

報告 各種低品質コンクリートの暴露3年の結果

片平 博*1・下谷裕司*2・渡辺博志*3・田口史雄*4

要旨: 凍結融解をはじめとするコンクリートの耐久性は、一般には「JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験」などの促進試験によって評価されているが、促進試験結果と実際の暴露環境下の劣化状況の関係については、十分な知見が得られていないのが現状である。このため、コンクリートの暴露試験を実施している。なお、通常のコンクリートでは暴露期間が長期に及ぶことから、耐凍害性に劣る骨材や、乾湿繰り返しによって劣化する骨材を使用するなどして、耐久性の低いコンクリート試験体を作製した。今回、暴露を開始してから3年が経過したので、促進試験の結果と併わせて、その経過を報告するものである。

キーワード: 低品質骨材, 凍結融解, 乾湿繰り返し, 暴露試験

1. はじめに

コンクリートの品質は使用する骨材や配合の影響を強く受ける。このため、例えばコンクリートに使用する骨材の品質であれば「JIS A 5308 レディーミクストコンクリート」の附属書1などで規定されている。ただし、骨材の品質として規定されている密度や吸水率などの指標から、その骨材を用いたコンクリートの耐久性を直接予測することは難しく、凍結融解抵抗性であれば、「JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法」によって、その耐久性を照査することが一般に行われている。しかし、凍結融解試験のような促進試験の結果と実構造物の耐用年数との関係に関しては、十分な知見が得られていない。

また、実環境におけるコンクリートの耐用年数を確認する方法として暴露試験があるが、通常のコンクリートの暴露試験では数十年の期間が必要であり、その実施は容易ではない。そこで、低品質な骨材の使用、高水セメント比、空気量の低減等によって、耐久性の低いコンクリートを製造し、促進試験と暴露試験との関係を検討することとした。なお、コンクリートの耐久性としては、凍結融解抵抗性と乾湿繰り返し抵抗性を対象とした。

暴露試験を開始してから、3年が経過したので、促進試験の結果と併わせて、暴露3年までの経過を報告する。

2. 実験方法

2.1 使用骨材

実験に使用した骨材の物理的品質を表-1に示す。表中の硬質砂岩と良質川砂は、コンクリート用骨材の品質基準を満足する良質な骨材であり、その他の骨材は、規格を満足しない低品質骨材である。

花崗岩、川砂利、安山岩1は事前に実施したコンクリートの凍結融解試験結果等から、耐凍害性が低いと判断され

表-1 骨材の品質

	岩種	Gmax (mm)	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性 (%)	備考
粗骨材	硬質砂岩	20	2.65	0.50	3.3	
	花崗岩	25	2.53	1.47	22.3	
	川砂利	25	2.45	3.37	14.9	
	安山岩1	25	2.29	5.58	52.7	
	安山岩2	25	2.47	2.74	72.9	ローモンタイトを2.8%含有
	頁岩	25	2.59	1.54	27.9	石膏を含有
細骨材	良質川砂	-	2.56	1.58	3.5	
	安山岩2	-	2.37	4.33	30.4	ローモンタイトを3.6%含有

る骨材として選定した。

安山岩2と頁岩は事前に実施したコンクリートの乾燥湿潤試験の結果等から、乾湿繰り返し抵抗性に劣ると判断される骨材として選定した。安山岩2はローモンタイトを3%程度含有している。ローモンタイトは水と結合することで体積が膨張してレオンハルダイトに変化し、この膨張圧によって骨材が劣化する。頁岩(けつがん)は粘土が堆積した碎屑岩であるが、同様の粘板岩に比べて堆積年代が新しく、固結度が低いものである。また、実験に使用した頁岩には硫酸塩鉱物である石膏が含有されており、骨材を数ヶ月間屋外に暴露すると、骨材表面が黄色に変色し、ひび割れが発生するものであった。過去において実施したG_{max}40mmとしたコンクリートの乾燥湿潤試験²⁾の結果で劣化が確認されている。

