

論文 再生骨材の簡易凍結融解試験法の合理的判定手法に関する研究

片平 博^{*1}・渡辺博志^{*2}

要旨：再生骨材の簡易な凍結融解試験法を提案した。この方法は再生骨材を5・10,10・15,15・20mmの単粒度ごとに容器に入れ、冷凍庫と水槽に交互に入れることで凍結融解を繰り返す方法である。この試験法の更なる合理化を目指し、5・20mmの全粒度範囲の再生骨材を1つの容器に入れて試験を行い、試験前後の粗粒率(FM)の違いから凍結融解抵抗性を評価する手法について検討を行った。また、試験条件として冷凍庫の性能との関連や試験容器の大きさ、繰り返し回数の影響等についても検討を行った。

キーワード：再生骨材, 凍結融解抵抗性, 試験法, 粗粒率, 冷凍庫

1. はじめに

現在、解体コンクリートの大半は道路の路盤材である再生クラッシャーランとして再利用されている。しかしながら、道路建設の今後の見通しや、需要と供給の地域的なアンバランス等を考えると、今後は、コンクリート解体材の利用用途の拡大を図ることが重要である。

特に、コンクリート解体材を再びコンクリート用骨材（再生骨材）として利用しようとする考えはリサイクルの基本であり、以前から数多くの研究が行われてきている¹⁾。

コンクリート解体材から原骨材だけを取り出せれば良質な骨材資源となる。しかし現状の技術では多大なエネルギーとコストを要し、また、解体コンクリートの容積の約半分が再利用困難な微粉となり、再生骨材としての利用可能な歩留まりは必ずしも高くない。

現在、再生クラッシャーランとして一般的に

製造、施工されている再生骨材は図-1に示すように原粗骨材にモルタルが付着した塊（あるいはモルタル単独の塊）であり、このような状態でコンクリート用骨材として再利用できればロスも少なく合理的である。

このような再生骨材をコンクリートに使用した場合には、とりわけ凍結融解抵抗性の低下が懸念される。これまでの研究¹⁾によれば、再生骨材の吸水率が大きいもののほど凍結融解抵抗性は低下する傾向にあるが、吸水率が大きくても凍結融解抵抗性の高いものも存在し、凍結融解抵抗性を適切に評価する新たな指標（試験法）が必要であった。

そこで筆者らは、昨年のJCI年次大会において再生骨材の簡易な凍結融解試験法の提案²⁾を行った。その試験法について、その後も検討を続け、今回は合理的な判定手法の検討、および各種試験条件が結果に及ぼす影響について得られた知見を報告する。

2. 再生骨材の凍結融解試験法

既報²⁾で報告した再生骨材の凍結融解試験法の概要について紹介する。

本試験法は図-2に示すように、再生骨材試

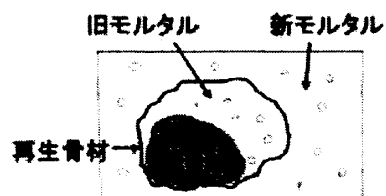


図-1 再生コンクリートの概念図

*1 土木研究所 構造物マネジメント技術チーム 主任研究員（正会員）

*2 土木研究所 構造物マネジメント技術チーム 主席研究員（正会員）

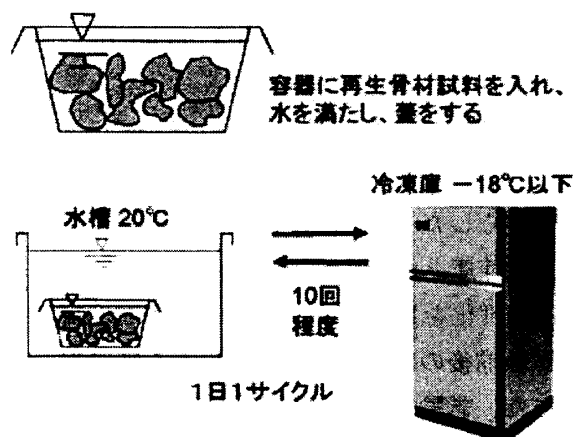


図-2 再生骨材凍結融解試験法のイメージ

料を容器に詰め、水を満たして蓋をし、これを水槽と冷凍庫に1日1サイクルで交互に入れ、10回の繰り返し終了後に凍結融解により砕けた試料の粒度を測定するものである。

粒度が5-20mmの再生粗骨材を対象に検証試験を行った。試料は5-10mm, 10-15mm, 15-20mmの各群にふるい分けて容器に詰め、試験終了後に細粒化されフルイ目から抜け落ちる量(凍結融解損失質量率)を求め、さらに、骨材全体の損失率は、各群における粒の質量百分率と、各群における損失率との積の総和で求めた。

