

# 論文 温度・湿度変化による乾燥を受けたコンクリートの割裂引張強度に関する検討

伊藤 充希\*1・篠野 宏\*1・丸山 一平\*2

**要旨**：本研究では、温度・湿度変化による乾燥を受けたコンクリートの割裂引張強度が変化する要因を明らかにすることを目的とした。微細ひび割れの程度を数値化するために Gap strain と呼ぶ新たな指標を定義し、微細ひび割れの程度が、割裂引張強度に及ぼす影響について定性的検討を行った。その結果、湿度乾燥においては、セメントペースト強度の増加がコンクリートの割裂引張強度に大きな影響を及ぼし、高温乾燥においては、微細ひび割れの増加がコンクリートの割裂引張強度の低下要因となることが確認された。

**キーワード**：割裂引張強度、微細ひび割れ、コンクリート、モルタル、乾燥、骨材種類

## 1. はじめに

近年、新規建設に係る環境負荷低減の観点から既存構造物の長寿命化が求められている。その際、既存構造物に対して適切な構造性能評価を行い、その結果に基づいて維持管理することが重要である。しかし、性能評価の際に指標として用いられているのは中性化深さやひび割れ幅など、数多く存在するコンクリートの物性変化の結果として顕在化する劣化現象の一部であり、長期供用中に生じるコンクリートの構造性能変化を適切に反映しているとは言えない。例えば、一般的には引張強度は圧縮強度の1/10~1/13程度として扱われているが、引張強度と圧縮強度は乾燥などの要因によって、異なる挙動を示すとの報告もある<sup>1), 2)</sup>。

コンクリートは、セメントペーストと骨材からなる多相材料であり、コンクリートの強度に与える内部要因としては、セメントペーストと骨材のそれぞれの物性変化の影響と、セメントペーストと骨材両者の相互作用の影響が考えられる。本検討では、その中でも温度・湿度変化による乾燥に伴うセメントペーストの物性変化がコンクリートの割裂引張強度に与える影響と、セメントペーストと骨材の相互作用が与える影響について定量的に分離して検討を行うこととした。

セメントペーストと骨材の相互作用による現象として、近年微細ひび割れの研究が進められている<sup>たとえば3), 4)</sup>。微細ひび割れとは、目視では確認できない微細なひび割れで、これはコンクリートが乾燥する際に、粗骨材の乾燥収縮ひずみがセメントペーストの乾燥収縮ひずみよりも小さいことから、セメントペーストの収縮が粗骨材に拘束されることによって、粗骨材まわりに生じる。著者らのグループにおいて、コンクリートに、乾燥収縮ひずみが小さく、かつ剛性の高い粗骨材を用いた場合には、粗

骨材によるセメントペーストの乾燥収縮ひずみに及ぼす拘束効果が高くなり、より多くの微細ひび割れが生じることが明らかにされている<sup>3)</sup>。閑田ら<sup>4)</sup>は、このような微細ひび割れが割裂引張強度の低下を生じさせることを指摘しているが、未解明な点が多い。

そこで本検討では、乾燥収縮ひずみが大きく異なる石灰岩と砂岩の粗骨材を使用したコンクリートとモルタルを作製し、さまざまな温度・湿度環境下で乾燥後、割裂引張試験を行い、乾燥によって生じるセメントペーストの物性変化と粗骨材まわりに生じる微細ひび割れが、コンクリートの割裂引張強度に与える影響に着目して検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料及び調合

表-1 使用材料

材料	記号	物理的性質など
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16g/cm <sup>3</sup> , プレーン値: 3230cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S	大井川水系産陸砂, 表乾密度: 2.59g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 2.08%
粗骨材	GLS	石灰岩碎石, 表乾密度: 2.64 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.36%
	GSS	硬質砂岩碎石, 表乾密度: 2.64 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.89%
AE 減水剤	AE	AE 減水剤標準形 I 種
増粘剤	AS	セルロース系水溶性高分子化合物

\*1 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 (学生会員)

\*2 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

表-2 セメント物性と化学成分(mass%)

