

論文 再生骨材コンクリートによる JIS の凍結融解試験方法(A 法)と液化窒素を用いた簡易急速凍結融解試験方法の比較

弓場 有沙^{*1}・橋本 親典^{*2}・渡邊 健^{*3}・石丸 啓輔^{*4}

要旨: 現在, 我が国で JIS 規格として制定されている「コンクリートの凍結融解試験(JIS A 1148:2001)」は, 多大な労力と時間がかかる。本研究では, 凍結融解抵抗性が劣る全量再生骨材コンクリート(AE コンクリート)を対象に, 液化窒素を用いた簡易急速凍結融解試験と JIS 試験法のサイクル数比の妥当性および簡易急速凍結融解試験法の有効性について検討した。その結果, JIS 試験法の凍結融解 30 サイクルが簡易急速法 1 サイクルに相当すると見なすことで, コンクリートの耐凍害性を安全側に評価できることが明らかになった。また, 簡易急速法では, 試験前養生期間を JIS 試験法の 28 日より短縮できることが明らかになった。

キーワード: 液化窒素, 凍結融解試験, 相対動弾性係数, 耐久性指数, 再生骨材, 養生期間

1. はじめに

コンクリートの凍結融解作用に対する抵抗性を定量的に評価できる試験方法として, 2001 年に制定された JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」がある。通常は, 水中凍結水中融解法(A 法)が用いられ, コンクリートの凍結融解抵抗性は, 300 サイクルで相対動弾性係数が 60%以上であれば確保されるとされている。現在, 我国において本試験方法は広く普及しており, コンクリートの配合選定において, 対象とするコンクリートの耐凍害性の有無を評価するとき, この試験方法によって照査することができる。本試験方法では, 1 サイクルは 3 時間以上 4 時間以内と規定されており, 300 サイクルには, 1200 時間必要であり, 計測する時間を含むと約 2 カ月間

程度必要である。配合選定のために数多くのコンクリートを試験することは時間的および経済的な制約を受ける。また, 評価に用いる相対動弾性係数のための共鳴振動による動弾性係数測定試験(JIS A 1127-2001)は, 実構造物を対象にした凍害やスケーリングの試験に用いることが困難である。

これに対して, 著者らの研究室では, 液化窒素を用いた簡易急速凍結融解試験方法を開発・提案してきた¹⁾。本試験は, 液化窒素を用いて急速(30 秒間)に試験体を凍結させ, 直後に融解させ, 1 サイクルが 5 分程度で終了する。主にコンクリートの表面を基点として急激に凍結融解作用を繰り返させるために液化窒素を使用する方法を提案し, 時間の短縮と容易性を図っている。

表-1 使用材料の物理的性質

材料	種類	産地	密度 g/cm ³	比表面積 cm ² /g
セメント	普通ポルトランドセメント	UM 社製	3.16	3380
フライアッシュ	II 種相当	四国電力	2.24	3878

表-2 再生骨材及び普通骨材の物理的性質

材料	種類	産地	表乾密度 g/cm ³	吸水率 %	粗粒率 %	実積率 %	微粒分量 %
細骨材	砕砂(a)	徳島県阿讃山系 砕砂	2.59	2.66	2.70		
	砕砂(b)		2.59	0.85	2.51		
	再生骨材	四国電力製電柱	2.30	7.74	3.33		6.70
粗骨材	砕石(a)(5-15)	静岡県大井川産砕石	2.58	1.70	6.21		
	砕石(b)(15-20)		2.58	1.59	7.04		
	砕石(c)(5-20)	徳島県鳴門市撫養産 砕石	2.57	2.17	6.66	58.7	
	再生骨材(5-20)	原コンクリート: 四国電力製電柱	2.45	4.49	6.56		1.60

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部知的力学システム工学専攻 博士前期課程 1 年 (正会員)

*2 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門教授 工博 (正会員)

*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門准教授 博(工) (正会員)

*4 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部総合技術センター技術専門職員 (正会員)