2.2 コンクリートの配合

表-1に示す骨材を使用し、表-2に示す配合でコンクリートを練り混ぜた。

配合1は耐久性に優れた配合である。これに対して配合2は空気量を減じることで、配合3は水セメント比を高めることで、配合4~8は低品質な骨材を用いることで、コンクリートの耐久性を低下させることとした。

*1 独立行政法人土木研究所 つくば中央研究所 材料地盤研究グループ 基礎材料チーム 主任研究員(正会員)
 *2 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 耐寒材料チーム 研究員(正会員)
 *3 独立行政法人土木研究所 つくば中央研究所 材料地盤研究グループ 基礎材料チーム 上席研究員(正会員)
 *4 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ 耐寒材料チーム 上席研究員(正会員)

表-2 コンクリートの配合とフレッシュ性状および促進試験結果

	使用骨材		W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					スランブ (cm)	空気量 (%)	相対動弾性係数(%)	
	粗骨材	細骨材			W	C	S	G	AE 減水剤			凍結融解 300cycl	乾湿 30cycl
1-Cont	硬質砂岩	良質川砂	55	46	165	300	832	1002	0.94	12.5	5.7	94	-
2-NonAE	硬質砂岩	良質川砂	55	46	170	309	858	1033	0.96	6.4	1.7	2	-
3-W/C85	硬質砂岩	良質川砂	85	50	165	194	949	972	0.61	5.8	4.1	8	-
4-花崗岩	花崗岩	良質川砂	55	46	165	300	832	963	0.94	11	5.6	65	-
5-川砂利	川砂利	良質川砂	55	46	165	300	832	956	0.94	15.9	6.1	32	-
6-安山岩	安山岩1	良質川砂	55	46	165	300	832	905	0.94	10.1	5.2	9	-
7-ローモン	安山岩2	安山岩2	55	47	162	295	818	938	0.92	3.8	6.3	80	30
8-頁岩	頁岩	良質川砂	55	46	165	300	832	986	0.94	8	4.4	95	85

2.3 促進試験の方法

練り混ぜた各フレッシュコンクリートを用いて 100×100×400mm の角柱供試体を作製し、材齢 28 日まで 20℃水中養生を行った後に、凍結融解試験および乾湿繰り返し試験を実施した。

凍結融解試験は「JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法」のA法に準拠して1サイクルを4時間として、0,10,25,40,60,80,100,140,180,220,260 および 300 サイクルで供試体の動弾性係数と質量を測定した。

乾湿繰り返しに対する試験は「コンクリートの乾燥湿潤試験方法(案)」²⁾に準拠して実施した。すなわち、乾燥炉 80℃で2日間、水中 20℃で2日間を1サイクルとし、30 サイクルまで試験を実施し、3 サイクル毎に供試体の動弾性係数と質量を測定した。

試験本数は表-3に示すとおりで、結果は各配合の平均値で整理した。

2.4 暴露試験の方法

暴露試験は表-2に示す全ての配合を対象に実施し、供試体の形状寸法は図-1に示す3種類を設定した。(a)は促進試験に用いたものと同じ 100×100×400mm の角柱供試体であり、(b)は暴露環境での供試体の劣化を促進させる目的で供試体の厚さを 60mm と薄くしたものであり、(c)は(b)の供試体の上部に深さ 6mm の溝を設けたものである。すなわち、凍結融解等による劣化は水があるか否かで大きく異なることから、供試体の上面に雨水が溜まる形状としたものである。なお、供試体作製上の都合から、溝の形状は型枠の下面に凸部を設けることによって作製し、供試体の上下を逆にして暴露した。なお、条件を揃える目的から(a)(b)の供試体も上下を逆にして暴露した。

供試体は作製後 28 日間 20℃水中養生を行い、その後、茨城県つくばと北海道千歳に暴露した。つくばでは直ちに暴露を開始し、千歳には封緘状態で輸送し、16 日後に暴露を開始した。暴露を開始した時点(2007 年 11 月)を初期値とし、毎年 5 月と 11 月に相対動弾性係数と質量の測定、および外観観察を実施した。試験本数は表-3に示すとおりで、結果は各配合の平均値で整理した。

