

論文 実環境を考慮した乾湿繰り返しがコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響

相川 葉月^{*1}・千歩 修^{*2}・長谷川 拓哉^{*3}・酒井 正樹^{*4}

要旨: 本論文は高強度および一般的な強度の nonAE コンクリートを用い、実環境を想定した乾湿繰り返し（乾燥温度 20℃・40℃）後に凍結融解試験を行い、軽微な乾湿繰り返しがコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響を検討したものである。この結果、高強度コンクリートでは軽微な乾湿繰り返しでも耐凍害性が低下すること、耐凍害性の低下には初期の数サイクルの影響が大きいこと、乾湿繰り返し条件による耐凍害性の低下は、乾燥時の放出水量と関連が深いことが明らかになった。

キーワード: 乾湿繰り返し, 耐凍害性, 凍結融解, 吸水性状

1. はじめに

低水セメント比の non-AE コンクリートは、標準的な凍結融解試験で耐凍害性が高いと評価されたものでも、3日間の屋内放置または屋外暴露後に同じ凍結融解試験を行うと耐凍害性が大幅に低下するものがあることが報告されている¹⁾。実環境下では乾湿繰り返しによって微細なひび割れが生じ、耐凍害性が低下するもの²⁾と考えられる。

本研究では、高強度コンクリートと比較のための一般的な強度のコンクリートを用い、実環境を想定して乾燥温度・時間と水中浸漬時間を変えた乾湿繰り返しを行い、それらが耐凍害性

に及ぼす影響を検討したものである。

2. 実験概要

表-1に実験計画を示す。本実験は、水セメント比25%の高強度コンクリートと、水セメント比45%のコンクリートを用い、2週水中養生後に各種乾湿繰り返しを行い、下面吸水試験及び凍結融解試験を行ったものである。

乾湿繰り返し時の乾燥条件は表-1に示すように実環境を考慮した40℃及び20℃とし、湿潤時の条件は水中浸漬とした。また、乾湿繰り返し時に質量、長さ及び動弾性係数を測定したが、これについてはコンクリートだけでなく、コンクリートのモルタル部分と同じ調合のモルタル

表-1 実験計画

W/C [記号] (%)	目標 AIR (%)	標準 [S]	乾湿繰り返し条件[記号]							屋外暴露 [E]
			1cycle/2日							
			乾燥6h水中42h			乾燥42h水中6h				
			40℃ [w]		20℃ [l]	40℃ [d]				
			7c	7c	14c	1c	7c	14c	21c	
25 [2]	1	● * □ ◇ ☆	● △ ☆	● △	● △ ☆	● △	● △	● △	(● △ ☆)	(● △ ☆)
45 [4]	1	● * □ ◇ ☆	● △ ☆	● △	● △ ☆	● △	● △	● △	(● △ ☆)	(● △ ☆)

注) ● : 凍結融解試験 (JIS A1148 A法) * : 圧縮試験 □ : 気泡間隔係数の測定
 △ : 吸水試験 ◇ : コンクリート乾燥収縮試験 ☆ : モルタル乾湿繰り返し試験
 試験体記号を「W/C-目標空気量-乾湿繰り返し条件-サイクル数」で表す
 例: 2-1-w-7 (W/C25%, 目標空気量1%に, 乾燥6h (乾燥温度40℃) 水中42h を7c かけた)
 () 書きは論文範囲外を示す

*1 北海道大学 大学院工学研究科空間性能システム専攻 (正会員)
 *2 北海道大学 大学院工学研究科空間性能システム専攻 教授・工博 (正会員)
 *3 北海道大学 大学院工学研究科空間性能システム専攻 助教授・博 (工) (正会員)
 *4 北海道大学 大学院工学研究科空間性能システム専攻 (正会員)

表-2 調査表

W/C (%)	目標 AIR (%)	目標 スランプ (cm)	目標 フロー (cm)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤量 (c × %)
					水	セメント	細骨材	粗骨材	SP8S
25	1.0	—	60.0 × 60.0	41.0	175	700	634	931	1.25
45	1.0	18	—	48.8	185	411	846	931	0.70