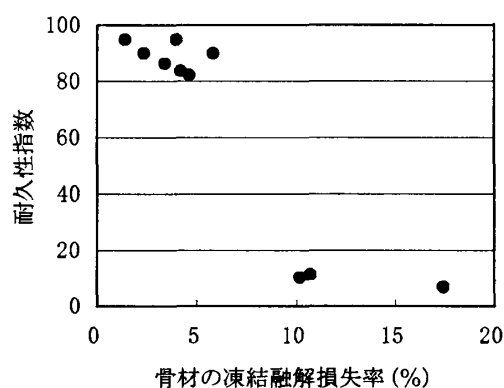
本試験法によって得られた再生骨材の凍結融解損失率と再生骨材コンクリート(W/C55%, AEコンクリート)の耐久性指数との関係は図-3に示すように良い対応を示した。

3. 実験方法

3.1 粗粒率による判定法の検討

2. で示した試験では「硫酸ナトリウムによる安定性試験」に準拠して、再生骨材を5-10mm, 10-15mm, 15-20mmの3群にふるい分けた試料に対して試験を行った。小さな冷凍庫で試験を行う場合などには容器数は少ないほうが効率的である。そこで、5-20mmの連続粒度の試料を対象に試験を実施し、試験前後の粗粒率(Fineness Modulus: FM)の変化に着目した評価法について検討を行った。

なお、凍結融解試験終了後の試料は細粒化されており、FMの本来の求め方からすれば

図-3 本試験法の結果と耐久性指数の関係²⁾

0.15mmまでの細かいフルイを用いなければならない。しかし、絶乾でない試料を細かい粒子までふるうのは困難であり、合理的ではない。そこで2.5mm以下のフルイは使用せず、5mm以下の粒子は全て2.5mmのフルイ上に止まると仮定してFMを計算することとした。この値を本論文ではFM(5)と表記する。5-20mmの再生骨材に対するFM(5)は式(1)で求められる。

$$FM(5) = \frac{(M_{10} + M_5)}{100} + 5.0 \quad (1)$$

ここに、

M_{10} , M_5 : 10mm, 5mmフルイ上にとどまる試料の質量百分率(%)

3.2 対象とした再生骨材

実験の対象とした再生骨材は表-1に示す13種類である。全て、原コンクリートを製造し、それを破砕して再生骨材を製造した。

再生骨材の名称は原コンクリートの品質[粗骨材種類(碎石 or 川砂利)・W/C・空気量(AE or NonAE)]と破砕方法[J:ジョークラッシャー, T:ツイスター, R:ロッドミル]を意味する。

表-1にはこれらの再生骨材を用いて製造した再生骨材コンクリート(W/C55%, AEコンクリート)の性能も示した。

普通骨材では骨材の凍結融解抵抗性は硫酸ナトリウムによる安定性損失質量で評価されるが、表-1に示すように安定性損失質量の値はどの再生骨材も40%前後で、コンクリートの耐久性指数との対応は見られなかった。

表-1 再生骨材の品質と再生骨材コンクリートの性状

再生骨材の No.種類	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	安定性 損失質量 (%)	再生コンクリート の配合	再生骨材コンクリートの性能			
					スランブ (cm)	実測Air (%)	圧縮強度 σ_{28} (N/mm ²)	耐久性 指数
1. 砕58N-J	2.35	5.58	52.7	Gmax:20mm W/C:55% s/a:46% 目標Air:4.5% 単位量(kg/m ³) W=165 C=291 S=844 G=927~946	14.0	5.7	32.5	24
2. 砕58N-T	2.36	5.40	39		8.0	5.1	33.6	25
3. 砕58N-R	2.36	5.35	40.1		15.1	6.0	31.7	27
4. 砕77A-J	2.31	5.65	55		8.3	4.9	32.3	73
5. 砕77A-T	2.36	5.07	40.8		8.5	5.1	31.0	67
6. 砕77A-R	2.37	4.94	42.3		9.6	6.6	30.3	80
7. 川58N-J	2.35	4.73	36.2		10.8	5.8	35.0	40
8. 川77A-J	2.37	4.25	46.9		14.2	5.1	30.2	31
9. 川55N-J	2.36	4.29	38.6		10.6	5.5	35.8	86
10. 川70N-J	2.37	4.28	49.1		7.8	5.1	34.6	44
11. 川85N-J	2.36	4.29	49.4		9.5	5.9	30.6	44
12. 川70A-J	2.34	4.45	34.4		9.2	6.1	32.6	87
13. 川85A-J	2.33	4.61	39.8		10.8	5.6	31.2	84