表-3 示方配合

配合名	スランブ cm	空気量 (%)	W/P (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					SP 剤	消泡剤	AE 剤
						W	C	FA	S	G			
N50	18±2.0	5.0±1.5	50	50.0	43.0	175	350	0	796	908	1.30%	なし	2A
N60			60	60.0	50.0	181	302	0	865	872	1.10%		なし
R50	12±2.0		50	50.0	49.0	165	330	0	767	850	1.20%	2T	
RV50			50	66.3	51.0	165	249	81	746	848	1.20%	1T	
RF50			40	48.7	49.0	165	339	74	687	847	0.70%	0.5T	
RFV50			60	87.3	53.0	165	189	85	796	835	0.90%	なし	
RF40													
RF60													

N60 の骨材は、砕砂(a)および砕石(a)と(b)を使用。N50 の骨材は砕砂(b)および砕石(c)を使用。

1T とは、(C+FA)×0.002%の使用量、1A とは、(C+FA)×0.001%の使用量を意味する。

配合名の R は再生骨材、N は普通骨材、V は振動付与、F はフライアッシュ、2桁の数字は、W/P を意味する。

ただし、本試験方法では、試験体の端部を局部的に凍結融解させるために、動弾性係数を求める方法は、JIS A 1146 の共鳴法ではなく、試験部位に超音波を入力しその到達時間に基づいた動弾性係数を求める超音波法を採用している。

これまでの NonAE コンクリートと AE コンクリートを対象にした研究成果¹⁾では、JIS A 1148(A 法)の凍結融解繰返回数(以後、サイクル数と称す)30 回が簡易急速凍結融解試験方法のサイクル数 1 回に相当するという結論を得た。しかしながら、凍結融解試験において耐久性指数の低い NonAE と耐久性指数の高い AE コンクリートでは、凍結融解抵抗性が極端に異なる場合が一般的である²⁾。そのため、研究成果¹⁾では、NonAE と AE コンクリートの相対動弾性係数-サイクル数の曲線が大きく異なり、両試験方法のサイクル数比の決定には問題が残されている³⁾。また、簡易急速凍結融解試験方法の試験前養生の期間は、現在の JIS A 1148 に準拠して材齢 28 日である。本試験方法の目的は、JIS A 1148(A 法)よりも早期にコンクリートの凍結融解抵抗性を照査することである。よって、試験前養生期間は、28 日よりも早期である方が望ましい。また、液化窒素の吹付け時間は 30 秒間である。これらの実験条件の適性について検証する必要がある。

本研究では、凍害劣化のメカニズムが異なるものの NonAE と AE コンクリートの相対動弾性係数-サイクル数曲線の中間的な凍結融解抵抗性を有するコンクリートとして、細・粗骨材全量に再生骨材を用いた AE コンクリートに着目した⁴⁾。フライアッシュや消泡剤を用い、振動付与練混ぜ工法を適用し、広範囲な耐久性指数を有する全量再生骨材コンクリートを製造し、両凍結融解試験方法のサイクル数比の検証を行うことを目的とした。

検証を行うにあたり、まず、普通骨材を用いた AE コンクリートを対象に、簡易急速凍結融解試験方法の実験

条件である、液化窒素の吹付け時間の長短および試験前養生期間が相対動弾性係数-サイクル数曲線に与える影響について検討を行った。

次に、全量再生骨材を用いた AE コンクリートによる JIS A 1146(A 法)と簡易急速凍結融解試験方法のサイクル数比の検討を行った。さらに、JIS A 1146(A 法)の試験では、動弾性係数の測定は共鳴法を用いているが、共鳴法は試験体に大きなひび割れが入ることによって、たわみ振動の共振点が不安定になり、正確な共振振動数を求めることができないことが RILEM 等の委員会報告によって指摘されている。⁵⁾本研究では、簡易急速凍結融解試験法との相関性に加え、JIS A 1146(A 法)の試験では、超音波法による相対動弾性係数の計測を行い、共鳴法と超音波法を比較して検討した。なお、今回の研究は再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性を調べたものであり、試験結果を普通コンクリートに拡張するものではない。

2. 実験シリーズ 1 の概要

シリーズ 1 は、普通骨材を用いた AE コンクリートを対象として、簡易急速凍結融解試験方法の試験条件(吹付け時間および試験前養生期間)が、凍結融解抵抗性に与える影響について検討した。

2.1 使用材料

実際に使用した材料および骨材の物理的性質を表-1、2 に示す。細骨材は、徳島県阿讃山系砕砂を表面乾燥状態で使用した。粗骨材は、静岡県大井川産砕石および徳島県鳴門市撫養産砕石を表面乾燥状態で使用した。

