

論文 長期有効曲げ剛性式の高強度コンクリート部材への適用性

手塚 正道*1・佐藤 良一*2・許 明*3・袖山 隆行*4

要旨：土木学会コンクリート標準示方書[平成8年制定]設計編に採用されているコンクリート部材の長期の変位・変形量を計算するための有効曲げ剛性式について、100N/mm²クラスの高強度コンクリート部材への適用性を実験値と比較して検討した。実験で取り扱った範囲は、部材下縁のプレストレス量が0~7.4N/mm²、引張鉄筋比が0~1.15%、圧縮鉄筋比が0.079%で、検討経過日数はおよそ400日である。比較の結果、実験値に対する計算値の比は全平均で0.87、圧縮鉄筋がない場合で0.99、圧縮鉄筋のある場合で0.75であり、実用的には満足しうる精度であることがわかった。
キーワード：長期、変形、曲げ剛性、高強度コンクリート、クリープ、収縮

1. まえがき

土木学会コンクリート標準示方書[平成8年制定]設計編¹⁾(以下、示方書)において、コンクリート部材の長期の変位・変形量を計算する場合に、短期も包含する形の有効曲げ剛性式が新たに取り入れられた。この有効曲げ剛性式はクリープ、収縮およびテンションスティフニングの影響を考慮したものであり、その適用性についての検証は、圧縮強度が30~40N/mm²クラスのコンクリート部材を対象として行われている^{2)・3)}。ここでは、近年、研究が進むと共に利用が期待される高強度($f'_{ck}=100\text{N/mm}^2$ クラス)コンクリート部材を対象として、この有効曲げ剛性式の適用性について実験的に検討した。

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種類の計10種類である。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、この他に供試体と同断面のプレーンコンクリートによるクリープおよび収縮計測用の供試体を作製した。

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。

供試体の荷重は、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。

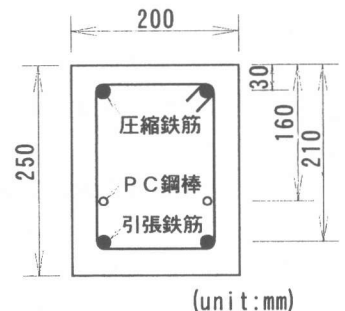


図-1 供試体断面図 (unit:mm)

*1 オリエンタル建設(株)技術研究所主任研究員 (宇都宮大学大学院)(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		P C 鋼棒		圧縮鉄筋		PC鋼棒 緊張応力 (N/mm ²)	載荷 モーメント (kN・m)
		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 ρ _{s'} (%)		
HL10	D19-0	573	1.15	---	---	---	---	---	19.5
HL12	D19-D16	573	1.15	---	---	397.2	0.79	---	19.5
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
HL50	(12.6) -0	---	---	250	0.50	---	---	800	25.0
HL52	(12.6) -D16	---	---	250	0.50	397.2	0.79	800	25.0

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

表-2 コンクリートの配合表

W/B (%)	s/a (%)	SF/B (%)	単体量 (kg/m ³)					
			W	C	SF	S	G	SP
25	45	10	150	540	60	766	640	12.2

ただし、B=C+SF、高性能AE減水剤(SP)は混練水(W)を含む。

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
シリカフェューム 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) 碎石 F. M. 6.68 比重 2.63
高性能AE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

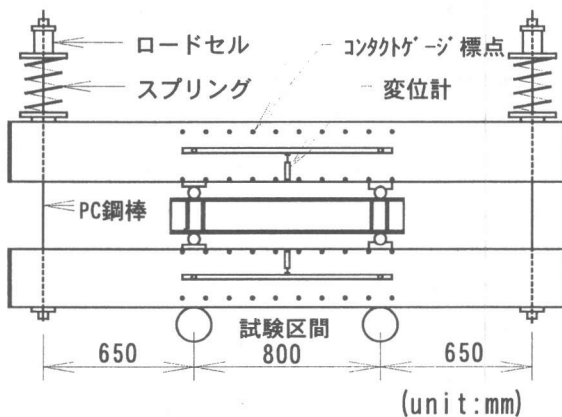


図-2 載荷概要図

3. 材料特性

環境条件は、実験室内とし、試験期間における実験室内の平均温度は15.3℃、平均湿度は64%であった。

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。また、HL20およびHL40供試体については、スパン全長に対するたわみ量も併せて計測した。

