

# 論文 凍結融解作用を受けたコンクリート供試体の力学特性

片平 博\*<sup>1</sup>・渡辺博志\*<sup>2</sup>

**要旨：**一般にコンクリートの耐凍害性は凍結融解試験 (JIS A 1148) の結果で評価される。本研究では、主に低品質骨材を使用した配合を中心に、凍結融解試験終了後の供試体に対して各種強度試験を実施した。この結果、(1) 供試体内部の強度分布はごく表面を除いてほぼ均等であること、(2) 質量減少率は供試体のごく表面の劣化を表現していること、(3) 相対動弾性係数は圧縮強度や曲げ強度と良い対応を示し、供試体の内部劣化の指標として適当であること、等が明らかとなった。

**キーワード：**凍結融解試験, 相対動弾性係数, 圧縮強度, 曲げ強度, 質量減少率

## 1. はじめに

コンクリートは耐凍害性の優れた材料であるが、構成材料の品質や配合によって耐凍害性が異なる。このため、コンクリートの耐凍害性は一般に「JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験法」のA法 (水中凍結水中融解法) によって得られる相対動弾性係数や質量減少率によって評価されている。しかしながら、凍結融解試験による供試体内の劣化性状や、それを相対動弾性係数によって評価することの妥当性については、十分な知見が得られているとは言い難い。

供試体内の劣化性状の検討としては白井らの針貫入試験によって供試体内の強度分布を測定した研究<sup>1)</sup>等がある。また、相対動弾性係数とコンクリートの力学的性能との関連については、高柴ら<sup>2)</sup>や松村ら<sup>3)</sup>が NonAE コンクリートを対象とした研究を行っている。しかしながら、コンクリートの耐凍害性は空気連行性のみではなく、骨材の品質等の影響も強く受ける。

また、質量減少率については、試験の測定項目にはなっているものの、評価基準は設定されておらず、工学的位置付けが曖昧なものとなっている。

筆者らはこれまで、骨材品質とコンクリートの耐凍害性の関連についての研究<sup>4)</sup>を行ってきた。今回、主に低品質骨材を用いた配合の凍結融解試験終了後の供試体を対象に、圧縮強度試験、曲げ強度試験、供試体表面からの深度に対応した付着強度試験等を実施し、実験結果から、供試体内の強度分布について検討し、これらの力学性能と相対動弾性係数や質量減少率との関連について調査した。

## 2. 実験方法

### 2.1 使用材料とコンクリート配合

試験の対象としたコンクリート配合は表-1に示す 21

配合である。配合によって粗骨材最大寸法 (Gmax) や細骨材率 (s/a)、使用したセメントの種類がやや異なるものの、配合 1 を基準配合と考え、配合 2 は NonAE コンクリートとした配合、配合 3 ~ 4 は W/C を変化させた配合、配合 5 ~ 15 は細骨材に比較的 low 品質な骨材を用いた配合、配合 16 ~ 18 は粗骨材に比較的 low 品質な骨材を用いた配合、配合 19 ~ 21 は細骨材、粗骨材ともに比較的 low 品質な骨材を用いた配合とみなすことができる。

試験に用いた骨材の品質を表-2に示す。この表では JIS A 5308 附属書 1 「レディーミクストコンクリート用骨材」の基準を満足しない物性を太文字表記とした。

使用したセメントの種類は配合 2 ~ 4 は早強ポルトランドセメント、その他の配合は普通ポルトランドセメントである。空気量は混和剤の種類と添加量によって調整することで、表-1中の値を得ている。

### 2.2 凍結融解試験方法

表-1に示す配合でコンクリートを練混ぜ、10 × 10 × 40cm の角柱供試体を 2 本ずつ作製し、材齢 28 日 (配合 2 ~ 4 は約 70 日) まで水中養生した後に JIS A 1148 A 法に従って凍結融解試験を 300 サイクルまで実施した。JIS A 1148 では相対動弾性係数が 60 % を下回った時点で試験を終了することとなっているが、本試験では全ての試験体について 300 サイクルまで試験を実施し、試験終了時の相対動弾性係数と質量減少率を求めた。

