

高強度域を考慮した乾燥収縮ひずみ およびクリープ予測式の提案

阪田憲次¹・椿龍哉²・井上正一³・綾野克紀⁴

¹フェロー会員 工博 岡山大学教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

²正会員 Ph.D. 横浜国立大学教授 工学部建設学科 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

³正会員 工博 鳥取大学教授 工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-1-01)

⁴正会員 博士(工学) 岡山大学大学院助教授 自然科学研究科 (〒700-8530 岡山市津島中3-1-1)

コンクリート構造物の高性能化により、ハイパフォーマンスコンクリートの使用や構造解析精度の向上に対する関心がますます高まってきている。それに伴い、高強度域まで適用可能なコンクリートの時間依存性ひずみ予測式の確立が強く望まれている。

本研究では、各国のデータバンクに収められている乾燥収縮ひずみおよびクリープの実験データを中心に用い、現在までに提案されている代表的な予測式の適合性の検証を行うとともに、コンクリートの強度がクリープおよび乾燥収縮ひずみに及ぼす影響を明らかにし、普通強度から高強度域までのコンクリートにも適用可能な乾燥収縮ひずみ・クリープ予測式の提案を行った。

Key Words: prediction equation, creep, drying shrinkage, high strength concrete, data base

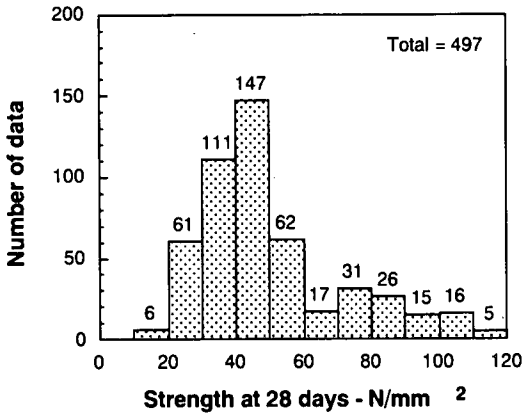
1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮ひずみおよびクリープは、コンクリート構造部材のたわみ、ひびわれ、プレストレスの減退等と直接に関係し、その正しい予測は、構造物の安全性、耐久性および使用性を検討する上で重要な役割を果たすものである。

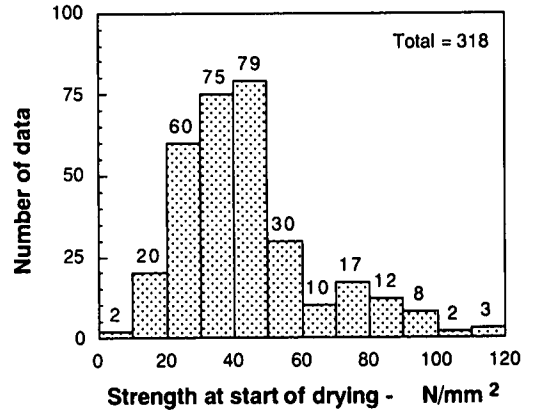
一方、最近のコンクリート構造物の高強度化は著しく、この種のコンクリートの諸性質とその利用に関する国際会議も盛んである。これは、シリカフェームや高性能減水剤の利用によるコンクリートの高強度化技術が一般化したこと、高強度化によって部材断面を小さくすることにより自重を軽減できること、高強度化に伴う耐久性の向上による長寿命化とそれによって環境に対する負荷低減が期待できること等によるものである。このような現状を考慮し、高強度コンクリートの諸性質に関する研究は、内外ともに盛んである。とくに、コンクリートの高強度化に伴う自己収縮の増大等の新しい問題点が提起されている。いずれにしろ、高強度化および長大化の著しいプレストレストコンクリート構造の設計においては、高強度コンクリートの乾燥収縮ひずみおよびクリープを的確に予測することが、その設計の要諦となる。

コンクリートの乾燥収縮ひずみおよびクリープの予測は、それらに影響をおよぼす諸要因を組み入れた予測式を用いて行われるのが内外ともに一般的である^{1),2)}。そのため、内外の示方書および設計基準には、この種のひずみの予測式が示されている。我が国の土木学会コンクリート標準示方書においても、我が国独自の予測式が示されている³⁾。しかし、それらの予測式は、およそ60N/mm²程度以下の普通コンクリートを対象として導かれたもので、それ以上の高強度コンクリートに対する適用性は必ずしも明らかではない。ところが、現行のコンクリート標準示方書においては、コンクリート強度の取り扱い範囲を従来の60N/mm²から80N/mm²まで拡張した。従って、示方書の全体的な適用範囲に合わせ、コンクリートの乾燥収縮ひずみおよびクリープの予測式を60N/mm²以上の高強度コンクリートにも適用できるように拡張することは、きわめて重要かつ緊急を要する問題である。

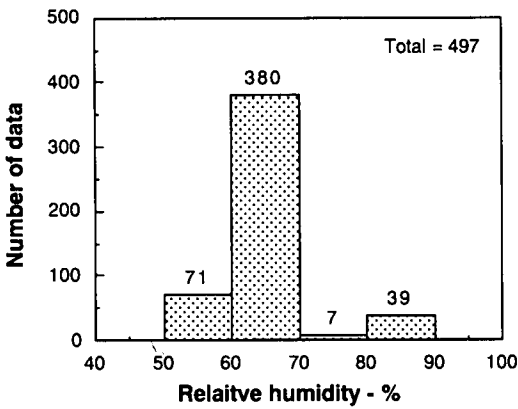
本研究は、コンクリートの乾燥収縮ひずみおよびクリープに関する現行の予測式の適用性を再検討し、普通強度から120N/mm²程度までのコンクリートにも適用できるように拡張することを目的とするものである。