表-3 試験本数

試験の種類と暴露場所	促進試験		暴露試験					
	凍結融解	乾燥湿潤	千歳			つくば		
供試体形状	(a)	(a)	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)
1-Cont	2	-	2	2	2	1	2	2
2-NonAE	2	-	2	2	2	1	2	2
3-W/C85	2	-	2	2	2	1	2	2
4-花崗岩	3	-	2	2	2	1	2	2
5-川砂利	3	-	2	2	2	1	2	2
6-安山岩	3	-	2	2	2	1	2	2
7-ローモン	3	2	2	2	2	1	2	2
8-頁岩	3	2	2	2	2	1	2	2

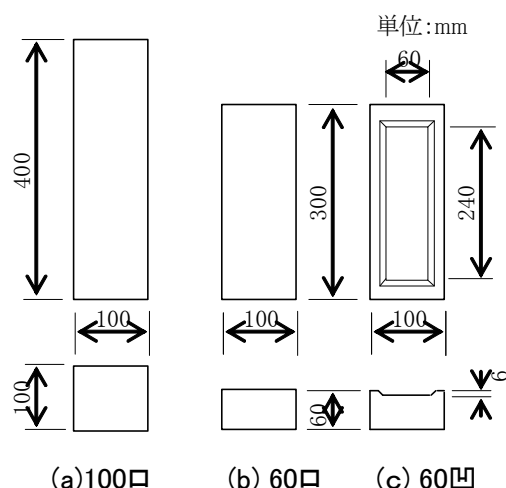


図-1 暴露供試体の形状

また、各暴露場における外気温を1時間間隔で3年間にわたって測定した。

3. 実験結果

3.1 促進試験の結果

凍結融解試験から得られる相対動弾性係数の変化を図-2に、質量減少率の変化を図-3に示す。相対動弾性係数は、「2-NonAE」、「3-W/C85」および「6-安山岩」の配合で大きく低下した。また、「5-川砂利」の配合でも30%程度まで低下した。質量減少率は「3-W/C85」の配合で大きくなった。

乾燥湿潤試験は「7-ローモン」および「8-頁岩」の配合に対して実施した。この試験から得られる相対動弾性

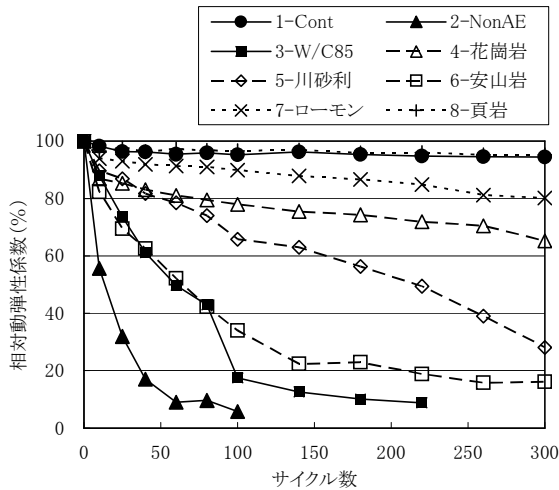


図-2 凍結融解試験結果 (相対動弾性係数)

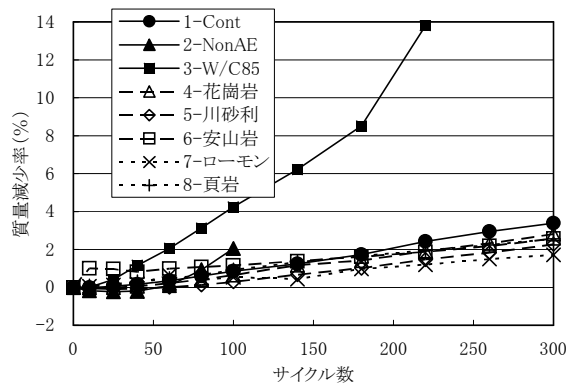


図-3 凍結融解試験結果 (質量減少率)