### 2.3 強度試験方法

凍結融解試験用供試体の製造と同時に φ 10 × 20cm 円柱供試体を 1 配合につき 3 本作製し、材齢 28 日まで水中養生し、JIS A 1108 に従って圧縮強度試験を実施した。

300 サイクルの凍結融解試験を終了した角柱供試体に対して、以下の手順で各種強度試験を実施した。なお、この強度試験を実施した時期は、凍結融解試験の終了から半年 ~ 1 年半を経過した時点であった。供試体に対す

\*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)

表-1 コンクリートの配合

配合	粗骨材の種類	細骨材の種類	G <sub>max</sub> (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				フレッシュ性状		
						W	C	S	G	Sl (cm)	Air (%)	
1	55A	GA	SA	25	55	46	165	300	832	1001	16.0	5.6
2	55N	GB	SA	20	55	45	160	291	825	1007	15.1	1.9
3	70A	GB	SA	20	70	46	160	229	867	1018	18.5	5.1
4	85A	GB	SA	20	85	48	160	188	921	997	12.5	4.5
5	55A-S1	GA	S1	25	55	46	165	300	822	1001	8.5	5.0
6	55A-S2	GA	S2	25	55	46	165	300	822	1001	8.3	4.7
7	55A-S3	GA	S3	25	55	46	165	300	819	1001	3.3	4.8
8	55A-S4	GA	S4	20	55	46	165	300	819	1004	7.7	6.9
9	55A-S5	GA	S5	20	55	46	165	300	816	1004	7.8	5.9
10	55A-S6	GA	S6	20	55	42	205	373	673	978	19.7	4.3
11	55A-S7	GA	S7	20	55	46	165	300	835	1004	12.5	5.6
12	55A-S8	GA	S8	20	55	42	205	373	636	978	11.2	4.0
13	55A-S9	GA	S9	20	55	46	165	300	838	1004	4.3	4.8
14	55A-S10	GA	S11	20	55	42	205	373	663	978	17.6	5.6
15	55A-S11	GA	S12	20	55	42	205	373	647	978	20.3	4.6
16	55A-G1	G1	SA	25	55	46	165	300	832	960	18.0	6.0
17	55A-G2	G2	SA	25	55	46	165	300	832	949	18.8	5.2
18	55A-G3	G3	SA	25	55	46	165	300	832	968	10.9	5.1
19	55A-SG1	G1	S1	25	55	46	165	300	822	960	9.5	4.7
20	55A-SG2	G2	S2	25	55	46	165	300	822	949	15.8	5.3
21	55A-SG3	G3	S3	25	55	46	165	300	819	968	3.5	5.3

表-2 骨材品質

		絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	安定性 (%)
細骨材	SA	2.56	1.58	3.5
	S1	<b>2.44</b>	<b>5.38</b>	<b>12.5</b>
	S2	2.47	3.18	8.5
	S3	<b>2.42</b>	<b>6.03</b>	<b>12.4</b>
	S4	2.46	<b>3.98</b>	6.5
	S5	<b>2.43</b>	<b>4.63</b>	9.8
	S6	2.46	<b>3.57</b>	3.8
	S7	<b>2.27</b>	<b>5.57</b>	<b>27.5</b>
	S8	2.53	3.05	3.7
	S9	2.54	3.46	8.3
	S10	2.45	2.28	7.5
S11	<b>2.29</b>	<b>6.60</b>	7.5	
粗骨材	GA	2.67	0.50	3.3
	GB	2.59	1.05	3.1
	G1	2.45	<b>4.21</b>	<b>21.0</b>
	G2	2.45	<b>3.37</b>	<b>14.9</b>
G3	2.48	<b>4.39</b>	<b>18.8</b>	

