

# 鉄筋コンクリート外壁のひびわれに関する研究 (その2)

—乾燥収縮に及ぼす骨材・調合の影響—

武田 寿一      中根 淳      小柳 光生  
増田 安彦      千野 裕之

## A Study on Shrinkage Cracks in Reinforced Concrete Walls (Part 2)

—Influence of Aggregates and Mixing on Shrinkage—

Toshikazu Takeda      Sunao Nakane      Mitsuo Koyanagi  
Yasuhiko Masuda      Hiroyuki Chino

### Abstract

The effects of coarse aggregate and water on shrinkage of concrete were investigated. It was shown that the rate of shrinkage decreases 0 to 15% with a 30 l/m<sup>3</sup> difference in water content, and concrete made with limestone aggregate has less shrinkage by 25 to 30% compared with that made with sandstone aggregate. The usefulness of limestone in crack control was thus confirmed.

### 概 要

コンクリートの乾燥収縮に及ぼす単位水量、粗骨材岩質の影響を検討した。その結果、単位水量 30 l/m<sup>3</sup> の差で 0～15% の乾燥収縮の低減になった。また粗骨材岩質では、硬質砂岩に対し石灰岩では 25～30% の収縮が減った。石灰岩を使用した場合、ひびわれ防止の面でも有効であることを確認した。

## 1. はじめに

コンクリート構造物に生じる収縮ひびわれを少なくするためには、材料・調合の面からコンクリートの乾燥収縮を極力小さくする必要がある。鉄筋コンクリート造のひびわれ対策指針案（日本建築学会）では、有害なひびわれを制御するため、コンクリートの乾燥収縮率、ブリージング量の標準値の目安を  $6 \times 10^{-4}$ （6 箇月）、 $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$  を定めている。

一方、これまで乾燥収縮に及ぼす要因についての実験研究は数多く報告されているが、まだ不明瞭な点も多い。ここでは自由収縮変形を小さくするような適切な材料・調合を探るため、単位水量・骨材の種類など主要な要因を取り込み、各々材令 6 箇月までの乾燥収縮の比較を行ない検討した。

## 2. 自由収縮変形に関する一連の実験

### 2.1. 単位水量の影響に関する実験

乾燥収縮に及ぼす単位水量の影響については数多くの

研究報告があり、その影響度合いも研究者によって様々であるが、一般には極めて大きな影響要因と考えられている。一方、セメント協会で行なった全国規模の共同試験結果<sup>1)</sup>によれば、同一強度をもつ軟練りと硬練りの違い（水量 30 l/m<sup>3</sup> 程度の違い）では 10～15% の収縮差であった。また、前報<sup>2)</sup>で報告した拘束ひびわれ実験の場合には、単位水量 27 l/m<sup>3</sup> の違いで、5% 程度の若干の収縮差であった。そこでまずこの点について確認実験を行なった。

#### 2.1.1. シリーズ 1

(1) 実験計画 このシリーズでは JIS A 1129 に準じた試験体 (10×10×40 cm, 各 3 本) の他に、15×30×35 cm の壁模擬試験体 (合板ベニヤ・密封鋼製各 2 体) を製作した。自由収縮の比較を行なう場合、調合の段階で所定の水量を変えたとしても、せき板からの脱水やブリージング水の蒸発によってその差が縮まることも考えられる。そこで壁模擬試験体は、一般の合板ベニヤ型枠の他に硬化時までこれらの水分逸散を無くした密封鋼製型枠を用いた試験体を作り、水量の違いが収縮に確実に反

映できることを狙った(写真-1参照)。骨材の物理的な性質及びまだ固まらないコンクリートの性質を表-2, 3に示す。収縮測定はコンタクトゲージ法を用いた。試験場所は恒温恒湿室(20°C, 60%RH)である。脱型は材令3日に行なった。

(2) 実験結果 まだ固まらないコンクリートの性質を表-3に示すが、単位水量が大きいとブリージングはかなり増加する。模擬試験体、JIS A1129試験体の経時的な乾燥収縮変形を図-1に示す。模擬試験体の初期の収縮はJIS A1129試験体に比べて少ないが、材令が経るに従いその差は縮まっている。また、いずれの形状の場合もA調合(硬練り)の収縮はC調合(軟練り)のほぼ0.87倍でやや少ない。