3.3 試験手順

(1)容器に入る分の再生粗骨材試料を表乾状態とし、フルイ分けにより各粒度の質量を測定する。今回の試験では5-10, 10-15, 15-20mmの質量比率を、再生骨材試料の平均的な粒度分布として2:2:1で統一した。

(2)この試料を容器に入れ、容器中に水を満たし、蓋をする。

(3)容器を冷凍庫に入れ、中の水が完全に凍結するまで冷凍する。凍結時間を16時間とした。

(4)容器を冷凍庫から取り出し、水槽(+20℃)に沈め、中の氷が完全に融解するまで水中におく。融解時間を8時間とした。

(5)1日1サイクルで(3)と(4)を交互に繰り返す。土日は凍結したままの条件とした。

(6)10サイクルを終了した後に容器から再生骨材試料を取り出し、表乾状態にしてフルイ分けにより粒度分布を測定する。

(7)粒度分布から3.1に示す方法によりFM(5)を算出し、試験前後の数値の変化量を求める。

3.4 実験ケース

実験は表-2に示す条件で5回実施した。実験に使用した容器と冷凍庫の諸元を表-3, 4に示す。

表-2中の実験1,2,3は表-1に示す13種類の再生骨材に対して凍結融解試験を実施したケースである。容器にはCまたはDを用い、容器

表-2 実験ケース

	冷凍庫	容器	試料量	容器数	繰返し回数
実験1	I	C	900g	6	10,15,20
	II	C	900g	5	
	III	C	900g	2	
実験2	I	C	750g	13	10
実験3	I	D	600g	13	10
実験4	I	C	750g	12	10
		D	300g	11	
実験5	I	A	3,000g	2	10
		B	1,500g	2	
		C	750g	2	

表-3 容器の大きさ

	容量(cc)	寸法(mm)
A	2,800	φ167×h175
B	1,250	φ140×h85
C	800	φ133×h60
D	550	φ105×h70

表-4 冷凍庫の諸元

	冷凍庫容量	性能*	最低温度	タイプ
I	200リットル	フォースター	-18℃以下	冷凍庫
II	60リットル	スリースター	-18℃以下	冷凍庫
III	20リットル	スリースター	-18℃以下	冷凍冷蔵庫

*スリースター:最低温度-18℃以下

フォースター:容積100Lあたり4.5kgの食品を24時間以内に-18℃以下に冷凍する

中の試料量は900,750,600gの3水準とした。

実験1では他の要因に関する検討も行った。すなわち、冷凍庫の性能の違いによる影響をみるために、表-1の再生骨材No.1~6は冷凍庫I, No.9~13は冷凍庫II, No.7,8は冷凍庫IIIで実験を行った。また、凍結融解の繰り返し

を20回まで行った。

実験4は試料の量が冷凍庫の能力を超えてしまった例であり、また、容器Dに対しては300gという少ない試料量として、容器中の水量が多い条件とした。

実験5は容器の大きさの影響を検討する目的で、容器A(2,800cc)に3,000g、容器B(1,250cc)に1,500g、容器C(800cc)に750gの試料を入れて実験を行った。

4. 実験結果

4.1 FM(5)と耐久性指数との関係

再生骨材コンクリートの耐久性指数は表-1に示すとおりで、耐久性指数が低いのは再生骨材のNo.が1,2,3,7,8,10,11であった。

実験1,2,3から得られる試験前後のFM(5)の変化量を図-4に示すが、コンクリートの耐久性指数と同様に、変化量が大きいのは再生骨材No.1,2,3,7,8,10,11であった。

図-5はコンクリートの耐久性指数とFM(5)(実験1～3の平均値)の関係を示したものである。耐久性指数が低いものほどFM(5)の変化量は大きくなる傾向を示した。耐久性指数は一般に60がボーダーラインとされるが、耐久性指数60はFM(5)の変化量-0.1と概ね対応する結果となった。