混和剤は、高性能 AE 減水剤(主成分：ポリカルボン酸エーテル系化合物)、空気量調整剤を用いた。

2.2 示方配合

供試体は、普通骨材を使用した W/P50%の AE コンクリート (以降、N50 と称す)を用いた。実験に使用したコ

ンクリートの示方配合を表-3に示す。配合名のRは再生骨材、Nは普通骨材、Vは振動付与、Fはフライアッシュ、2桁の数字は、W/Pを意味する。本研究で用いた供試体は全て各条件につき1本の供試体を作成し、養生方法は水中養生とした。

2.3 実験装置

写真-1は実験で用いた簡易急速凍結融解試験装置である。簡易急速凍結融解試験装置は、液化窒素容器をクライオトロールポンプとつなぎ、電源を入れると1分間に420ミリリットルの液化窒素が吹きつけられる仕組みになっている。

2.4 試験方法

液化窒素を用いた簡易急速凍結融解試験を、既往の研究から以下の手順で行った。用いた供試体は

まず液化窒素用のバケツに、φ100×h200mmの円柱供試体を静かに投入し、液化窒素を数秒間吹き付ける。蓋をして30秒間底面を凍結させる。浸漬時間後、バケツから取り出し、お湯(約40℃)に浸漬し、5分間融解させる。融解後、水分を拭き取り、凍結した底面から約15mmの位置に、超音波センサーをあて、距離100mm間の超音波伝播時間を計測する。この作業を1サイクルとし、相対動弾性係数が60%以下になるか、サイクル数が10回に達した時点を試験終了とした。動弾性係数は、各試験で測定した超音波伝播時間を用いて緒方らが提案する以下の式から求めた。⁶⁾

$$E_d = 4.038VL^2 - 14.438VL + 20.708 \quad (1)$$

ここに、

E_d : 動弾性係数(GPa)

VL : 超音波伝播速度(km/s)

また、凍結融解試験を評価する相対動弾性係数は、上記式(1)の動弾性係数の値を使用して、式(2)から求めた。

$$\text{相対動弾性係数}(\%) = E_{dn}/E_{d0} \times 100 \quad (2)$$

ここに、

E_{dn} : サイクル数nの超音波伝播速度から評価した動弾性係数(GPa)

E_{d0} : 凍結融解試験の開始前に測定した超音波伝播速度から評価した動弾性係数(GPa)

また、耐久性指数は、300サイクル(簡易急速凍結融解試験では10サイクル)を終える前に相対動弾性係数が60%に達し試験が終了した場合、最終的に300サイクル(簡易急速凍結融解試験では10サイクル)を終えた時の相対動弾性係数を予測するために用いる。以下の式(3)から算出する。

$$D_F = P \cdot N / M \quad (3)$$

ここに、

D_F : 耐久性指数

P : Nサイクルのときの相対動弾性係数(%)



写真-1 簡易急速凍結試験装置

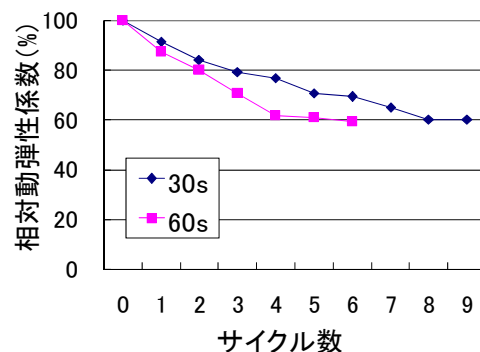


図-1 N50の液化窒素吹付け時間を30sと60sで行った場合の試験結果

N : 相対動弾性係数が60%になるサイクル数、又は300サイクル(簡易急速凍結融解試験では10サイクル)のいずれか小さいもの

M : 300サイクル(簡易急速凍結融解試験では10サイクル)

