

## ◆ 報 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\* 渡辺博志\*\*

## 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「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）によって評価する場合が多い。本来、本試験法の位置づけとしては「この試験法は、使用材料や配合などの異なるコンクリートの耐凍害性を相互に比較するためのものであって、コンクリート構造物における耐凍害性を直接評価したり、耐凍害性によって定まるコンクリート構造物の耐用年数を測定するものではない」と明記されている。しかしながら、この試験法以外に信頼できる照査手法が無いことから、この試験法によって得られる相対動弾性係数が60%以下に低下するか否かで耐凍害性を評価する場合が多い。2002年制定「コンクリート標準示方書（土木学会）<sup>1)</sup>」でもこの試験法の結果で耐凍害性を評価して良いと記述されている。

この試験法では相対動弾性係数によってコンクリートの耐凍害性が評価される。相対動弾性係数とコンクリートの力学的な性能との関連については、松村ら<sup>2)</sup>がNonAE（非空気連行型）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。このため今回、骨材の種類や空気連行性、水セメント比（W/C）等の配合条件を様々に変えて実施した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、これらの力学性能と相対動弾性係数との関連について調査した。

また、凍結融解試験では相対動弾性係数とともに質量減少率（スケージング量）も測定されるが、この質量減少率と力学特性との関連についても調査し、コンクリートの凍害による劣化パターンに

ついて考察した。

## 2. 実験方法

## 2.1 使用材料とコンクリート配合

凍結融解試験を実施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は細骨材に比較的低下品質な骨材を用いた配合、配合16～18は粗骨材に比較的低下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低下品質な骨材を用いた配合と見なすことができる。

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した。

## 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日間（配合2～4は約70日間）水中養生した後、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

300サイクルの凍結融解試験を終了した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、供試体に対す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角柱供試体についてJIS A 1106の

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	S10	20	55	42	205	373	663	978	17.6	5.6
15	55A-S11	GA	S11	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

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

太字は基準を満たさない項目

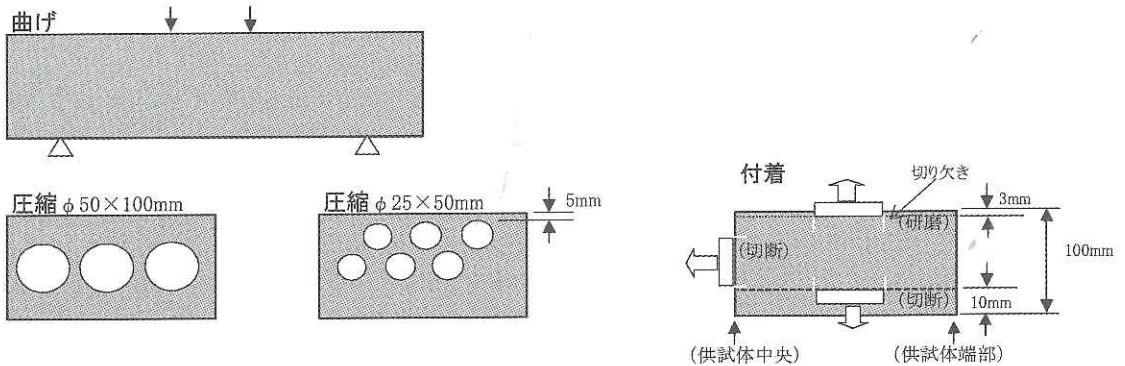


図-1 凍結融解試験終了後の供試体を実施した強度試験の概要図

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φ50×100mm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部付近とし、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φ25×100mm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（できるだけ表面に使い部分）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<sup>3)</sup>により付着強度を測定した。引張治具の形状はφ50mmの円形とし、エポキシ樹脂でコンクリートに接着し、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り、コンクリートの引張強度を得るための試験である。治具を接着する位置（深さ）は供試体表面から3mm、10mmの位置、および供試体中心部とし、深さ方向の強度の違いを比較検討した。試験数は1配合につき各深さ位置で1箇所とした。



### 3. 実験結果

#### 3.1 凍結融解試験結果

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を図-2に示すが、双方の間に明確な対応関係は見られない。相対動弾性係数については、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W/C = 85%で特に大きかった。

なお、供試体表面のスケーリングはW/C = 85%を除いて、付着強度試験を実施した深度3mmの位置よりも概ね浅い範囲での発生であった。

#### 3.2 圧縮強度試験結果

図-3は各配合の標準養生28日での(凍結融解作用を受けない状態の)圧縮強度試験結果である。これによると、55Nの圧縮強度はやや高く、高W/Cである70Aと85Aは強度が低くなった。その他の55Aの配合では概ね同一の強度であり、骨材品質が圧縮強度に与える影響は比較的小さな結

