

論文 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

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

要旨：低水セメント比 non-AE コンクリートは、標準的な凍結融解試験において耐凍害性が高いと評価されているが、屋外暴露・屋内放置後に同じ凍結融解試験を行うと耐凍害性が低下することが報告されている。本研究は、乾燥・乾湿繰り返し等がコンクリート内部に応力を生じさせ、微細なひび割れを発生させることを想定し、粗骨材種別および暴露方法・期間を変化させ、耐凍害性の変化について検討を加えたものである。

キーワード：コンクリート, 耐凍害性, 乾燥収縮, 屋外暴露, 屋内放置, 骨材種別

1. はじめに

標準的な凍結融解試験 (JIS A 1148 A 法) で耐凍害性が高いと評価された低水セメント比の non-AE コンクリートでも、半年～1 年の屋内放置・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⁾。また、実環境下では乾湿繰り返しによりコンクリートに微細なひび割れが発生し、そのひび割れに水分が浸透することで耐凍害性が低下すると考えられることが報告されている²⁾³⁾。

本研究では、乾燥収縮・乾湿繰り返しがコンクリートに微細なひび割れを発生させ、耐凍害性を低下させることを想定し、暴露条件・期間及び粗骨材種別を変えた試験体について凍結融解試験を行い、検討を加えた。

2. 実験計画

実験概要を表-1 に示す。本実験は 2 種類の粗骨材を用いた高強度コンクリートの試験体を作

表-1 実験概要

粗骨材種別 (記号)	暴露条件 (記号)	初期養生後の暴露期間 (記号)	
青梅産 碎石 (0)	屋内放置 (i)	0日(0d) 6週間(6w) 3日(3d) 8週間(8w) 1週間(1w) 10週間(10w) 2週間(2w) 12週間(12w) 4週間(4w) 16週間(16w)	
	屋外暴露 (o)		
常盤産 碎石 (T)	屋内放置 (i)		
	屋外暴露 (o)		

注)

試験体記号を「粗骨材種別+暴露条件+初期養生後の暴露期間」で表す

例：0i3d (青梅産碎石を用いて屋内放置を3日後凍結融解試験を行ったもの)

表-2 コンクリートの調合および基礎性状

粗骨材種別	W/C (%)	目標 AIR (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤量 (c×%)	実測 AIR (%)	スランプフロー (cm)	28日圧縮強度 (MPa)
				水	セメント	細骨材	粗骨材				
青梅産	25	1	39.3	175	702	617	954	1.3	0.9	62.5	90.1
常盤産							958		0.8	67.0	99.8

*1 北海道大学 大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 北海道大学 大学院工学研究科 社会基盤工学専攻教授 工博 (正会員)

*3 北海道大学 大学院工学研究科 社会基盤工学専攻助教授 工博 (正会員)

*4 北海道大学 工学部 建築都市学科 (非会員)

製し、2週間水中養生後、暴露条件・期間を変えて暴露した後、凍結融解試験を行ったものである。暴露開始日は2004年8月3日であり、暴露期間は0日～16週間である。暴露条件は、乾燥のみを想定した屋内放置（北海道大学材料性能学分野実験室内に放置）と、乾湿繰り返しを想定した屋外暴露（同大学建築棟屋上にて放置）の2通りを行った。

調査表を表-2に示す。コンクリートの乾燥収縮時における粗骨材によるモルタルの収縮の拘束の影響を検討するために、骨材性状が異なる青梅産と常盤産の2種類の粗骨材を使用した。

表-3に粗骨材の性状を示す。なお、青梅産碎石は常盤産碎石に比べ、吸水率が低く、骨材自体の乾燥収縮率が小さいものである。また、セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 ）、細骨材は勇払産陸砂（表乾密度 2.65g/cm^3 、吸水率 1.26% ）を使用した。