表-3 コンクリートの基本性状

W/C (%)	実測 AIR (%)	実測 スランプ・フロー (cm)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	リニアトラバース	
					AIR (%)	気泡間隔係数(mm)
25	1.0	64.0 × 64.0	103.1	3.7 × 10 ⁴	0.67	0.56
45	1.2	23.0	50.9	3.1 × 10 ⁴	1.56	0.54



図-1 下面吸水試験

表-4 乾湿繰り返しコンクリート・モルタル結果

	コンクリート						モルタル					
	長さ変化率(μ)			質量変化率(%)			長さ変化率(μ)			質量変化率(%)		
	最小	最大	最大振れ幅	最小	最大	最大振れ幅	最小	最大	最大振れ幅	最小	最大	最大振れ幅
2-1-w	-43	57	100	-0.21	0.20	0.42	-277	-23	253	0.01	0.69	0.68
2-1-l	-343	0	343	-0.34	0.01	0.35	-348	-71	277	-0.49	0.19	0.68
2-1-d	-429	-157	271	-0.61	-0.05	0.56	-624	-306	318	-2.29	-1.30	0.99
4-1-w	-100	71	171	-0.69	0.08	0.77	-130	124	253	-0.94	0.06	1.00
4-1-l	-357	-157	200	-1.34	-0.28	1.06	-412	-118	295	-2.48	-0.94	1.54
4-1-d	-286	-100	186	-1.95	-0.57	1.38	-436	-218	218	-2.86	-0.78	2.07

についても同様に測定した。

コンクリートの調合を表-2に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材は常盤産砕石(絶乾密度2.59g/cm³)、細骨材は勇払産陸砂(絶乾密度2.58g/cm³)を使用した。

表-3に各調合のコンクリートの基本性状を示す。水セメント比25%は空気量が水セメント比45%に比べ少なくなっているが、気泡間隔係数はほぼ同じ値となっている。

凍結融解試験はJIS A 1148 A法(水中凍結水中融解試験法)に準じて行った。なお、乾湿繰り返しを行った試験体は2日間の水中浸漬後に凍結融解試験を開始した。また、吸水試験はRILEM CDC3-1993に従い、図-1に示すように下面吸水試験(14日間)を行い、体積含水率、初期吸水速度を求めた。その他、気泡間隔係数の測定(ASTM C-457-71, リニアトラバース法)、コンクリート・モルタルの圧縮試験(ヤング係数も測定)、コンクリートの乾燥収縮試験(質量、長さ、動弾性係数の測定)を行った。