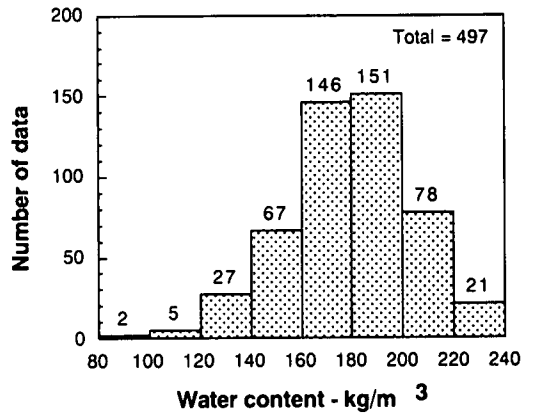
(a) 材齢 28 日における圧縮強度



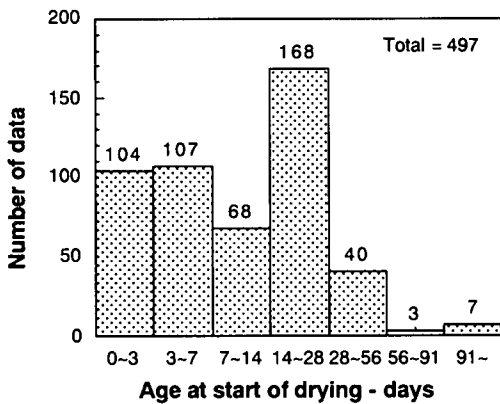
(b) 乾燥開始時材齢における圧縮強度



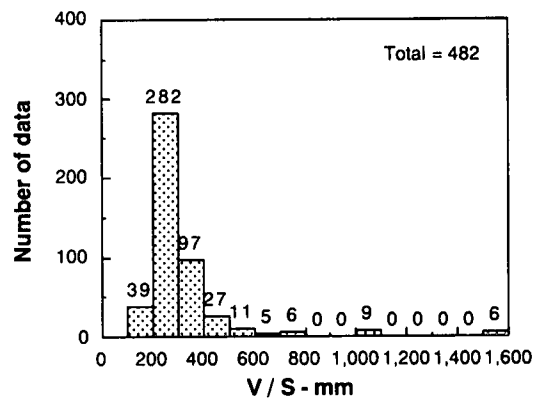
(c) 測定を行った試験室の相対湿度



(d) コンクリートの単位水量

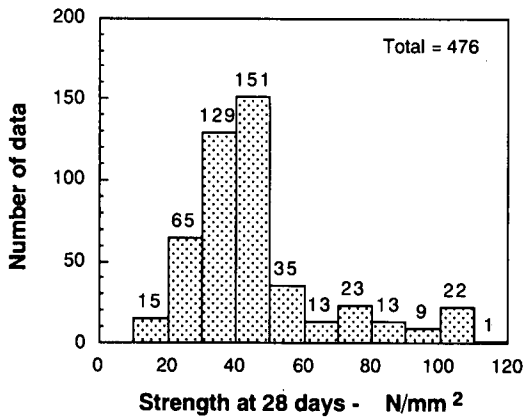


(e) 乾燥開始時材齢

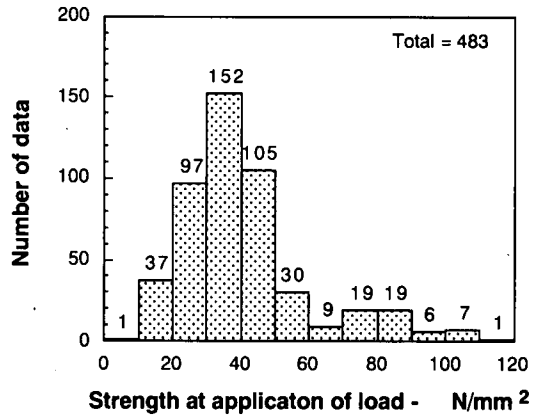


(f) ひずみ測定用供試体の体積表面積比

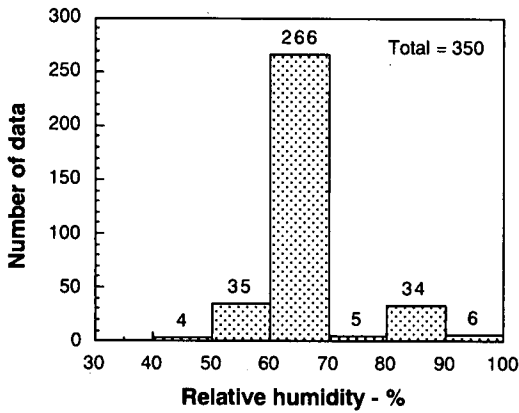
図 -1 本研究に用いた乾燥収縮ひずみデータの概要



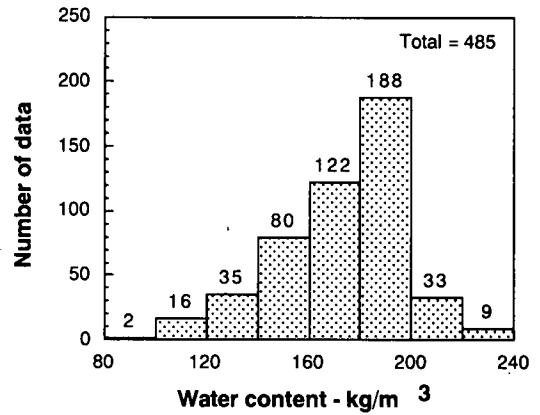
(a) 材齢 28 日における圧縮強度



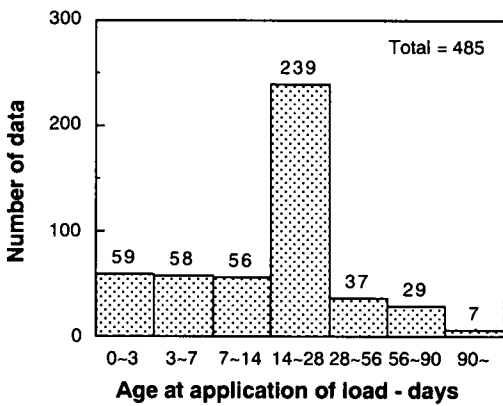
(b) 載荷開始時材齢における圧縮強度



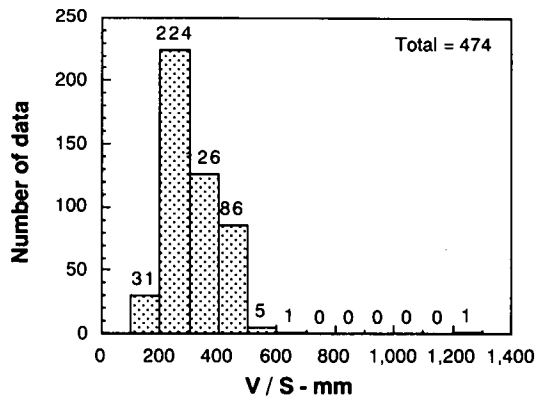
(c) 測定を行った試験室の相対湿度



(d) コンクリートの単位水量



(e) 載荷開始時材齢



(f) ひずみ測定用供試体の体積表面積比

図-2 本研究に用いたクリープデータの概要

2. 代表的な予測式の精度

(1) 本研究に用いたデータの概要

コンクリートの乾燥収縮ひずみおよびクリープに関するデータベースとして有名なものに RILEM のデータベース、CEB の 1990 年式を確立する際に用いられたデータおよび JSCE のデータベースがある。RILEM のデータベース⁴⁾には、クリープに関して 512 の実験データが、また、乾燥収縮ひずみに関しては、419 の実験データが収められている。CEB の 1990 年式を確立する際に用いられたデータ⁵⁾には、乾燥収縮ひずみおよびクリープともに 168 の実験データが含まれている。RILEM および CEB のデータベースが欧米諸国において行われた実験データを収集したのに対し、JSCE では、日本国内において発表された研究論文を中心に実験データを収集し、データベースを作成している。JSCE のデータベース⁶⁾には現在、クリープに関して 259 の実験データが、また、乾燥収縮に関して 219 の実験データが収められている。本章では、これらのデータベースに収められたデータと種々の予測モデルとの適合性を示す。予測モデルには、CEB モデル⁷⁾と次期 ACI モデルとして用いられることが有力な B3 モデル(Bazant & Baweja 式)⁸⁾と GZ モデル(Gardner & Zhao 式)⁹⁾の 3 つのモデルを用いた。

ただし、予測式の適合性を検証するために用いられたデータは、データベースに収められているデータのうち経時変化を式(1)で示される双曲線で回帰した場合に C_0 および C_1 の最適値の標準偏差が 10 以下のものだけを用い、ばらつきが大きく信頼性にかけるものは省いた。

$$\text{Creep or shrinkage} = \frac{C_0 \cdot t}{C_1 + t} \quad (1)$$

ここに、

t : 乾燥期間または載荷期間(日)

また、RILEM のデータに関しては、CEB の 1990 年式を確立する際に用いられたデータと重複するものは省いて用いた。さらに、いずれのデータベースに含まれる乾燥収縮ひずみも、相対湿度が 99% 以上の条件下で測定されたデータは、比較を行うデータから省いた。その結果、クリープの比較に用いたデータ数は、RILEM が 140、CEB が 118 で、JSCE が 37 である。また、乾燥収縮ひずみの比較に用いたデータ数は、RILEM が 52、CEB が 106 で、JSCE が 42 である。ただし、予測式によっては、予測値を計算するために必要なデータがデータベースに含まれていない

場合があり、上記のデータ数よりも少ないデータとの比較になっている場合がある。

クリープおよび乾燥収縮ひずみ予測式の確立を行う際に使用したデータには、RILEM、CEB および JSCE のデータバンクに収められている実験データに加え、著者らによって行われた実験データも用いた。本研究に用いた全ての実験データの概要を図-1 および図-2 に示す。なお、いずれのデータも外気温 20℃ の条件下で測定されたものである。乾燥収縮ひずみは、無載荷状態の供試体から測定されたものである。ただし、高強度コンクリートの乾燥収縮ひずみは、無載荷状態で測定されたひずみから、水分移動のない条件におかれた供試体から測定されたひずみを差し引いて求められたものである。ただし、高強度コンクリートの乾燥収縮ひずみであっても、乾燥開始時材齢が 1 週間以上と、自己収縮ひずみの影響が少ないと考えられるものは、無載荷状態の供試体から測定されたものを乾燥収縮ひずみとして用いた。また、クリープデータは、一定持続荷重下で測定されたひずみから、同じ形状および同じ寸法の無載荷状態の供試体から測定されたひずみを差し引いて求められたものである。

(2) 各予測式の適用範囲

表-1 は、これまでに提案されている代表的な予測式の適用範囲を示したもので、表-2 は、各々の予測式を用いて予測するために必要な入力項目を示したものである。予測に必要な入力項目は予測式によって異なり、B3 モデルが最も多い入力項目を必要としている。また、クリープに関しては、B3 モデルがクリープ関数を予測するモデルであるのに対し、CEB モデルと GZ モデルは、クリープ係数を予測するモデルである。ただし、CEB モデルのクリープ係数は、材齢 28 日における弾性ひずみに対するクリープ係数 $\phi_{28}(t, t')$ であり、GZ モデルのクリープ係数は、載荷時材齢における弾性ひずみに対するクリープ係数 $\phi(t, t')$ である。すなわち、単位応力当たりのクリープひずみを $C(t, t')$ 、材齢 t' における弾性係数を $E(t')$ 、クリープ関数を $J(t, t')$ とすれば、B3 モデルの予測するクリープ関数 $J(t, t')$ と CEB および GZ モデルの予測するクリープ係数 $\phi_{28}(t, t')$ および $\phi(t, t')$ の間には、以下の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} J(t, t') &= \frac{1}{E(t')} + C(t, t') \\ &= \frac{1}{E(t')} + \frac{\phi_{28}(t, t')}{E(28)} = \frac{1}{E(t')} + \frac{\phi(t, t')}{E(t')} \end{aligned} \quad (2)$$

表-1 各予測式の適用範囲

	JSCE Model	CEB Model	B3 Model	GZ Model
Strength at 28days(N/mm ²)	Less than 70	20~90	17.2~68.95	20~68.95
Aggregate/cement ratio in weight	-	-	2.5~13.5	-
Unit cement content (kg/m ³)	260~500	-	160~721	-
Water/cement ratio	0.40~0.65	-	0.35~0.85	0~0.6
Relative humidity (%)	45~80	40~100	40~100	40~100
Type of Cement	Normal	Normal Low heat Rapid hardening High strength	Normal Low heat Rapid hardening High strength	Normal Low heat Rapid hardening High strength
Volume/surface ratio (mm)	100~300	-	-	-
t' and t ₀	-	-	t' ≥ t ₀	≥2days
Curing method	-	-	Autoclave Water curing Sealed curing	-

t': Age at the first application of load (days), t₀: Age at start of drying (days)

表-2 予測値を求めるのに必要な入力項目

	JSCE Model		CEB Model		B3 Model		GZ Model	
	Shrinkage	Creep	Shrinkage	Creep	Shrinkage	Creep	Shrinkage	Creep
Strength at 28days			○	○	○	○		○
Strength at t' or t ₀							○	○
Aggregate/cement						○		
Unit cement content		○				○		
Unit water content	○	○			○	○		
Water/cement ratio		○				○		
Relative humidity	○	○	○	○	○	○	○	○
Type of cement			○		○	○	○	
Start of drying	○				○	○		○
t'		○		○		○		○
Size of specimen	○	○	○	○	○	○	○	○
Shape of specimen					○	○		
Curing method					○	○		

t': The first application of load (days)

本研究では、CEBモデルおよびGZモデルにおいては単位応力当たりのクリープひずみを用いて、また、B3モデルにおいてはクリープ関数を用いて実験値と予測値の比較を行った。データベースに載荷時の弾性係数または材齢28日における弾性係数が掲載されている場合はその値を、弾性係数が掲載されていない場合には各予測モデルが含まれるモデルコードまたはそのモデルの確立を行った研究者の提案している式によって計算を行った値を用いた。

表-4は、表-3に示す条件下で各予測式によって計算を行った乾燥収縮ひずみおよび単位応力当たりのクリープひずみの予測値を求めたものである。我が国のコンクリート標準示方書(設計編)に、計算に用いるべき値として示されている乾燥収縮ひずみの値は

350μで、クリープ係数の値は4.3(単位応力当たりのクリープひずみでおおよそ130μ/(N/mm²))である。我が国のコンクリート標準示方書に表として示されている乾燥収縮ひずみの値は他の予測式の値に比べ小さめの値となっている。また、クリープは、表ではクリープ係数で値が示され、予測式では単位応力当たりのクリープひずみが求められるため、設計に用いる弾性係数によっては両者に大きな差が表れる場合がある。

(3) 乾燥収縮ひずみ予測式の精度

図-3は、RILEM、CEBおよびJSCEのデータベースに収められている乾燥収縮ひずみデータのうち、材齢28日におけるコンクリートの圧縮強度が80N/

表-3 予測式の計算に用いた値

Item	Input data
Start of drying	7 days
The first application of load	7 days
Relative Humidity	60 %
Strength at 28days	30 N/mm ²
Strength at the first application of load	20 N/mm ²
Cement type	Normal
Aggregate/cement ratio	6
Unit cement ratio	300 kg/m ³
Unit water content	180 kg/m ³
Water/cement ratio	60 %
Size and shape of specimen	100×100×400 mm

表-4 各予測式による予測値

	JSCE Model	CEB Model	B3 Model	GZ Model
Drying shrinkage (μ)	790	557	441	817
Specific creep (μ/MPa)	214	130	107	134

mm²以下の場合の実験値とJSCEモデルによる計算値との比較を行ったものである。また、図-4は、RILEM、CEBおよびJSCEのデータベースに収められているデータのうち、材齢28日における圧縮強度が80N/mm²以上の実験値との比較を行ったものである。このうち、●は乾燥開始時材齢が28日のものを、また、○は乾燥開始時材齢が1日のものを示している。これらの図より、JSCEモデルによる予測値は、若材齢において乾燥を開始する場合を除き、実験値よりも極めて大きくなる事が分かる。

図-5は、RILEM、CEBおよびJSCEのデータベースに収められているデータのうち、CEBモデルの適用範囲内の条件で測定された実験値との比較を行ったものである。この図より、CEBモデルによる予測値をCEBのデータベースに収められているデータと比較した場合には、極めて妥当な値を示している事が分かる。しかし、RILEMまたはJSCEのデータベースに収められているデータと比較した場合には、CEBモデルによる予測値は実験値に対して小さめの値となっている事が分かる。図-6は、RILEM、CEBおよびJSCEのデータベースに収められているデータのうち、CEBモデルの適用範囲外の実験値との比較を行ったものである。このうち、●はコンクリートの28日圧縮強度が90N/mm²を超えるものを示している。この図より、材齢28日における圧縮強度が90N/mm²を超えるような高強度コンクリートに対しては、CEBモデルによる予測値は実験値を大幅に下回る傾向がある事が分かる。