凍結融解試験はJIS A 1148(ASTM C666)A法（水中凍結水中融解）に準じて行った。なお、試験体は所定の屋内放置・屋外暴露を行った後に2日間の水中浸漬を行い、浸漬直後の値を基準にして凍結融解試験を行った。

また、2週水中養生後、2週 $20^\circ\text{C}60\%\text{R.H}$ 恒温室で養生したコンクリート及びウェットスクリーニング法で作製したモルタルの28日圧縮強度及びヤング係数を測定した。また屋内放置におけるコンクリート試験体と $4\times4\times16\text{cm}$ モルタル試験体の長さ変化と質量変化を測定した。なお、長さ変化はJIS A 1129-3ダイヤルゲージ方法に準じて行った。

表-3 骨材性状とヤング係数算定結果

粗骨材 種別	密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	乾燥 収縮率 ^{※1} ($\times 10^{-6}$)	ヤング 係数 ^{※2} (kN/mm^2)
青梅産 碎石	2.65 (表乾)	0.60	299	59.8
常盤産 碎石	2.66 (表乾)	2.69	322	49.7

※1足立らの研究の測定結果より引用⁴⁾

※2Hashin-Hansen式により算定

3. 実験結果及び考察

(1) 粗骨材のヤング係数の算定

コンクリートとモルタルのヤング係数からHashin-Hansen式⁵⁾を用いて粗骨材のヤング係数を算出した。以下に算定式を示す。

$$\frac{E_c}{E_m} = \frac{(1-V_a)E_m + (1+V_a)E_a}{(1+V_a)E_m + (1-V_a)E_a} \quad (1)$$

E_c, E_m, E_a : コンクリート, モルタル,

粗骨材のヤング係数 (kN/mm^2)

V_a : 粗骨材比

表-3に粗骨材のヤング係数の算定結果を示す。常盤産碎石に比べ青梅産碎石はヤング係数が高いことがわかる。

(2) コンクリートとモルタルの乾燥収縮性状

図-1に屋内放置におけるコンクリートとモルタルの収縮率の経時変化と収縮率と質量変化率の関係を示す。

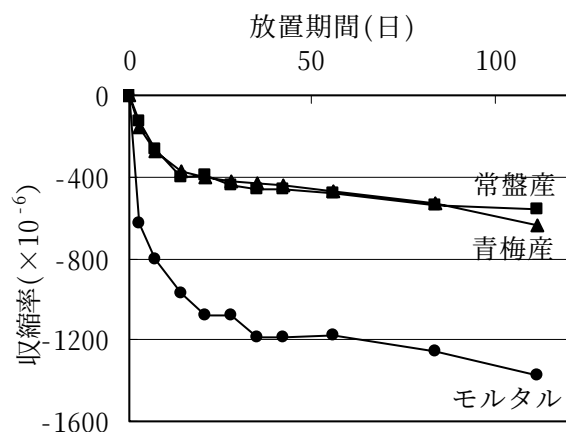


図-1-a 収縮率の経時変化（屋内放置）

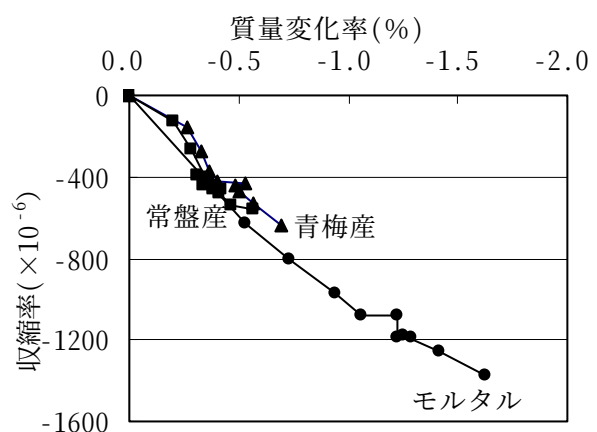


図-1-b 収縮率と質量変化率の関係（屋内放置）

図-1-a からモルタルに比べコンクリートのほうが収縮しにくいことがわかる。このことから、コンクリート内部では粗骨材がモルタルの収縮を拘束していると考えられる。また、今回の実験ではそれぞれ常盤産碎石と青梅産碎石を用いたコンクリートは収縮率の経時変化にほとんど違いがない結果となった。