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。また、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クリープ係数および収縮ひずみの経時変化の結果を図-3、4にそれぞれ示す。クリープ試験における応力は常に±3%以内の誤差範囲に収まるように管理した。図中の経過日数は持続載荷開始時点からの値を示し、クリープ係数は持続載荷開始時点を載荷時材齢とした結果を示している。有効曲げ剛性の計算には、計算時点の図中の値を用いている。

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

4. 有効曲げ剛性および平均曲率の算定式

曲げひび割れによる剛性の低下、クリープおよび収縮の影響を考慮して短期または長期の変位・変形量を計算する場合に、示方書では、クリープの影響を有効弾性係数で、収縮の影響を付加モーメントの形で定式化した以下の算定式による有効曲げ剛性を用いてよいことが解説に示されている。

$$E_e I_e = \left(\frac{M_{crd}}{M_d} \right)^4 \frac{E_e I_g}{1 - \frac{\Delta M_{csg}}{M_d - P(d_p - c_g)}} + \left\{ 1 - \left(\frac{M_{crd}}{M_d} \right)^4 \right\} \frac{E_e I_{cr}}{1 - \frac{\Delta M_{cscr}}{M_d - P(d_p - c_{cr})}} \quad (1)$$

ここで、記号の説明については、示方書を参照されたい。

有効曲げ剛性を部材全長にわたって一定とした場合には、べき乗数4を3に換え、設計曲げモーメント M_d を設計曲げモーメントの最大値 M_{dmax} に置換することによって求められる。

式(1)で求められた有効曲げ剛性を用いて平均曲率は以下の式で表すことができる。

$$\psi = \frac{M_d - P(d_p - c_e)}{E_e I_e} \quad (2)$$

ここで、圧縮縁から有効図心位置までの距離 c_e の値が必要になるが、ここでは次式に示すようにひび割れ断面と全断面の図心位置を按分することで求めた^{2), 3)}。

$$c_e = \left(\frac{M_{crd}}{M_d} \right)^4 c_g + \left\{ 1 - \left(\frac{M_{crd}}{M_d} \right)^4 \right\} c_{cr} \quad (3)$$

後述の実験結果において示す図の有効曲げ剛性および平均曲率の計算値は、短期荷重直後か

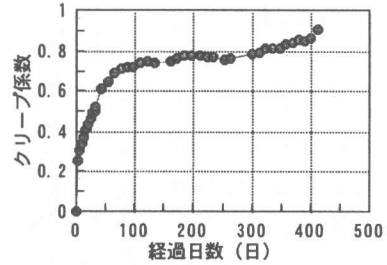


図-3 クリープ係数の経時変化

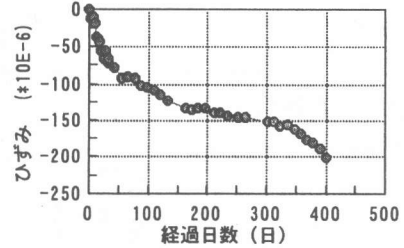


図-4 収縮ひずみの経時変化

ら持続荷重経過日数400日までの7時点についての結果を結んだものである。

5. 実験結果および考察

5.1 曲げ剛性

全断面、ひび割れ断面における曲げ剛性および有効曲げ剛性の計算値と実験値の経時的な比較を、代表的な供試体について、図-5～8に示す。また、短期荷重直後と持続荷重経過日数400日時点における有効曲げ剛性と実験値の比較を全供試体について、表-5に示す。ただし、実験値については、図心位置が特定できないため、プレストレス力によるモーメント $P(d_p - c_e)$ を求めることができない。そこで、荷重直前の曲率をプレストレス力モーメントによる曲率として以下の式より算定することとした²⁾。

$$E_e I_e = \frac{M - P(d_p - c_e)}{\psi_m} = \frac{M}{(\psi_m - \psi_p)} \quad (4)$$

ここに、 ψ_m :プレストレス導入前を0として、実測されている平均曲率、 ψ_p :荷重直前の曲率、 M :荷重した外力モーメントを示す。

この場合、ひび割れによって図心位置が圧縮縁の方向に移動し、プレストレス力によるモー

メントは荷重直前に比べて増加するが、ここでは一定としているため、実験値は実際の有効曲げ剛性より大きいことに留意する必要がある。また、短期荷重時の曲げ剛性は平成3年版の曲げ剛性と同一である。

