

論文 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

手塚 正道^{*1}・佐藤 良一^{*2}・許 明^{*3}・袖山 隆行^{*4}

要旨：100N/mm²クラスの高強度コンクリートを用いたRC、PRCおよびPC部材の時間依存による曲げ変形挙動を実験的に検討し、併せてクリープの載荷時材齢を考慮した重ね合わせの原理に基づくstep-by-step法を用いたクリープ解析を行った。その結果、自己収縮によって導入される鉄筋の拘束ひずみを精度良く解析できること、曲率におけるMC90によるテンションスティフニング効果は、ひび割れ発生直後の段階ほど過小に評価し、作用モーメントが大きい段階ほど精度が良いことなどが認められた。

キーワード：高強度コンクリート、時間依存、変形、テンションスティフニング

1. まえがき

近年、高性能AE減水剤や微粉末混和材の研究、開発が進み、100N/mm²クラスの高強度でも流動性の高いコンクリートが容易に製造できるようになってきた。コンクリートの高強度化に伴って、ビルの高層化や橋梁の長大化あるいは軽量化などを目的として、コンクリート構造物への利用に関する研究も盛んに行われている。しかしながら、100N/mm²クラスの高強度コンクリート部材に対する設計方法はまだ確立されるには至っていない。これまでの曲げ部材を対象とした研究としては、終局耐力、じん性など静的な挙動に関するものであり[例えば1]、長期変形などの時間依存性に関するものはほとんど見られない。高強度コンクリートを曲げ部材に適用していくためには、変形に対して精度の高い予測が要求されるものと予想される。

そこで本研究では、100N/mm²クラスの高強度コンクリートを用いて、PC鋼材量（プレストレス量）と引張鉄筋量の比率、および圧縮鉄筋比をパラメータとしたRC、PRCおよびPC部材の材齢100日程度までの比較的早期における時間依存曲げ変形挙動を実験的に検討したものである。解析としては、クリープの載荷時材齢を考慮した重ね合わせの原理に基づくstep-by-step法を用いてクリープ解析をひび割れ断面および全断面有効とした断面について行った[2]。ついで、これに基づいてCEB-FIP MODEL CODE 1990[3]（以下、MC90）によるテンションスティフニングの影響を取り入れた解析を行い、実測値と比較しテンションスティフニングの効果について検討を加えた。

2. 実験概要

2. 1 供試体

供試体の形状は、断面が20×25cm、長さが240cmの矩形断面はりである。断面諸元を図-1に示す。供試体の種類は、表-1に一覧表を示すようにRCが2種類、PRCが6種類およびPCが2種類

*1 オリエンタル建設（株）技術研究所主任研究員（正会員）

*2 宇都宮大学助教授 工学部建設学科、工博（正会員）

*3 宇都宮大学助手 工学部建設学科（正会員）

*4 宇都宮大学大学院 工学部建設学科建設工学専攻（正会員）

表-1 供試体一覧表

NO.	名 称 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)	導入直後の応力		載荷 モーメント (kN・m)	載荷直後の応力	
		断面積 A _s (mm ²)	鉄筋比 ρ_s (%)	断面積 A _p (mm ²)	鋼材比 ρ_p (%)	断面積 A _{s'} (mm ²)	鉄筋比 $\rho_{s'}$ (%)		引張 鉄筋 (N/mm ²)	コンクリート 下縁 (N/mm ²)		引張 鉄筋 (N/mm ²)	コンクリート 上縁 (N/mm ²)
HL10	D19-0	573	1.15	---	---	---	---	---	---	---	19.5	180.8	-16.0
HL12	D19-D16	573	1.15	---	---	397.2	0.79	---	---	---	19.5	180.9	-14.2
HL20	D16(7.1)-0	397.2	0.79	80	0.16	---	---	900	-11.8	-2.4	22.1	156.3	-18.3
HL22	Dm16(7.1)-D16	317.5	0.64	80	0.16	397.2	0.79	900	-12.2	-2.5	22.1	185.3	-17.4
HL30	D13(9.0)-0	253.4	0.51	128	0.26	---	---	940	-18.2	-3.7	22.2	141.1	-18.7
HL32	Dm13(9.0)-D16	184.9	0.37	128	0.26	397.2	0.79	940	-18.6	-3.8	22.2	170.0	-17.7
HL40	D10(10.7)-0	146.7	0.29	180	0.36	---	---	940	-29.5	-6.0	23.5	66.6	-17.0
HL42	Dm13(10.7)-D16	184.9	0.37	180	0.36	397.2	0.79	940	-28.9	-5.9	23.5	56.9	-14.7
HL50	(12.6)-0	---	---	250	0.50	---	---	800	---	-7.4	25.0	---	-17.3
HL52	(12.6)-D16	---	---	250	0.50	397.2	0.79	800	---	-7.5	25.0	---	-14.9