太字は基準を満たさない項目

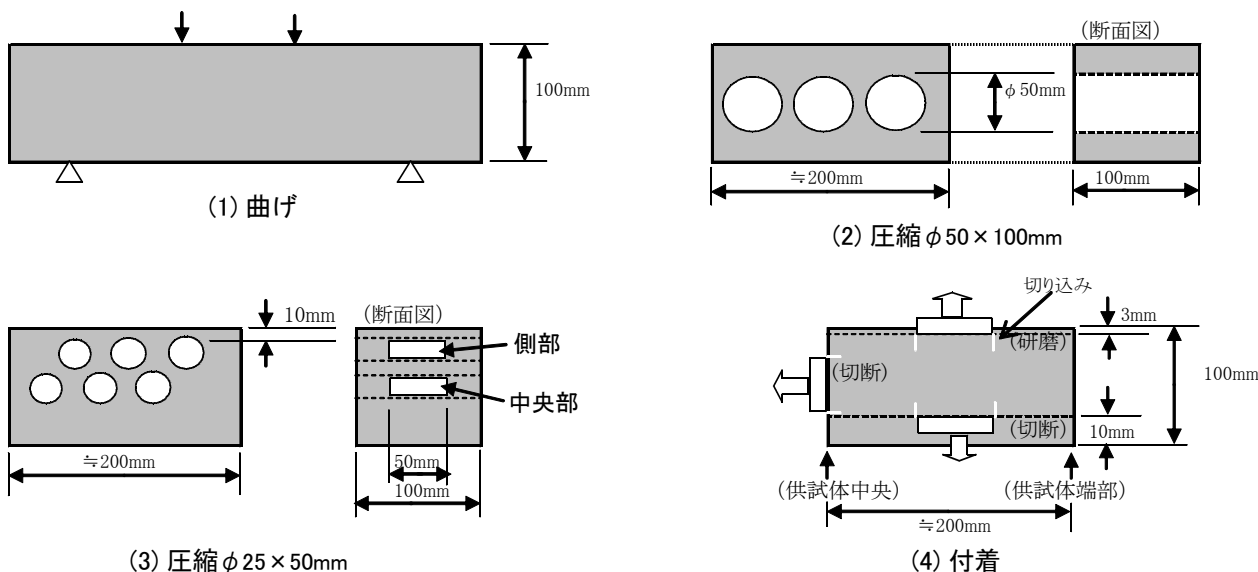


図-1 凍結融解終了後の供試体を実施した強度試験の概要図

る各強度試験の実施箇所の概要を図-1に示す。

(1) 曲げ強度試験

凍結融解試験の終了した 10 × 10 × 40cm 角柱供試体を用いて JIS A 1106 の方法により曲げ強度試験を実施した。試験本数は各配合 2 本とした。

(2) φ50mm コアによる圧縮強度試験

曲げ強度試験によって 2 分された供試体から φ 50 × 100mm のコアを採取し、端面を研磨・整形した後に圧縮強度試験を実施した。コアの採取位置は供試体のできるだけ中央付近とし、本数は各配合 3 本とした。

(3) φ25mm コアによる圧縮強度試験

曲げ強度試験によって 2 分された供試体から φ 25 × 100mm のコアを採取し、コアの上下端 25mm を切断した後に端面を硫黄キャッピングし、圧縮強度試験を実施した。コアの採取本数は各配合 6 本とし、このうち 3 本は供試体のできるだけ中央部から、残りの 3 本は側部（表面から約 10 ~ 35mm の位置）から採取することとし、位置の違いによる影響を検討した。

(4) 付着強度試験

建研式接着力試験装置により付着強度を測定した。この試験法は、引張治具をエポキシ樹脂でコンクリートに接着し、治具を引張ることで接着面のコンクリート側に

引張破壊を生じさせるものである。なお、引張治具の形状は、付着面の応力状態ができるだけ均等になるようにφ 50mm の円形とした。

治具を接着する位置(深さ)は供試体表面から 3mm (85A はスケーリングが著しく 3mm での実施が困難であったために約 6mm)、10mm の位置、および供試体中心部とし、深さ方向の強度分布を比較した。試験数は 1 配合につき各深さ位置で 1 箇所とした。なお、接着面の周囲はコアリングにより深さ 1cm 程度の切り込みを入れた。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 凍結融解試験結果

凍結融解試験後の供試体に確認された特に著しい劣化性状としては写真-1~3 に示す 3 通りが確認された。写真-1 は供試体表面に著しいスケーリングが生じたケースであり、水セメント比の大きな 85A の供試体で最も顕著であった。また、低品質細骨材を用いた供試体でもスケーリングがやや大きい供試体が認められた。写真-2 は供試体のモルタル部分にひび割れが発生したケースであり、NonAE の配合である 55N の供試体で確認された。写真-3 は供試体内の粗骨材が劣化またはポップアウトしたケースであり、低品質粗骨材を用いた供試体で確認された。