図-1-b から、今回の実験では質量変化率と収縮率の関係をみると、一般的な乾燥収縮試験で認められるような、乾燥初期において質量変化率に比べて収縮が小さくなる部分がほとんど認められない。これは、ここで用いたコンクリートが低水セメント比であるために、収縮に寄与しない水分がほとんど含まれていないことによるものと考えられる。

また、図-1-b では、コンクリートとモルタルのデータがほとんど重なっているようにみえるが、今回の実験の条件でこのようにみえるだけであると考えられる。すなわち、水分の減少は主にモルタルからの水分であり、粗骨材を含むコンクリートはモルタルに比べて粗骨材分だけ水分の減少が少なくなり、さらに、収縮も拘束されて小さくなることになる。今回の実験では、これら2つの粗骨材の影響が加わった結果、コンクリートとモルタルの質量変化と収縮率の関係がほぼ同様のものとなったものと考えられる。コンクリートの同じ質量変化に対する収縮率をみると、青梅産碎石を用いたものは常盤産碎石を用いたものよりもやや小さな値となっており、粗骨材種別の影響も認められる。

(3) 凍結融解試験結果

図-2 に屋内放置期間(0d~16w)が異なる青梅産碎石を用いたコンクリートの凍結融解試験結果を示す。この図から、水中養生後すぐに凍結融解をしたもの(0d)は、相対動弾性係数の低下が300 サイクルまでは認められず、質量増加の兆候も200 サイクルあたりからであり、優れた耐凍害性を示している。しかしながら、屋内放置(3d~20w)を行ったものについては、早いサイクル数で相対動弾性係数が大きく低下しており、

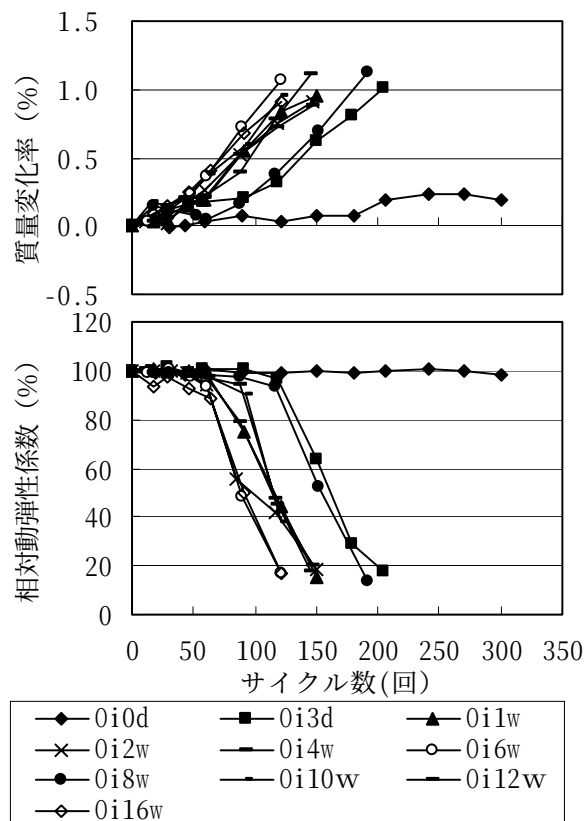


図-2 屋内放置期間の影響(青梅産)