係数の変化を図-4に、質量変化率の変化を図-5に示す。「7-ローモン」では、相対動弾性係数が大きく低下した。また、質量変化率については、試験の初期で大きく低下したが、その後は増加する傾向を示した。質量は水中浸漬後に測定しており、供試体に生じた微細なひび割れに水が浸入することで質量が増加したものと考えられる。一方、「8-頁岩」では、相対動弾性係数の低下は見られず、質量の増加傾向も「7-ローモン」に比較して僅かであった。図-4および5には、参考値として、「8-頁岩」とほぼ同じ配合で粗骨材最大寸法を40mmとした過去の試験結果を配合8'のとして示した。この結果では相対動弾性係数がやや低下する傾向が認められた。

3.2 暴露場の外気温測定結果

暴露試験場の冬期(1月)と夏期(8月)の外気温測定結果を図-6および図-7に示す。冬期に関して、千歳は凍結融解回数が多く、さらに寒さも厳しく、日最低気温は-20℃程度にまで達する日が連続している。一方、夏期に関しては、つくばの暑さが厳しく、暴露場がコンクリート建屋の屋上であったこともあり、最高気温は40℃に達している。

氷点下になった日数、降雨日数、降雪日数について3年間の年平均日数を表-4に示す。

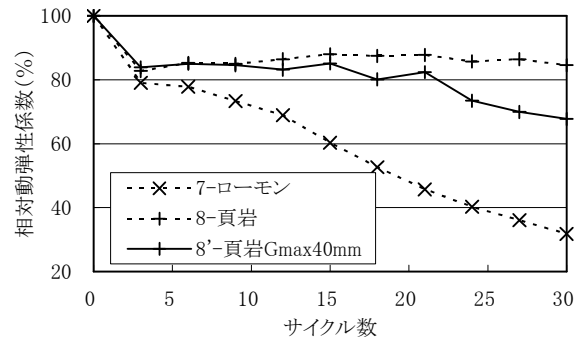


図-4 乾燥湿潤試験結果 (相対動弾性係数)

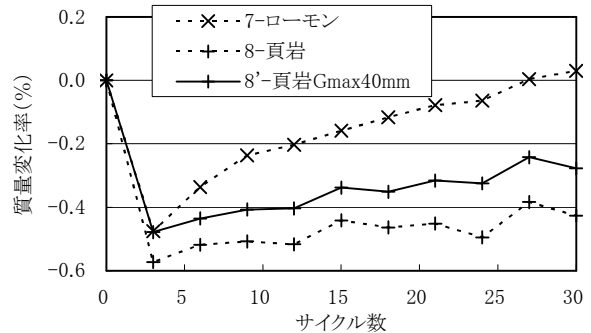


図-5 乾燥湿潤試験結果 (質量変化率)

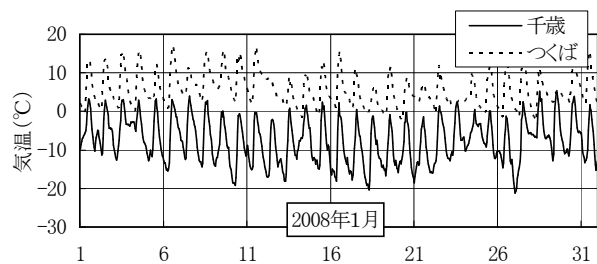


図-6 冬期の測定外気温

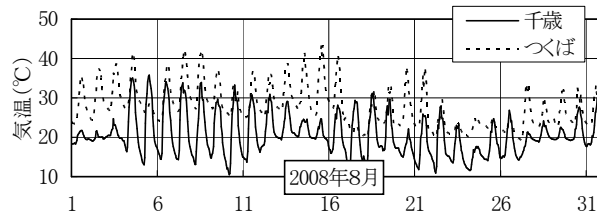


図-7 夏期の測定外気温

表-4 気象条件の比較(3年間の平均、単位:日)