このように、構成材料の品質や配合条件によって劣化性状は大きく異なるものであった。本論文は、それぞれの劣化性状の特徴を整理するとともに、各劣化性状に対して凍結融解試験で得られる相対動弾性係数や質量減少率の値がどのような物理的意味を持つのかについて、供試体の各種強度測定結果等から考察するものである。

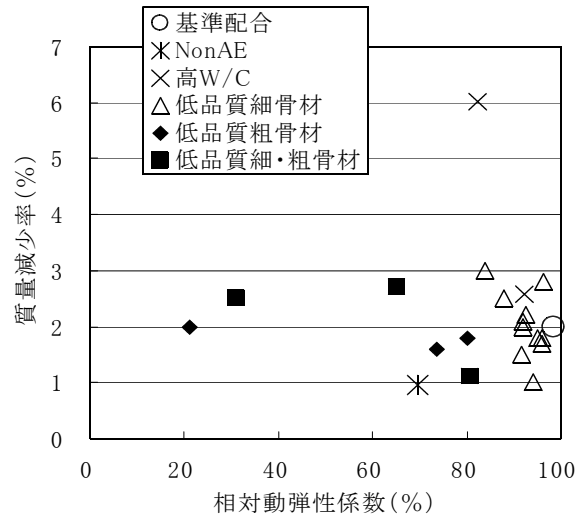


図-2 相対動弾性係数と質量減少率

凍結融解試験終了時の相対動弾性係数と質量減少率の関係は図-2 に示すとおりであり、双方の間に明確な対応関係は見られなかった。相対動弾性係数は主に低品質粗骨材を使用した配合(◆■)と NonAE の配合(✱)で低いものがあり、質量減少率についてはスケーリング劣化が著しかった W/C=85% で特に大きかった。

#### 3.2 供試体内の強度分布

凍結融解試験後の供試体内の強度分布について検討した。

図-3 はφ 25mm コアの中央部と側部の圧縮強度を比較したものであるが、採取位置の違いによる強度の差はいずれの配合でも認められなかった。

図-4 には供試体の曲げ強度と供試体表面からの深度毎に実施した付着強度との関係を示す。付着強度試験は各深度ごとに 1 箇所の試験であったことから、試験結果



写真-1 表面のスケーリング (85A)

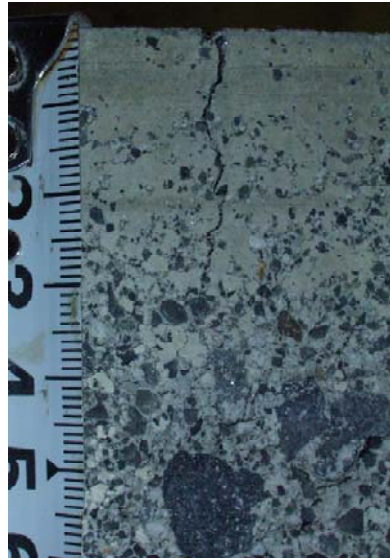


写真-2 モルタル部分のひび割れ (55N)



写真-3 骨材の劣化 (55A-G2 左下の円弧は削孔あと)