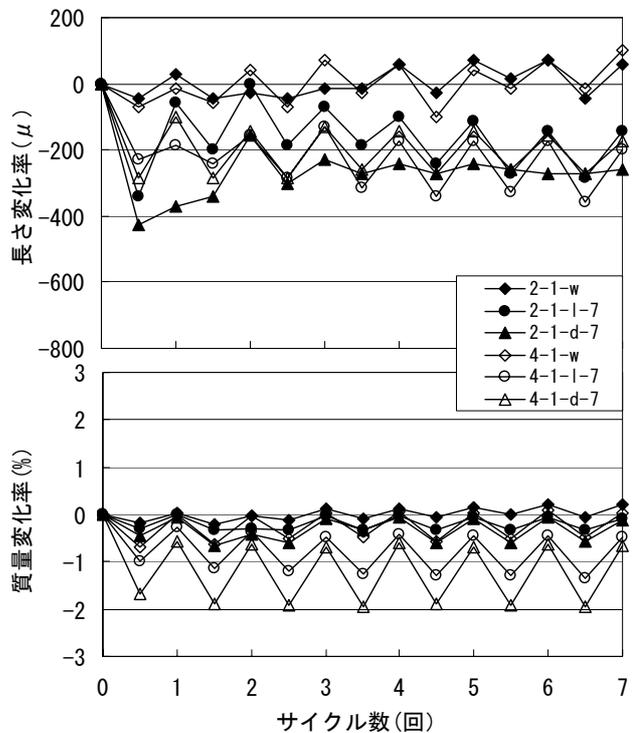


図-2 コンクリート乾湿繰り返し結果

3. 結果および考察

(1) 乾湿繰り返し結果

図-2 にコンクリート試験体の各乾湿繰り返しをおこなった際の長さ変化率・質量変化率を示す。質量変化率についてみると、水セメント比 25、45%ともに $w \geq 1 \geq d$ となっており、乾燥温度だけではなく、乾燥時間も影響していることがわかる。乾燥時間のほうが乾燥温度よりも劣化を与えらると思われる。

表-4 に乾湿繰り返しを行った際の、コンクリート・モルタルの長さ・質量変化率の最小値、最大値、最大振れ幅を示す。コンクリートに比べモルタル試験体のほうが、長さ変化率、質量変化率ともに最大振れ幅が大きいことがわかる。これは、コンクリートよりもモルタルの方が単位水量が大きいため、移動できる水分を多く含むためによるものと考えられる。また、条件wは40℃で乾燥しているが乾燥時間が6時間と短いため、1(20℃で42時間乾燥)よりも小さくなっている。

(2) 乾湿繰り返し回数が耐凍害性に及ぼす影響

図-3に条件d(40℃乾燥42h水中6h)の凍結融解試験結果を示す。ここでは乾湿繰り返し回数の影響を検討する。

水セメント比25%では、乾湿繰り返し1サイクルでも耐凍害性の低下が見られ、7及び14サイクルでは更に耐凍害性が低下している。高強度コンクリートの耐凍害性には乾湿繰り返しが大きく影響することがわかる。

水セメント比45%では、乾湿繰り返しを行った試験体はいずれも、乾湿繰り返しを行わなかった試験体よりも耐凍害性が増加した。軽微な乾燥を受けると耐凍害性が増加する³⁾という報告があるが、乾湿繰り返しについても同様のメカニズムが作用しているものと思われる。また、乾湿繰り返し1サイクルに比べて7及び14サイクルでは耐凍害性が低下しており、乾湿繰り返し回数は耐凍害性の低下に影響すると考えられる。

水セメント比 25%、水セメント比 45%は、共に乾湿繰り返し7サイクルと14サイクルの耐凍害

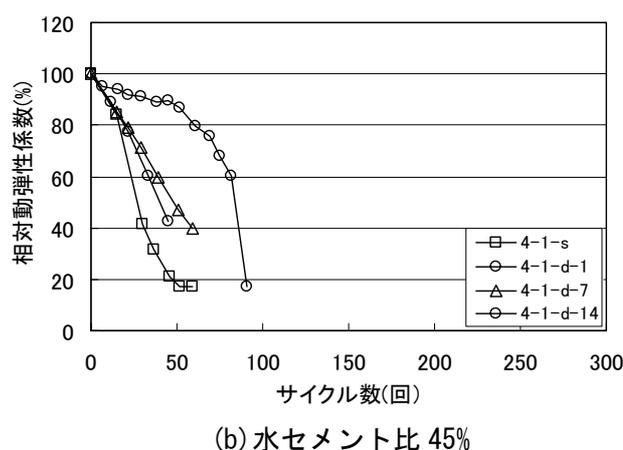
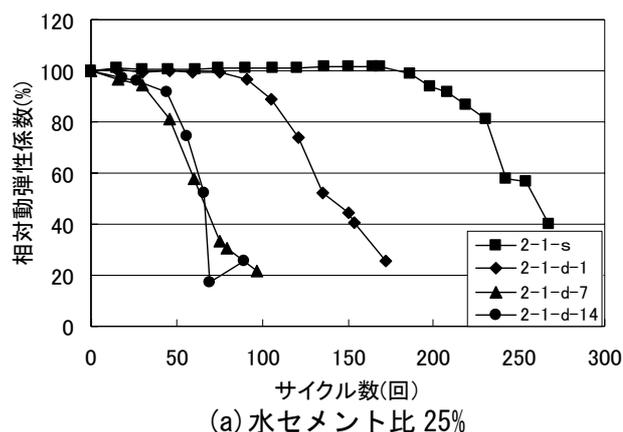