図-7は、RILEM、CEBおよびJSCEのデータベー

スに収められているデータのうち、B3モデルの適用範囲内の実験値を用い、B3モデルの予測値との比較を行ったものである。この図より、B3モデルの予測値は、その適用範囲内のデータであっても、実験値に対して小さめの値を示す傾向のある事が分かる。また、適用範囲外の条件で測定された実験値とB3モデルによる予測値を比較した図-8からも、実験値を小さめに予測する傾向が見られる。さらに、●で示した材齢28日におけるコンクリートの圧縮強度が70N/mm²を超える場合の乾燥収縮ひずみに対しては、とくに予測値が小さめとなる事が分かる。

図-9は、RILEM、CEBおよびJSCEのデータベースに収められているデータのうち、GZモデルの適用範囲のものGZモデルによる予測値との比較を行ったものである。適用範囲内のデータであれば、GZモデルは、約±40%の範囲内の精度をもっている事が分かる。これに対して、図-10は、GZモデルの適用範囲外のデータとGZモデルによる予測値との比較を行ったものである。材齢28日における圧縮強度が70N/mm²以上のものを○、材齢28日における圧縮強度が20N/mm²以下のものを□、また、乾燥開始時材齢が2日以内のものを●で示している。この図より、コンクリートの28日圧縮強度が70N/mm²以上の場合には、比較的±40%の範囲で予測されているが、乾燥開始時材齢が2日以下のとき予測値が実験値に比べて大きくなっている事が分かる。

表-1に示したように、予測式毎にその適用範囲が異なる。従って、図-3から図-10は、同じ実験データを用いて比較されたものではない。従って、これら

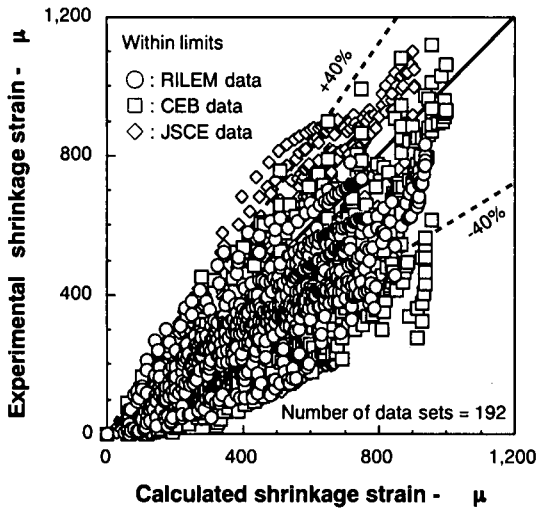


図-3 JSCE乾燥収縮ひずみモデルの精度 (適用範囲内)

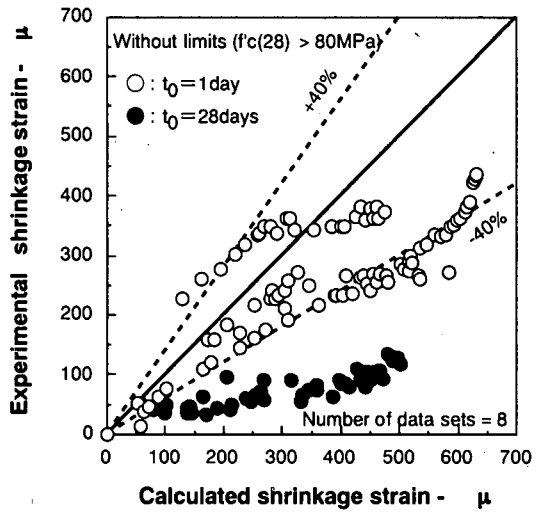


図-4 JSCE乾燥収縮ひずみモデルの精度 (適用範囲外)

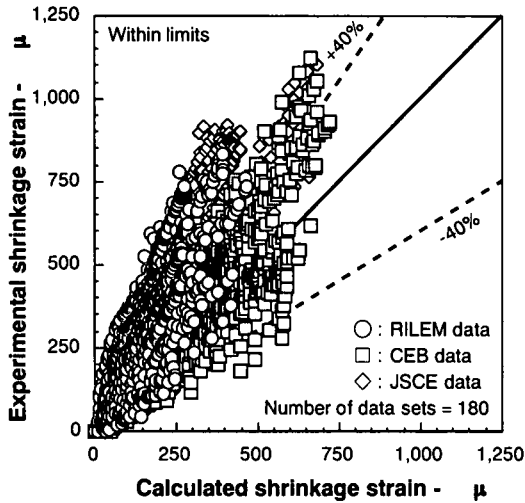


図-5 CEB乾燥収縮ひずみモデルの精度 (適用範囲内)

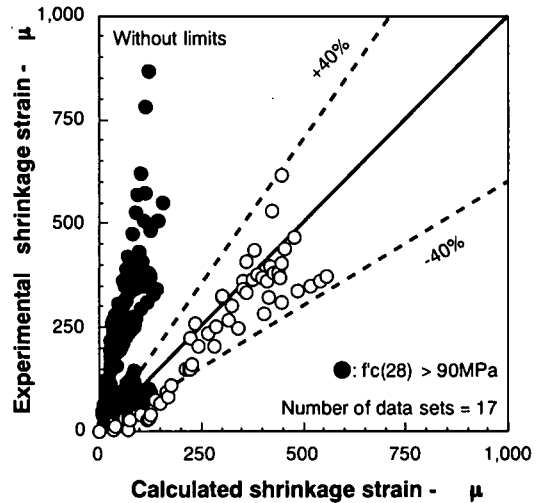


図-6 CEB乾燥収縮ひずみモデルの精度 (適用範囲外)

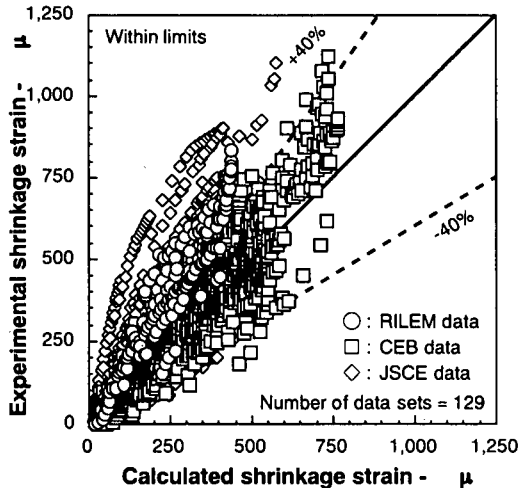


図-7 B3乾燥収縮ひずみモデルの精度 (適用範囲内)

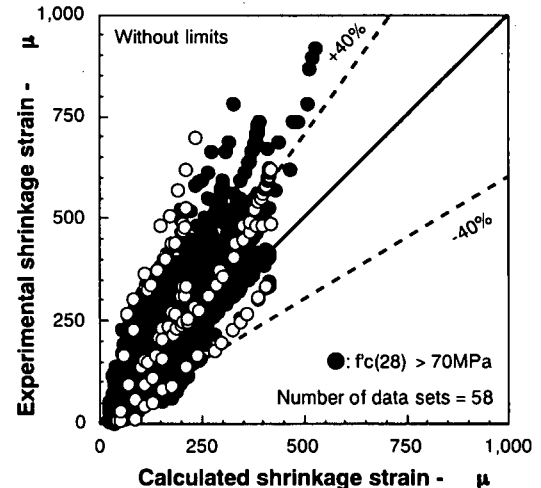


図-8 B3乾燥収縮ひずみモデルの精度 (適用範囲外)

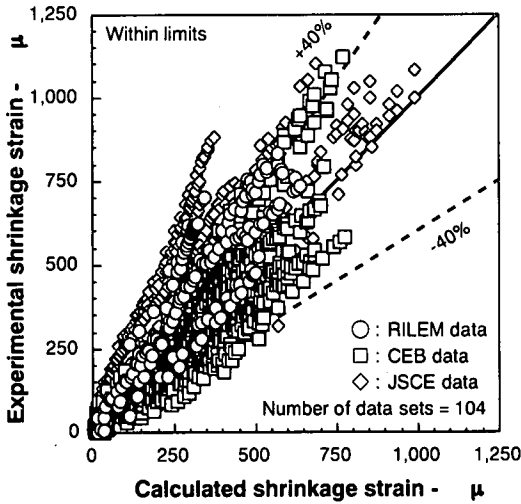


図-9 GZ乾燥収縮ひずみモデルの精度 (適用範囲内)

の比較だけで予測式の優劣を判定することはできないが、現在提案されている乾燥収縮ひずみ予測式の精度は各々の予測式の適用範囲内のものに対してはおおよそ±40%程度であるといえる。また、適用範囲外の高強度コンクリートの乾燥収縮ひずみに対しては、JSCEモデルは実験値に対して大きめの値を、それ以外の予測式は小さめの値を予測しており、いずれの予測式によっても正確に高強度コンクリートの乾燥収縮ひずみを予測することは難しいといえる。

(4) クリープひずみ予測式の精度

図-11は、JSCEモデルによる単位応力当たりのクリープひずみの予測値とRILEM、CEBおよびJSCEのデータベースに収められている実験値との比較を行った図である。この図には、コンクリートの圧縮強度が100N/mm²を越える場合のクリープデータも含まれている。また、図-12は、JSCEモデルが実験値に対して著しく異なる予測値を与える場合を示したものである。図-12中のデータは、図-11中のデータに対して特別な条件で測定されたものではない。JSCEの予測モデルは入力項に強度の項が無く、コンクリートの配合と供試体寸法および環境条件によって予測値が計算される。JSCEの予測式では、強度の項を使って計算する予測式を用いると妥当な値が得られるデータに対して、実験値との一致が極めて悪い結果が計算される場合がある。

図-13は、RILEM、CEBおよびJSCEのデータベースに収められているデータのうち、CEBモデルの適用範囲内の条件で測定された実験値とCEBモデルによる予測値との比較を行ったものである。また、図-14は、RILEM、CEBおよびJSCEのデータベースに

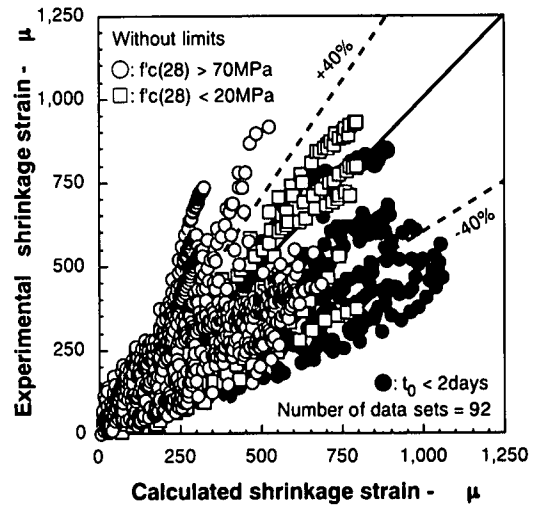


図-10 GZ乾燥収縮ひずみモデルの精度 (適用範囲外)