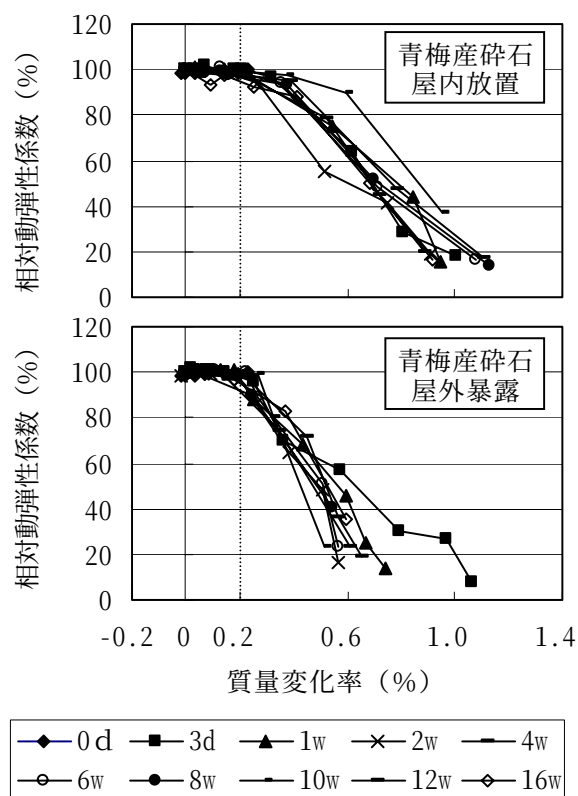


図-3 質量変化率と相対動弾性係数の関係(青梅産碎石)

耐凍害性が大きく低下していることがわかる。
このことから、屋内放置により、コンクリートに乾燥収縮が生じ、それによりモルタル部分に微細なひび割れが生じ、耐凍害性を低下させていることが考えられる。

また、屋内放置 3 日においても相対動弾性係数の低下が見られることから、今回の実験の範囲内では高強度 non-AE コンクリートは、軽微な乾燥を受けた場合でも、耐凍害性が低下するといえる。

また、今回の高強度コンクリートでは、目視でほとんどスケーリングが認められず、凍結融解サイクルの増大による質量増加が認められた。質量変化率と相対動弾性係数のグラフを照らし合わせてみると、相対動弾性係数が急激に低下する以前の測定サイクルにおいて、質量変化率が大きくなっていることがわかる。凍結融解試験の初期には、ひび割れ等に水分が浸透し、含水率が限界値に達してから組織に緩みが生じていると考えられる。

青梅産碎石を使用したコンクリートにおける質量変化率と相対動弾性係数の関係を図-3 に示す。屋内放置、屋外暴露ともに、若干のばらつきはあるものの、放置期間に関わらず、ほぼ同じ質量変化率になった後に相対動弾性係数が低下を開始している。暴露条件によらず、ある一定の質量変化率になるまでは、含水率の上昇のみが生じており、ある限界値を超えると組織が緩み始めていることを示しており、限界飽水度法の考え方⁶⁾に対応するものである。また、図から限界値は質量変化率で約 0.2%増加した時点であり、1m³のコンクリートに対して 5lの質量増加となる。また、屋内放置と屋外暴露を比較すると、屋内放置試験体のほうが質量増加に対する相対動弾性係数の低下勾配が小さくなっている。これは、乾燥を受けたコンクリートは質量増加に応じた組織の緩みの進行が小さいことを意味し、屋外暴露と屋内放置ではひび割れの発生状況が異なることや、屋外暴露に比べ屋内放置は乾燥の程度が進んでおり、2 日間の水中

