化(HL42)

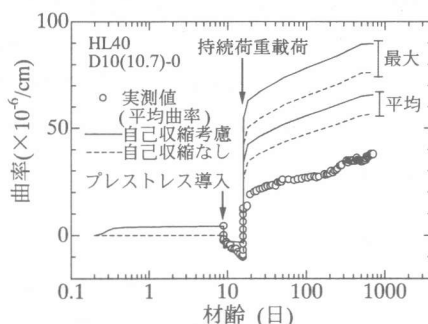


図-10 曲率の経時変化(HL40)

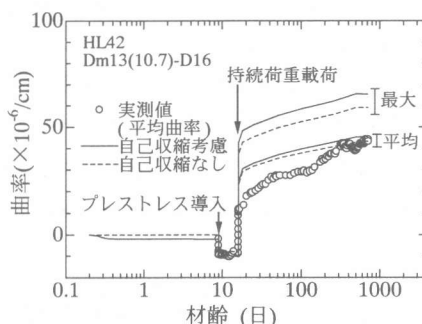


図-11 曲率の経時変化(HL42)

いるのが認められる。これは、付着の影響で、ひび割れ間引張部コンクリートが引張力を負担していることを示している。また、ひび割れ断面において圧縮ひずみの増加に対し圧縮応力がクリープにより減少し、それに伴う中立軸の下降、PC 鋼棒応力の減少、引張鉄筋応力の増加が認められる。

6. まとめ

本研究の範囲内で得られた結論を以下に示す。

(1) 打込み直後からの自己収縮、プレストレス導

入，短期載荷等を経て持続荷重下の長期材齢に至るまでの，高強度 PRC 部材における時間依存性変形挙動の解析方法の考え方を示した。

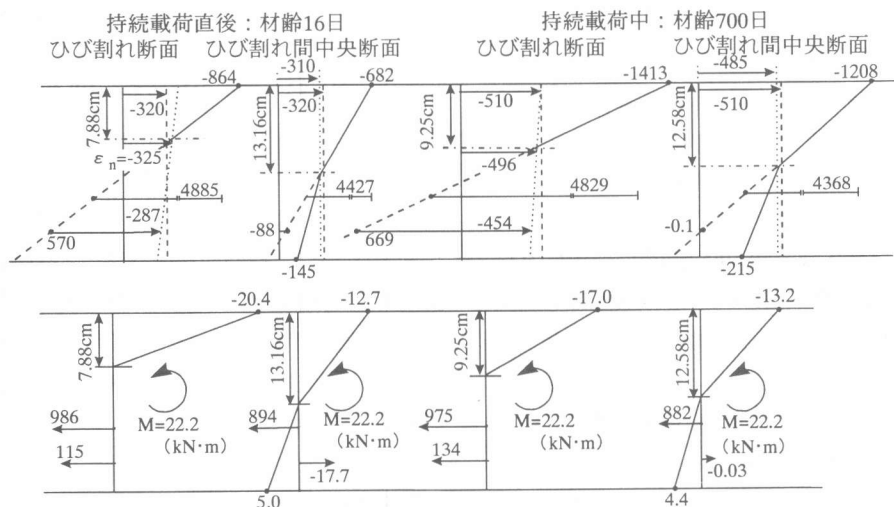
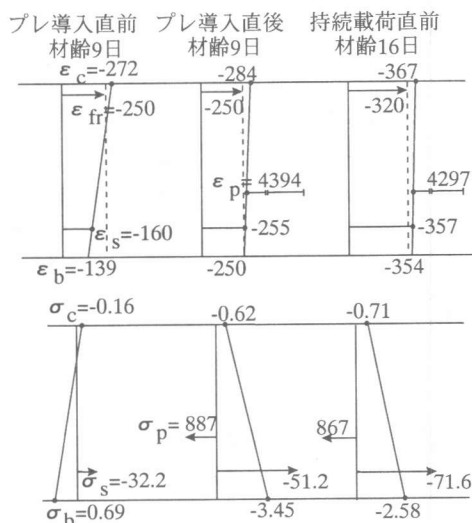
- (2)本解析法は，材齢と共に変化するヤング係数，クリープ係数，収縮を考慮し，さらに重ね合わせの原理を適用してコンクリートおよび付着すべり関係における応力履歴を考慮できる。
- (3)本解析法により自己収縮を無視すると変形を過小評価することを示した。
- (4)本解析法は，高強度 PRC 部材の鉄筋ひずみ，曲率等を定性的には予測できるが，過大評価することを示し，その理由としてひび割れ断面における引張部コンクリートの応力負担があることを示した。

参考文献

- 1)袖山隆行ほか：コンクリートと付着の応力履歴を考慮した PRC 部材の時間依存性挙動解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，pp.241-246，1998
- 2)手塚正道ほか：高強度コンクリート部材の時間依存曲げ変形挙動の検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.585-590，1997
- 3)Yang, Y. et al：Experimental Investigation on

Shrinkage and Creep of High Strength Concrete at Early Ages, Fourth CANMET /ACI /JCI International Symposium on Advances in Concrete Technology, pp.201-215, 1998

- 4)袖山隆行ほか：高強度コンクリートと異形鉄筋との付着特性について，土木学会第 24 回関東支部技術研究発表会講演概要集，pp.590-591,1997
- 5)高橋久雄ほか：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講演論文集，Vol.1,pp.465-468，1979



上段：ひずみ分布($\times 10^{-6}$)，下段：応力分布(単位： N/mm^2)

図-12 断面のひずみ・応力分布 (HL30)