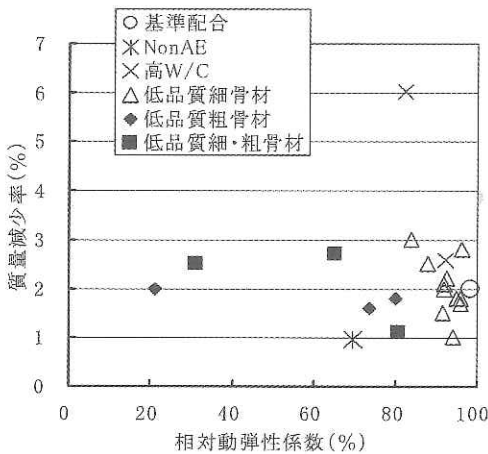


図-2 相対動弾性係数と質量減少率

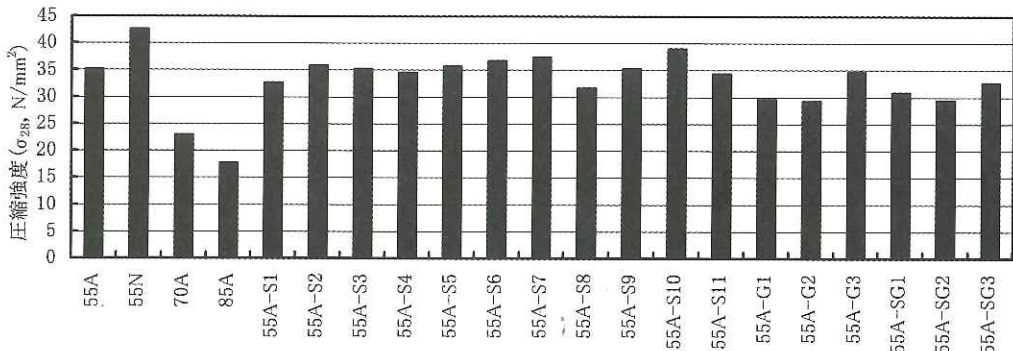


図-3 凍結融解作用を受けない状態での圧縮強度

果となった。

図-4は凍結融解試験後の供試体から採取したφ50mmコアの圧縮強度と相対動弾性係数との関係を示したものである。この図から相対動弾性係数が低下すると圧縮強度も低下する傾向が認められる。図中の高W/C(×)はももとの圧縮強度が低く、他と同等には評価できないので、それを除いたデータから求めた回帰直線を図中に示す。これによると、おおよその目安として相対動弾性係数が60%に低下した供試体の圧縮強度は劣化の少ない基準供試体の75%程度と見なすことができる。圧縮強度の低下傾向は相対動弾性係数の低下傾向に比較して緩やかであった。

なお、図-4において相対動弾性係数が高い供試体の圧縮強度が45~50N/mm<sup>2</sup>と、図-3の凍結融解試験前よりもやや高いが、この理由としては試験期間中の強度の増進とコア径が小さいことによる寸法効果の影響が考えられる。

図-5は凍結融解試験後の供試体から採取したφ25mmコアの圧縮強度と相対動弾性係数との関係を示したものである(高W/Cを除く)。この結果も図-4のφ50mmの結果と類似した結果となった。中央部と側部の圧縮強度を比較すると図-6のようであり、採取位置の違いによる強度の差は認められなかった。側部からの小径コアは図-1に示すように表面から5mmの厚さを残してコアリングしており、ビットの厚さ(約5mm)を考慮すると表面から約10~35mmの位置のコアであり、その位置では中央部と遜色無い強度であったと考えられる。