4.2 冷凍庫の性能の影響

本実験方法で最も留意が必要なのが凍結に関わる条件の設定であり、冷凍庫の能力を考慮して試験を行う必要がある。

表-2に示すように、実験2,3では冷凍庫I

に13個の容器を入れたのに対して、実験1では冷凍庫Iに6個、冷凍庫IIに5個、冷凍庫IIIに2個の容器を入れて試験を行った。図-6は実験1,2,3の各実験結果同士の相関をみた結果であるが、実験1と実験2は良い相関を示し、冷凍庫の違いの影響は認められなかった。冷凍庫の能力は冷凍庫I、II、III順に低いが、能力に合わせて試料の数を設定したため、各冷凍庫ともに十分な凍結が行えたものと考えられる。

図-7は凍結行程での冷凍庫内温度の履歴で

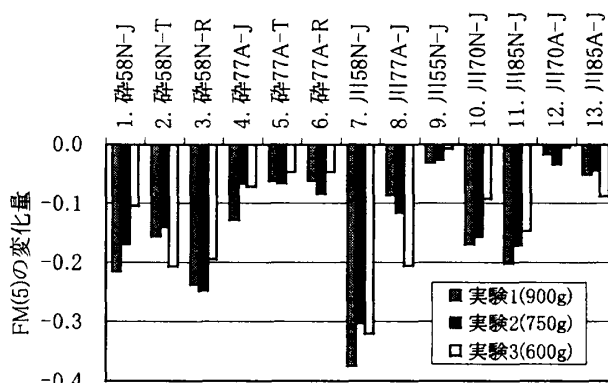


図-4 各再生骨材ごとのFM(5)の結果

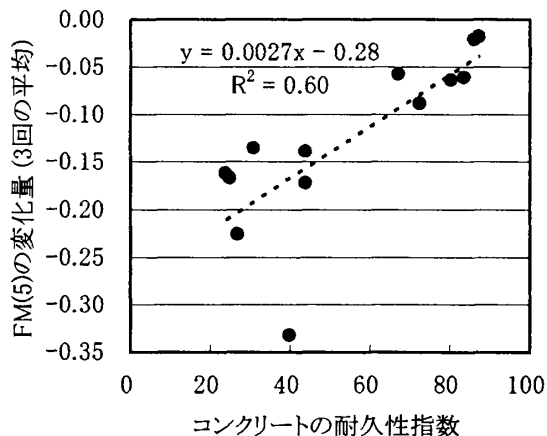


図-5 耐久性指数とFM(5)の関係

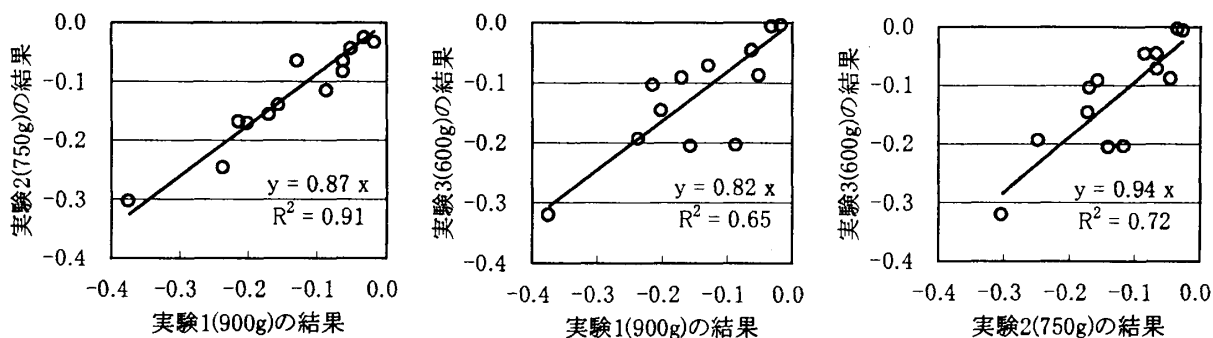


図-6 実験1,2,3の結果の比較 (FM(5)の変化量)