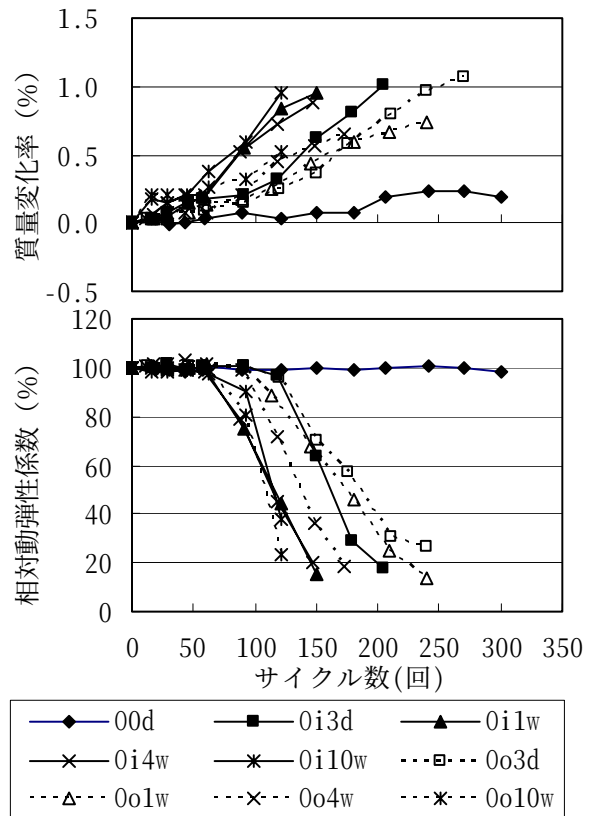


図-4 暴露条件の影響(青梅産)

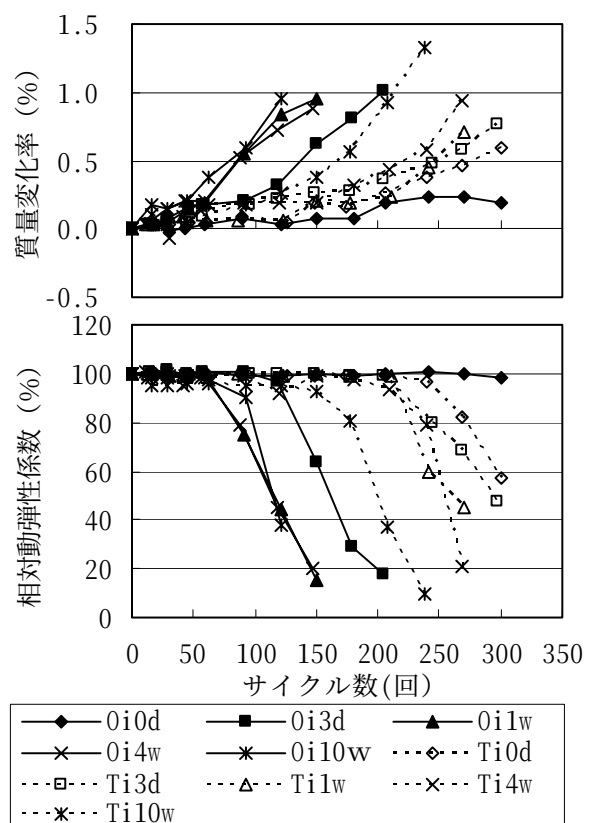


図-5 使用粗骨材の影響(屋内放置)

浸漬では水が十分に吸収されなかったこと等が考えられる。

図-4 に青梅産碎石を用いたコンクリートにおける暴露条件の違い(屋内放置・屋外暴露)を比較した凍結融解試験結果を示す。質量変化率のグラフをみると、屋内放置した試験体は屋外暴露した試験体よりも質量増加が早いサイクル数で開始していることがわかる。また相対動弾性係数の変化をみても、同様な傾向がみられる。これは、屋外暴露では雨水による水の供給により、養生が進み、組織が緻密になったため耐凍害性が向上したこと、あるいは初期の含水状態が異なっていること等が考えられる。

図-5 に屋内放置における粗骨材の異なるコンクリートの凍結融解試験結果の比較を示す。青梅産碎石を用いたコンクリートは常盤産碎石を用いたコンクリートに比べ、質量の増加・相対動弾性係数の低下が凍結融解の早期の段階で生じていることがわかる。これは、コンクリートが乾燥を受けた場合、粗骨材のヤング係数が大きいほど、乾燥収縮時の粗骨材の拘束効果が大きくなるため、ヤング係数の大きい青梅産碎石を使用したコンクリートのほうが常盤産碎石を使用したコンクリートよりも多くのひび割れが発生していると考えられる。