	千歳	つくば
年間で氷点下となった日数 ^{*1}	153	35
年間降雨日数 ^{*2}	89	112
年間降雪日数 ^{*2}	47	2

*1:測定温度データ *2:気象庁データ

3.3 暴露試験結果

外観観察の結果、大きな変状が確認されたものを表-5に整理する。

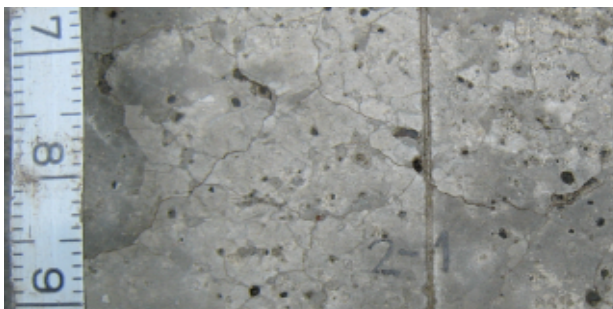
千歳では、「2-NonAE」の供試体に多数のひび割れが確認された。このひび割れは、(c)60回の供試体で特に顕著であった(写真-1)。また、「5-川砂利」の配合では、供試体の角部にあった粗骨材が分離し、角部が剥落した(写真-2)ほか、表面付近の骨材のポップアウト

が確認された。「7-ローモン」の供試体では、全体的に供試体表面からの劣化が確認された（写真－3）。

つくばでは、「7-ローモン」の供試体の劣化が著しく、

表－5 外観観察結果(大きな変状)

	千歳	つくば
1-Cont		
2-NonAE	(C)60凹で無数のひび割れ	
3-W/C85		
4-花崗岩		
5-川砂利	(b)60口の角部が剥落	
6-安山岩		
7-ローモン	全体的に表面が劣化	表面から大きく劣化
8-頁岩		



写真－1 千歳2-NonAE(c)60凹のひび割れ



写真－2 千歳5-川砂利(b)60口の剥落



写真－3 千歳7-ローモン(c)60凹の劣化



写真－4 つくば7-ローモン(c)60凹の劣化

特に角部は粉砕化され大きく欠損する状態であった（写真－4）。

相対動弾性係数の変化を図－8に、質量変化率の変化を図－9に示す。これらの図からは次の2つの劣化が確認された。

(1) 千歳の「2-NonAE」の(c)60凹（図－8(3)の▲）の相対動弾性係数が低下した。この相対動弾性係数は冬期に低下し、夏期には幾分回復する傾向を示しながら、年々、除々に低下する傾向を示した。

(2) つくばの「7-ローモン」の配合では、暴露2年以降で質量の減少が確認された。また、(b)60口と(c)60凹では相対動弾性係数も3年目の測定でやや低下したが、それでも80%以上の値であった。

4. 考察

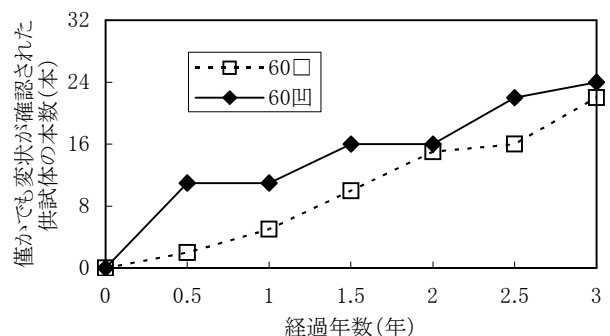
4.1 滞水条件の影響

今回の暴露試験では、図－1に示すように3種類の供試体を作製した。(c)60凹は、上面に6mmの溝を設け、雨水が溜まるように工夫したものである。実際の暴露環境では、晴天の場合は雨水が数時間で蒸発し、滞水が供試体の凍結融解等に及ぼす影響を十分に把握するには溝が浅かったと思われる。しかし、千歳の「2-NonAE」の供試体では(c)60凹で相対動弾性係数が低下しており、溝を設けることで耐久性の低いコンクリートを早期に判定できる可能性を示唆した。