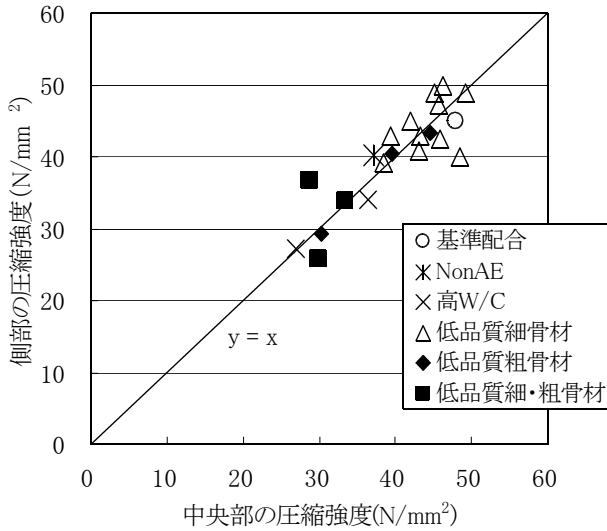


図-3 中央部と側部の圧縮強度の比較

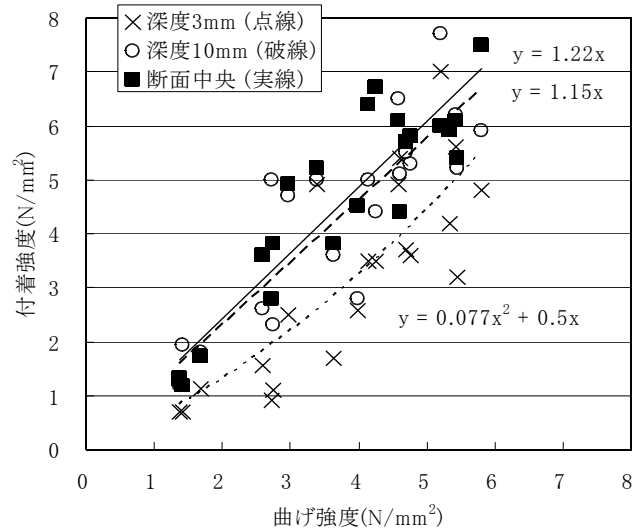


図-4 曲げ強度と付着強度の関係

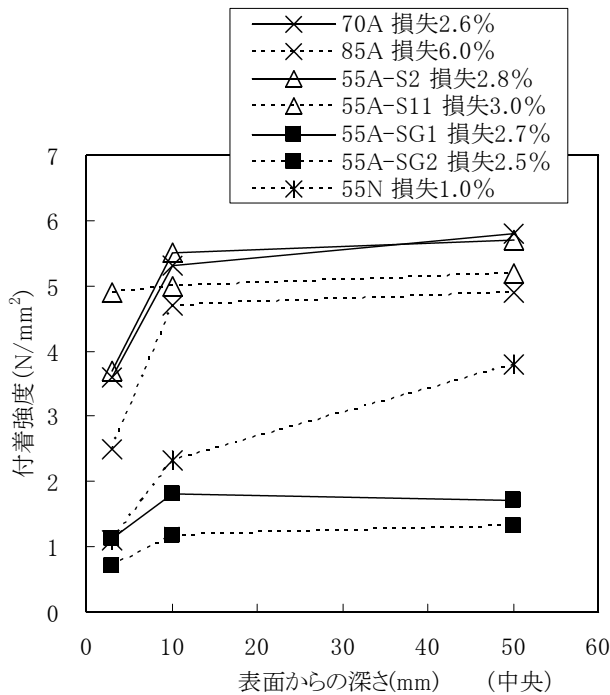


図-5 供試体表面からの深度と付着強度の関係

にバラツキはあるものの、この図から、付着強度と曲げ強度との間には相関関係があること、深度 3mm の付着強度はやや低い、深度 10mm と中央部の付着強度は同程度であることが分かる。

図-5は高 W/C 配合(70A,85A), 低品質細骨材使用配合(55A-S2,55A-S11), 低品質粗骨材使用配合(55A-SG1, 55A-SG2), および nonAE 配合(55N)の各配合条件のうち、質量減少率の比較的大きな供試体について、表面からの深度に対応した付着強度分布を示したものであるが、10mm 以深での強度の変化は比較的小さかった。