図-2に重量変化率を示す。鋼製型枠の重量減少は合板型枠に比べて大きい(脱型時から26週までに50l~58lの単位水量減少に相当)。その反面、型枠の違いによる収縮の差はほとんど無い。なお当初、鋼製の場合に単位水量の違いで収縮差が顕著に現れるのではないかと予想していたが、その傾向は認められなかった。

2.1.2. シリーズ2

(1) 実験計画 水量の収縮に及ぼす影響を調べるため、同一試験を繰り返し行なった。調査は前報<sup>2)</sup>で用いた調査表と同じである。シリーズ1と比べると、使用材料は同じであるが、軟練りに混和剤を使用していないことや、細骨材率がやや異なる。また全体的に空気量が少ない傾向にあった。

(2) 実験結果 6箇月間の乾燥収縮を図-3に示す。この結果、シリーズ1のように単位水量を少なくすることによる収縮への影響は認められなかった。この原因が多少の条件の違いによるものなのか、単なる材料的なバラツキなのか明らかではないが、いずれにしても再現性は無かった。

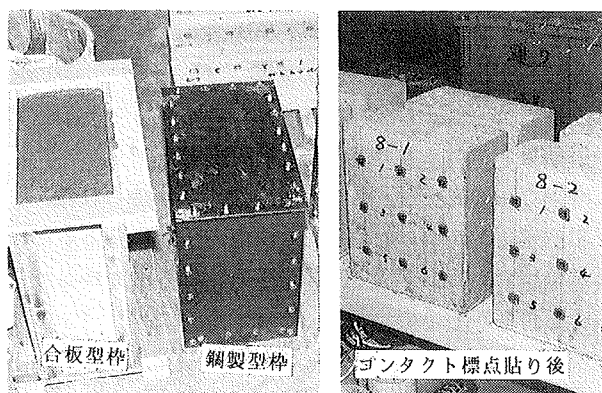


写真-1 模擬試験体の状況 (シリーズ1)

調合名称 cm	スラ ンプ cm	空気 量 %	水セメ ント比 %	細骨 材率	重量 (kg/m <sup>3</sup> )					
					単位 水量	セメ ント	細骨 材	粗骨 材	流動 化剤	混和剤 No.70
A	8.0	4.0	58.5	0.43	145	248	833	1102	—	2.48
B	18.4	4.0	58.5	0.45	170	291	826	1010	—	2.91
C	21.0	4.0	58.5	0.47	180	308	844	949	—	3.08

表-1 コンクリート調合計画 (シリーズ1)

種類	骨材の岩質	表乾比重	吸水率(%)	実積率(%)	洗ひ試験	産地
粗骨材	硬質砂岩	2.63	1.1	60.8	—	青梅産碎石
細骨材	—	2.63	1.4	66.0	0.60	木更津産山砂
粗骨材	石灰岩	2.67	0.68	—	—	青梅産碎石

表-2 骨材の性質 (シリーズ1)

計画調合	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容量 (kg/m <sup>3</sup> )	コンクリ ート温度	ブリージング (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> ) 量
スランプ 8cm	5.5	4.8	2329	14.0	0.153
スランプ 18cm	18.5	4.8	2311	14.0	0.244
スランプ 21cm	21.2	4.8	2306	14.0	0.320

表-3 まだ固まらないコンクリートの性質 (シリーズ1)

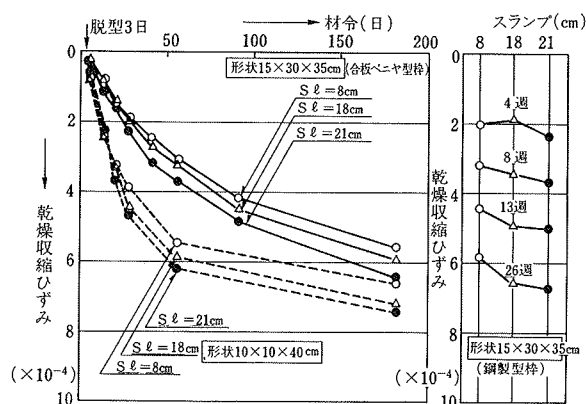
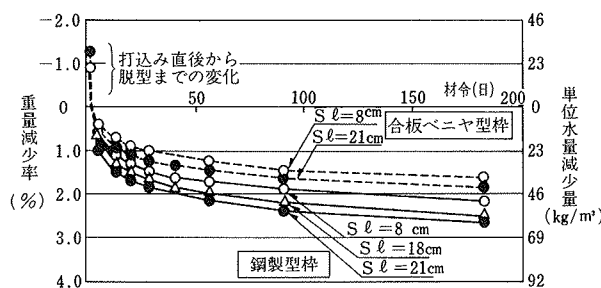