また、図－10は僅かでも変状（微細なひび割れ、ポップアウトなど）が確認された供試体の本数を(b)60口と(c)60凹とで比較したものであるが、(c)60凹のほうが多かった。実構造物では、コンクリート表面に如何に水を滞水させないかが重要と考えられる。

4.2 促進試験と暴露試験の劣化過程の違い

暴露試験結果では、外観観察で劣化が確認されていても、相対動弾性係数や質量変化率の測定結果ではその兆候が確認できないものがあつた。例えば、つくばでの「7-ローモン」の供試体は、外観観察では著しい劣化が認められたが、相対動弾性係数の低下は僅かであった。また、



図－10 僅かでも変状が確認された供試体本数の推移

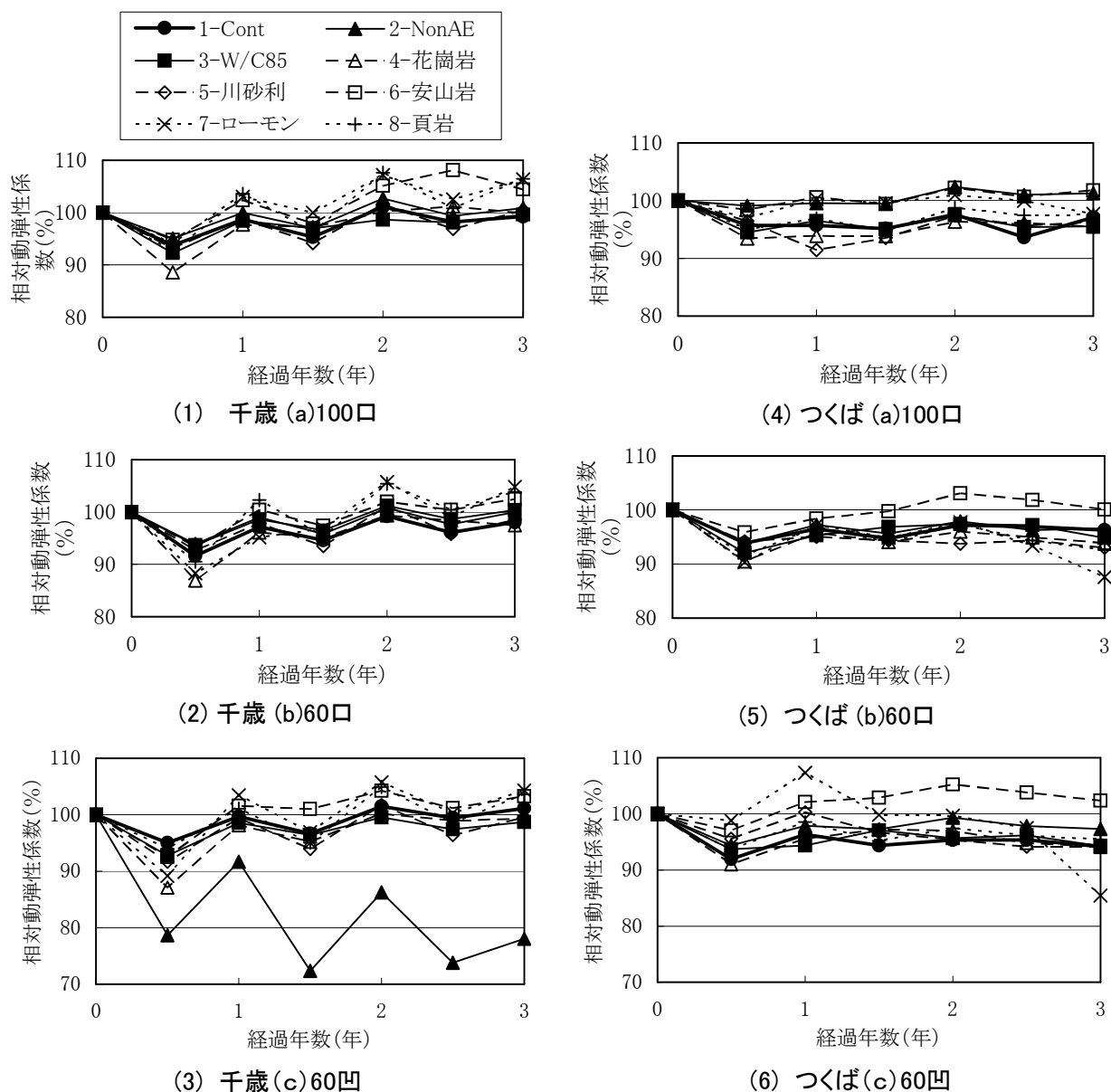


図-8 暴露試験における相対動弾性係数の変化

千歳での「5-川砂利」の供試体の一部では、角部にあった比較的大きな粗骨材の劣化からコンクリート片が剥落したが、相対動弾性係数や質量の低下は確認できなかった。質量の低下が確認できなかった理由は、剥落による質量低下量よりも、供試体の乾燥湿潤による質量の変動のほうが大きかったためと考えられる。

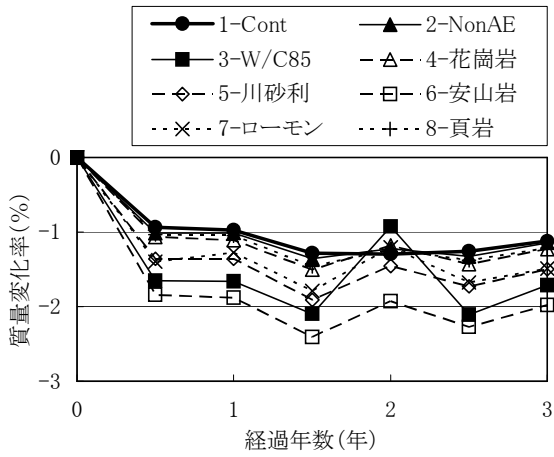