(引張鉄筋 Dm は溝切り加工したもの、鉄筋比はコンクリート全断面に対する比率を表す。)

の計10種類である。表中の
応力度は計算値を示す。全
ての供試体は曲げ耐力がほ
ぼ等しくなるように設計さ
れたものである。また、こ
の他に同断面のクリープお
よび収縮計測用の供試体を
作製した。

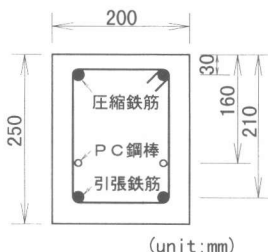


図-1 供試体断面図

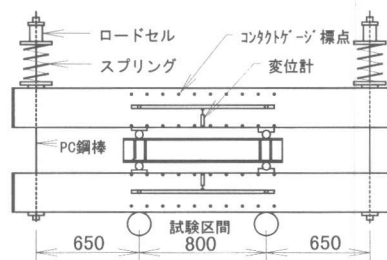


図-2 載荷概要図

供試体に用いたコンク
リートの配合および使用材
料を表-2、表-3に示す。
鉄筋には呼び名D19、D16、
D13、D10のSD295を、PC鋼
材には呼び名7.1、9.0、10.7、12.6mmの
細径異形PC鋼棒(D種1号)をそれぞれ使
用した。

供試体の載荷は、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
載荷した。養生としては、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。

2.2 載荷方法および計測方法

載荷はスパン210cm、せん断スパン長65cmの2点載荷とした。載荷の概要を図-2に示す。純
曲げ区間80cmを試験対象区間として平均曲率、鉄筋ひずみを計測した。

平均曲率は試験対象区間中央で変位計(精度1/1000mm)を用いて計測された試験区間内のたわ
み量より求めた。鉄筋ひずみは異形鉄筋の縦リブの位置に深さ3mm、幅4mmの溝を切削加工し
て、その溝に試験対象区間の中央52cmに2cm間隔で貼付したひずみゲージより求めた。

表-2 コンクリートの配合表

目標 強度 (N/mm ²)	W/B (%)	s/a (%)	SF/B (%)	SP/B (%)	単位量 (kg/m ³)					
					W	C	SF	S	G	SP
100	25	45	10	2.2	150	540	60	766	640	12.2

ただし、B=C+SF、高性能A E減水剤(SP)は混練水(W)に含む。

表-3 コンクリート使用材料

使用材料	種 類
セメント C	早強ポルトランドセメント 比表面積 4420cm ² /g 比重 3.14
シリカフューム SF	SiO ₂ 91% 比表面積 20m ² /g 比重 2.2
細骨材 S	鬼怒川産(安山岩)川砂 F.M.2.69 比重 2.61
粗骨材 G	鬼怒川産(安山岩)砕石 F.M.6.68 比重 2.63
高性能A E減水剤 SP	ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合 体

3. 材料特性

コンクリートの強度特性の試験結果を表-4に示す。標準養生以外のテストピースは、供試体と同条件で養生したものである。クリープ係数の経時変化の結果を図-3に示す。図中の載荷時材齢が極若材齢のデータは、本供試体と同じコンクリートを用いた川崎らの実験[4]によって得られたものである。クリープ係数の推定値として、宮澤ら[5]と同様な方法を用いて載荷時材齢の異なる実測値をそれぞれMC90式(1)、(2)で回帰し、載荷時材齢と終局クリープ係数 ϕ_0 および進行速度を決める係数 β_H の関係を求めて、任意の載荷時材齢に対する関係を以下のように導いた。