これらの結果から配合条件や劣化機構が異なっていて

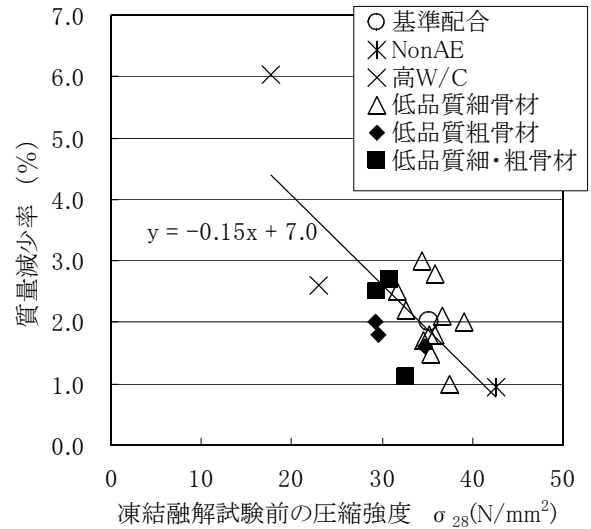


図-6 試験前の圧縮強度と質量減少率の関係

も、10mm 以深は概ね均等な劣化状態であると推察される。なお、内部の強度が概ね均等であるという結果は文献1)の結果とも一致するものであった。

### 3.3 質量減少率について

質量減少は、主に供試体表面のスケーリングによって発生するが、3.2の結果から考えて、凍結融解試験におけるスケーリングは供試体のごく表面部分に限定される劣化現象であり、質量減少率はコンクリートの内部組織の劣化を表す指標とは考え難い。

例えば、今回の実験結果で質量減少率が最も大きな値(6%)を示した 85A でも、相対動弾性係数は約 80%であり、また、図-5に示すように 10mm 以深の付着強度も高く、著しい内部劣化が生じているとは考え難い。

スケーリングはコンクリート表面の水が凍結する際の

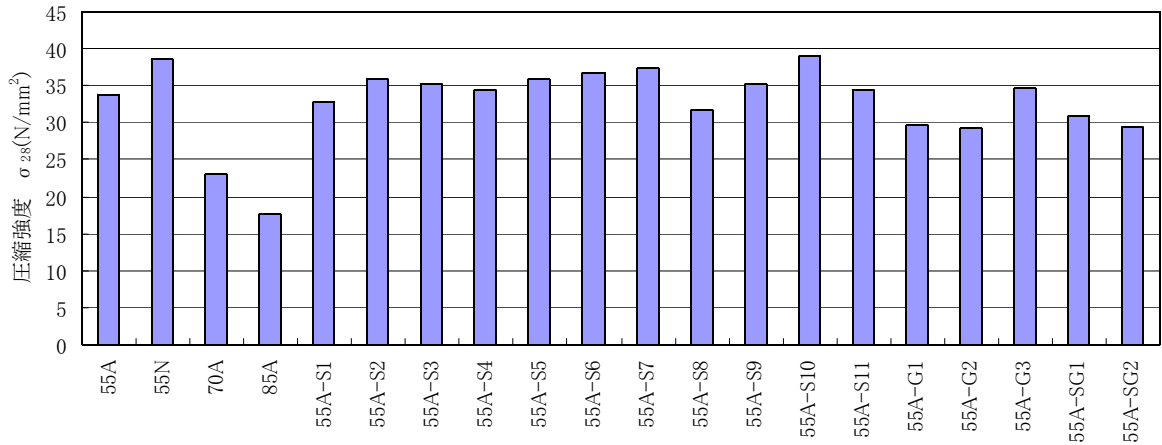


図-7 凍結融解試験前の圧縮強度 ( $\sigma_{28}$ )