#### 3.3 曲げ強度試験結果

凍結融解試験後の供試体の曲げ強度試験結果を図-7に示す。試験後の相対動弾性係数の大小と曲げ強度の大小の関係は圧縮強度のそれよりも対

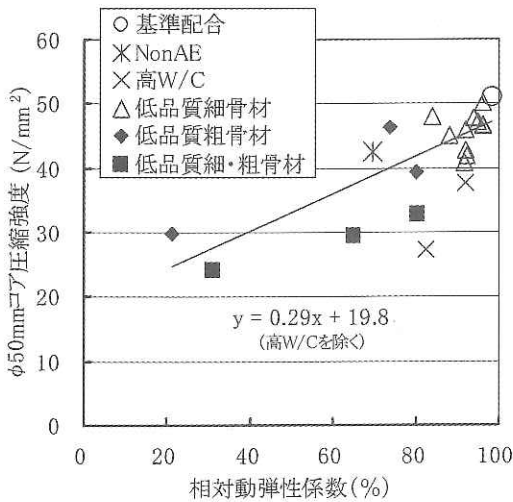


図-4 φ50mm 圧縮強度と相対動弾性係数の関係

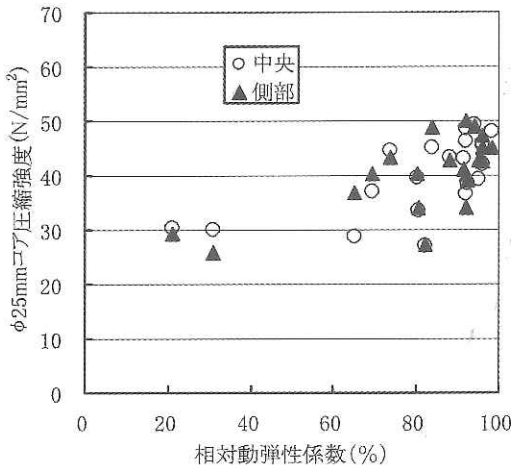


図-5 φ25mm 圧縮強度と相対動弾性係数の関係

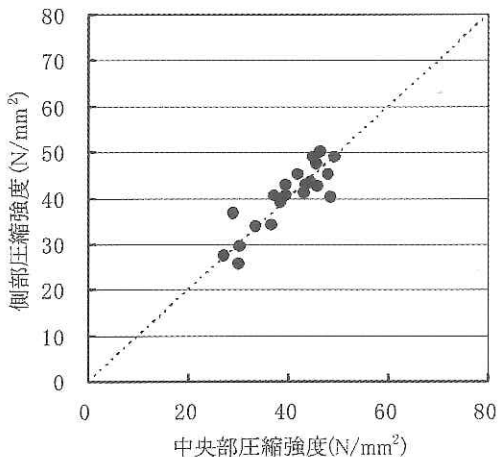


図-6 中央部と側部の圧縮強度の比較

応が良く、相対動弾性係数が60%以下に低下した供試体の曲げ強度は、ほとんど劣化しない基準供試体の30%以下であり、圧縮強度のそれが約75%であったのに対して、より低い結果となった。

### 3.4 付着強度試験結果

凍結融解試験後の供試体に対して実施した付着強度試験の結果と相対動弾性係数との関係(高W/Cを除く)を図-8に示す。グラフの傾向としては図-7の曲げ強度との関係に類似したものであった。

図-8には深度ごとのデータの回帰曲線を示した。付着強度試験は深度ごとに1箇所の試験であることから、測定値にバラツキがあると考えられるが、深さ方向別の傾向をみると、深度10mmの付着強度は断面中央と遜色が無く、深度3mmの付着強度は中央部よりも低いものが認められた。