LOI	化学成分									合計
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>	
2.3	20.04	5.21	2.87	64.9	1.46	2.21	0.14	0.34	0.019	99.489

表-3 コンクリートの調合及びフレッシュ性状試験の結果

	調合									スランプ (cm)	空気量 (%)	練上がり 温度(°C)
	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )									
			W	C	S	GLS	GSS	AE	AS			
Mortar	55	—	271	492	1432	—	—	4.9	2.0	23	4.9	21
LS	55	51.8	177	322	940	909	—	3.2	1.3	10.0	3.0	21
SS	55	51.8	177	322	940	—	892	3.2	1.3	9.0	2.6	21

本実験で使用した材料を表-1, 使用したセメントの物性と化学成分を表-2, 使用したモルタルとコンクリートの調合及びフレッシュ性状試験の結果を表-3 へ示す。

2.2 試験体の作製

コンクリートの粗骨材には、図-1 に示したように、乾燥収縮ひずみの性状が異なる石灰岩碎石(GLS)と硬質砂岩碎石(GSS)を使用した。図-1 及び図-3 から図-8 において、図中のプロットはそのパラメーターの平均値を示し、上下のバーは標準誤差を示す。それぞれの粗骨材の粒径を5~10mm, 10~15mm, 15~20mm に調整し、この3種類を重量で等分に混ぜたものをコンクリートに添加した。粗骨材種類の異なる2種類のコンクリートと、モルタルをφ100×200mmの型枠に打設し、その後、材齢1日または2日に脱型を行った。試験開始まで飽和水酸化カルシウム水溶液中で20°C±1°Cの一定条件の下で標準水中養生を行った。この時、飽和水酸化カルシウム溶液を用いたのは、試験体からのカルシウムの溶脱を防ぐためである。試験体はφ100×200mmのモルタル及びコンクリート試験体をダイヤモンドカッターで厚さ9mmに切断し、φ100×9mmとしたものを用いた。また、乾燥条件は飽水, 95%RH, 80%RH, 60%RH, 43%RH, 11%RH, 40°C, 65°C, 90°Cの計9種類であり、粗骨材有無・種類と合わせて計27種類のパラメーターとした。試験体名は、石灰岩碎石を用いたコンクリートをLS, 硬質砂岩碎石を用いたコンクリートをSSと表記する。試験体数については、LSの高温乾燥試験体とSS試験体、モルタル試験体は1パラメーターにつき5体であり、LS湿度乾燥試験体については1パラメーターにつき3体とした。