表-4 コンクリートの強度試験結果

試験時期	プレストレス導入時 (材齢9日)	持続荷重 載荷時 (材齢16日)	標準養生 (材齢28日)
圧縮強度 (N/mm ²)	95.4	100	105.4
引張強度 (N/mm ²)	---	4.27	6.43
ヤング係数 (kN/mm ²)	35.2	36.6	38.7

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\beta_c(t - t_0) = \left\{ (t - t_0) / (\beta_H + (t - t_0)) \right\}^{0.3} \quad \dots\dots (2)$$

$\phi(t, t_0)$: 載荷材齢 t_0 日の t 日における
クリープ係数

$$\phi_0 = \phi_1 \cdot \left\{ (a-1) / (a - t_0^{-b}) \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\phi_1 = 1.45, a = 4.40, b = -1.33$$

$$\beta_H = c \cdot t_0^{-2} + d \cdot t_0 + e \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$c = 3.00, d = 11.0, e = -5.31$$

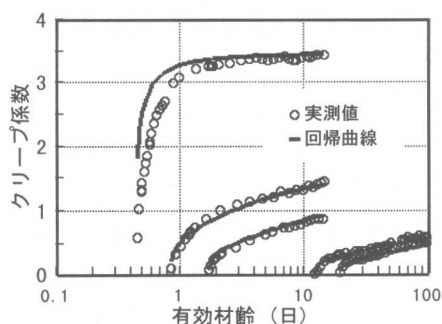


図-3 クリープ係数の経時変化

図-3に示すように、実測値と回帰曲線はそれぞれの載荷時材齢に対してよく一致しており、解析にはこの関係を用いた。

供試体と同断面で同じ養生をしたプレーンコンクリートの収縮ひずみの経時変化を図-4に示す。解析にはこの実測値を用いた。

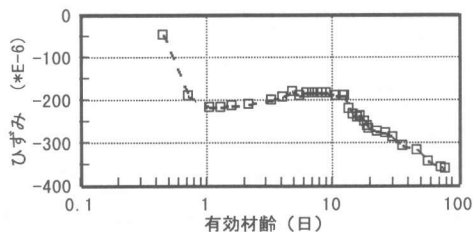


図-4 収縮ひずみの経時変化

4. 解析方法[2]の概要

クリープの載荷時材齢を考慮した重ね合わせの原理に基づくstep-by-step法によれば、上縁から z の位置における考慮している時点 $t_{i+1/2}$ での全ひずみは次のように表される。

$$\varepsilon_{c, i+1/2}(z) = \sigma_{c, 1/2}(z) \cdot J(t_{i+1/2}, t_{1/2}) + \sum_{j=1}^i \Delta \sigma_{c, j}(z) \cdot J(t_{i+1/2}, t_j) + \varepsilon_{cs, i+1/2}(z) \quad \dots\dots\dots (5)$$

これより考慮している時点での応力は次のようになる。

$$\sigma_{c, i+1/2}(z) = E_c(t_{i+1/2}, t_i) \{ \varepsilon_{c, i+1/2}(z) - \sigma_{c, 1/2}(z) \cdot J(t_{i+1/2}, t_{1/2}) - \sum_{j=1}^{i-1} \Delta \sigma_{c, j}(z) \cdot J(t_{i+1/2}, t_j) + \sigma_{c, i-1/2}(z) \cdot J(t_{i+1/2}, t_i) - \varepsilon_{cs, i+1/2}(z) \} \quad \dots\dots (6)$$

ここで、 $t_i, t_{i+1/2}$: i 番目のタイムインターバルの中間と終点の材齢

$\varepsilon_{cs, i+1/2}(z)$: $t_{i+1/2}$ における収縮ひずみ

$J(t_{i+1/2}, t_j) = 1/E_c(t_j) + \phi(t_{i+1/2}, t_j)/E_{c28}$, $E_c(t_{i+1/2}, t_j) = 1/J(t_{i+1/2}, t_j)$