2.5 実験条件

(1) 液化窒素の吹付け時間を変化させた場合の試験

簡易急速凍結融解試験における液化窒素の吹き付け時間を30秒と60秒の2パターンで行い、試験時間の検討を行う。供試体は材齢31日のN50を使用した。

(2) 28日以内の早期材齢での凍結融解試験

材齢を3日、8日、31日と変えて簡易急速凍結融解試験を行った。ただし、液化窒素の吹き付け時間は30sとした。

2.6 液化窒素を用いた簡易急速凍結融解試験結果

(1) 液化窒素の吹付け量の影響

図-1に簡易急速凍結融解試験における液化窒素の吹き付け量を変えた場合の比較を示す。吹き付け時間が60sの場合は6サイクルで式(2)で求めた相対動弾性係数の値が60%に達しているのに対して、吹き付け時間30sでは9サイクルかかる。

式(3)を用いて算出した耐久性指数は、吹き付け時間60sで35.97、30sで53.98となり、60sの方がより早く相対動弾性係数60%に達し、耐久性指数が30sに比べきわめ

て低い値になった。吹付け時間 60s で簡易急速凍結融解試験を行った場合、より短いサイクル数で試験が終了できるが、吹付け時間 30s であれば液化窒素の総使用量が減り、コスト削減になる。よって、液化窒素吹付け時間は 30s が妥当であるといえる。

(2)28 日以内の早期材齢の影響

図-2 に圧縮強度の推移、図-3 に N50 での材齢 3 日、8 日、31 日に行った簡易急速凍結融解試験結果を示す。液化窒素の吹付け時間は 30s で一定とした。相対動弾性係数は式(2)、耐久性指数は式(3)を用いて求めた。図-3 より、材齢 3 日という早期材齢の供試体では強度が低いいため、5 サイクルで相対動弾性係数が 60%に達している。図-4 に液化窒素の吹付け時間 30s と 60s それぞれの相対動弾性係数が 60%を下回ったときのサイクル数の推移を示す。材齢によって差はあるものの、材齢が増し圧縮強度が上昇するにつれてサイクル数ものびている。

吹付け時間を 30s と 60s で比較した場合、相対動弾性係数が 60%を下回るサイクル数差は、材齢 8 日と 31 日は 3 回であった。しかし材齢 3 日ではどちらの場合も早期に相対動弾性係数が 60%に達するため、吹付け時間によるサイクル差も 1 回となり、大きな差は見られなかった。また、耐久性指数は材齢 3 日が 29.84、材齢 8 日が 42.95、材齢 31 日が 53.98 となり材齢 3 日が極端に低い結果となった。材齢 8 日と 31 日を比べた場合、吹付け時間に関わらず、相対動弾性係数が 60%を下回ったときのサイクル数は 1 サイクル差しか見られなかった。また、ASTM においても試験開始材齢は 14 日を標準としており、試験開始材齢早期化について検討の余地がある。よって、普通ポルトランドセメントを用いた、W/C50%のコンクリートにおいて材齢 8 日以上であれば圧縮強度が凍結融解抵抗性に及ぼす影響は乏しく、急速凍結融解試験は材齢 28 日より早期に行うことができると考えられ、時間短縮につながるといえる。

3. 実験シリーズ 2 の概要

シリーズ 2 では、全量再生骨材を用いた AE コンクリートを対象として、JIS A 1148(A 法)と簡易急速凍結融解試験方法で得られる耐久性指数による両試験方法のサイクル数比の検討を行った。さらに、JIS A 1148(A 法)では、動弾性係数を求める測定方法である共鳴法と超音波が、動弾性係数に与える影響について検討した。

3.1 使用材料

実際に使用した材料の物理的性質を表-1 に示す。再生骨材は、廃品コンクリートポールを破碎・洗浄・乾燥・分級したものである。原コンクリートの配合は、W/C29%、W144kg/m³、細骨材率 37.4%、細骨材および粗骨材の表乾密度と吸水率は、2.57g/cm³、1.75%および 2.64g/cm³、