収められているクリープデータのうち、CEBモデルの適用範囲外の条件で測定された実験値との比較を行ったものである。これらの図より、CEBモデルの予測値は、材齢28日における圧縮強度が適用範囲外となる場合に対しても、適用範囲内の場合とほぼ同等な予測精度を有していることが分かる。

図-15は、RILEM、CEBおよびJSCEのデータベースに収められているクリープデータのうち、B3モデルの適用範囲内の条件で測定された実験値とB3モデルによる予測値との比較を行ったものである。この図より、B3モデルによる予測値は、比較に用いた実験値が適用範囲内のものであっても、ばらつきが大きいことが分かる。図-16は、B3モデルの適用範囲外の条件で測定された実験値との比較を行ったものである。このうち、●は材齢28日におけるコンクリートの圧縮強度が70N/mm²を超えるものである。この図より、B3モデルは適用範囲外の高強度コンクリートの実験値に対しても、ほぼ妥当な予測を行っていることが分かる。

図-17は、GZモデルの適用範囲内の条件で測定された実験値とGZモデルによる予測値との比較を行ったものである。この図より、GZモデルを用いた予測値は適用範囲内のデータに対して、若干小さめの予測結果となる場合が多くあることが分かる。図-18は、CEBおよびJSCEのデータベースに収められているデータのうち、GZモデルの適用範囲外のデータを用いた比較を示したものである。この図より、材齢28日における圧縮強度が70N/mm²以上の場合および荷重開始時材齢が2日以下の場合において、予測値は実験値に対してやや大きめの値を示していることが分かる。しかし、GZモデルは適用範囲外の実験デー

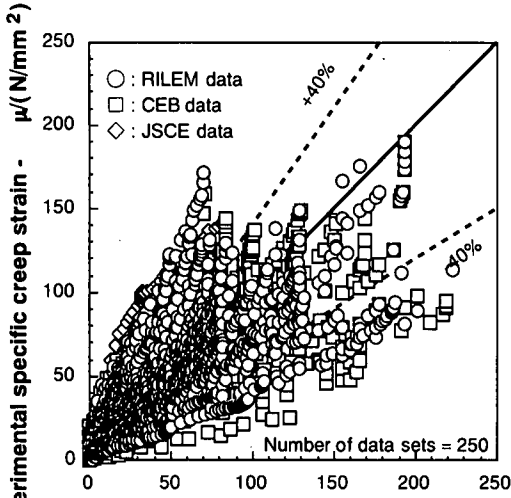


図-11 JSCEクリープモデルの精度 (適用範囲内)

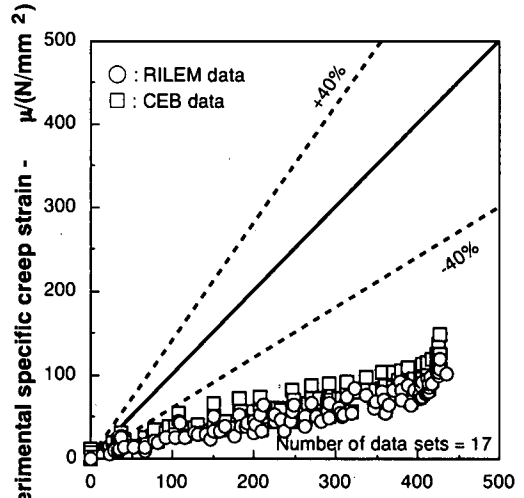


図-12 JSCEクリープモデルの精度 (適用範囲外)

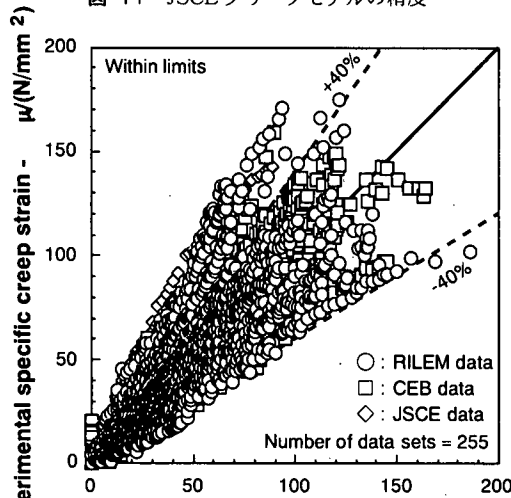


図-13 CEBクリープモデルの精度 (適用範囲内)

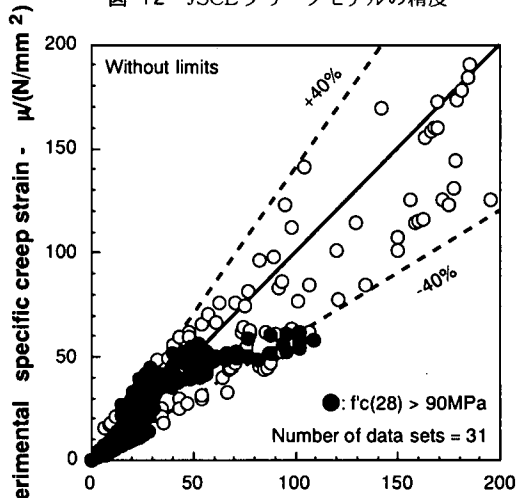


図-14 CEBクリープモデルの精度 (適用範囲外)

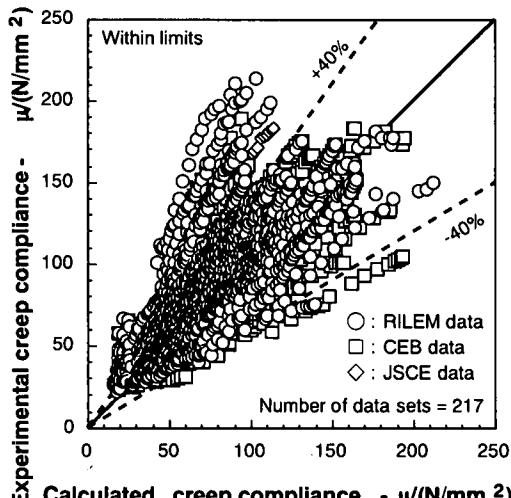


図-15 B3クリープモデルの精度 (適用範囲内)

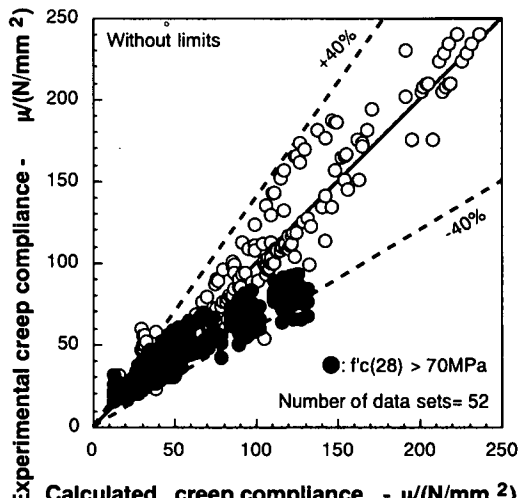


図-16 B3クリープモデルの精度 (適用範囲外)

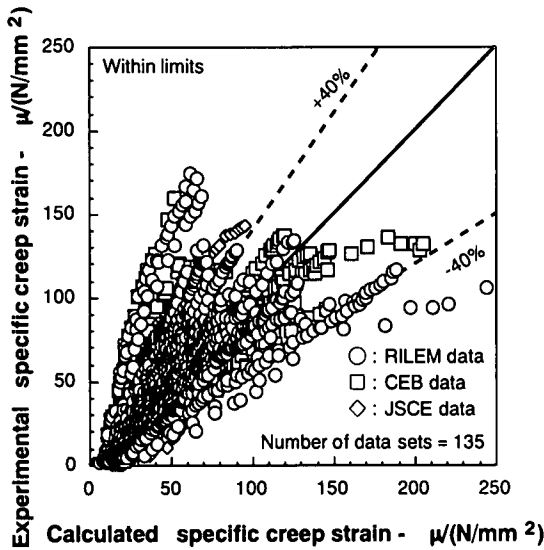


図-17 GZクリープモデルの精度 (適用範囲内)

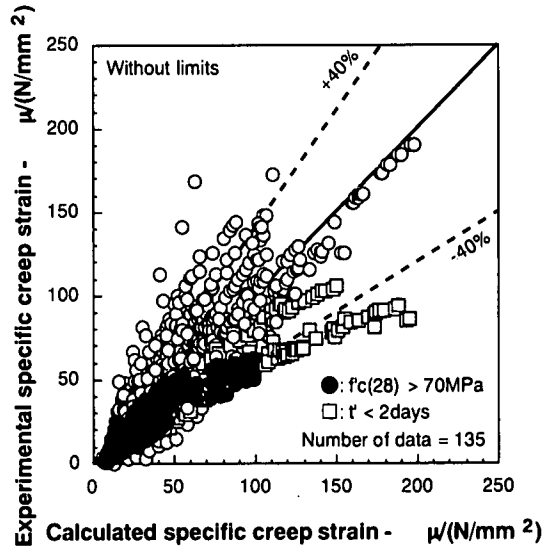


図-18 GZクリープモデルの精度 (適用範囲外)

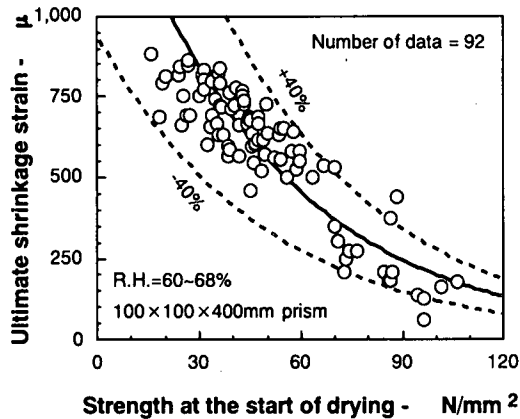


図-19 乾燥開始時材齢における圧縮強度と乾燥収縮ひずみの最終値との関係

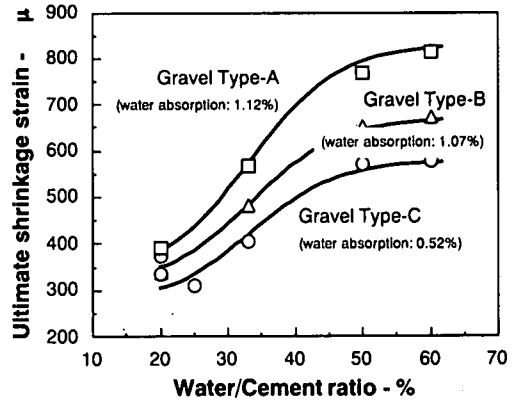


図-20 コンクリートの水セメント比と乾燥収縮ひずみ最終値との関係

タに対しても、ほぼ妥当な予測結果を示すことが分かる。

以上の結果より、強度の項を含まないJSCEモデルを除き、現在提案されているクリープ予測式は、適用範囲外の高強度コンクリートのクリープに対しても、適用範囲内のクリープと同様にほぼ±40%の精度で予測可能であることが分かる。