図-3 各種乾湿繰り返し回数の影響

性の変化は小さく、コンクリートの耐凍害性には初期の数サイクルの乾湿繰り返しの影響が大きいものと考えられる。

また、同じ条件で比較すると、水セメント比25%の高強度コンクリートは、水セメント比45%のものに比べ緩やかに低下している。これは、水セメント比25%の高強度コンクリートは組織が緻密なため、内部までの水分浸透の速度が緩やかであると推察できる。

(3) 乾湿繰り返し条件が耐凍害性に及ぼす影響

図-4に乾湿繰り返し条件w,d,l(全て7サイクル)及びS(標準)の凍結融解試験結果を示す。水セメント比25%では、耐凍害性は $S \approx w > 1 > d$ となっている。条件wは乾燥温度が40℃であるが、乾燥時間が6時間と短く、条件lは乾燥温度が20℃であるが、乾燥時間が42時間と長くなっており、耐凍害性には乾燥の最高温度ではなく、乾燥程度が影響するものと思われる。

条件1は乾燥による含水率の変化が小さく、乾燥程度が弱いことで、ひび割れの発生が少なく、耐凍害性が低下しないものと考えられる。また、条件 d では乾燥程度が強く、乾燥によりひび割れが生じ耐凍害性が低下したと考えられる。

水セメント比 45%では、耐凍害性は $S < d < w < 1$ となっている。水セメント比 45%のコンクリートでは、乾燥温度が低く、乾燥時間が短いもののほど、耐凍害性が向上している。耐凍害性を向上させた要因としては、乾燥によりコンクリート内部の毛細管が気泡の役割をしていることが考えられる。

(4) 放出水量と耐凍害性

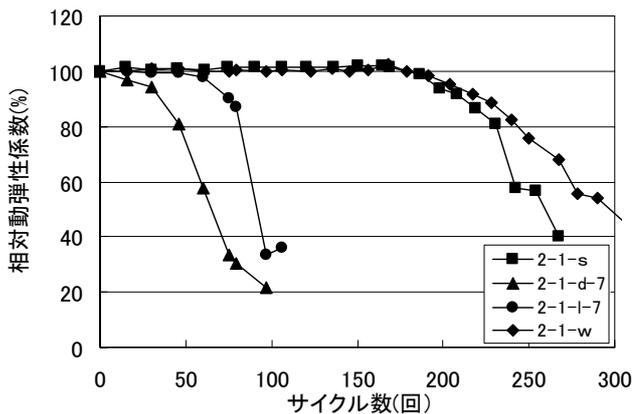
放出水量を、乾湿繰り返しによるひび割れを示す指標として、検討した。乾湿繰り返しによる乾燥の程度を乾湿繰り返し時の各サイクルの平均的な値と考え、式(1)を用い放出水量を算定した。

$$D = \frac{W - W_0}{\rho \cdot V} \times 100 \quad (1)$$

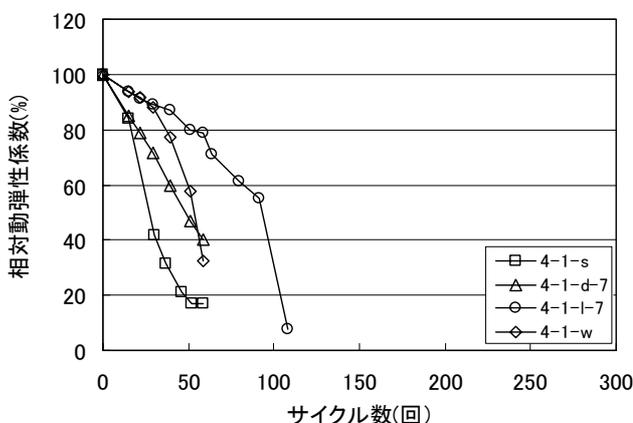
W_0 : 基準質量(g) V : 試験体体積(cm^3)