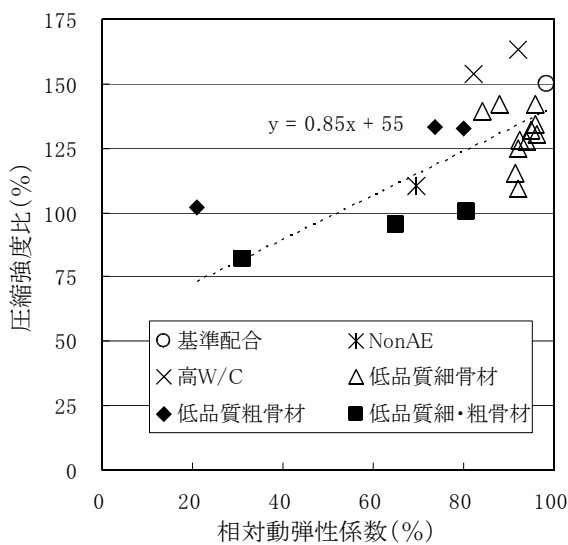


図-8 相対動弾性係数と圧縮強度との関係

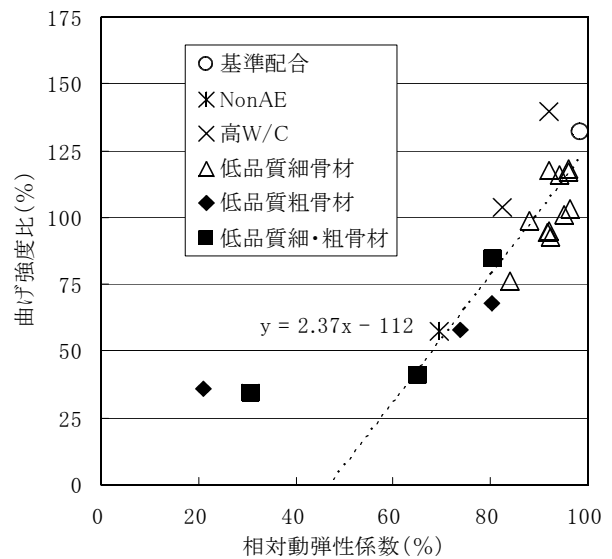


図-9 相対動弾性係数と曲げ強度との関係

氷結圧にコンクリート表面の強度が耐えられずに表面組織が剥落する現象と考えられ、凍結融解試験前のコンクリート強度と関連があると考えられる。そこで、材齢 28 日の圧縮強度とスケーリング量（質量減少率）との関連をみると図-6 のようであり、ばらつきはあるものの、圧縮強度が低いものほどスケーリング量が大きくなる傾向が認められた。

### 3.4 相対動弾性係数と供試体強度との関係

上記のように凍結融解試験試験後の供試体内の強度分布はごく表面付近を除いて、おおそ均等と考えられるため、その劣化状態は圧縮強度（今回の実験では供試体中央部から採取した  $\phi$  50mm コア圧縮強度）や曲げ強度で代表できると考えられる。ここでは、これらの強度値と相対動弾性係数との関係について検討する。

コンクリート強度は骨材の品質や配合等によって変化するので、凍結融解作用を受ける前の強度に対する比率（強度比）で劣化度を評価することとした。

$\phi$  50mm コア圧縮強度は材齢 28 日で実施した標準供試体の圧縮強度（図-7）に対する比で求めた。

曲げ強度については、凍結融解試験前のデータが無いので、図-7 の材齢 28 日で実施した標準供試体の圧縮強度から式(1)<sup>9)</sup>を用いて曲げ強度の初期値を推定し、この値との比で求めた。

$$fb = 0.42 fc^{2.3} \quad (1)$$

ここに、 $fb$ ：曲げ強度の初期値の推定値

$fc$ ：材齢 28 日の標準供試体の圧縮強度

圧縮強度比と相対動弾性係数との関係を図-8に、曲げ強度比と相対動弾性係数との関係を図-9に示す。図-8、9ともに相対動弾性係数が 100%に対応した強度比が 100%を超えているが、この原因としては、強度試験を凍結融解試験終了から半年～一年半後に実施してい

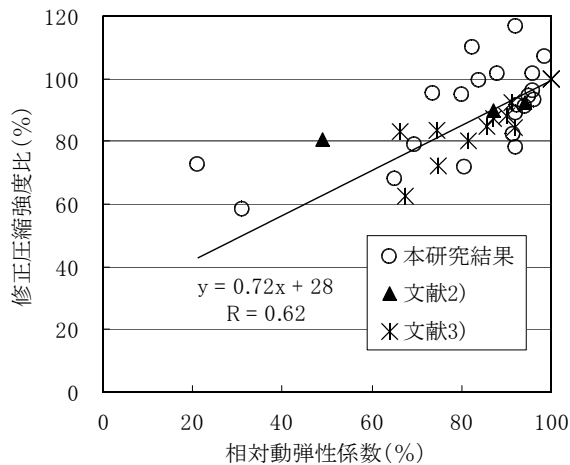


図-10 相対動弾性係数と圧縮強度との関係  
(既往文献との比較)