3. 乾燥収縮ひずみ予測式の提案

(1) 圧縮強度が乾燥収縮ひずみの最終値に及ぼす影響

図-19は、乾燥収縮ひずみの経時変化を式(3)に示す双曲線によって回帰し、その最終値と乾燥開始時材齢におけるコンクリートの圧縮強度との関係を示したものである。

$$\epsilon_{sh}(t, t_0) = \frac{\epsilon_{sh\infty} \cdot (t - t_0)}{\beta + (t - t_0)} \quad (3)$$

ここに、

$\epsilon_{sh\infty}$: 乾燥収縮ひずみの最終値(μ)

β : 乾燥収縮ひずみの経時変化を表す項

t : コンクリートの材齢(日)

t_0 : 乾燥開始時材齢(日)

この図より、乾燥収縮ひずみの最終値は、乾燥開始時材齢における圧縮強度が大きくなるに伴って小さくなる傾向がある。また、乾燥開始時材齢における強度と乾燥収縮ひずみの最終値との関係を双曲線を用いて回帰すると、ほぼ全てのデータが回帰値の±40%以内に入る。これまでに提案されている予測式も、このような関係を基に乾燥開始時材齢における

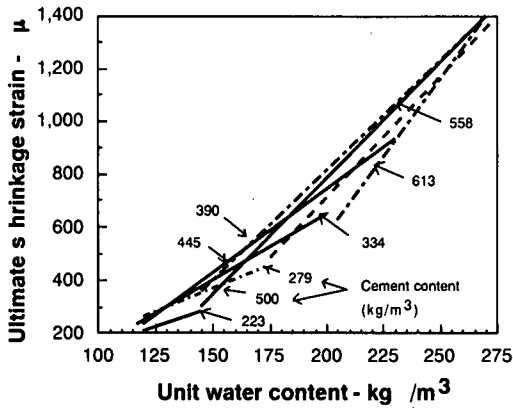


図-21 単位セメント量および単位水量と乾燥収縮ひずみとの関係

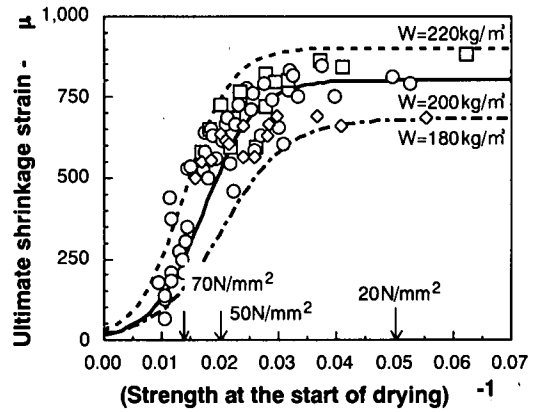


図-22 乾燥開始時強度の逆数と乾燥収縮ひずみの最終値との関係

圧縮強度の影響を考慮したものが多い^{10),11)}。しかし、異なる種類の粗骨材を用いて、コンクリートの乾燥収縮ひずみを測定した結果を示した図-20から、いずれの粗骨材を用いた場合も、水セメント比が50~60%の大きい範囲、すなわち、コンクリートの強度が低い場合には、コンクリートの圧縮強度が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は小さいことが分かる。また、普通強度のコンクリートの単位水量が乾燥収縮ひずみの最終値に及ぼす影響を調べた図-21¹²⁾からも、水セメント比が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響よりも、単位水量の及ぼす影響の方が大きいことが示されている。さらに、乾燥開始時材齢における圧縮強度の逆数を横軸にとることで、横軸に占める普通強度の範囲を広く示した図-22からも、50N/mm²以下の強度のコンクリートにおいては、コンクリートの圧縮強度が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響よりも、単位水量の及ぼす影響の方が大きいことが分かる。コンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす配合の影響を調べるために、一般に用いられているコンクリートの単位水量の範囲のみならず、広い範囲の単位水量のコンクリートを用いて得られた結果が図-21および図-22である。これらの図から、単位水量が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響は、コンクリートの圧縮強度が高くなるにつれて小さくなり、高強度コンクリートでは、むしろ、圧縮強度の及ぼす影響の方が大きくなるといえる。従って、高強度コンクリートの乾燥収縮ひずみを予測する場合には、普通コンクリートの場合とは異なり、乾燥開始時材齢における圧縮強度の影響を考慮しなければならないことが分かる。

しかし、以上のことを考慮に入れて、乾燥開始時材齢における圧縮強度の項を含む高強度コンクリートにも適用可能な予測式を確立しようとしても、全てのデータバンクに乾燥開始時材齢におけるコンク

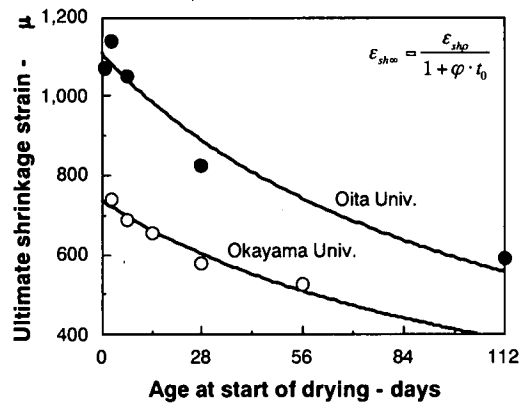


図-23 乾燥開始時材齢と乾燥収縮ひずみ最終値の関係

リートの圧縮強度のデータが収められているわけではない。とくに、RILEMのデータベースには、乾燥開始時材齢における圧縮強度のデータはほとんど収められていない。そこで、乾燥開始時材齢における圧縮強度の代わりに材齢28日における圧縮強度のみで乾燥収縮ひずみの最終値を表せるよう、乾燥収縮ひずみの最終値と乾燥開始時材齢 t_0 の関係を式(4)に示す双曲線を用いて、図-23のように回帰を行った。

$$\epsilon_{sh\infty} = \frac{\epsilon_{sh\rho}}{1 + \varphi \cdot t_0} \quad (4)$$

ここに、

$\epsilon_{sh\rho}$, φ : 回帰分析によって求める係数

t_0 : 乾燥開始時材齢(日),

$t_0 \geq 98$ のとき, $t_0 = 98$ とする。

図-24は、式(4)中の $\epsilon_{sh\rho}$ と材齢28日における圧縮強度の関係を示したものである。この図から明らか

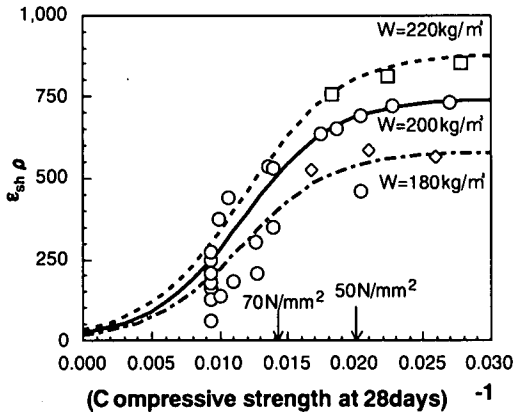


図-24 コンクリートの28日圧縮強度と ϵ_{shp} との関係

のように、 ϵ_{shp} は単位水量ごとに28日圧縮強度の関数で表せることが分かる。図-24に示した ϵ_{shp} と28日圧縮強度の関係は式(5)を用いて回帰したものである。

$$\epsilon_{shp} = \frac{C_{p3}}{1 + C_{p1} \exp\left(-\frac{C_{p2}}{f'_c(28)}\right)} \quad (5)$$

ここに、

C_{p1} , C_{p2} , C_{p3} : 回帰分析によって求める係数

図-25は、式(4)中の ϵ_{shp} と単位水量の関係を普通強度のコンクリートを用いて調べたものである。一方、図-26は、測定期間中の大気相対湿度と ϵ_{shp} との関係を示したものである。これらの図より、単位水量および相対湿度と ϵ_{shp} の関係は、直線で表せることが分かる。以上のことを考慮に入れ導かれた式を式(6)に示す。ただし、式中の係数は、実験データを基に回帰分析によって求められた値である。

$$\epsilon_{shp} = \frac{\alpha(1-h)W}{1 + 150 \exp\left\{-\frac{500}{f'_c(28)}\right\}} \quad (6)$$

ここに、

α : セメントの種類によって異なる係数
 h : 相対湿度(as decimal)
 W : 単位水量(kg/m³)
 $f'_c(28)$: 28日圧縮強度(N/mm²)

なお、 α の値は、日本の普通セメントを用いたデータによって回帰を行った場合、 $\alpha = 11$ となる。

図-27は、材齢28日におけるコンクリートの圧縮

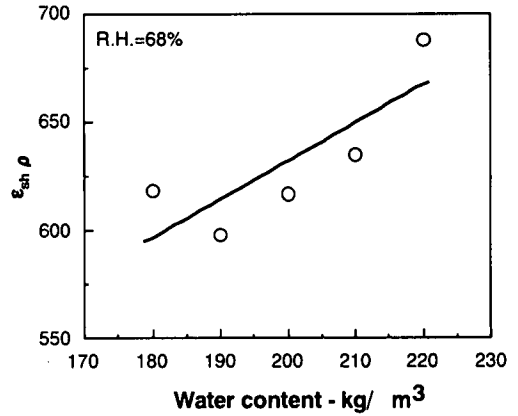


図-25 コンクリートの単位水量と ϵ_{shp} との関係

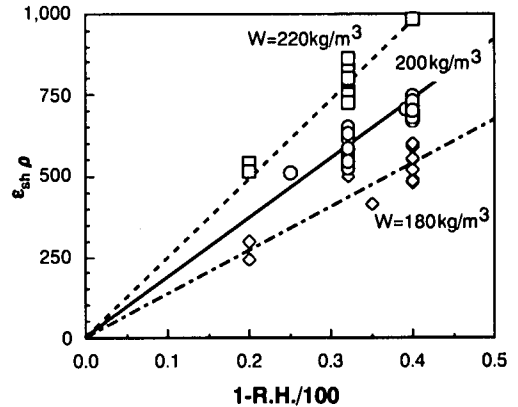


図-26 測定環境の相対湿度と ϵ_{shp} との関係

強度と式(4)中の φ との関係を示したものである。この図より、28日強度が高いほど、 φ の値が大きくなることが分かる。また、コンクリートの単位水量と φ との関係を示した図-28からは、単位水量が多いほど φ も大きくなることが分かる。これらの関係式を表せば次式が得られる。ただし、式中の係数は実験データを用いて回帰分析によって求めた値である。

$$\varphi = 10^{-4} \{15 \exp(0.007 f'_c(28)) + 0.25W\} \quad (7)$$

ここに、

$f'_c(28)$: 材齢28日における圧縮強度(N/mm²)
 W : 単位水量(kg/m³)

式(4)から式(7)を用いて求められた乾燥収縮ひずみの最終値と、双曲線によって乾燥収縮ひずみの経時変化を回帰して求めた乾燥収縮ひずみの最終値との比較を図-29および図-30に示す。ただし、図-29および図-30は、それぞれ、RILEMおよび日本国内