W : 測定質量(g) ρ : 水の密度(g/cm^3)=1

図-5に乾湿繰り返し乾燥過程1サイクルの最大の放出水量と耐久性指数の関係を示す。水セメント比 25%の高強度コンクリートでは、放出水量は 0.5~2(体積%)と小さいが、放出水量が大きいほど耐凍害性が低下している。また、放出水量が少なくても耐凍害性が低いのは、乾燥による微細ひび割れが生じているものと考えられる。水セメント比 45%のコンクリートでは、放出水量が 3~5(体積%)と高強度コンクリートに比べて大きく、放出水量が大きいほど耐久性指数が小さくなる傾向がある。既往の研究³⁾では、放出水量が 4~6(体積%)までの乾燥は耐凍害性を向上させるとの報告があるが、図-5の耐凍害性低下の傾向をみると、放出水量 4%程度でも耐凍害性が低下している。しかし、乾燥を受けないコンクリート (s) の耐久性指数も小さいこと



(a) 水セメント比 25%



(b) 水セメント比 45%

図-4 各種乾湿繰り返し条件の影響

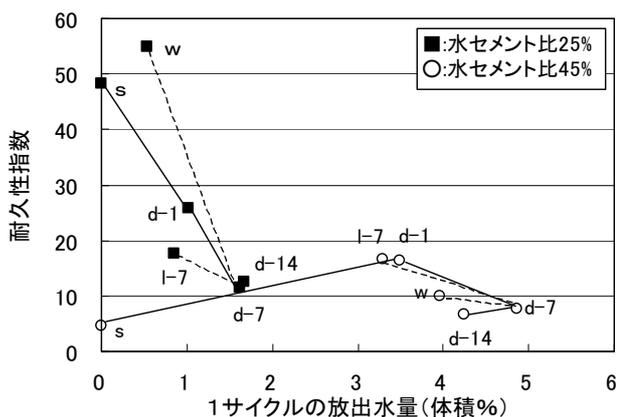


図-5 乾湿繰り返し1サイクルの最大放出水量

から、水セメント比 45%における放出水量と耐凍害性の明確な傾向をつかむことができなかった。

(5) 耐久性指数と

乾湿繰り返し返しにおける最大収縮率

図-6 に各乾湿繰り返し返し条件における試験体の乾湿繰り返し返し時最大収縮率と耐久性指数の関係を示す。

水セメント比 25%, 45%ともに、最大収縮率が大きいほど、耐凍害性は低下する傾向がある。また、水セメント比 45%の最大収縮率が小さなものでも耐久性指数が低下しているが、これは、コンクリート自体の耐久性指数が小さいことによる。

(6) 吸水試験結果

図-7 に吸水試験結果を示す。体積含水率は以下に示す式(2)より求めた。

$$U_{v;t} = \{(Q_t - Q_{d;105}) / Q_{d;105}\} \times 100 \quad (2)$$

$U_{v;t}$: 体積含水率 (%)

Q_t : ある時間での気中質量

$Q_{d;105}$: 絶乾状態での試験体の質量

水セメント比 25%の試験体に比べ水セメント比 45%の試験体のほうが、勾配が急であり、吸水率が大きいことがわかる。しかし、乾湿繰り返し返しを行った(1)と、乾湿繰り返し返しを行っていない(s)では明確な差はみられなかった。乾湿繰り返し返しによる影響が出ていないのではなく、吸水試験前に行う 40°C 3 日の乾燥により、乾燥による影響が同程度になってしまったものと思われる。