図-1 乾燥収縮ひずみの経時的な動き (シリーズ1)



注) 脱型直後を基準としている。

図-2 重量減少率の動き (シリーズ1)

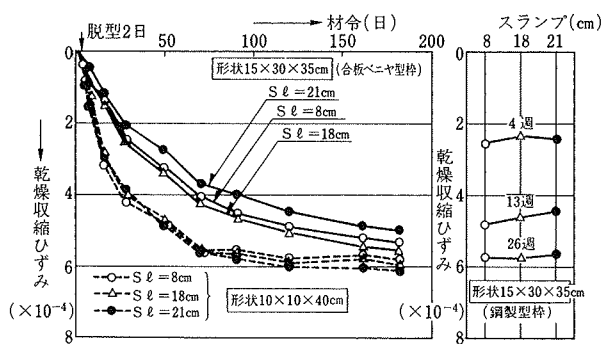


図-3 コンクリート収縮試験結果 (シリーズ 2)

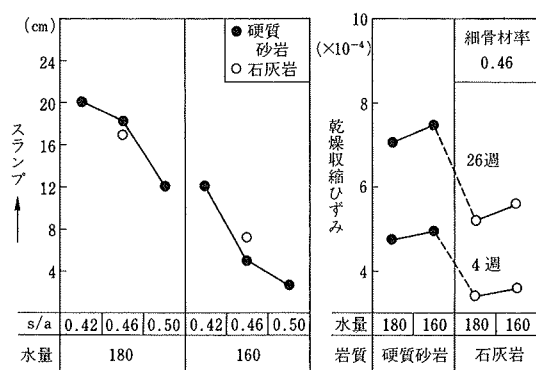


図-4 スランブと収縮に及ぼす水量・岩質の影響 (シリーズ 3)

### 2.2. 細骨材率・粗骨材岩質の影響 (シリーズ 3)

(1) 実験計画 細骨材率の影響を調べるため、単位水量と細骨材率を変えたコンクリート (6水準) についての乾燥収縮試験を行なった(表-4 参照)。また、粗骨材に石灰岩碎石を使用したコンクリートの収縮が少ないことが文献で指摘されている<sup>3)</sup>ことから、硬質砂岩碎石の他に、石灰岩碎石 (2水準) についてもあわせて試験した。乾燥収縮試験体は、JIS A1129 に準じた。それぞれの骨材試験の結果は、表-2 に示すとおりである。水セメント比はすべて 60%とした。スランブ試験結果を図-4 に示す。細骨材率が増えるに従いスランブは小さくなる。なお、空気量は 3.5~5.4%の範囲であった。脱型は材令 1日に行なった。

(2) 実験結果 6箇月までの乾燥収縮を表-4、図-4 に示す。この結果、細骨材率・単位水量とも収縮変形への影響は明瞭ではなかった。またこのシリーズで単位水量の少ない方が収縮は大きい傾向にあったが、この理由は不明である。

一方、石灰岩は明らかに収縮変形は少ないことが認められる。その割合は、硬質砂岩の0.70~0.75とかなり小さい。

番号	実験因子			乾燥収縮率 (×10 <sup>-6</sup> )				重量変化率* (%)			
	岩質	単位水量	細骨材率	4 W	8 W	13W	26W	4 W	8 W	13W	26W
1	硬質砂岩	180	0.42	490	627	681	747	2.95	3.05	3.06	3.06
2			0.46	471	617	652	700	2.80	2.91	2.91	2.93
3			0.50	472	628	674	727	2.92	3.04	3.08	3.12
4	石灰岩	160	0.42	482	646	666	726	2.45	2.55	2.60	2.62
5			0.46	493	639	681	746	2.65	2.77	2.83	2.85
6			0.50	492	634	674	722	2.75	2.88	2.93	2.98
7	石灰岩	180	0.46	340	439	482	520	2.68	2.79	2.84	2.88
8		160	0.46	357	472	520	560	2.59	2.70	2.76	2.83