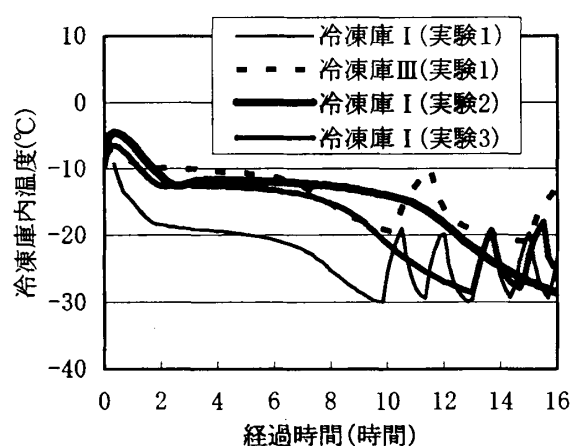


図-7 冷凍庫内の温度履歴

ある。試料を冷凍庫に入れたら、試料の温度が十分に低下するまで冷凍庫内の温度も設定した最低温度までは下がらないことが分かる。この特性を利用して、あらかじめ、その冷凍庫の最低温度を確認し、その温度まで低下したかどうかを確認することで、試料温度が確実に低下したか否かを判断することが可能と考えられる。なお、最低温度まで低下した後は 10℃程度の幅で昇降を繰り返す傾向を示した。

図-7より、冷凍庫 I の結果では試料量の違いから実験 1,3,2 の順に温度低下速度が遅くなる傾向を示した。また、冷凍庫 III の設定最低温度は冷凍庫 I に比較してやや高い設定であった。このように実験 1,2,3 では温度低下速度や最終安定温度に差があったが、試験結果（図-4、図-6）に、これに起因すると思われる有意な差は認められなかった。

4.3 容器内の水量の影響

実験 4 は冷凍庫の冷凍能力を超える試料量を試験したケースである。それから得られる FM(5) の変化量を図-8 に示す。図-4 の結果に比較して明らかに FM(5) の変化量が小さかった。また、実験 4 では 800cc の容器に 750g の再生骨材を入れた

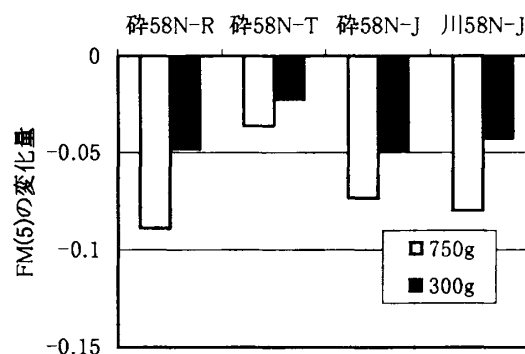


図-8 実験4の結果

ものと 550cc の容器に 300g の再生骨材を入れたものとを試験したが、図-8 から分かるように 300g の結果のほうが FM(5) の変化量が小さかった。

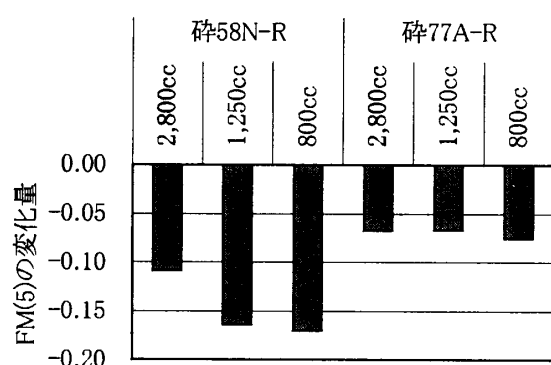
この原因としては 550cc の容器には約 600g の再生骨材を入れることができるにも関わらず 300g としたことで結果的に容器内の水量が多くなった。表-5 に示すように再生骨材（コンクリート）に比較して水や氷の比熱は大きい。さらに水が氷に変化するためには大きな潜熱を必要とするため、水量が多いほど凍結しにくい。表-6 は各試験ケースごとに、20℃から-18℃に凍結するのに必要な熱量を計算した結果である。水を含む試料 1 リットルあたりの熱量は実