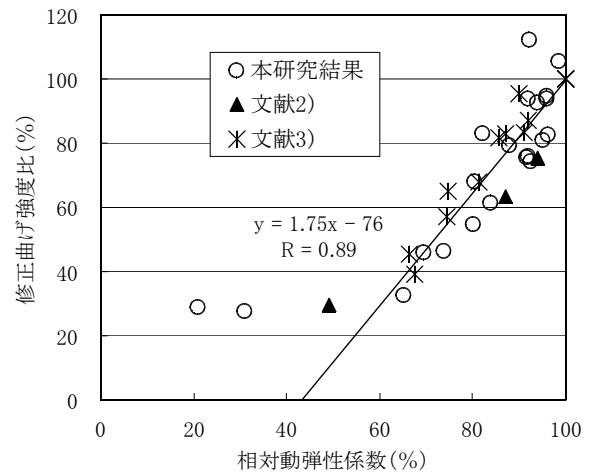


図-11 相対動弾性係数と曲げ強度との関係  
(既往文献との比較)

るために、水和作用の増進によるものと推定される。

図より、相対動弾性係数が低下すると圧縮強度比や曲げ強度比も低下する傾向を示し、特に曲げ強度比は相対動弾性係数と良い対応を示した。図には NonAE の条件、高 W/C の条件、低品質細骨材や低品質粗骨材使用の条件等、劣化条件の異なるコンクリートのデータを一同に示したにも関わらず、どのデータも概ね同じ傾向を示す結果となった。

### 3.5 既往論文との比較

図-8, 9の結果を、既往の論文 2)3)の結果と比較した結果を図-10, 11に示す。

ただし、図-8, 9では、相対動弾性係数 100 %に対応した強度比が 100 %になっていないので、圧縮強度比については 1.4、曲げ強度比については 1.25 で除した値を修正強度比として、図-10, 11に示した。

文献 2)3)では NonAE コンクリートを対象とした実験を行っており、主に低品質骨材使用コンクリートを対象とした本研究とは対象が異なっているにも関わらず、相対動弾性係数と強度比との関係は、概ね同様の傾向であった。

これらのことから、凍結融解試験後の供試体の内部劣化を評価する指標として相対動弾性係数は適切であると考えられる。

図-10, 11には相対動弾性係数 60 %以上の全てのデータを対象にした直線回帰式を示したが、相対動弾性係数の 10 %の低下に対応する強度比の低下は、圧縮で約 7 %、曲げで約 18 %であった。

## 4. まとめ

(1) 凍結融解試験によって生じる劣化には、次の 3 種類の劣化が確認できた。

- 1) 著しいスケーリング：主に高 W/C や低品質細骨材使用の配合で発生
- 2) ひび割れ：NonAE 配合で発生
- 3) 粗骨材の劣化、ポップアウト：低品質粗骨材使用の配合で発生。

(2) 主にスケーリングによって生じる質量減少率は供試体内部の劣化とは対応せず、供試体のごく表面の劣化を表現する指標と考えられ、ばらつきはあるものの凍結融解試験前の圧縮強度と相関性が認められた。

(3) (1)のように様々な劣化形態を示すが、劣化形態によらず、凍結融解試験後の供試体内部の強度分布は、供試体のごく表面を除いて、概ね均等と考えられる。

(4) 劣化形態の違いによらず、凍結融解試験で得られる相対動弾性係数と供試体の圧縮および曲げ強度とは良い対応を示しており、相対動弾性係数は供試体の内部劣化の評価指標として適切であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 白井和絵, 丹野篤, 三浦尚：凍結融解作用で劣化したコンクリート内部の強度分布に関する研究, 第 55 回土木学会年次講演会講演概要集, 第 5 部門, pp.754-755, 2000.9
- 2) 高柴保明, 堺孝司, 熊谷守晃：凍害およびアルカリ骨材反応を受けたコンクリートの力学特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.221-226, 1998.7
- 3) 松村宇, 桂修, 吉野利幸：凍害を受けたコンクリートの性状と劣化度評価法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 563 号, pp.9-13, 2003.1
- 4) 片平博, 渡辺博志：低品質細骨材の有効利用に関する研究, ダム技術, No.238, pp.25-33, 2006.7
- 5) 平成 8 年制定コンクリート標準示方書, 設計編, 3.2 コンクリート強度, (社)土木学会, pp.19-2, 1996