2.3 実験の手順

実験の手順を図-2 に示す。試験体作製後、試験開始

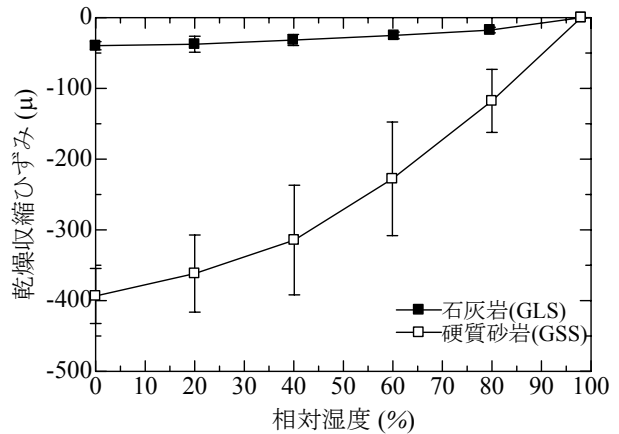


図-1 粗骨材の乾燥収縮ひずみと相対湿度の関係

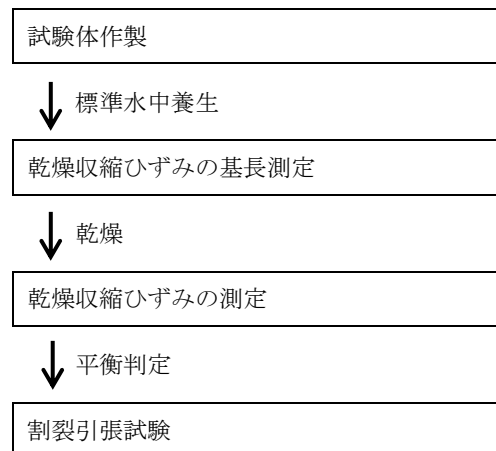


図-2 実験の手順

まで標準水中養生を行った。飽水状態で長さ測定を行い、乾燥収縮ひずみの基長を得た後、所定の湿度及び温度で乾燥させた。24時間の試験体の質量変化が0.03%以下となった時点で平衡状態に達したと判断し、乾燥終了とした。乾燥終了後、再び長さ測定を行い、乾燥収縮ひずみを得た。最後に割裂引張試験を行い、割裂引張強度の測定を行った。

φ100×9mm という寸法の試験体で割裂引張試験を行にあたって、寸法効果による強度変化の影響が考えられるため、3.1節に示す内容で別途検討を行った。

## 2.4 乾燥収縮ひずみの測定

乾燥前後の試験体の長さ変化を、レーザー変位計(精度：1/2000mm)を用いて測定した。乾燥収縮ひずみ測定時の試験体温度は20℃である。高温乾燥後の試験体は、乾燥終了後アルミバックに入れて封緘状態とし、それを20℃恒温室に入れて約3時間後に測定を行った。長さが既知のステンレス鋼を用意し、試験体との長さの差によって試験体の長さを求め、乾燥収縮ひずみを算出した。なお、ステンレス鋼は温度によって長さが増えるため、測定中の室内温度も合わせて測定し、線膨張係数を用いて補正を行った。ステンレス鋼の線膨張係数は実測した $17 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とした。また、一つの試験体につき3か所の直径を測定し、その平均値をもってその試験体の乾燥収縮ひずみとした。

## 2.5 割裂引張試験

前節に示した所定の条件で乾燥、長さ測定を行った後、同じ試験体で載荷装置を用いて割裂引張試験を行った。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 供試体寸法が実験結果に及ぼす影響に関する検討

通常のコングリートの割裂引張試験では、φ100×200mmの試験体を用いるが、本研究では、φ100×200mmを切断したφ100×9mmの円板状の試験体を使用している。そこで、供試体寸法が実験結果に及ぼす影響についての検討を併せて行った。

コンクリートの強度における寸法効果については、代表的なものとして、破壊力学の観点から評価したもの<sup>5)</sup>や、骨材寸法の観点から評価したもの<sup>6)</sup>などがあり、多くの研究がなされてきた。

特に、割裂引張試験における寸法効果については、長谷川ら<sup>7)</sup>は、試験体長さによる寸法効果は認められないが、試験体の直径が50cm以下の範囲では、応力分布性状や、破壊モードに変化が起こり、寸法効果によって割裂引張強度が減少すると報告している。また、榊原ら<sup>8)</sup>は、割裂引張強度の平均値はほぼ同等であるが、割裂断面面積が大きくなった場合には、標準偏差が小さくなると報告している。さらに、田中ら<sup>9)</sup>は、試験体の直径が

500mm以上では材料の非均質性に起因する寸法効果が認められ、直径が200mm以下の場合には破壊エネルギーに起因する寸法効果が起こると報告している。以上のように、寸法効果が割裂引張強度に与える影響については、統一的な見解がなされておらず、さらには今回用いる試験体のように長さ9mm程度で実験を行っている例は見られない。そこで、φ100×9mmの試験体を用いた場合の寸法効果について、併せて評価を行うために、次に示されるように実験条件の設定を行った。

寸法効果の影響を検討するために、本研究で用いるφ100×9mmの試験体のほかに、φ100×150mm、φ100×100mm、φ100×50mmの計4種類の大きさの試験体について、割裂引張試験を行った。試験体には、石灰岩碎石の粒径が15~20mmものを粗骨材として使用し、調合は表-3中のLSと同じとした。乾燥は行わず、飽水状態で各寸法につき3体載荷を行った。