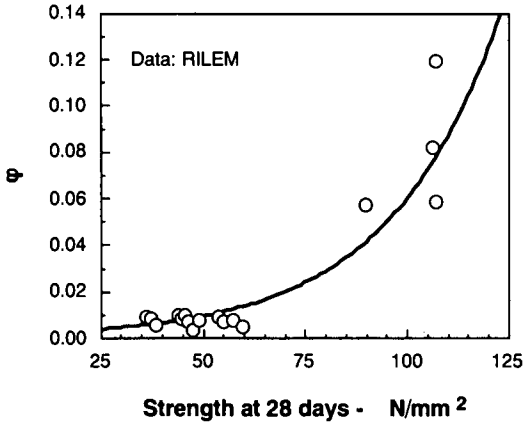


図-27 28日圧縮強度とφとの関係

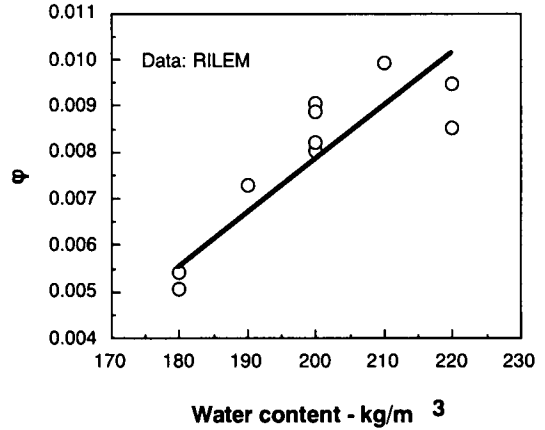


図-28 コンクリートの単位水量とφとの関係

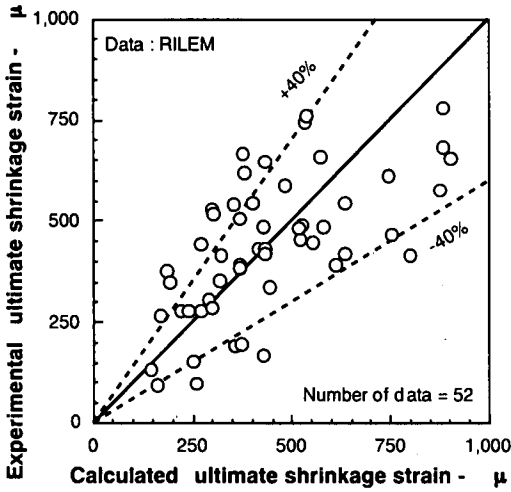


図-29 RILEMの実験データとの比較

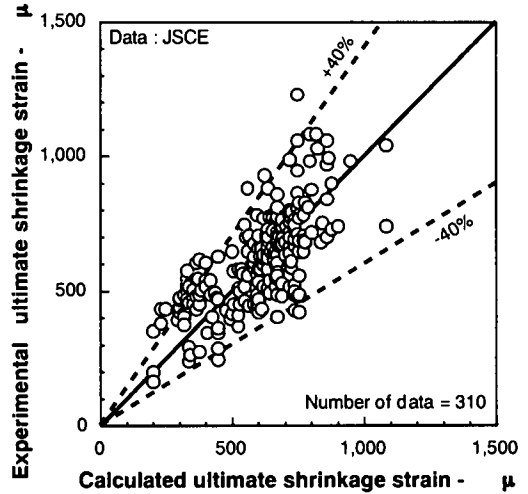


図-30 国内の実験データとの比較

において測定された実験データとの比較を行ったものである。ただし、これらの図では、式(6)に含まれる α にはセメントの種類の影響を考慮して以下の値を用いている。すなわち、日本のセメントに対しては、普通および低発熱セメントの場合に $\alpha=11$ 、早強セメントの場合に $\alpha=15$ とし、外国のデータに対しては、早強高強度セメントの場合に $\alpha=11$ 、普通および早強セメントの場合に $\alpha=10$ 、低発熱セメントの場合に $\alpha=8$ としている。これらの α の値は、いずれも実験データを基に回帰分析によって求められた値であり、セメントの種類その他にも各国における骨材事情等による影響が含まれた値である。これらの図から、乾燥収縮ひずみの最終値に対する予測値は、ほぼ±40%の範囲内に収まっており、いずれのデータベースに対しても、精度の良い予測が行われていることが分かる。

(2) 乾燥収縮ひずみの経時変化

図-31は、式(3)に含まれる乾燥収縮ひずみの経時

変化を表す項 β と単位水量との関係を示したものである。この図より、コンクリートの単位水量と β の間には線形関係が成り立つことが分かる。また、乾燥開始時材齢が大きくなると β は、単位水量に関係なくほぼ一定値となることが分かる。一方、図-32は、供試体の体積表面積比と β との関係を示したものである。この図より、供試体の体積表面積比が大きくなるにつれ β も大きくなることが分かる。これらのことを式で表せば、次式のようになる。

$$\beta = \left(\frac{C_{\beta 1}}{1 + C_{\beta 2} \cdot t_0} \cdot W + C_{\beta 3} \right) \cdot (V/S)^{C_{\beta 4}} \quad (8)$$

ここに、

W : 単位水量(kg/m³)

V/S : 体積表面積比(mm)

$C_{\beta 1}, C_{\beta 2}, C_{\beta 3}, C_{\beta 4}$: 回帰分析により求められる係数

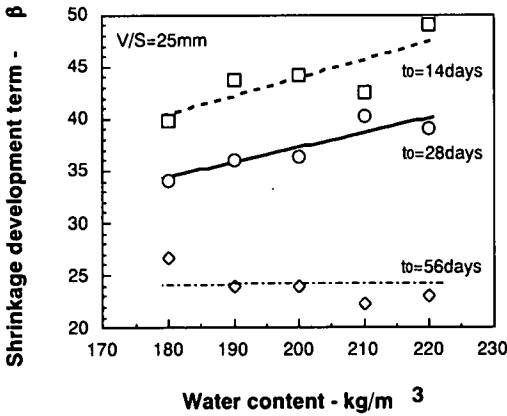


図-31 単位水量と β との関係

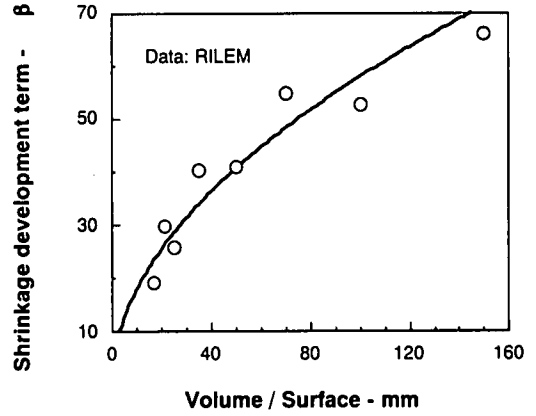


図-32 体積表面積比と β との関係

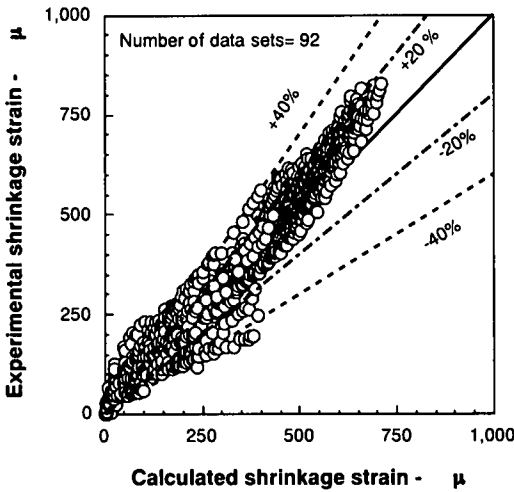


図-33 著者らの行った実験データとの比較

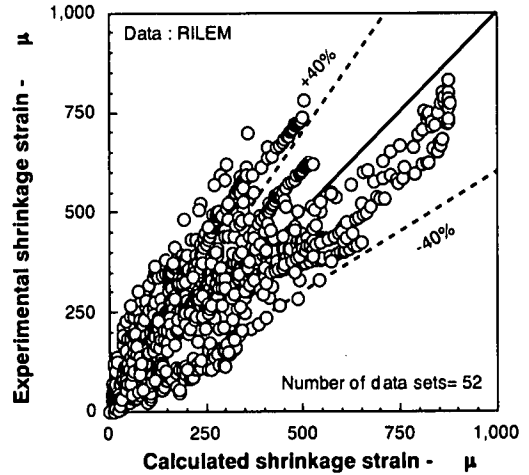


図-34 RILEM データベースとの比較

これらに含まれる係数を実験データを用いて回帰分析を行えば $C_{\beta 3} \approx 0.0$ となり、結果的に次式が得られた。

$$\beta = \frac{4W\sqrt{V/S}}{100 + 0.7t_0} \quad (9)$$

(3) 提案する乾燥収縮ひずみ予測式の精度

図-33 から図-36 は、各データベースに収められている実験値と本研究で提案する予測式を用いた予測値との比較を行ったものである。これらの図より、予測値と実験値のばらつきはほぼ $\pm 40\%$ の範囲内に収まっており、本研究で提案する予測式が精度良く低強度から高強度までのコンクリートの乾燥収縮ひずみを予測していることが分かる。

4. クリープ予測式の提案

(1) 圧縮強度がクリープの最終値に及ぼす影響

図-37 は、単位応力当たりのクリープひずみの経時変化を式(10)に示す双曲線によって回帰し、その最終値と載荷開始時材齢におけるコンクリートの圧縮強度との関係を示したものである。

$$C_r(t, t') = \frac{C_{r\infty} \cdot (t - t')}{\beta_{cr} + (t - t')} \quad (10)$$

ここに、

- $C_{r\infty}$: クリープ係数の最終値
- β_{cr} : クリープ係数の経時変化を示す項
- t : コンクリートの材齢(日)
- t' : 載荷開始時材齢(日)