(7) 吸水性状と耐凍害性

図-8 に下面吸水試験における初期吸水速度と耐久性指数の関係を示す。ここでの吸水曲線は、満洲らの実験⁴⁾のように明確な屈曲線をもたないため、初期吸水速度は、吸水試験を行った際の初期の測定時刻 7 点 (0, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8 時間) での近似曲線の傾きを用いた。

なお、満洲らの実験⁴⁾では、50°C 5 日及び 80°C 5 日の乾湿繰り返し返しを行い、乾湿繰り返し返しで初期吸水速度が大きく変化することを報告している。これと比較すると、今回の初期吸水速度は乾湿

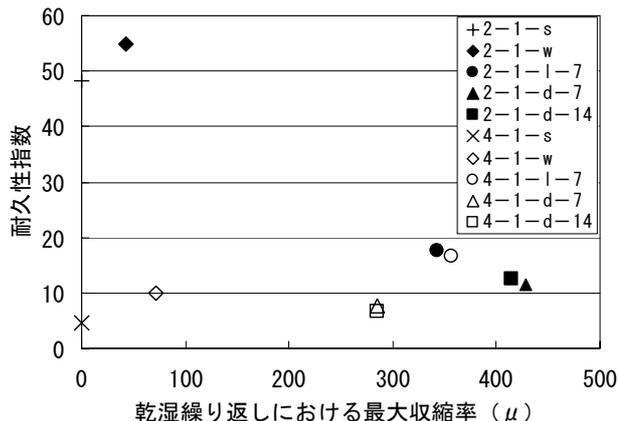


図-6 乾湿繰り返し返しにおける最大収縮率と耐久性指数

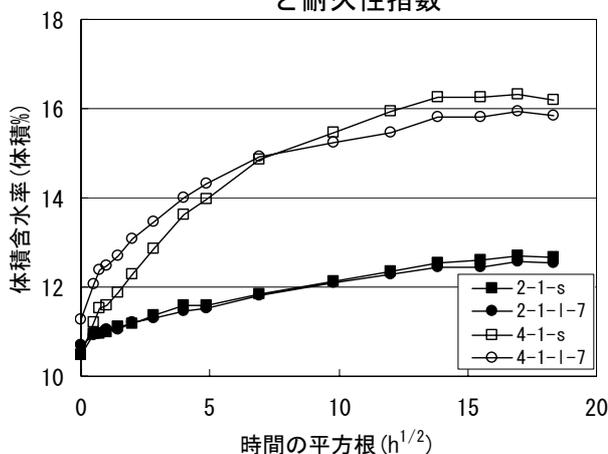


図-7 吸水試験曲線

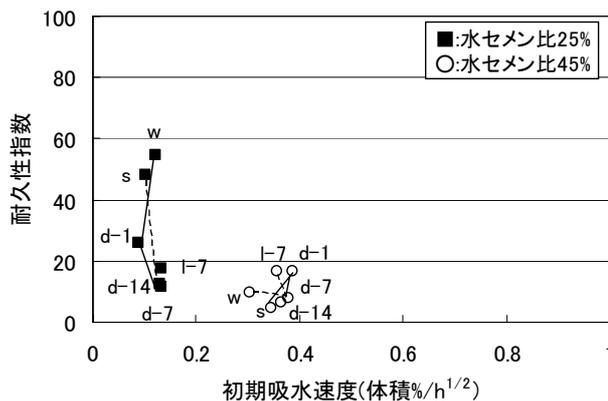


図-8 下面吸水試験における初期吸水速度と耐久性指数

繰り返しによってほとんど変化しないといえ、吸水性状の変化がほとんどない乾湿繰り返し返しでも耐凍害性が低下するといえる。水セメント比 25%では、初期吸水速度が変化しないにも関わらず耐凍害性が大きく変化しており、吸水試験結