(4)収縮率と耐久性指数の関係

図-6-a に屋内放置における各試験体の収縮率と耐久性指数の関係を示す。収縮率は2週水中養生後の値を基準にして、各暴露条件の暴露直後の収縮率を示したものである。

粗骨材種別ごとにみると収縮率が大きいほど耐久性指数が小さくなる傾向があるように思われるが、ばらつきが大きく、収縮率だけでは耐久性指数の低下を説明できないと考えられる。

青梅産碎石を使用したコンクリートにおいては、収縮率が小さな値でも耐久性指数が大きく減少していることがわかる。それに対して、常盤産碎石を使用したコンクリートにおいては、暴露を行わないものの耐久性指数がやや低いが、収縮率の増加に伴う耐久性指数の低下が比較的

小さいことがわかる。このことから、今回の実験の範囲では、青梅産碎石を使用したコンクリートはヤング係数が大きいため、モルタル部分の収縮を骨材が拘束する効果が大きく、それに伴い常盤産碎石を使用したものに比べて、ひび割れが生じているため、収縮率は小さい範囲でも耐凍害性が低下していることが考えられる。

図-6-b に屋外暴露における各試験体の収縮率と耐久性指数の関係を示す。収縮率は暴露直後の値であるため、室内放置に比べ小さな値となっている。

全体的に小さい収縮率の割に屋内放置に比べて耐久性指数の低下が大きいことから、単に乾燥を受ける条件よりも乾湿繰り返しや温度変

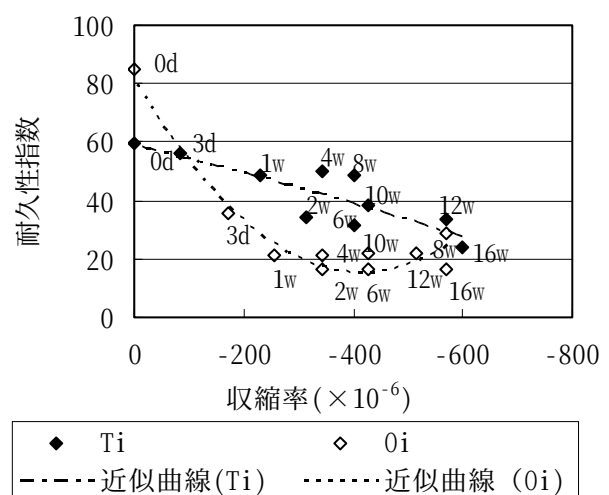


図-6-a 収縮率と耐久性指数の関係 (屋内放置)

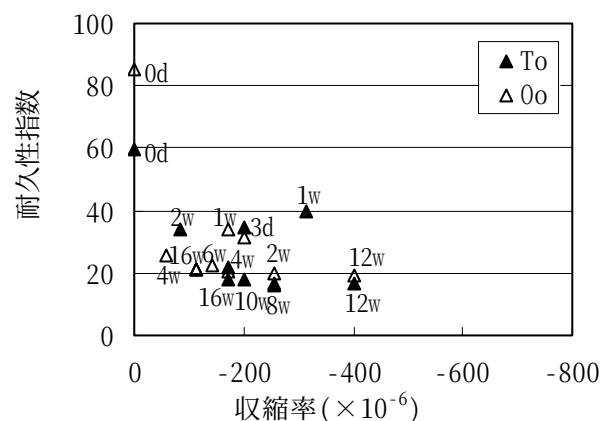


図-6-b 収縮率と耐久性指数の関係 (屋外暴露)