図-5～8によれば、示方書式は、有効曲げ剛性が持続荷重後急速に低下し、その後漸減する傾向を良く表現している。この中で、図-8のように実験値が全断面の計算値より大きくなっているものもあるが、これは前述したように実測値の整理方法によるものである。

表-5によれば、RC供試体については、短期、長期共に計算値は実験値を良い精度で評価している。PRC供試体については、短期荷重では、荷重の増大に伴って上昇する図心位置の影響を無視しているため、RCの場合に比べ、実験値は計算値との比較において相対的に大きい。持続荷重下では、クリープにより中立軸位置が深くなることがあるため、経過日数400日では、相対的に実験値は小さくなり、計算値と近くなる。

圧縮鉄筋のある供試体とない供試体を比較すると、圧縮鉄筋のある供試体の有効曲げ剛性の計算値は経時的な減少が小さく、経過日数400日では実験値より大きな値を示している。これは、圧縮部コンクリート応力は、荷重後の経過日数と共に減少し、圧縮鉄筋がある場合には、コンク

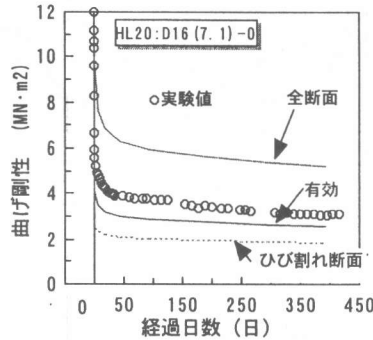


図-5 曲げ剛性の経時変化

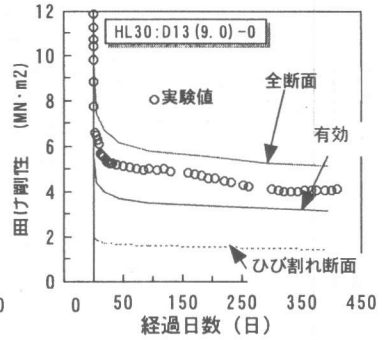


図-6 曲げ剛性の経時変化

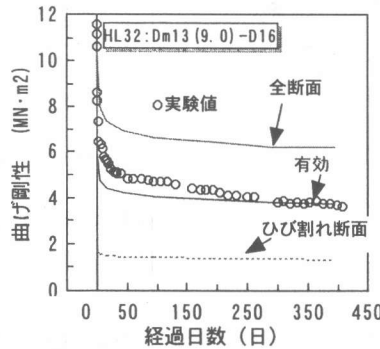


図-7 曲げ剛性の経時変化

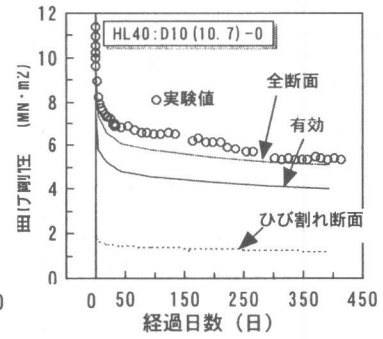


図-8 曲げ剛性の経時変化

表-5 有効曲げ剛性の比較

供試体名	短期荷重時 (MN·m ²)			経過日数400日 (MN·m ²)		
	実験値 ①	計算値 ②	②/①	実験値 ①	計算値 ②	②/①
D19-0	3.88	3.54	0.91	2.57	2.46	0.96
D19-D16	3.93	3.73	0.95	2.61	2.78	1.07
D16(7.1)-0	6.66	4.08	0.61	3.09	2.56	0.83
Dm16(7.1)-D16	5.61	4.15	0.74	2.66	2.82	1.06
D13(9.0)-0	8.85	5.56	0.63	4.10	3.14	0.77
Dm13(9.0)-D16	8.65	5.99	0.69	3.65	3.75	1.03
D10(10.7)-0 *1	9.74	9.72	1.00	5.39	4.04	0.75
Dm13(10.7)-D16	10.56	9.13	0.86	4.67	5.50	1.18
(12.6)-0 *1	9.24	9.57	1.04	4.64	4.28	0.92
(12.6)-D16 *1	10.13	10.14	1.00	5.10	5.90	1.16
高強度シリーズ	平均		0.84	平均		0.97
普通強度シリーズ*2	平均		0.86	平均		0.83

*1印は、短期荷重直後はひび割れがなく、持続荷重下で微細なひび割れが生じた供試体で、短期荷重時のみ全断面の計算値を用いた。

*2印は津田ら²⁾の実験結果で、長期については経過日数750日の結果を示す。

リートの負担していた圧縮応力が鉄筋に移行するためその応力減少の程度が大きくなる。一方、有効弾性係数法では、考慮している時点の応力が荷重後から生じていると仮定しているの