表-5 試料の熱特性

	比熱 (J/g℃)	潜熱 (J/g)	20℃ → -18℃ に 必要な熱量 (J/g)
水	4.2	335	-455
氷	2		
再生骨材	1.05	-	-40

表-6 容器中の水量を考慮した場合の凍結に必要な熱量

	冷凍庫 種類	容器		容器中の物質質量(g)		20℃ → -18℃ に必要な熱量(kJ)		
		種類	個数	再生骨材	水	1容器 あたり	水を含む試料 1リットルあたり	冷凍庫内 全体
実験1	I	C	6	900	430	-232	-290	-1,390
	II	C	5	900	430	-232	-290	-1,158
	III	C	2	900	430	-232	-290	-463
実験2	I	C	13	750	490	-253	-316	-3,288
実験3	I	D	13	600	300	-161	-292	-2,087
実験4	I	C	12	750	490	-253	-316	-5,320
		D	11	300	430	-208	-378	
実験5	I	A	2	3,000	1580	-839	-300	-2,886
		B	2	1,500	640	-351	-281	
		C	2	750	490	-253	-316	



図－9 実験5の結果(容器の大きさとFM(5)の変化量)

験 4 の容器 D の値が最も大きな値であった。

このように、容器中の水量はできるだけ少ないほうが効率的である。そのためには、試料の粒度も単粒度よりも連続粒度としたほうが実積率が向上し、それだけ水量が少なくなるので効果的である。

4.4 容器の大きさの影響

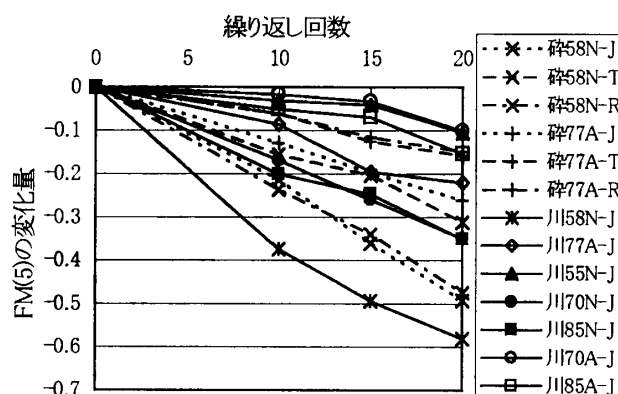
実験 1,2,3 では容器 C または D を使用し、試料量を 900, 750, 600g と変化させた。図－6 に示した各実験結果同士の相関をみると実験 1 と実験 2 の相関は高いが実験 1 と実験 3, 実験 2 と実験 3 の相関はやや低かった。この結果から、試料量の少ない実験 3 (600g) のデータのバラツキがやや大きかった可能性が考えられる。

実験 5 では 2,800cc, 1,250cc, 800cc の 3 種類の容器を用いた。この結果を図－9 に示す。1,250cc と 800cc の結果は概ね一致したが 2,800cc の FM(5) の変化量はやや小さな値となった。実験 5 の試料全体を -18℃ まで冷やすに必要な熱量は表－6 に示すように実験 2 と同程度であるが、容器が大きい場合には、容器の中心部まで十分に温度が低下するまでには更に長い時間を必要とした可能性が考えられる。

このように、容器が小さいと試験結果が変動しやすく、大きいと中心部までの凍結に長時間を必要とする。このため容器の大きさとしては 1,000cc 前後のものが妥当と考えられる。

4.5 繰返し回数の影響

実験 1 では凍結融解の繰返し回数を 20 回



図－10 繰返し回数とFM(5)の変化量の関係

まで実施し、10,15,20 回目に FM(5) を測定した。この結果を図－10 に示す。FM(5) の変化量は繰返し回数に概ね比例して大きくなる傾向を示しており、試験に費やす日程を考慮すると、繰返し回数は 10 回程度が妥当と考えられる。

5. まとめ

- (1) 冷凍庫と水槽を用いた再生骨材の凍結融解試験法について、5-20mm の連続粒度の試料で試験を行い、試験前後の粗粒率の変化量によって評価が可能であることがわかった。
- (2) 容器の大きさは 1,000cc 前後のものを用い、再生骨材試料をできるだけ多く詰め、容器中の水量を少なくしたほうが良い。
- (3) 冷凍庫の能力を考慮して実験数量を選定する必要があり、試料の凍結温度が十分に低下したか否かは、冷凍庫の温度が最終安定温度に達したか否かで判断できると考えられる。
- (4) FM(5) の変化量は凍結融解の繰返し回数にほぼ比例して大きくなる傾向を示した。

参考文献

- 1) 片平博：再生骨材の品質がコンクリートの性能に与える影響，セメント・コンクリート，No.654，pp.38-44，2001
- 2) 片平博，渡辺博志：再生骨材の簡易凍結融解試験法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，pp.1351-1356,2005