図-9、10は深度3mmと中央部、深度10mmと

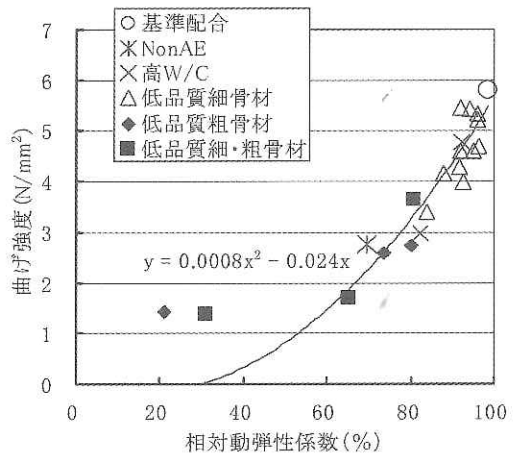


図-7 曲げ強度と相対動弾性係数との関係

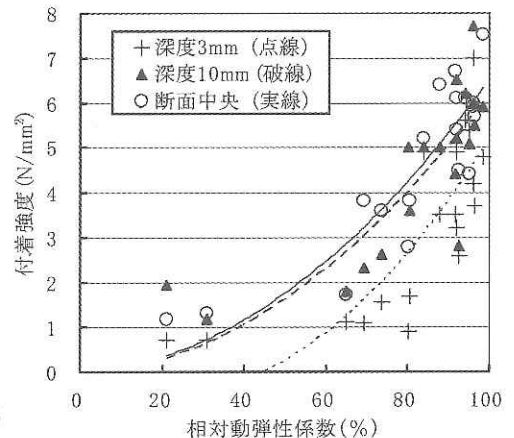


図-8 付着強度と相対動弾性係数との関係



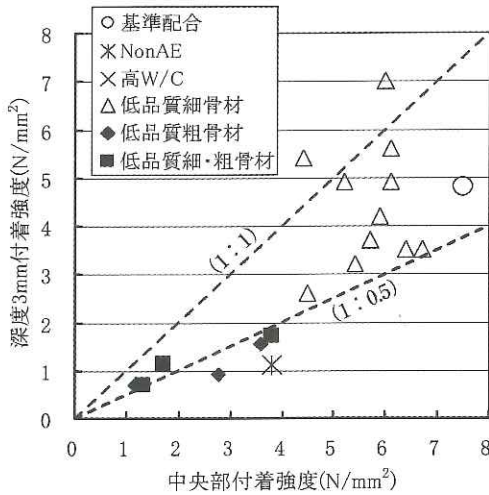


図-9 深度3mmと中央部の付着強度の比較

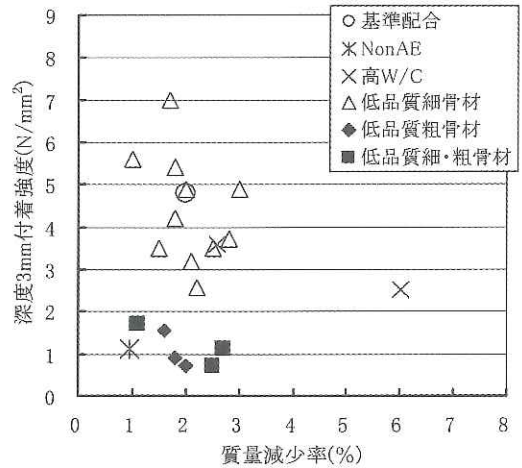


図-11 深度3mmの付着強度と質量減少率の関係

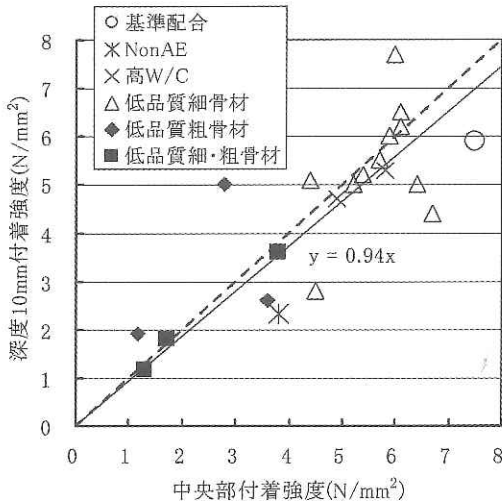


図-10 深度10mmと中央部の付着強度の比較

中央部の付着強度を比較した図である。この図でも深度10mmの付着強度は中央部の付着強度と遜色無い結果であり、このことから、深度10mm以深の付着強度は概ね均等であり、相対動弾性係数はその内部の付着強度と良く対応していると考えられる。また、深度3mmの付着強度については、特に相対動弾性係数に低下がみられた低品質粗骨材を使用したケースとNonAEのケースで中央部の1/2程度まで付着強度が低下した。また、低品質細骨材を使用したケースではバラツキがあり、中央部の0.5~1倍の付着強度を示した。このように表面から数mmの範囲では中央部よりもやや付着強度が低下するものが見られた。

### 3.5 質量減少率と付着強度の関係

今回実施した強度試験のなかで質量減少率と最も関連が深いと考えられるのは表面付近の付着強度試験である。そこで、深さ3mmの付着強度と質量減少率との関係を図-11に示すが、両者の間に明確な傾向は認められなかった。

この理由について考察すると、深度3mmの付着強度は3.4で述べたように供試体内部の劣化現象に関連したものと考えられる。これに対して質量減少率は、供試体表面のスケリング量を表すものであり、この量は供試体を覆う水が氷結する際の氷の膨張圧力によって供試体のごく表面に生じる劣化と考えられ、内部の劣化とは異なる症状と考えられる。

## 4. 凍結融解による劣化パターンに関する考察

今回の実験では耐凍害性に劣るコンクリートとして、(1) 高W/Cコンクリート、(2) NonAEコンクリート、(3) 低品質骨材使用コンクリートの実験を行った。この結果、高W/Cコンクリートでは相対動弾性係数の低下はわずかであっても質量減少率が大きくなる場合があること、NonAEや低品質粗骨材使用コンクリートでは供試体内部の相対動弾性係数や強度が低下すること、質量減少率は相対動弾性係数や強度の低下と対応しないことが分かった。