$\Delta \sigma_{c, j}(z) = \sigma_{c, j+1/2}(z) - \sigma_{c, j-1/2}(z)$

$\phi(t_{i+1/2}, t_j)$: t_j に載荷された $t_{i+1/2}$ におけるクリープ係数

$E_c(t_j)$, $E_{c28}:t_j$ および標準養生された材齢28日のコンクリートのヤング係数

式(6)を用いて、軸方向力と曲げモーメントについて断面の釣合条件を求める。これに加えて、それぞれの計算過程で次の適合条件を適用することによって、断面のひずみ分布が求められる。①プレストレス導入時は圧縮鉄筋、引張鉄筋およびコンクリートが同一平面上にあり、P C鋼材の変化ひずみとその位置のコンクリートの変化ひずみが等しいとする。②クリープ、収縮によって生じるP C鋼材のストレスロスの段階では、コンクリートひずみの直線性と圧縮鉄筋、引張鉄筋およびP C鋼材の変化ひずみとそれぞれの位置のコンクリートの変化ひずみが等しいとする。③ひび割れ後は中立軸が変化するので各段階の断面の応力、ひずみ分布を重ね合わせることができない。したがって、ひび割れ断面および全断面共に鉄筋、P C鋼材、コンクリートの全てに平面保持が成立するとする。以上、断面のひずみ分布が得られれば式(6)より応力分布が求められる。

平均曲率は全断面とひび割れ断面について得られた結果を用いてMC90による方法で求めた。

5. 実験結果および考察

5. 1 自己収縮の影響

高強度コンクリートでは極若材齢時から自己収縮によって収縮ひずみが大きく、鉄筋が存在すると拘束応力が生じることが知られている。そこで、Dm16(7.4)-D16タイプについて、コンクリートの打込み直後からプレストレス導入前までの鉄筋ひずみの経時変化の実測値と解析による鉄筋ひずみおよび断面下縁のコンクリート応力の結果を図-5に示す。鉄筋ひずみは実測値と解析値はよく一致しており、荷重時材齢として極若材齢から10の荷重時材齢のクリープ係数を取り込んで行ったstep-by-step法による解析は、自己収縮によって導入される鉄筋の拘束ひずみを精度良く予測できる一つの方法であるといえる。ここでの解析によれば、コンクリート応力の経時変化は、打込み後1日以内の極若材齢において最大引張応力 0.3N/mm^2 が生じ、その後は収縮ひずみに対応してその変化は小さい。本供試体の鉄筋比(0.64%)程度で、自己収縮ひ