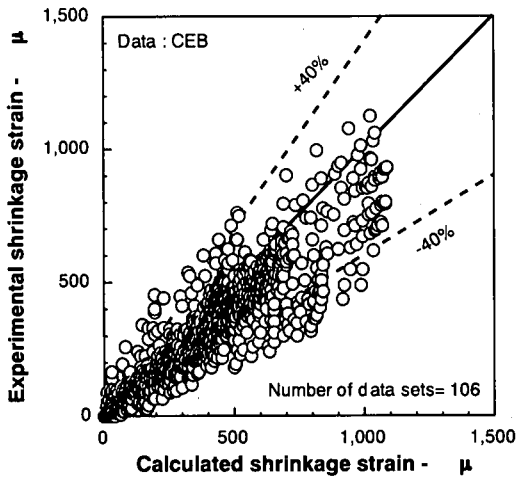


図-35 CEB データベースとの比較

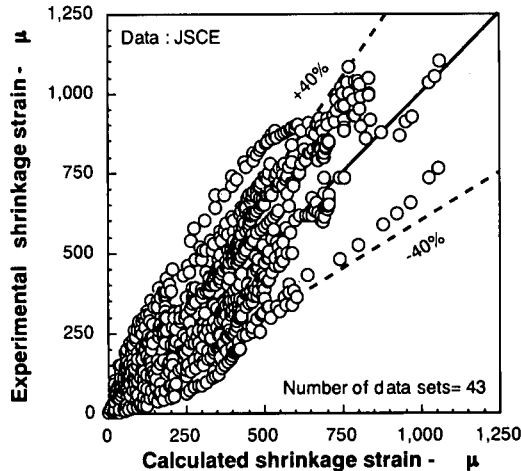


図-36 JSCE データベースとの比較

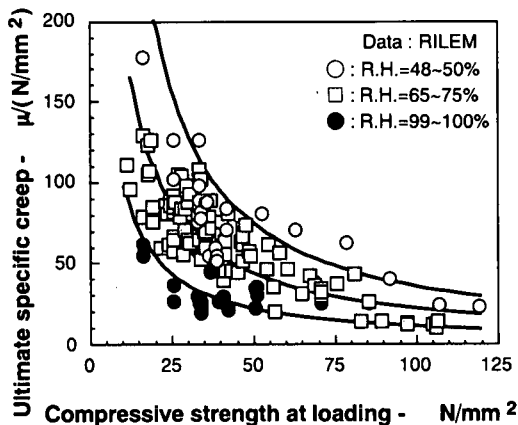


図-37 載荷時圧縮強度とクリープ係数最終値との関係

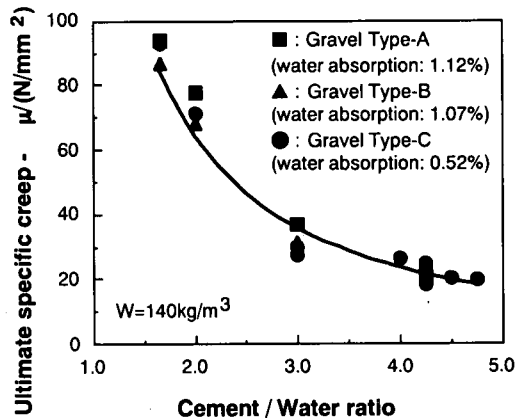


図-38 セメント水比とクリープ係数の最終値との関係

この図より、クリープ係数の最終値は、載荷開始時材齢における圧縮強度が高くなるにつれ、その大きさとばらつきが小さくなること分かる。また、異なる種類の粗骨材をコンクリートに用いた実験でも、図-38に示されるように、セメント水比が大きくなるにつれ、すなわち、高強度になるほど、クリープ係数は小さくなること分かる。

(2) クリープの経時変化

図-39および図-40は、それぞれ、単位応力あたりのクリープひずみの経時変化を式(10)に示される双曲線と式(11)に示す対数式によって回帰し、その回帰値と実験値との比較を行ったものである。

$$Cr(t, t') = A \log_e(t - t' + 1) \quad (11)$$

ここに、

A : 回帰分析で決定される係数 ($\mu / (N/mm^2)$)

t : コンクリートの材齢(日)

t' : 載荷開始時材齢(日)

これらの図より、双曲線および対数式のいずれで回帰した場合も、 $\pm 20\%$ の範囲内でクリープの経時変化を表せていることが分かる。しかし、双曲線によって回帰した場合には、載荷期間が長くなるにつれて回帰値と実験値とのずれが大きくなること分かる。これに対して、対数式を用いて回帰を行った場合には、載荷初期における実験値とのずれはやや大きい、載荷期間が長くなるにつれ回帰値と実験値がよく一致することが分かる。また、対数式を用いれば、単位応力あたりのクリープひずみの経時変化を回帰によって求める際に必要な係数の数が1つにな

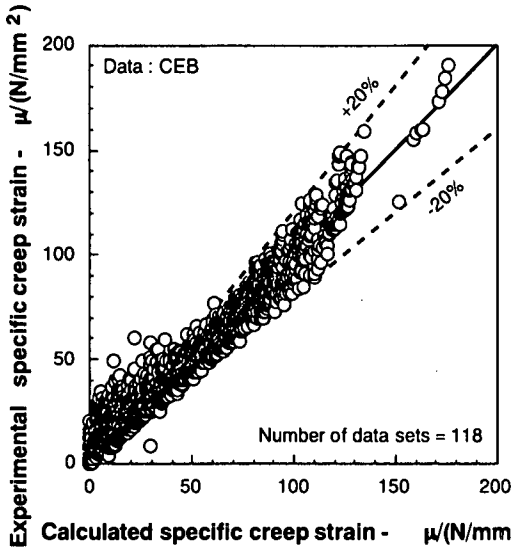


図-39 双曲線の式によって回帰した場合のクリープひずみ実験値と回帰値の比較

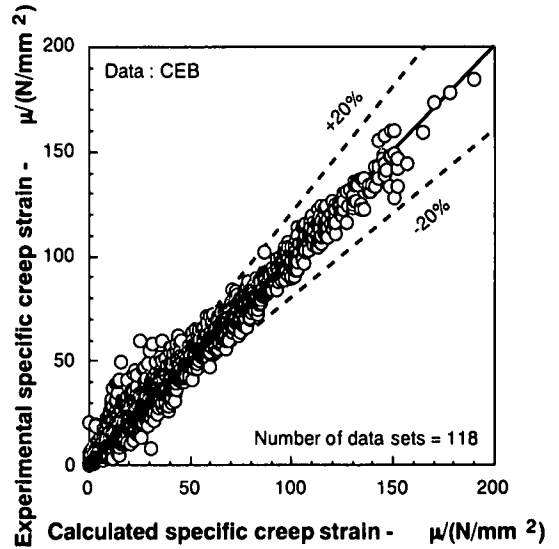


図-40 対数の式によって回帰した場合のクリープひずみ実験値と回帰値の比較

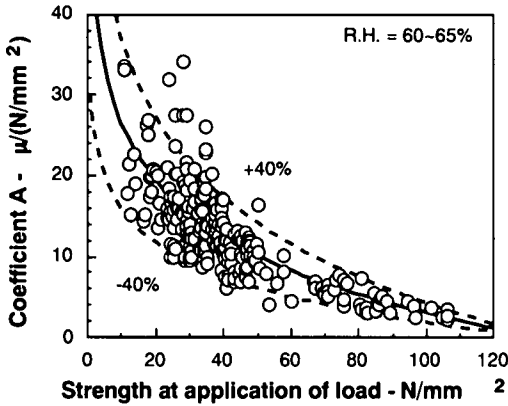


図-41 係数Aと載荷開始時材齢における強度の関係

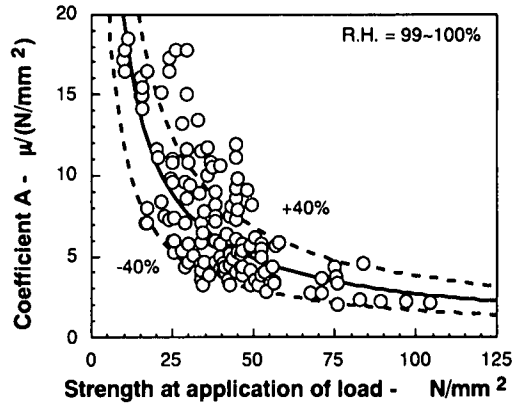


図-42 係数Aと載荷開始時材齢における強度の関係

り、予測式を確立する上でより簡便である。

図-41 および図-42 は、それぞれ、相対湿度が60～65%および99～100%の条件下で求められた単位応力あたりのクリープひずみの経時変化を対数式で回帰し、係数Aの最適値と載荷開始時材齢における強度との関係を示したものである。これらの図より、両者の関係は、一本の曲線で表せることが分かる。図中の曲線は、式(2)で示される双曲線式で求めたものである。

$$A = \frac{C_\alpha}{C_\beta + f_c(t)} \quad (12)$$

ここに、

C_α, C_β : 実験データに基づいて決定される係数
 $f_c(t)$: 載荷時材齢での圧縮強度(N/mm²)

図-43 は、相対湿度と式(11)中の係数Aとの関係を示したものである。この図より、相対湿度と係数Aとの関係は、線形関係で表せることが分かる。また、コンクリートの単位水量と式(11)中の係数Aの関係を示した図-44 から、単位水量の関係も線形関係で表せることが分かる。これらのことを式で表せば式(13)となる。ただし、式(13)は、外気の相対湿度が100%のとき、すなわち、 $h=1$ のときに生じる基本クリープひずみと、 $h<1$ の場合に生じる乾燥クリープとに載荷開始時材齢における圧縮強度が及ぼす影響は異なるものとして導いた。

$$A = \frac{C_{drying} \cdot W(1-h)}{\varphi_{drying} + f_c(t)} + \frac{C_{basic}}{\varphi_{basic} + f_c(t)} \quad (13)$$

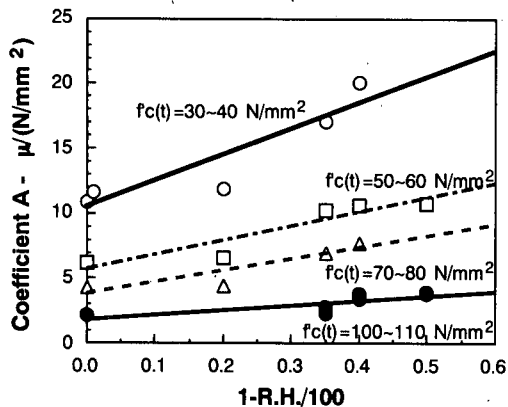


図-43 係数Aと相対湿度の関係

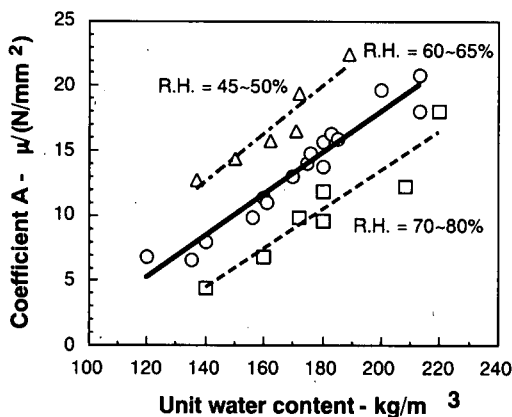


図-44 係数Aと単位水量の関係

ここに、

C_{basic} , C_{drying} , φ_{basic} , φ_{drying} : 未定係数

h : 相対湿度 (as decimal)

W : 単位水量 (kg/m^3)

$f_c(t)$: 載荷時材齢での圧縮強度(N/mm^2)

式(13)に含まれる係数を、全ての実験データを用いて回帰分析を行えば、 $\varphi_{basic} \equiv \varphi_{drying}$ となり、結果的に、次式が得られた。

$$A = \frac{4W(1-h)+350}{12+f_c(t)} \quad (14)$$

式(14)は、図-2に要約した数多くの実験データから回帰分析によって求められたものである。従って、回帰分析上、係数Aに及ぼす影響が小さいと思われる因子は省かれている。例えば、供試体の体積表面積比のように、従来の予測式では考慮されていた因子であってもその影響が大きいと思われるなかったものは予測式に含めていない。図-45は、JSCEモデルおよびCEBモデルにおいて、体積表面積比が各々の予測値に及ぼす影響を示したものである。JSCEモデルおよびCEBモデルにおいて、体積表面積比が100mmの場合と1,000mmの場合を予測した結果の差は2割以下であり、予測値に及ぼす体積表面積比の影響は比較的大きくない。また、B3モデルやGZモデルにおいて体積表面積比は、乾燥クリープの経時変化を考慮するために用いられている。このような因子は、式を単純化する目的で省いた。