これらの結果をもとに凍結融解作用による劣化パターンを分類すると図-12のように想定される。すなわち、(a) 高W/Cの場合は表面にスケリングが発生するが、内部は健全である。(b)

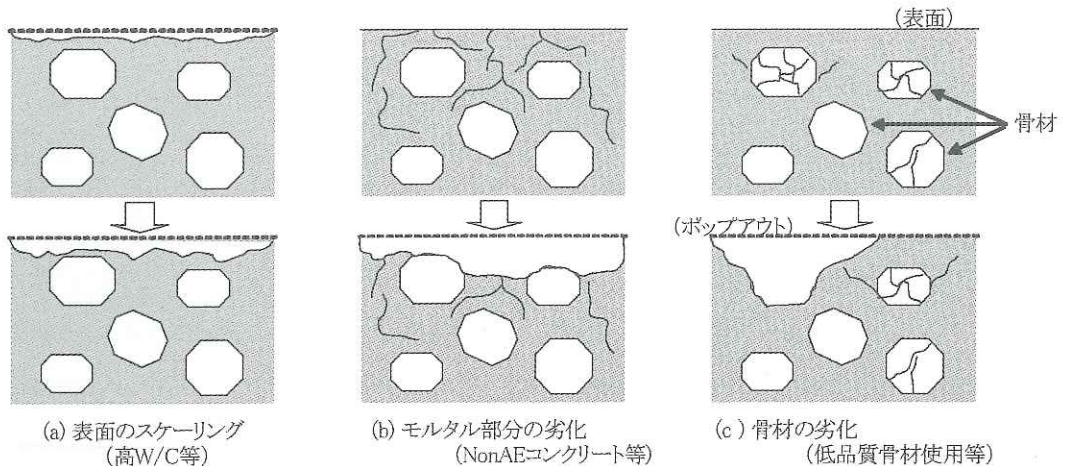


図-12 凍結融解作用による劣化パターンの分類

NonAEの場合だとモルタル部分に劣化が生じ、動弾性係数や強度が低下する。(c) 低品質粗骨材使用の場合だと骨材に劣化が生じ、動弾性係数や強度が低下する。(a) は表面劣化、(b) および (c) は内部劣化と考えることができる。

図-12の上図に示すように、劣化の初期～途中段階では (a) と (b) (c) は症状が異なるが、劣化が進行すると、ひび割れが連続して表面部分が欠落することとなり、下図に示すように (b) (c) もスケールと同様の劣化形態を示すと予想される。すなわち、同じスケールでも (a) (b) (c) では劣化の形態や深さが全く異なるものであり、現場での劣化診断では、どの形態による劣化であるかを詳細に調査することが望ましい。

## 5. まとめ

上記の結果を整理すると以下のものである。

- (1) 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引張（曲げ、付着）強度とは良い対応を示しており、相対動弾性係数は凍結融解試験の評価指標として適切であると考えられる。
- (2) 相対動弾性係数の低下に伴う強度の低下量は圧縮よりも引張のほうが大きかった。
- (3) 供試体表面から深度3mm位置の付着強度は中央部よりも劣るものが見られたが、深度10mmの付着強度や側部の小径コア（深さ10～35mm）の圧縮強度は中央部の強度と遜色無かった。このことから、今回の実験結果からは、供試体のごく表面を除いて、内部の劣化状態は概ね同等と考えられる。

- (4) 凍結融解試験で得られる質量減少率（スケールリング量）と相対動弾性係数や圧縮強度、付着強度とは対応せず、質量減少率は供試体表面のみの劣化の指標と考えられる。

- (5) 本実験の結果から、凍結融解によるコンクリートの劣化パターンを3つに分類する考えを示し、現場での劣化診断における留意点を示した。

今後は、現場で3パターンの劣化の違いを確認できるか否かを含め、劣化診断手法について更なる調査研究が必要と考える。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕, pp.81-82, 2002
- 2) 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
- 3) 今泉勝吉：建築内装工事における接着工法に関する研究、建築研究所報告、第49号, 1967.3

片平 博\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所技術推進  
本部構造物マネジメント  
技術チーム主任研究員  
Horoshi KATAHIRA

渡辺博志\*\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所技術推進  
本部構造物マネジメント  
技術チーム主席研究員、  
工博  
Dr. Horoshi WATANABE