各寸法の試験体の割裂引張試験の結果を図-3に示す。

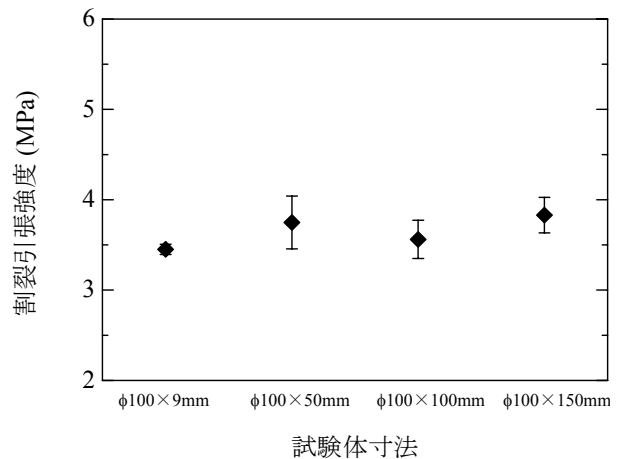


図-3 試験体寸法と割裂引張強度の関係

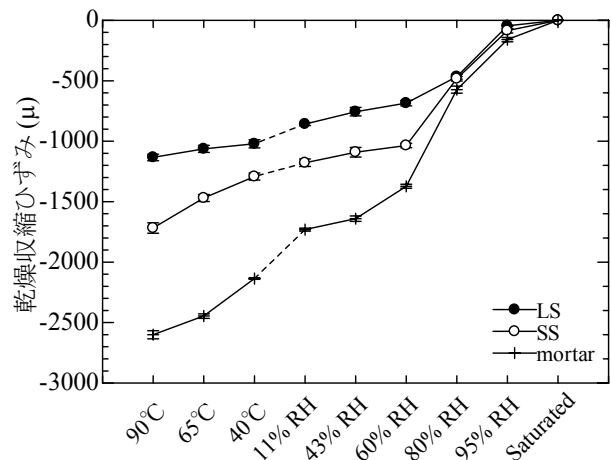


図-4 乾燥収縮ひずみと乾燥条件の関係

全体としては、試験体寸法と割裂引張強度との間には相関関係が無く、試験体寸法が  $\phi 100 \times 9\text{mm}$  においても、割裂引張強度を評価することが可能であると推測される。

### 3.2 コンクリート・モルタルの乾燥収縮ひずみについて

図-4にLS, SS, モルタル試験体の乾燥収縮ひずみと乾燥条件の関係を示す。各乾燥条件において、SSの乾燥収縮ひずみのほうが、LSの乾燥収縮ひずみよりも大きいという結果になった。図-1で示したように、各相対湿度における乾燥収縮ひずみは粗骨材SSのほうが大きい。このことは、粗骨材の乾燥収縮ひずみが、コンクリートの乾燥収縮ひずみに影響を及ぼすという既往の研究<sup>10)</sup>と一致した。

### 3.3 コンクリート・モルタルの割裂引張強度について

#### (1) セメントペーストの強度変化の観点からの考察

図-5に各試験体の割裂引張強度と乾燥条件の関係、図-6に各試験体の強度比と乾燥条件の関係を示した。ここで、強度比とは飽水状態の試験体の割裂引張強度の平均値に対する、各乾燥条件の試験体の割裂引張強度の平均値の比である。モルタルについては、飽水から60%RHまで割裂引張強度が増加し、60%RHから43%RHにかけては減少、43%RHから11%RHにかけては再び増加して、11%RHにおける割裂引張強度が最大となった。この強度変化の傾向を、セメントペーストの強度変化から考察を行う。

単材料であるセメントペーストの曲げ試験においては、セメントペーストの引張強度によって曲げ強度が決まる。そこで、セメントペーストの曲げ強度と引張強度は同じ傾向を示すと判断し、コンクリート及びモルタルの割裂引張強度について、セメントペーストの曲げ強度からの考察を行う。図-7に示したセメントペーストの曲げ強度<sup>11)</sup>と比較すると、80%RHから60%RHでの挙動はセメントペーストの強度変化とは異なるものの、60%RHから11%RHでは似た傾向を示し、11%RHで割裂引張強度が最大値を取ることから、湿度乾燥領域においては、モルタルの割裂引張強度には、ベースとなっているセメントペーストの強度変化が大きな影響を与えると推測される。