\* 脱型後からの変化量。脱型は 1日。

表-4 コンクリート収縮試験結果 (シリーズ 3)

調合計画 種類	空気量 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位容積重量 (kg/m <sup>3</sup> )	コンクリート 温度 (°C)
①	2.0	12.5	2.2	2377	24.5
②	4.0	15.7	4.1	2337	25.0
③	6.0	19.2	6.0	2289	25.0

表-5 まだ固まらないコンクリートの性質 (シリーズ 4)

### 2.3. 空気量の影響 (シリーズ 4)

(1) 実験計画 空気量 (または単位容積重量) の影響度を調べるため比較試験を行なった。その調合は、AE 剤の添加量を変え、空気量を 2%, 4%, 6%の 3水準にただただ、他は表-1 の B 調合とほぼ同じ条件である (ただし細骨材率0.44)。まだ固まらないコンクリートの性質を表-5 に示す。空気量が多いほどスランブは大きくなっている。試験体は 10×10×40 cm 各 3本とした。

(2) 実験結果 材令 6箇月での乾燥収縮を図-5 に△印で示す。この図は縦軸を乾燥収縮、横軸を単位容積重量として表したもので、シリーズ 1~3の結果も併せて示した。シリーズ 4では、空気量が 2%の場合、他のせいぜい 9割程度の収縮率であった。他のシリーズを考えても収縮と空気量 (単位容積重量) は関係があるがそれほど大きくはないように思われる。

### 2.4. 一連の乾燥収縮試験の考察

シリーズ 1~4 および後述するシリーズ 5 の 6箇月での収縮量と単位水量の関係を整理して図-6 に示す。

- 今回の一連の実験から次のような結果が得られた。
- 単位水量が少ないと収縮も小さくなる傾向にあるが、その度合いは、水量 30l/m<sup>3</sup>の違いでも最大 15%減である。しかしその再現性はあまり無い。
  - 水量が大きいとブリージングはかなり増加する。
  - 空気量が少ないと収縮も若干小さくなる。
  - 細骨材率の影響はあまり明らかではなかった。
  - 石灰岩碎石を使用すると、硬質砂岩碎石よりも収縮が

No.	W/C	スランブ(cm)	s/a	W	C	S	G	粗骨材
1		21	0.47	180	308	844	949	硬質砂岩
2	58%	8(流動化後15)	0.43	150	256	823	1092	硬質砂岩
3		21	0.47	180	308	844	949	石灰岩

表-6 コンクリートの調合計画 (拘束実験)

No.	試験体 1	2	3	4	5	平均
1	43	26	23	19	35	29.2
2	25	42	27	26	36	31.2
3	発生なし	発生なし	25	発生なし	23	—

発生なし：材令91日時点でひびわれのないもの

表-7 ひびわれ発生材令 (拘束実験)

25%程度も少なく、その影響は大きかった。

### 3. 拘束ひびわれ実験 (シリーズ 5)

石灰岩碎石の場合、収縮が小さくなるのが分かったが、拘束ひびわれ性状の面での有効性についても確認する実験を行なった。

#### 3.1. 実験計画

拘束試験体形状は図-7に示すがこれは、“コンクリートのひびわれ試験方法 (案)”<sup>4)</sup> に準じている。コンクリート断面 100 cm<sup>2</sup> に対して鋼材断面 3.97 cm<sup>2</sup>/本の拘束である。コンクリートの調合は、表-6に示す単位水量と粗骨材の岩質を因子とした3種類である。試験体は、各コンクリートごとにそれぞれ5本一組の拘束試験体と自由収縮試験体 (10×10×40 cm) 3本一組を製作した。試験は恒温恒湿室で行ない、材令6日まで湿布養生した後、乾燥を開始した。

#### 3.2. 実験結果

各調合での自由収縮を図-8に示す。ほぼ前述した実験と同じ傾向が見られた。拘束試験体のひびわれ発生日数を表-7に示す。同じコンクリートでもかなりのバラツキを生じているが、その平均値は調合 No.1(硬練り砂岩)、No.2(軟練り砂岩)それぞれ29日、31日でありあまり差がなかった。一方調合 No.3(軟練り石灰岩)の場合、5本のうち3本は91日でもひびわれの発生はなく、ひびわれ対策の面からも優れていることが確認された。