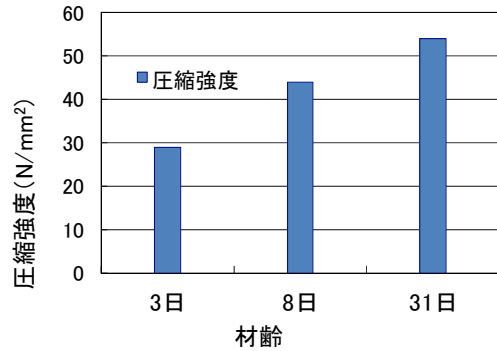


図-2 N50 の材齢 3 日、8 日、31 日での圧縮強度の推移結果

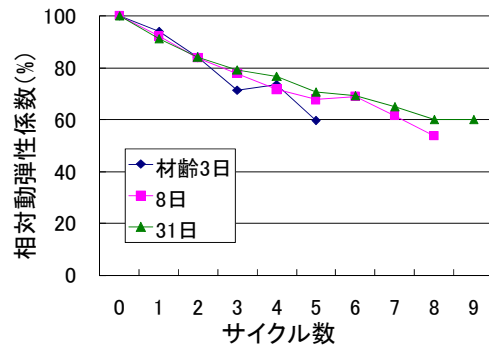


図-3 N50 の材齢 3 日、8 日、31 日での簡易急速凍結融解試験結果

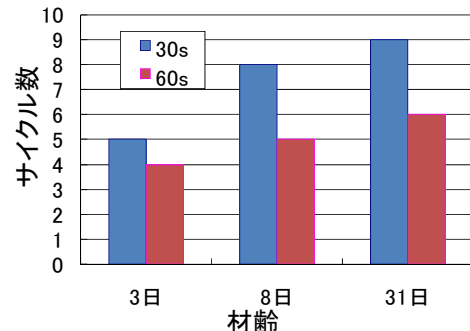


図-4 相対動弾性係数が 60%を下回った時のサイクル数の推移結果

1.60%である。再生骨材のクラスは、再生骨材 L に相当する。

混和剤は、高性能 AE 減水剤(主成分：ポリカルボン酸エーテル系化合物)、空気量調整剤および再生骨材は空気が入りやすいため消泡剤(主成分：ポリアルキレングリコール誘導体)を用いた。

3.2 示方配合

実験に使用したコンクリートの示方配合を表-2 に示す。全量再生骨材コンクリートは合計 6 配合である。W/P50%のコンクリートの配合は、振動とフライアッシュの混入無し、振動及びフライアッシュの一方または両方を用いた 4 種類である。W/P40%、60%のコンクリートはフライアッシュを混入した。振動とは、ミキサで練混ぜを行うときに、振動を与えながら練混ぜることを意味する²⁾。なお、振動エネルギーは、練混ぜエネルギーと

比較して相当小さい。著者らのこれまでの研究によって、全量再生骨材コンクリートの製造において振動付与練混ぜは、再生骨材の表面に付着している原コンクリートの硬化セメントペーストの微粉末を除去し、再生骨材表面の遷移帯を強固にし、圧縮強度の増加を図ることができると明らかになっている。フライアッシュは、セメントの内割り置換である。

全量再生骨材コンクリートの練混ぜは、練混ぜ容量 1000 リットルの実機レベルの振動付与練混ぜミキサーを用いて、実機試験の一環として行った。

3.3 実験装置

(1)簡易急速凍結融解試験

実験概要(シリーズ 1)と同様の物を用いた。

(2)JIS 法

通常の凍結融解試験機を用いた。

3.4 試験方法

(1)液化窒素を用いた簡易急速凍結融解試験方法

シリーズ1と同様に行った。ただし、材齢は28日とし、液化窒素吹き付け時間は30秒間とした。

(2) JIS A 1148 (A 法)

JIS 規格での試験方法は共鳴法および超音波法によって相対動弾性係数を求める方法がある。そのため、再生骨材を用いたコンクリートによる共鳴法と超音波法の相対動弾性係数の比較、また超音波法での測定に限られている簡易急速凍結融解試験方法との相関性を求めるために、JIS(A 法)は共鳴法と超音波法の2種の計測を実施した。JIS(A 法)においても、簡易急速凍結融解試験方法と同様に、計測間隔 100mm で供試体の軸直角方向に超音波を入力させ、超音波法による相対動弾性係数の計測を行った。

3.5 実験結果および考察

(1)スランブおよび空気量と圧縮試験結果

表-3 に各配合の空気量、スランブおよび材齢 28 日における圧縮強度試験結果を示す。なお空気量は、空気量試験で得られた見かけ空気量から骨材修正係数の 0.7% を差し引いた値を用いた。スランブは N50 が最も大きい値となった。空気量は、練混ぜ時に振動をかけなかった R50 と RF60 が 8%以上含む結果となった。再生骨材を用いたものについては W/P が低いものほど単位水量が減るため強度が高く、6 種類の中では RF40 が最も圧縮強度が高い結果となった。W/P50%の配合については、フライアッシュの混入無混入に関わらず振動を加えた供試体が高い値となり、W/P が高く振動を加えなかった RF60 が空気を多く含んでいたため、8 配合中で最も低い値になった。