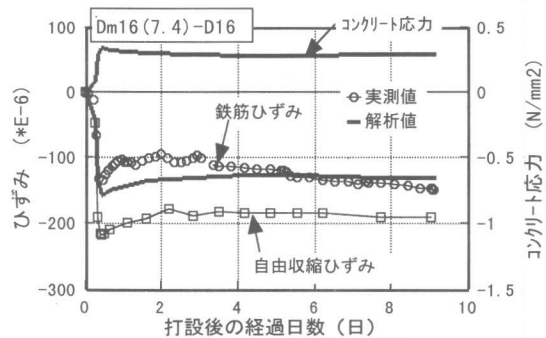


図-5 自己収縮の影響

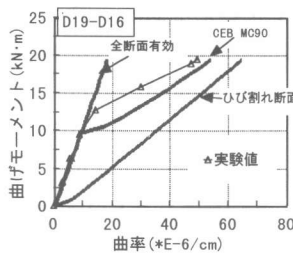


図-6 モーメントと曲率の関係

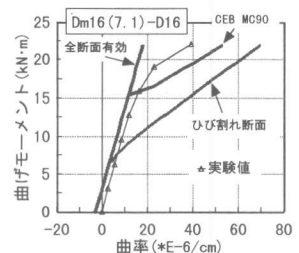


図-7 モーメントと曲率の関係

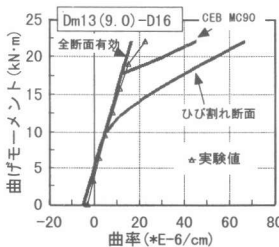


図-8 モーメントと曲率の関係

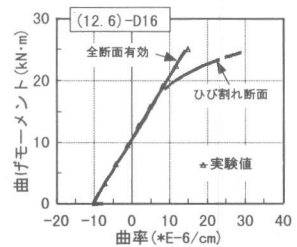


図-9 モーメントと曲率の関係

ずみが200 (*E-6) 程度あれば、生じる引張応力も小さく、ひび割れ発生荷重に与える影響は小さいと考えられる。

5. 2 モーメントと曲率の関係

持続荷重に達するまでの載荷モーメントと曲率の関係について、実測値と解析値を合わせて図-6～9に示す。これ以後の図は全て原点をプレストレス導入前としている。解析値としては、ひび割れ断面、全断面有効断面および両者を用いてMC90によるテンションスティフニングを考慮して求めた値である。また、ひび割れ発生モーメントは、自己収縮応力を無視した有効プレストレスの計算値と載荷時の割裂試験より得られた引張強度から求めた。ひび割れ発生モーメントに着目すると、ひび割れが生じないPC供試体(図-9)を除き、RC(図-6)およびPRC供試体(図-7, 8)では実測値と計算値は比較的よく一致している。この一つの理由としては自己収縮応力が小さかったことによるものと考えられる。所定の作用モーメントにおいて曲率を比較すると、MC90の値はRC供試体の場合が実測値に最も近く、図-7、図-8にみられるようにプレストレス量が大きく、作用している引張鉄筋ひずみが小さいほどその差は大きい。ひび割れ発生以後の曲率の増加傾向は、実測値が上に凸な放物線を描くのに対しMC90の値は逆の変化をしている。この傾向は、高強度の場合に限らず普通強度を用いた実験結果[2]においても同様であった。軸方向力が作用し、ひび割れ発生直後の状態にある場合のMC90による平均曲率は過大に評価する。

5. 3 引張鉄筋ひずみの経時変化

引張鉄筋の部材中央52cm区間に2cm間隔で測定したひずみの平均値と最大値について、図-10、11に示す。コンクリート強度の影響を見るために、普通強度(45N/mm²)コンクリートを用いて他の条件は同一とした場合の実験結果[2](図中に△印で表示のNLタイプ)も合わせて示す。また、計算値としては高強度コンクリートの場合を示す。最大ひずみと平均ひずみの差が付着によるテンションスティフニング効果を意味している。この点に着目し数値比較したものを表-5に示す。表中のテンションスティフニング効果の実測値および計算値は載荷後経過85日における値である。高強度と普通強度の場合の付着によるテンションスティフニング効果を比較すれば、高強度の場合(図中に□で表示)の方が普通強度の場合に比べて、

Dm16(7.1)-D16 タイプで18%、
Dm13(9.0)-D16 タイプで14%、いずれも大きい。

表-5 付着によるテンションスティフニング効果の比較

	Dm16(7.1)-D16		Dm13(9.0)-D16		強度による比較	
	HL22 ③	NL22 ④	HL32 ⑤	NL32 ⑥	③/④	⑤/⑥
実測値①	274*10 ⁻⁶	233*10 ⁻⁶	380*10 ⁻⁶	334*10 ⁻⁶	1.18	1.14
解析値②	145*10 ⁻⁶	130*10 ⁻⁶	150*10 ⁻⁶	111*10 ⁻⁶	1.12	1.35
②/①	0.53	0.56	0.39	0.32		

ただし、実測値① $\epsilon_{ts} = \epsilon_{sMax} - \epsilon_{sAve}$ 。
コンクリート強度 (HLタイプ: 105N/mm², NLタイプ: 45N/mm²)