### 4. 石灰岩碎石の性状に関する一考察

石灰岩碎石を用いたコンクリートは収縮が少ないことが確認されたが、この理由として①モルタルとの付着(界面強度)が良いこと、②骨材の収縮が小さいこと、が考えられる。今回、この点について若干の検討を行なった。

#### 4.1. 原石とモルタルとの付着試験

それぞれの原石より φ100×100のコア供試体を抜取

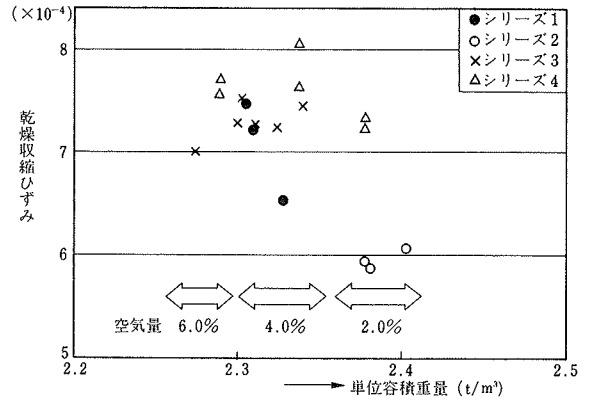


図-5 収縮と単位容積重量の関係

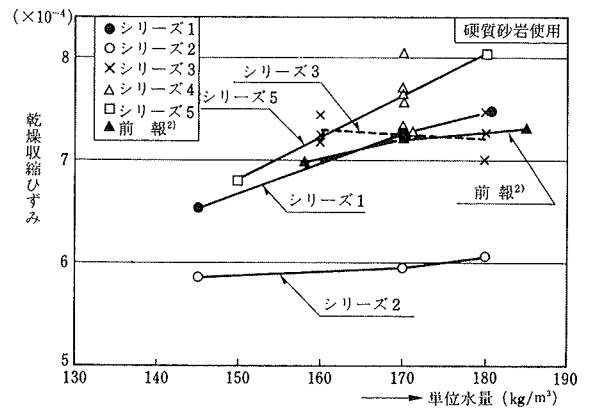


図-6 収縮と単位水量の関係

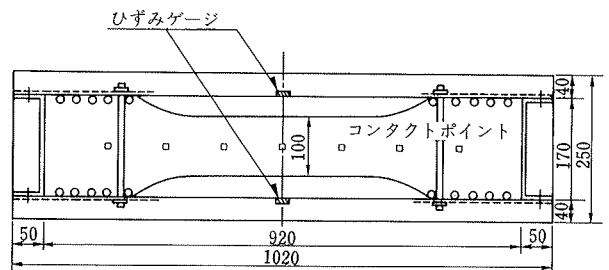


図-7 拘束ひびわれ実験 試験体形状

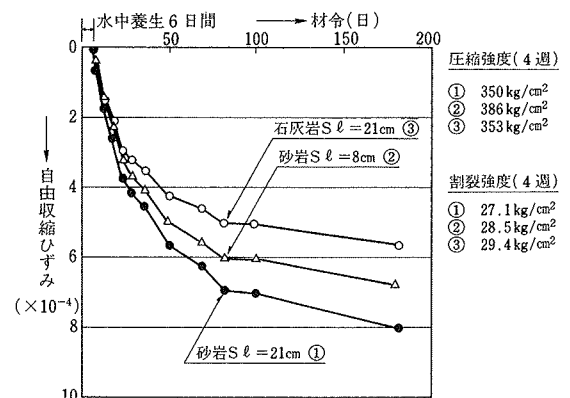
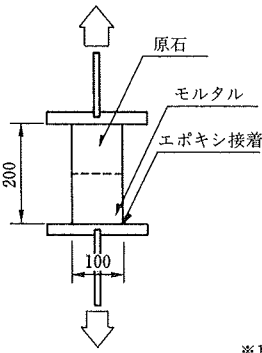


図-8 自由収縮ひずみの動き (拘束実験)



岩質	No.	付着強度	
		kg/cm <sup>2</sup>	平均値
硬質砂岩	1	1.65	1.69
	2	1.72	
	3	—*1	
石灰岩	1	2.54	2.80
	2	2.68	
	3	3.18	