化・日射による熱膨張収縮などが耐久性指数に与える影響は大きいものであるといえる。

(5)粗骨材の拘束がモルタルに及ぼす応力

粗骨材の拘束によりモルタル部分に発生する引張応力を求め、耐久性指数との関係をみて検討する。

ここでは、**図-1**に示す実測したモルタルとコンクリートの収縮率－質量変化率曲線から、モルタル、コンクリートの収縮率を求め、モルタルとコンクリートの歪の差からモルタルのヤング係数を用いて、モルタル部分に発生する応力を算定する。算定式を以下に示す。

$$\sigma_m = (\varepsilon_m - \varepsilon_c) \times E_m \times 10^{-3} \quad (2)$$

σ_m : モルタル部分に発生する応力 (N/mm^2)

ε_m : モルタル部分の歪 ($\times 10^{-6}$)

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)

屋内放置における各放置期間のモルタルに発生する応力と耐久性指数の関係を**図-7**に示す。この図から、常盤産砕石を使用したコンクリートに比べ、青梅産砕石を使用したコンクリートは発生する応力が比較的大きい。また、両コンクリートともに室内放置 3 日 (3d) の応力が最も大きく、この時点で耐凍害性が大きく低下し、必ずしも収縮率に対応して耐久性指数が低下しないものと思われる。しかしながら、ばらつきが大きく、モルタルとコンクリートの試験体寸

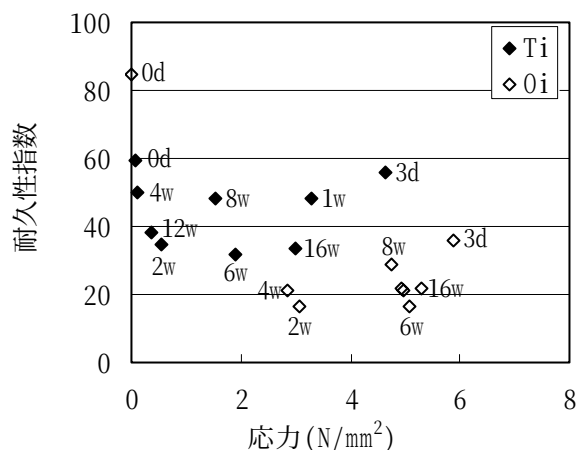


図-7 粗骨材の拘束によりモルタルに発生する応力と耐久性指数の関係

法が異なること等があり、より詳細な検討が必要と思われる。

4.まとめ

- (1) 2週間水中養生後の耐凍害性が高いと評価される non-AE 高強度コンクリートでも屋内放置、屋外暴露における軽微な乾燥により耐凍害性が低下する。
- (2) 屋内放置、屋外暴露の耐凍害性の低下には粗骨材種別、暴露期間が影響する。
- (3) 乾燥の影響を受ける場合、ヤング係数が大きい骨材を用いたコンクリートは小さい骨材を用いたものに比べ、内部で発生する応力が大きくなり、耐凍害性の低下が大きくなる。

参考文献

- 1) 千歩 修, 濱田 英介, 友澤 史紀: 養生・放置条件が低水セメント比コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.969-974, 2004
- 2) 田畑 雅幸, 洪 悦郎, 鎌田 英治: コンクリートの耐凍害性におけるひび割れの役割の考察, 日本建築学会構造系論文集, 第366号, pp.11-16, 1986.8
- 3) 田畑 雅幸, 鎌田 英治, 洪 悦郎: コンクリートの耐凍害性試験条件の影響とモデル化した条件による凍結融解実験, 韓・日国際共同シンポジウム論文集, pp.35-46, 1994.8
- 4) 足立 裕介ほか: コンクリートの乾燥収縮予測のための粗骨材基礎性状把握方法の検討, 第56回セメント技術大会講演要旨, 2002
- 5) T.C.Hansen: Influence of Aggregate and Voids on Modulus of Elasticity of concrete, mortar and cement paste, Journal of the ACI, 1965
- 6) G.Fagerlund: The Critical Degree of Saturation Method of Assessing the Freeze/Thaw Resistance of Concrete, Material & Structures, Vol.10, pp.217-229 (1977)