果に影響を及ぼさないような微細ひび割れが耐凍害性を低下させていると考えられる。なお、吸水試験前に、40℃3日の乾燥を行っており、この乾燥により、乾燥の影響の程度の差がなくなってしまったことも考えられる。また、水セメント比25%の試験体は、45%に比べ初期吸水速度の値が小さくなっていることから、凍結融解過程においても水分の浸透が緩やかになると思われる。

(8) 粗骨材の拘束により

モルタルに発生する応力

ここでは式(3)を用い、粗骨材がモルタル部分を拘束して生じる内部応力を算定した。

$$\sigma_m = (\varepsilon_m - \varepsilon_c) \times E_m \times 10^{-3} \quad (3)$$

σ_m : モルタル部分に発生する応力

ε_m : モルタルの歪 ($\times 10^{-6}$)

ε_c : コンクリートの歪 ($\times 10^{-6}$)

E_m : モルタルのヤング係数 (kN/mm^2)

図-9に粗骨材の拘束によりモルタルに発生する応力と耐久性指数の関係を示す。水セメント比25%、水セメント比45%試験体は共に、乾湿繰返し条件dにおいて、最も発生する応力が大きく、耐久性指数も低下している。条件dは、乾燥温度が40℃であり、他の条件に比べ、放出水量(図-5)が大きいことから、乾燥程度が強く、モルタルに発生する応力も高くなると考えられる。また、水セメント比25%の高強度コンクリートは、乾燥の程度が厳しいほど、応力も大きくなる傾向があるが、ここで計算した応力の大きさだけでは説明できず、今後の検討が必要である。水セメント比45%の試験体では、水セメント比25%に比べ、発生する応力の値は小さくなっている。水セメント比45%の試験体は、25%のものに比べ内部組織が粗となっているため収縮応力自体も小さくなるものと思われる。

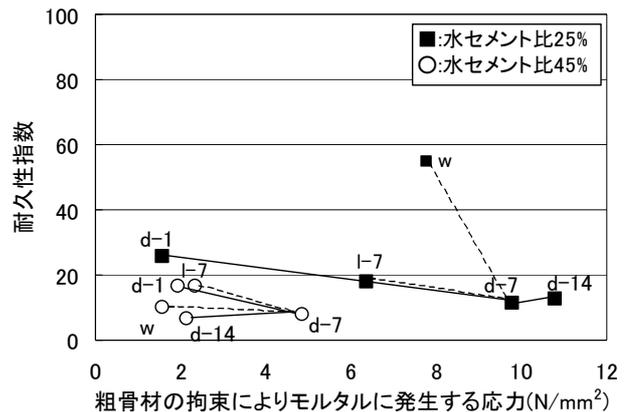


図-9 粗骨材の拘束により
モルタルに発生する応力

4. まとめ

低水セメント比のnon-AE高強度コンクリートについて以下の点が明らかとなった。

- 1) 乾燥温度20℃の軽微な乾湿繰返しでも耐凍害性が低下する。
- 2) 乾湿繰返し数の増大に伴って耐凍害性の低下も大きくなるが、初期の数サイクルの影響が大きい。
- 3) 乾湿繰返し条件は、乾燥温度だけではなく、乾燥時間も耐凍害性を低下させる要因となる。
- 4) 乾湿繰返し条件による耐凍害性の低下は、乾燥時の放出水量(乾燥程度)と関連深い。

参考文献

- 1) 相川葉月ほか：暴露条件・粗骨材種別が高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響，日本建築学会学術講演梗概集（近畿）1145-1146，2005。
- 2) 田畑雅幸ほか：コンクリートの耐凍害性におけるひびわれの役割の考察，日本建築学会構造系論文集，第336号，11，1986
- 3) 田畑雅幸ほか：コンクリートの耐凍害性に及ぼす乾燥の影響，セメント技術年報XXXII，365-368，1978
- 4) 満渕えりほか：乾湿繰返しが限界飽水度試験結果に及ぼす影響，日本建築学会学術講演梗概集（東海），527-528，2003