で、クリープ変形が小さく評価され、その結果、曲げ剛性の長期的な減少は小さいものと考えられる。

表-5には、同一形状の供試体で普通強度 ($f'c=45N/mm^2$) コンクリートを用いて行った津田ら²⁾の実験における計算値と実験値の比率を併せて示す。本実験の高強度コンクリートの場合と比較すると、短期載荷時では普通強度の場合とほぼ同等の精度と言えるが、長期では高強度の場合の方が精度が良い結果となっているが、これについては5.2で平均曲率と併せて議論することとする。

5.2 平均曲率

曲げ剛性の場合、実験値との評価の際に図心位置の上昇を無視するために正確に実験値を表すものではなかった。しかし、平均曲率ではその評価上の問題がないため、曲げ剛性と曲率とは表裏一体であるが、あえてここで取り上げて、算定式の評価を行うこととした。

全断面、ひび割れ断面における曲げ剛性および有効曲げ剛性の結果を用いて算出した平均曲率の計算値と実験値の経時的な比較を、代表的な供試体について、図-9～12に示す。また、短期載荷直後と持続載荷経過日数400日時点における平均曲率の計算値と実験値の比較を全供試体について、表-6に示す。

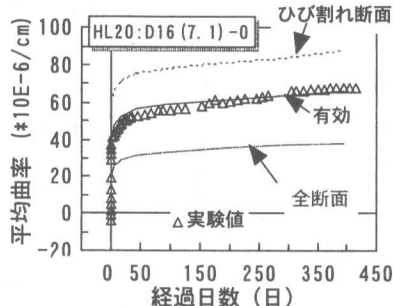


図-9 平均曲率の経時変化

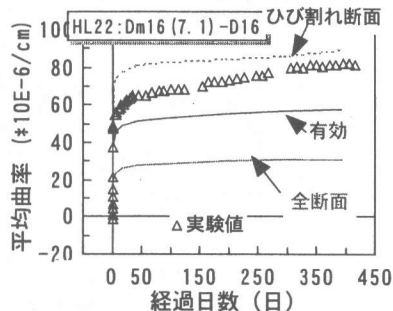


図-10 平均曲率の経時変化

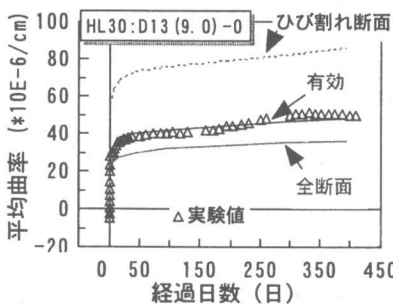


図-11 平均曲率の経時変化

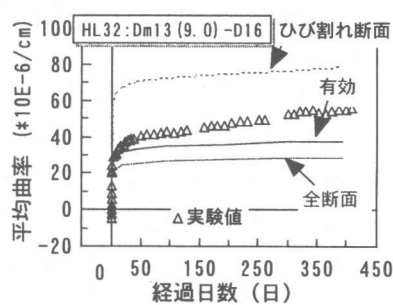


図-12 平均曲率の経時変化

表-6 平均曲率の比較

供試体名	短期載荷時 (*10 ⁻⁶ /cm)			経過日数400日 (*10 ⁻⁶ /cm)		
	実験値 ①	計算値 ②	②/①	実験値 ③	計算値 ④	④/③
D19-0	50.1	55.0	1.10	75.9	79.3	1.04
D19-D16	49.5	52.3	1.06	74.8	70.1	0.94
D16 (7.1)-0	29.4	39.4	1.34	68.0	66.4	0.98
Dm16 (7.1)-D16	37.7	37.8	1.00	81.6	57.7	0.71
D13 (9.0)-0	20.5	25.3	1.23	49.8	47.9	0.96
Dm13 (9.0)-D16	20.6	22.9	1.11	56.0	37.5	0.67
D10 (10.7)-0 *1	18.3	18.5	1.01	37.5	38.9	1.04
Dm13 (10.7)-D16	14.4	17.5	1.22	42.2	29.0	0.69
(12.6)-0 *1	15.1	19.1	1.26	42.2	38.2	0.91
(12.6)-D16 *1	13.8	17.4	1.26	38.2	28.3	0.74
高強度シリーズ	平均		1.16	平均		0.87
普通強度シリーズ*2	平均		1.06	平均		0.97