(2)JIS 法との比較結果

図-5 に JIS(A 法)および簡易急速法の相対動弾性係数

表-3 各配合の空気量・スランブ・材齢 28 日における圧縮強度試験結果

配合名	スランブ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)
N50	21.0	4.0	52.7
N60	10.5	5.3	40.9
RF40	12.0	5.2	38.8
R50	10.0	8.4	27.7
RV50	7.5	5.3	32.9
RF50	11.5	5.3	28.3
RFV50	10.0	4.7	31.3
RF60	14.0	8.4	15.3

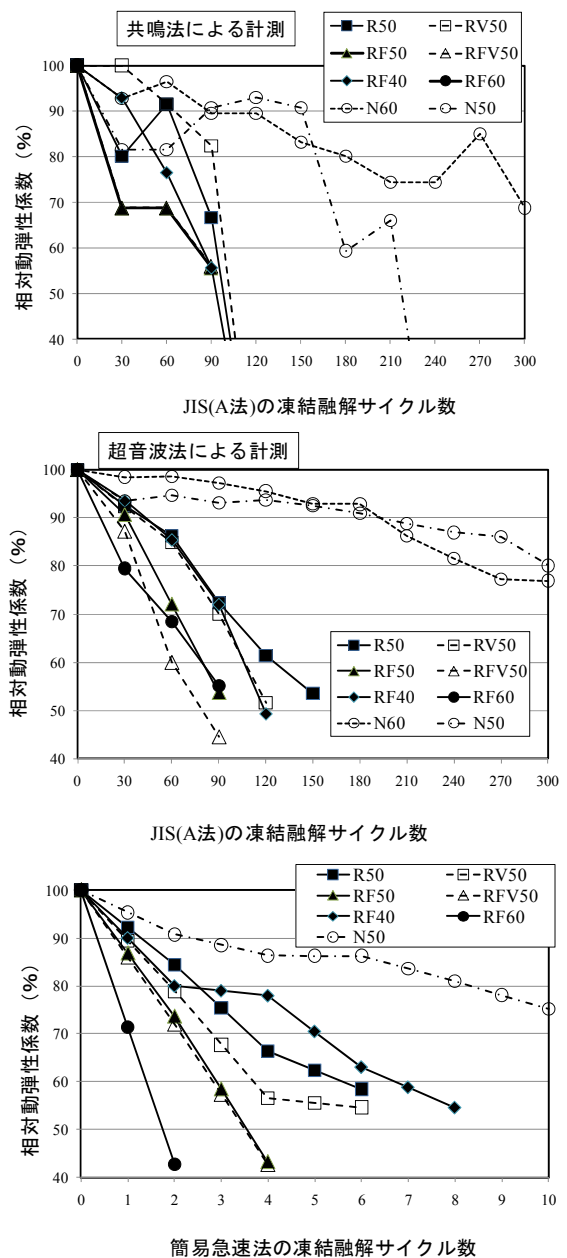


図-5 JIS(A 法)共鳴法、超音波法および簡易急速法の相対動弾性係数とサイクル数の関係

とサイクル数の関係を示す。N60 の配合については、簡易急速凍結融解試験を行っていない。JIS 法における共鳴法と超音波法を比較した場合、相対動弾性係数の変化に違いがみられた。

一方、JIS(A 法)と簡易急速凍結融解試験の超音波法は、同様な傾向を示した。フライアッシュ有り(RF50, RF40, RF60)または振動を加えた供試体(RFV50)が短いサイクル数を示し凍結融解に弱い結果を示している。これは材齢 28 日の供試体を使用しており、フライアッシュを混入したコンクリートの初期材齢における強度が小さいためこのような結果になったと考えられる。