LS試験体とSS試験体については、湿度乾燥領域において、両者とも、飽水から80%RHまでは割裂引張強度が増加し、その後43%RHまで減少、43%RHから11%RHにかけて再び増加するという結果が得られた。高温乾燥領域では、乾燥温度の上昇に伴って割裂引張強度が減少していった。湿度乾燥領域において、80%RHでLS・SS試験体の割裂引張強度が最大値を取るという点がセメントペーストの曲げ強度の変化<sup>11)</sup>とは異なる。しかし、各乾燥条件における、割裂引張強度の変化がセメントペーストの曲げ強度の変化と同様の傾向であることから、湿

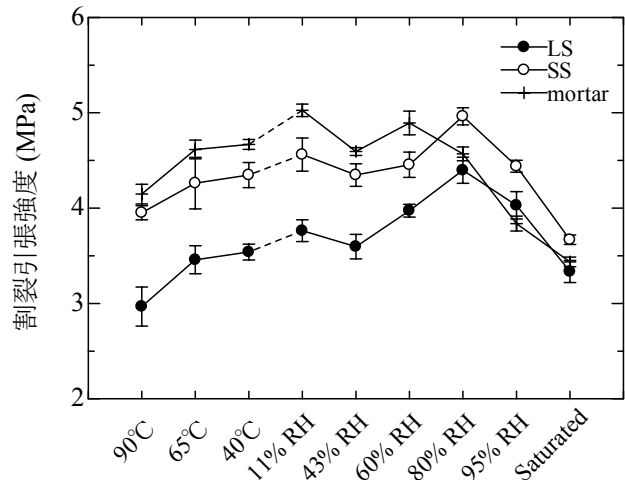


図-5 割裂引張強度と乾燥条件の関係

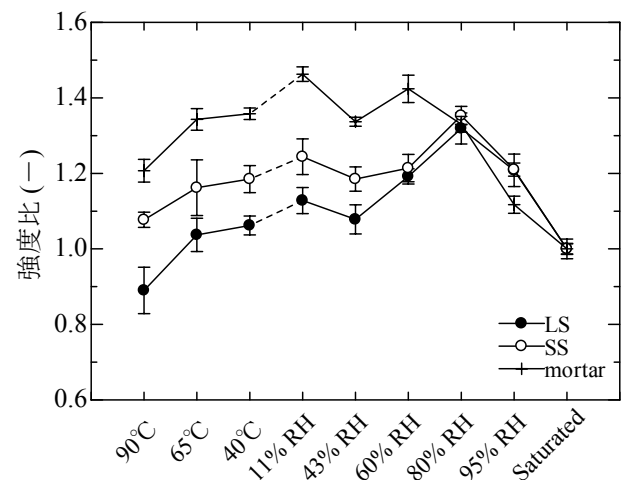


図-6 強度比と乾燥条件の関係

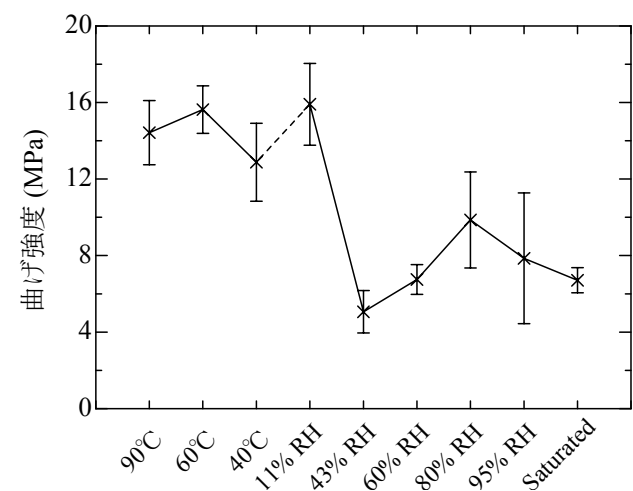


図-7 セメントペースト曲げ強度と乾燥条件の関係<sup>11)</sup>

度乾燥領域においては、コンクリートの割裂引張強度には、セメントペーストの強度変化が強く影響すると推測される。

高温乾燥領域において、LS・SS 試験体ともに減少傾向を示しており、セメントペーストの曲げ強度の変化とは異なる。よって、高温乾燥領域においては、別の要因が、セメントペーストの強度変化よりも強く影響し始めると推測される。このことに関しては、微細ひび割れの観点から考察を行う。