*1印は、短期載荷直後はひび割れがなく、持続荷重下で微細なひび割れが生じた供試体で、短期載荷時のみ全断面の計算値を用いた。
*2印は津田ら²⁾の実験結果で、長期については経過日数750日の結果を示す。

図-9～12の平均曲率の経時変化によれば、圧縮鉄筋のない図-9、11の場合には、平均曲率の経時的な増加割合は実験値と有効曲げ剛性による計算値はほぼ同等であるのに対して、圧縮鉄筋のある図-10、12の場合には、実験値に比べ計算値の増加割合は小さい。これ

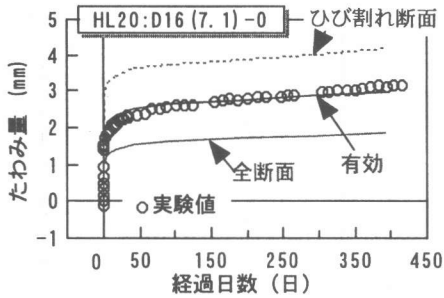


図-13 たわみ量の経時変化

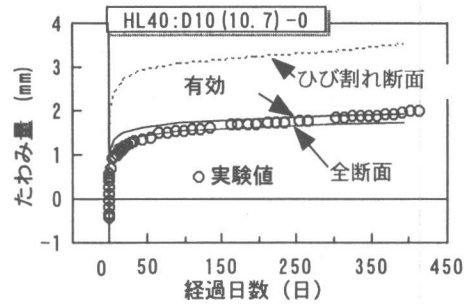


図-14 たわみ量の経時変化

は、先に述べたとおり応力履歴を無視している結果である。

表-6において、短期荷重時と経過日数400日の結果を比較すると、短期荷重時では計算値は実験値より大きく、当然であるが有効曲げ剛性の場合の評価と一致する。長期の場合、実験値に対する計算値の比は全平均で0.87、圧縮鉄筋がない場合で0.99、圧縮鉄筋がある場合で0.75であり、実用的には満足しうる精度であることがわかった。しかし、圧縮鉄筋量にも依存するが、より高精度の算定値が要求される場合には、材齢係数など⁴⁾の取り込みにより、応力が経時的に低下する影響を適切に評価する必要がある。

なお、普通強度の場合、計算値の実験値に対する比は、高強度に比べて大きい。この原因の一つに、普通強度の場合、クリープ試験において鋼材応力の低減を認め、単位応力度に換算して求めたクリープ係数を用いていることで、クリープ係数を大きく評価していることが考えられる。ちなみに、普通強度の実験値に対する計算値の比は、同一比の圧縮鉄筋がある場合0.86、ない場合1.05であって、圧縮鉄筋の影響による差異は、高強度および普通強度とも0.2程度ではば等しい。

5.3 長期たわみ量

スパン全長に対するスパン中央のたわみ量の経時変化について、計測した2供試体の実験結果を計算値と併せて図-13、14に示す。計算値は曲げ剛性を部材全長にわたって一定とした場合の結果を用いて算出している。有効曲げ

剛性による計算値は、実験値と良く一致している。比較例は少ないものの、高強度コンクリート部材についても、長期変形に対する適用性は高いと思われる。ただし、圧縮鉄筋のある場合には、変形を過小評価することを考慮しなければならない。

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) コンクリート標準示方書[平成8年制定]設計編の有効曲げ剛性式は、 100N/mm^2 クラスの高強度コンクリート部材に対して、実験値に対する計算値の比は全平均で0.87、圧縮鉄筋がない場合で0.99、圧縮鉄筋のある場合で0.75であり、実用的には満足しうる精度であることがわかった。
- (2) しかし、圧縮鉄筋量にも依存するが、より高精度の算定値が要求される場合には、材齢係数などの取り込みにより、応力が経時的に低下する影響を適切に評価する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[平成8年制定]設計編，1996
- 2) 津田 守，佐藤良一，他：コンクリート部材の長期有効曲げ剛性式の提案，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 18，No. 2，pp. 1157-1162，1996
- 3) 土木学会：平成8年制定コンクリート標準示方書改訂資料，コンクリートライブラリー-85，pp. 22-29，1996
- 4) A. M. Neville, W. H. Dilger, J. J. Brooks: Creep of plain and structural concrete, Construction Press, 1983