(3) 提案するクリープ予測式の精度

図-46、図-47、図-48および図-49は、各データベースに収められている実験値と本研究で提案する予測式を用いた予測値との比較を行ったものである。

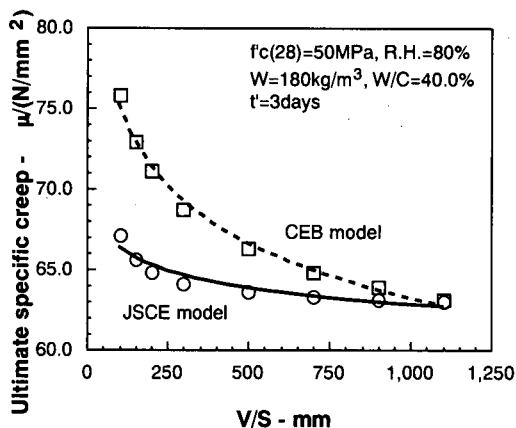


図-45 各予測式の予測値におけるV/Sの影響

これらの図より、予測値と実験値のばらつきはほぼ±40%の範囲内に収まっており、本研究で提案する予測式が精度良く低強度から高強度までのコンクリートの単位応力当たりのクリープひずみを予測していることが分かる。これらの図より、本研究で提案する予測式は極めて簡便な式でありながら、これまでに提案されている代表的な予測式に劣らない精度をもった予測式であることが分かる。

5. 本研究で提案する予測式

以下に本研究で提案する乾燥収縮ひずみおよびクリープ予測式を示す。

乾燥収縮ひずみ予測式：

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{sh0} \cdot (t - t_0)}{\beta + (t - t_0)} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{sh0} = \frac{\varepsilon_{shp}}{1 + \eta \cdot t_0} \quad (16)$$

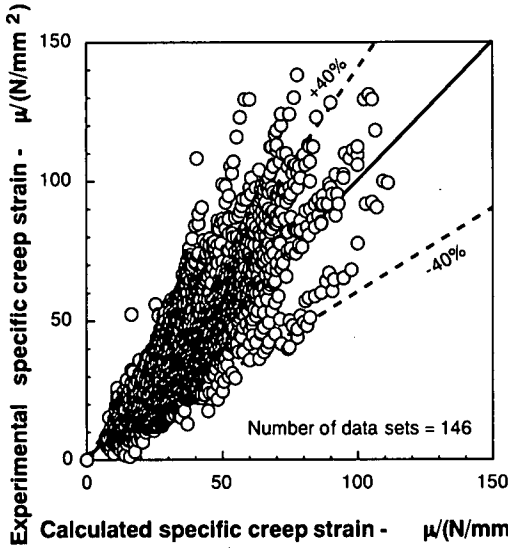


図-46 著者らの行った実験データとの比較

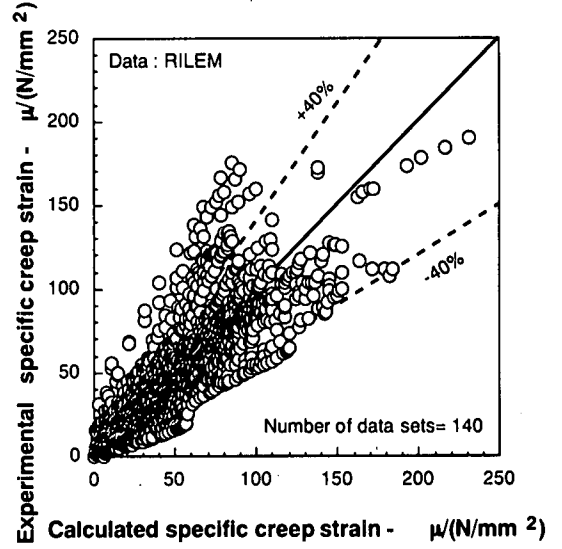


図-47 RILEM データベースとの比較

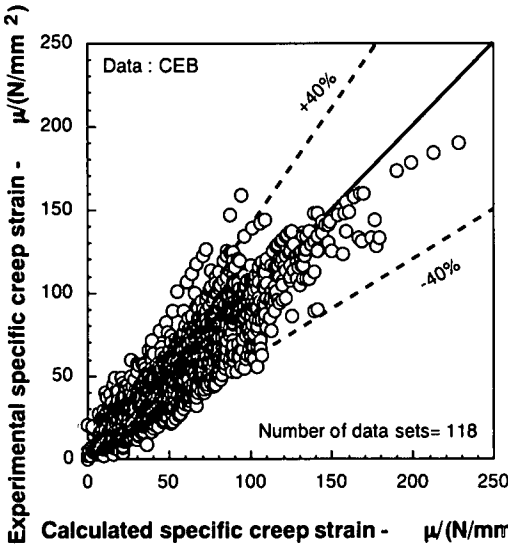


図-48 CEB データベースとの比較

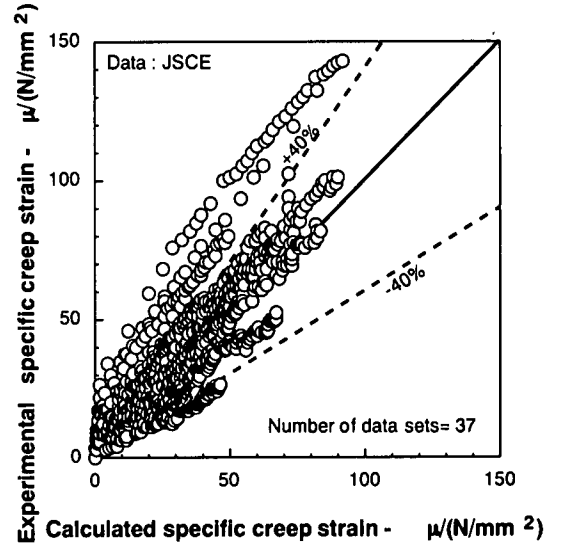


図-49 JSCE データベースとの比較

$$\varepsilon_{shp} = \frac{\alpha(1-h)W}{1 + 150 \exp\left\{-\frac{500}{f'_c(28)}\right\}} \quad (17)$$

$$\eta = 10^{-4} \{15 \exp(0.007 f'_c(28)) + 0.25W\} \quad (18)$$

$$\beta = \frac{4W\sqrt{V/S}}{100 + 0.7t_0} \quad (19)$$

ここに,

$\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: 乾燥収縮ひずみ (μ)

t : コンクリートの材齢(日) ($t \geq 1$)

t_0 : 乾燥開始時材齢 (日)

($t_0 \geq 1$, ただし $t_0 \geq 98$ のとき $t_0 = 98$)

$f'_c(28)$: 材齢 28 日における圧縮強度 (N/mm^2)

($f'_c(28) \leq 120 N/mm^2$)

h : 相対湿度 (as decimal) (0.4 ~ 0.9)

W : 単位水量 (kg/m^3) ($130 kg/m^3 \sim 230 kg/m^3$)

V/S : 体積表面積比 (mm) ($100 mm \sim 1,000 mm$)

α : セメントの種類の影響を表す係数

日本のセメントに対して

早強セメントの場合: $\alpha = 15$

普通および低発熱セメントの場合: $\alpha = 11$

外国のデータに対して

早強高強度セメントの場合: $\alpha = 11$

普通および早強セメントの場合: $\alpha = 10$

低発熱セメントの場合: $\alpha = 8$

クリープ予測式：

$$Cr(t,t') = \frac{4W(1-h)+350}{12+f'_c(t')} \log_e(t-t'+1) \quad (20)$$

ここに、

$Cr(t,t')$ ：単位応力当たりのクリープひずみ
($\mu / (\text{N}/\text{mm}^2)$)

t' ：載荷開始時材齢(日) ($t' \geq 1$)

h ：相対湿度 (as decimal) (0.4 ~ 0.9)

W ：単位水量 (kg/m^3) ($130\text{kg}/\text{m}^3 \sim 230\text{kg}/\text{m}^3$)

$f'_c(t')$ ：載荷開始時材齢の圧縮強度 (N/mm^2)

($f'_c(t') \leq 120\text{N}/\text{mm}^2$)

6. 結 論

普通強度から高強度コンクリートまで精度良く予測可能な乾燥収縮ひずみおよび単位応力当たりのクリープひずみの予測式の提案を行った。乾燥収縮ひずみ予測式は、普通強度のコンクリートでは強度よりも単位水量が乾燥収縮ひずみに及ぼす影響の大きいことを、また、高強度コンクリートでは逆に強度の及ぼす影響が大きくなることを考慮に入れた予測式となっている。クリープ予測式は、予測に必要な項が少なく極めて簡便な式でありながら、これまでに提案されている代表的な予測式と比較しても精度の劣らない予測式となっている。

参考文献

- 1) Comite Euro-International du Beton: CEB-FIP MODEL CODE 1990, pp.52~65, 1990.
- 2) ACI Committee 209: Prediction of creep and shrinkage, and temperature effects on concrete structures, *American Concrete*

Institute Special Publication No.76, 1982.

- 3) 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.
- 4) RILEM TC 107 Subcommittee 5: Data base on creep and shrinkage tests - 3.0, 1999.
- 5) Dilger, W. H.: Private communication.
- 6) クリープ・乾燥収縮小委員会 (308)：コンクリートの乾燥収縮ひずみおよびクリープ, コンクリート技術シリーズ, N0.24, pp.56~93, 1997.
- 7) Comite Euro-International du Beton: CEB-FIP MODEL CODE 1990 (DESIGN CODE), Thomas Telford, pp.52~65, 1998.
- 8) Bazant, Z. P. and Baweja, S.: Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures - Model B3, *Materials and Structures*, RILEM, Paris, France, Vol. 28, pp.357~365, 1995.
- 9) Gardner, N. J.: Design Provisions for Shrinkage and Creep of Concrete, *Proceedings of International Conference on Engineering Material*, Ottawa, Canada, Vol.1, pp.647~657, 1997.
- 10) CEB-FIP: International Recommendations for the Design and Construction of Concrete Structures - Principles and Recommendations, Comite Europeen du Beton - Federation Internationale de la Precontrainte, FIP Sixth Congress, Prague, June 1970; published by Cement and Concrete Association: London, 1970.
- 11) Bazant, Z. P. and Panula, L.: Simplified prediction of concrete creep and shrinkage from strength and mix, *Structural Engineering Reports No.78-10/6405*, Department of Civil Engineering, Northwestern University, Evanston, Illinois, pp.24, Oct. 1978.
- 12) 岡田清, 明石外世樹, 小柳治: 土木材料学, 国民科学社, p.193, 1998.

(2000.6.5 受付)

PREDICTION EQUATIONS OF CREEP AND DRYING SHRINKAGE STRAIN FOR WIDE-RANGED STRENGTH CONCRETE

Kenji SAKATA, Tatsuya TSUBAKI, Shoichi INOUE and Toshiki AYANO

According to the enhanced performance of concrete and the generalization of high strength concrete, the model code is improved to cope with them. The prediction equations of creep and shrinkage for high strength concrete are also indispensable to the present model code.

In this study, the precision of the present prediction equations was examined by using some data bases. The reliable knowledge of the effect of concrete strength on creep and shrinkage was also derived from the data included in these data bases. New prediction equations proposed in this paper are very simple and available for wide-ranged strength concrete creep and shrinkage.