(2) 微細ひび割れの観点からの考察

粗骨材の拘束効果が高いほど、乾燥収縮ひずみが小さくなる<sup>10)</sup>ことと、微細ひび割れがより多く発生する<sup>3)</sup>という報告があることから、乾燥収縮ひずみから微細ひび割れの発生の程度を評価できると考え、Gap strainを定義して考察を行う。Gap strainは、同じ乾燥条件におけるコンクリート試験体の乾燥収縮ひずみとモルタル試験体の乾燥収縮ひずみとの差として定義する。Gap strainは、コンクリートにおいて、モルタルの収縮を、粗骨材がどれだけ拘束したかを表す指標であり、つまり、この値が大きいくほど、粗骨材がモルタルを強く拘束し、微細ひび割れがより多く発生していると推測される。

図-8にGap strainと乾燥条件の関係を示した。どの乾燥条件においてもLS試験体のほうがGap strainの値が大きく、SS試験体よりも微細ひび割れが多く発生していると推測される。図-9にはすべての乾燥条件における、強度比とGap strainの関係を、図-10には高温乾燥させた試験体の、強度比とGap strainの関係を示した。図-9より、全体的な傾向として、Gap strainの増加に伴って強度比が低下することが確認され、微細ひび割れが割裂引張強度の変化に影響を及ぼすと推測される。

セメントペーストの強度変化と異なる傾向を示すコンクリートの40°Cから90°Cの高温乾燥領域では、Gap strainの増加とともに強度低下が著しい。さらに、Gap strainが最大値をとるLS 90°Cの試験体において、割裂引張強度が最小値を取ることから、Gap strainが大きい領域では、微細ひび割れの影響がセメントペースト強度の影響よりも大きくなり、コンクリートの割裂引張強度の低下要因となるということが推測される。

5. まとめ

本研究では、温度・湿度変化により乾燥を受けたコンクリートの割裂引張強度の変化に関する検討を行い、以下の知見を得た。

- 1) モルタルの割裂引張強度については、飽水から11%RHにおいてはベースとなっているセメントペーストの影響が支配的となる。
- 2) 飽水から11%RHまでのコンクリートの割裂引張強

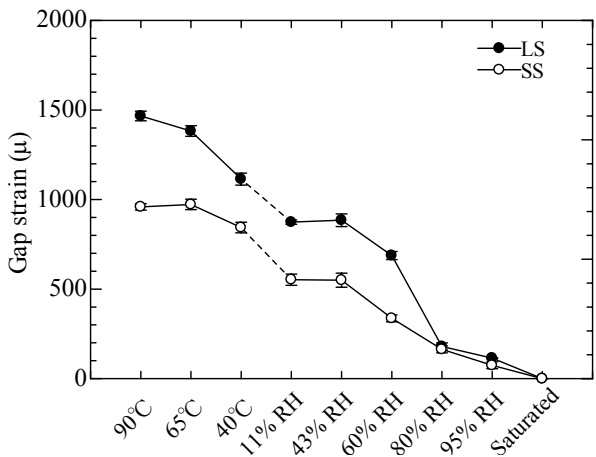


図-8 Gap strainと乾燥条件の関係

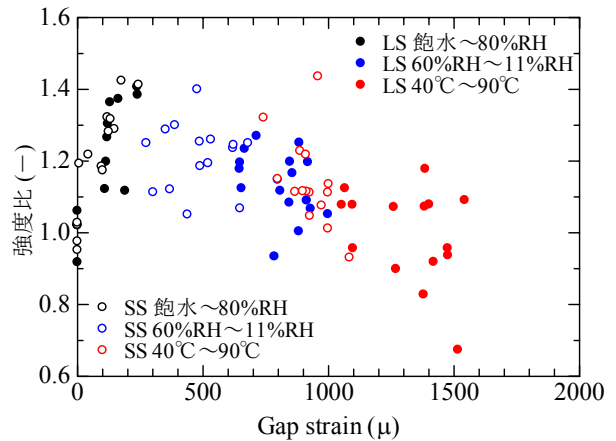


図-9 強度比とGap strainの関係 (全ての乾燥条件)