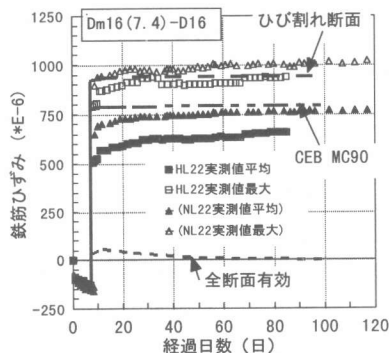


図-10 鉄筋ひずみの経時変化

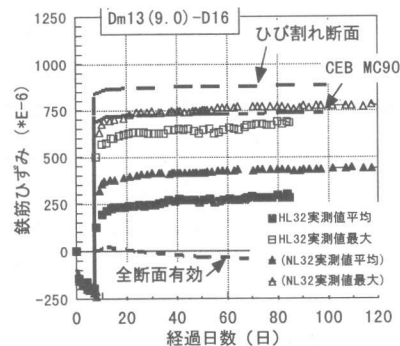


図-11 鉄筋ひずみの経時変化

5. 4 曲率の経時変化

等曲げモーメントが作用する載荷点間の平均曲率の経時変化を、普通強度を用いた実験結果 [2] と合わせて図-12～15に示す。計算値としては高強度コンクリートの場合を示す。いずれも高強度コンクリートを用いた供試体 (HLタイプ) の場合の方が普通強度 (NLタイプ) の場合に比べ、平均曲率の増加割合は小さく、経過日数85日の絶対値で比較すると普通強度の場合の35～75%の範囲にあり、全供試体平均で約60%である。

図-12、13のRC供試体では実測値とMC90による結果とは比較的一致しているが、図-14、図-15とプレストレス量の大きな供試体になるに従い、言い換えれば、作用する鉄筋の応力度が小さいほど、MC90による曲率は実験値を過大に評価している。

6. まとめ

本研究の範囲内で以下のような結果が得られた。

- (1) クリープの載荷時材齢を考慮した重ね合わせの原理に基づくstep-by-step法を用いたクリープ解析は、高強度コンクリートの材料特性を適切に取り込むことによって、自己収縮によって導入される鉄筋の拘束ひずみを精度良く予測できることが認められた。
- (2) 実測された鉄筋ひずみの最大値から平均値を差し引くことによって求めた付着によるテンションスティフニング効果は、鉄筋比が0.37～0.64%、作用している最大鉄筋ひずみが650～1000 ($\times 10^{-6}$) の範囲では、普通強度 (45N/mm^2) コンクリートの場合に比べ、高強度 (105N/mm^2) の場合は10～20%程度大きい結果を示した。
- (3) 高強度コンクリート部材の載荷後の経過85日における平均曲率は、普通強度コンクリート部材の場合の約60%であった。曲率におけるMC90によるテンションスティフニングの評価は、ひび割れ発生直後の鉄筋応力の低い段階ほど過小に評価し、ひび割れ発生モーメントに対して比較的大きなモーメントが作用する、鉄筋応力の高い段階ほど精度が良いことが認められた。

(参考文献)

- [1] 鈴木基行、堀内信、前田直己、尾坂芳夫：純曲げを受ける超高強度コンクリートはり部材の力学的特性、コンクリート工学論文集、第4巻第1号、pp. 39-51, 1993
- [2] 山本浩嗣、佐藤良一、涌井 一、落合 勝：P R C部材の長期変動挙動の検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 16, No. 2, pp. 973-978, 1994
- [3] CEB:CEB-FIP MODEL CODE 1990, Final Draft, 1991
- [4] 川崎靖幸、楊 楊、佐藤良一：高強度コンクリートのクリープ実験、土木学会第24回関東支部技術研究発表会、pp. 586-587, 1997
- [5] 宮澤伸吾、大谷 博、今本啓一、佐藤良一：超高強度コンクリートの若材齢におけるクリープ係数、第51回土木学会年次学術講演会講演概要集第5部、pp. 578-579, 1996

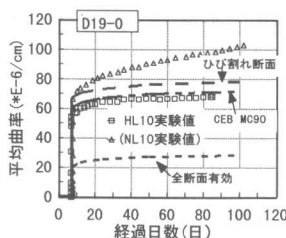


図-12 平均曲率の経時変化

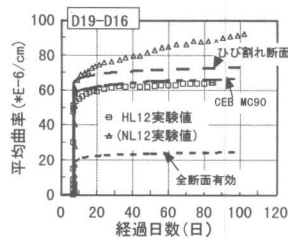


図-13 平均曲率の経時変化

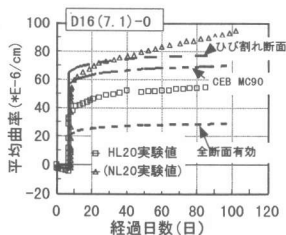


図-14 平均曲率の経時変化

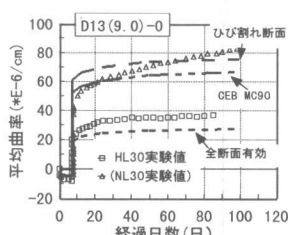


図-15 平均曲率の経時変化