上記のように、促進試験と暴露試験とでは、劣化の進行過程に違いがあるものが認められた。この原因としては、促進試験と暴露環境との条件の違いが影響しているものと考えられる。すなわち、凍結融解に関しては、凍結融解速度の違いや、最低温度の違い、水中と気中との違いなどが挙げられる。乾燥湿潤に関しては、温度は促進試験のほうが80℃と高いものの、日射によるコンクリート表面の乾燥回数は暴露環境のほうが格段に多いと考えられ、これらの条件の違いが、劣化過程の違いに影響

を与えているものと考えられるが、詳細な検討は今後の課題とする。

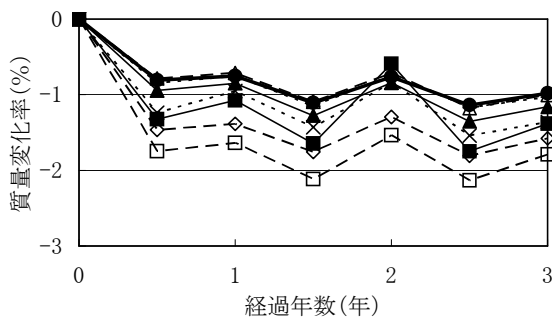
5. まとめと今後の課題

低品質な骨材を用いたり、配合を工夫したコンクリートの暴露試験を実施しており、3年までの結果から、以下のことが分かった。

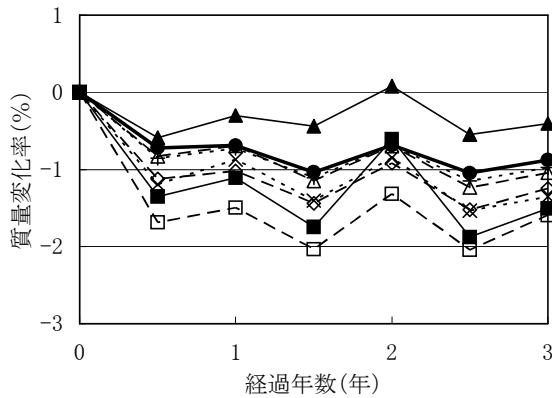
- (1) 暴露試験で、顕著な劣化が認められたのは空気量を低下させた配合、低品質な川砂利を粗骨材に使用した配合、およびローモンタイトを含有する骨材を使用した配合であった。
- (2) 暴露試験では上面に水が溜まる形状にした供試体のうち、空気量を低下させた配合ではひび割れが発生し、動弾性係数が低下した。
- (3) 暴露試験では、低品質な川砂利を粗骨材に使用した