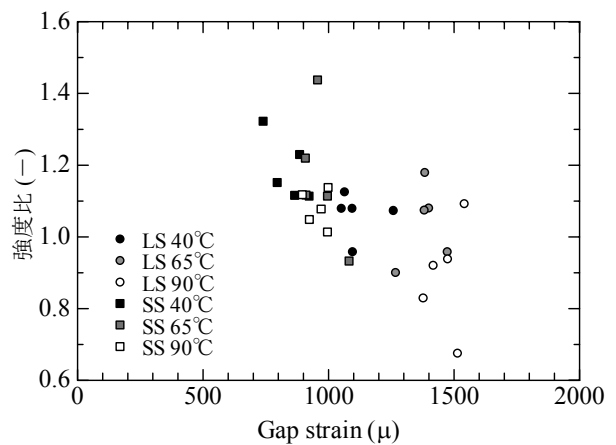


図-10 強度比とGap strainの関係 (高温乾燥のみ)

度には、セメントペーストの曲げ強度が支配的な影響を有する。

- 3) コンクリート試験体を高温で乾燥させた場合には、微細ひび割れの影響が顕著となり、コンクリートの割裂引張強度が低下したと推測される。

#### 参考文献

- 1) S.E. Pihlajavaara : A review of some of some of the main results of a research on the ageing phenomena of concrete: Effect of moisture conditions on strength, shrinkage and creep of mature concrete, *Cement and Concrete Reserch*, Vol.4, pp.761-771, 1974
- 2) J.A.Hanson : Effects of curing and drying environments on splitting tensile strength of concrete , *Journal of the American Concrete Institute*, Vol.65, pp.535-543, 1968.7
- 3) Ipei Maruyama, Hiroshi Sasano : Strain and crack distribution in concrete during drying, *M&S*, DOI 10.1617/10.1617/s11527-013-0076-7, 2013.4
- 4) 閑田徹志, 市川禎和, 紺谷修, 武田三弘, 大塚浩司 : 高温および低湿度環境下におけるコンクリート物性の変化と損傷の定量化に関する実験検討, *日本建築学会構造系論文集 No.615*, pp.15-22, 2007.5
- 5) Z. P. Bazant : Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal, *Journal of Structural Division, Proc. of ASCE*, pp.2473-2490, 1972
- 6) 谷川恭雄, 山田和夫 : コンクリートの圧縮強度の寸法効果について, *日本建築学会論文報告集*, 第 262 号, pp.13-21, 1977.12
- 7) 長谷川俊昭, 塩屋俊幸, 岡田武二 : コンクリートの割裂引張強度に関する寸法効果, *コンクリート工学年次論文報告集*, Vol.7, pp.309-312, 1985
- 8) 榊原泰造, 近松竜一, 十河茂幸 : 割裂引張強度の試験結果に及ぼす寸法効果の影響, 第 58 回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.419-420, 2003.9
- 9) 田中泰司, Joop. A. den Uiji : 確率論的解析手法による割裂引張強度の寸法効果に関する検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.30, No.3, pp.49-54, 2008.7
- 10) 後藤幸正, 藤原忠司 : コンクリートの乾燥収縮に及ぼす骨材の影響, *土木学会論文報告集*, 第 286 号, pp.125-137, 1979
- 11) 丸山一平, 西岡由紀子, 五十嵐豪 : 乾燥下におけるセメントペーストの物性変化 V. 強度およびヤング率の評価, 第 67 回セメント技術大会講演要旨, pp.234-235, 2013