図-6 は、JIS(A 法)と簡易急速凍結融解試験方法の相対動弾性係数のサイクル数比を 30 回:1 回および 30 回:0.5 回に対応すると仮定して、両者の耐久性指数の分布図を作成したものである。JIS(A 法)と簡易急速法のサイクル数比 30:1 では、実験データが 45 度の直線より上側に分布する結果となった。これは、簡易急速法の液化窒素の吹付け時間 30 秒が、厳しいためと考えられる。一方、サイクル数比 30:0.5 では、ほぼ直線上に分布するが、一部は下回った。簡易急速凍結融解試験法は、急速試験としての性格上、JIS(A 法)よりも安全側の結果を出す方が望ましい。よって、凍結融解抵抗性が劣る全量再生骨材コンクリート(AE コンクリート)においても、JIS(A 法)凍結融解回数 30 回が、簡易急速凍結融解試験法の凍結融解回数 1 回に相当するサイクル数比は、妥当であるとみなすことができる。

4. まとめ

凍結融解抵抗性が劣る全量再生骨材コンクリート(AE コンクリート)に着目し、著者らが提案した簡易急速凍結融解試験と JIS 試験法のサイクル数比の妥当性について検討した。本実験の範囲内で以下のことが明らかになった。

- 1) 簡易急速凍結融解試験は液化窒素吹き付け時間 30s が適当である。
- 2) 簡易急速凍結融解試験法では、材齢 8 日以上であれば、材齢 28 日とほぼ同等の試験結果が得られる。
- 3) 凍結融解抵抗性が劣る全量再生骨材コンクリート(AE コンクリート)を対象にした、JIS A 1148(A 法)の凍結融解試験方法と液化窒素を用いた簡易急速凍結融解試験法は、A 法の凍結融解 30 サイクルが簡易急速凍結融解試験法 1 サイクルに相当する。
- 4) 若干、簡易急速凍結融解試験法の方が厳しい試験であり、コンクリートの耐凍害性に対して安全側の評価を与える。

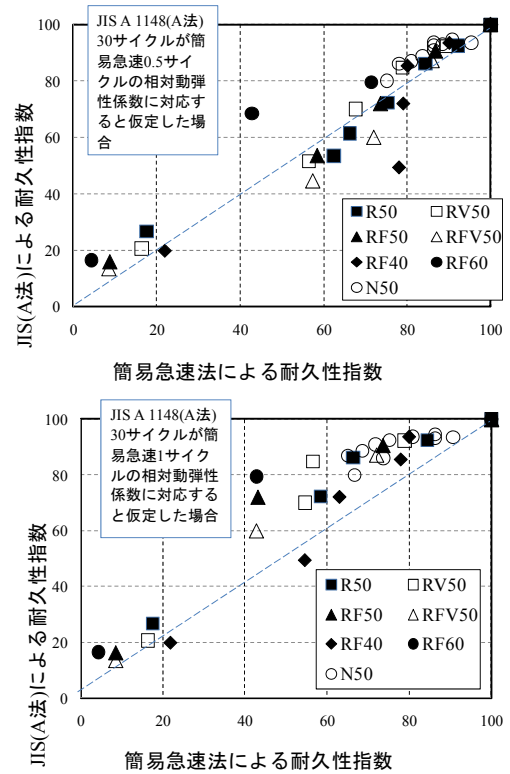


図-6 JIS(A 法)と簡易急速法のサイクル数の相関

謝辞

本研究の一部は、池端大地氏(株式会社明治産業勤務)が平成 21 年度徳島大学建設工学科の卒業研究で実施されたものである。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 橋本 紳一郎ほか：液体窒素を用いたコンクリートの簡易的凍結融解試験の提案, JCI 年次論文集, Vol.27, No.1, pp.757~762, 2005.1
- 2) 社団法人 日本コンクリート工学協会：コンクリート技術士研修テキスト, Vol.22, pp.79~80, 2010.6
- 3) 橋本 親典ほか：再生骨材コンクリートを用いた簡易急速凍結融解試験法と JIS A 1148(A 法)との相関性, 土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集, Vol.16, pp.295~296, 2010.5
- 4) 江口 正晃ほか：骨材全量を再生細・粗骨材 L を用いたコンクリートの硬化性状に関する基礎的研究, JCI 年次論文集, Vol.30, No.2, pp.385~390, 2008.2
- 5) 弾性波法の非破壊検査研究小委員会報告書および第 2 回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演概要集, Vol.73, pp.32~36, 2007.2
- 6) 緒方 英彦ほか：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価, JCI 年次論文報告集, Vol.24, No.1, pp.1563~1568, 2002.1