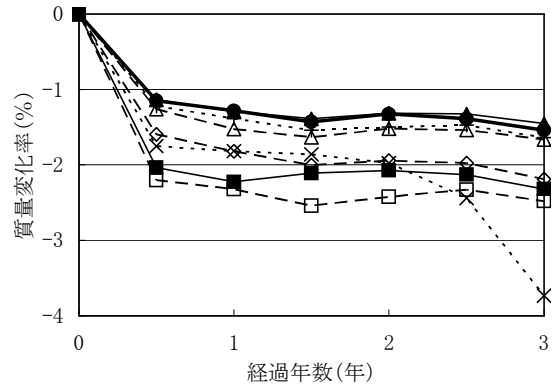
(1) 千歳(a)100口



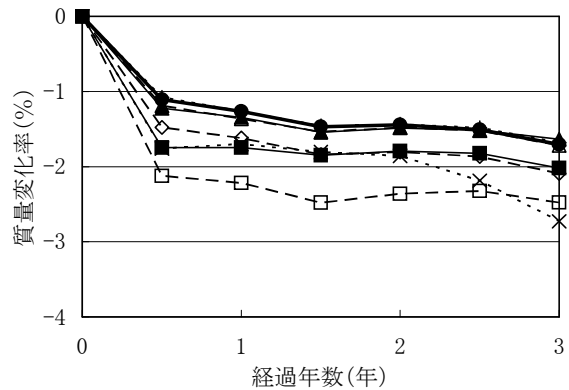
(2) 千歳(b)60口



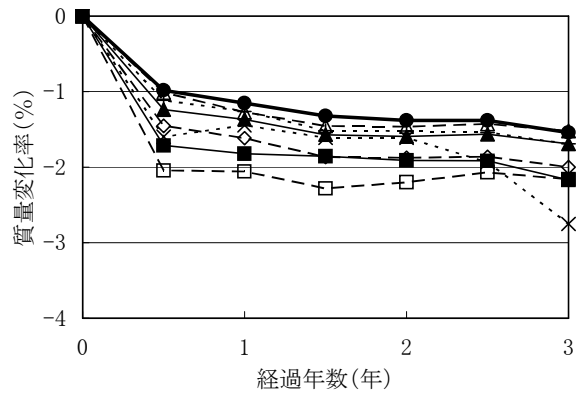
(3) 千歳(c)60口



(4) つくば(a)100口



(5) つくば(b)60口



(6) つくば(c)60口

図-9 暴露試験における質量変化率の変化

配合、およびローモンタイトを含有する骨材を使用した配合では、外観観察で大きな変状が認められても、相対動弾性係数の低下は僅かであった。

以上のように、暴露環境の劣化には滞水の影響が大きく、滞水させることで耐久性の低いコンクリートを早期に評価できる可能性があること、また、室内促進試験と暴露試験とでは、劣化の進行過程に違いがあることが明らかとなった。しかしながら、当初の目的である、促進試験と実際の暴露環境での劣化との対応関係を明確に掴むためには、更に長期間の測定が必要である。また、暴露試験における劣化の測定指標としては、相対動弾性係

数のような供試体全体の劣化を表現する指標の他に、表面の劣化を的確に表現する指標が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 河野広隆ほか：コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書，(社)コンクリート工学協会，2008.8
- 2) 渡辺博志，森濱和正，片平博：低品質骨材を使用したコンクリートの乾湿繰返し抵抗性に関する検討，付録「コンクリートの乾燥湿潤試験方法(案)」，土木研究所資料第4042号，(独)土木研究所，2007.1