※1. 石の割れ目で破断

図-9 石とモルタルの付着強度試験

り3本ずつ成型したものをモールド(φ100×200)の中に入れ、残りの部分にモルタル(W/C=65, S/C=3.3)を流し込んだ。試験4週まで湿潤養生し、図-9のような純引張りによる付着強度試験を行なった。なおモルタルとの界面は研磨して平滑に仕上げている。その結果を同図中に示す。石灰岩の方が付着力はあるようであるが、いずれもその付着強度は2 kg/cm<sup>2</sup>前後と小さい。

#### 4.2. 原石の乾燥収縮試験

原石の乾燥収縮に関する実験は、馬場らの報告<sup>5)</sup>などにわずかに見られる。これによれば、原石の種類によってはかなりの乾燥収縮を生じるようである。

φ100×200の原石のコア供試体にコンタクトゲージを貼り、乾湿を繰り返し行なった時の収縮の動きを図-10に示す。石灰岩はほとんど変化しないのに対し、硬質砂岩は膨張・収縮の変化が大きく、2～5×10<sup>-4</sup>の変動をもつという結果であった。なお重量変化は両者ともほとんど見られなかった。

#### 4.3. 原石の鉱物分析

岩石の収縮量の違いには、構成鉱物などの微視的な性質が大きく関与している可能性があるため、両者の岩石について鉱物分析を行なった。その結果、石灰岩は方解石の結晶同士の結合によって生成しているが、硬質砂岩は石英、長石を主要鉱物とし、その間を雲母、粘土鉱物、有機物などの体積変化の可能性をもつ鉱物によって結合されていることが確認された。このような含有鉱物および結合状態の違いが乾燥収縮の違いに関与しているのではないと思われる。

以上の結果から、石灰岩碎石の収縮が小さくなる理由はおもに原石の収縮の違いによると判断された。

### 5. まとめ

鉄筋コンクリート構造物のひびわれの主要な原因であ

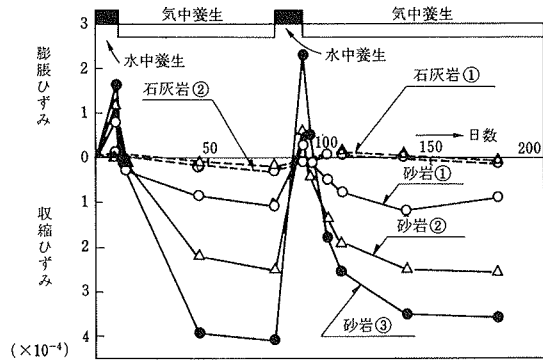


図-10 石灰岩と硬質砂岩の乾燥収縮

るコンクリートの乾燥収縮量に着目し、それに影響すると思われる種々の要因について一連の実験を行なった。その結果を以下に箇条書に示す。

(1) 粗骨材として石灰岩碎石を用いると硬質砂岩に比べて収縮量が25～30%小さくなった。

(2) 単位水量を145～180 l/m<sup>3</sup>まで変えた比較では、水量が多いほど収縮が大きい傾向にあるが、多い場合でも1×10<sup>-4</sup>程度のひずみ差、比率にして15%近い収縮差であった。空気量の収縮への影響も若干認められた。

(3) 拘束ひびわれ実験の結果、石灰岩碎石はひびわれ抑制の面でも優れていることが確認された。

(4) 外壁ひびわれをコンクリート材料、調合の面から制御する場合の対策として、単位水量を減らして乾燥収縮、ブリージングを少なくするように心がける他、適切な骨材の選定や空気量の十分な管理も望まれる。

#### 参考文献

- 1) 細骨材の品質がコンクリートの諸性質におよぼす影響コンクリート専門委員会報告F-32, セメント協会, (昭56. 3)
- 2) 武田寿一, 中根淳, 小柳光生, 増田安彦: 鉄筋コンクリート外壁のひびわれに関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 36 (1988), pp.115～119
- 3) Troxell, Raphael, and Davis: Long-time Creep and Shrinkage Tests of Plain and Reinforced Concrete, Proceedings, ASTM, Vol. 58,(1958), p. 1110
- 4) コンクリートのひびわれ試験方法(案), コンクリート工学, Vol. 23, (1985. 3), p.50
- 5) 岸谷孝一, 馬場明生: 建築材料の乾燥収縮機構, セメントコンクリート, No. 346, (1975. 12), p.36