

1. モデル供試体を用いた凍結融解試験法の改善検討 1.1 はじめに

コンクリートの凍結融解試験における動弾性係数の計測では、供試体にたわみ振動を与えコンクリートの一次共鳴振動数を計測し、供試体が一様に脆弱化していると仮定して動弾性係数を算出している。しかし、凍害による脆弱化は表面に近いほど進展しており、一様ではないことが知られている。凍害劣化の指標である動弾性係数を安定的に計測するためには、こうした点に留意する必要がある。

本研究では、黒曜石を熱発泡させた細骨材（パーライト、以下、PL）を使用し、凍害を受けて脆弱化したコンクリート層を模擬したモルタルを作製した。この脆弱モルタル層と普通コンクリートとを打継ぎ、脆弱層の厚さや位置を変えた積層角柱供試体を作製し、共鳴振動法により動弾性係数を計測した。脆弱の程度（PLの混入割合）や厚さ、積層供試体中の脆弱層の位置が、計測される動弾性係数の値に及ぼす影響を明らかにし、安定した計測値を得る方法を提案した。

1.2 実験概要

(1) 使用材料及び配合

PLの外観を図-1.2に示す。図-1.2のような粒径のPLを用いて脆弱コンクリート層を模擬したモルタル（パーライトモルタル、以下PM）を作製した。PLは指で押さえるとつぶれる程度の強度である。

PMの基準配合を表-1.1、積層供試体の母材となるコンクリートの配合を表-1.2に示す。PMでは砂をPLで



図-1.1 PLの外観

容積置換し、PL置換率を0%（川砂100%）から、20%刻みで100%まで6水準とした（それぞれPL0, PL20, PL40, PL60, PL80, PL100とよぶ）。

(2) 供試体概要

本実験で作製した供試体の種類を表-1.3に示す。供試体の寸法はPM単体供試体、PM積層供試体のいずれも100×100×200mmの角柱供試体とした。PM単体供試体は打設後翌日に脱型、6日間の水中養生後、一次共鳴振動数を計測した。その後、厚さ15mm, 30mm, 45mmでカッターにより切り出し、母材コンクリートを打ち継ぎ、PM積層供試体を作製した（それぞれPM15mm, PM30mm, PM45mmとよぶ）。

(3) 試験方法

JIS A1127「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」に規定されているたわみ振動により、一次共鳴振動数を計測した。この試験で計測した一次共鳴振動数から、JIS A1127で規定される式(1)より動弾性係数を求めた。

$$E_D = 9.47 \times 10^{-4} \frac{L^3 T}{v_{t,3}^2} m f_i^2 \quad (1)$$

ただし、 E_D :動弾性係数(N/mm²)、 L :供試体の長さ(mm)、 b 及び t :角柱供試体の断面の各辺の長さ(mm)で t は振動方向の辺の長さ、 m :供試体の質量(kg)、 f_i :たわみ振動の一次共鳴振動数(Hz)、 T :修正係数。

上記の試験で計測した一次共鳴振動数から、JIS A1148「コンクリートの凍結融解試験」に規定される相

表-1.1 PM基準配合(PLの置換率0%)

W/C	単位量 (kg/m ³)			
	W	C	S	PL
0.6	270	450	1336	0

表-1.2 母材コンクリート配合

Gmax (mm)	W/C	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	AE
15	0.55	48.0	175	318	843	921	0.994

表-1.3 供試体の水準

種別	因子	水準	数量
PM単体供試体	PLの置換率(%)	0, 20, 40, 60, 80, 100	6
PM積層供試体	PM	厚さ(mm)	15, 30, 45
		PL置換率(%)	0, 20, 40, 60, 80, 100

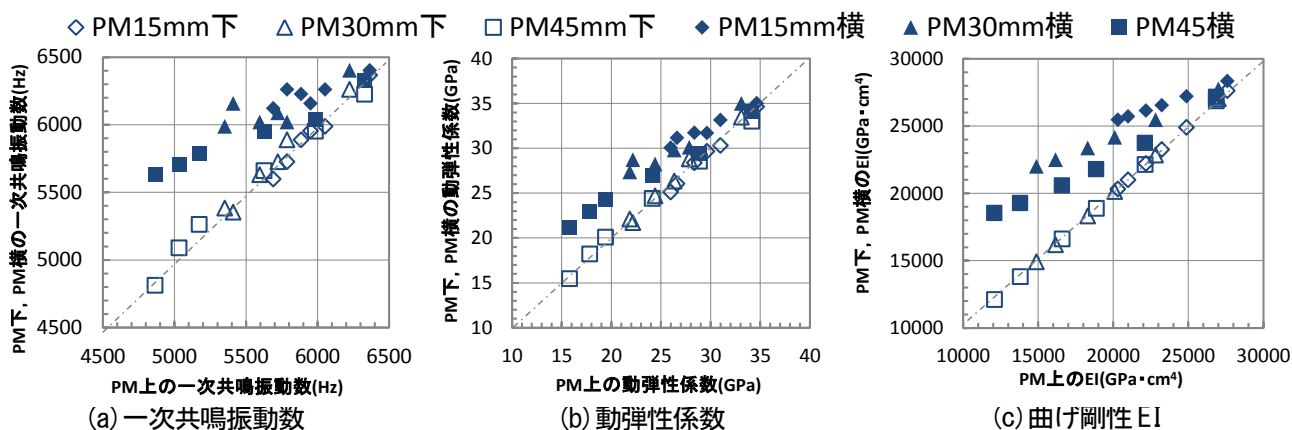


図-1.2 測定方向での各計測結果の比較

対動弾性係数を式 (2) より求めた。

$$P_n = \left[\frac{f_n^2}{f_0^2} \right] \times 100 \quad (2)$$

ただし、 P_n : PL 置換率 $n\%$ の相対動弾性係数(%), f_n : PL 置換率 $n\%$ のたわみ振動の一次共鳴振動数(Hz), f_0 : PL 置換率 0% におけるたわみ振動の一次共鳴振動数(Hz)。PM 積層供試体では、一次共鳴振動数を供試体の打設面 (PM 上), 底面 (PM 下), 側面 (PM 横) の 3 方向から計測した。

また、供試体の質量を計測し、各 PL 置換率の供試体質量を PL0 の供試体質量で除した値を質量変化率とした。

1.3 実験結果及び考察

本概要では測定方向の違いが計測結果に与える影響についてのみ記す。

図-1.2 に PM 上に対する、PM 下、PM 横の測定値および各計算値を示す。(a) に一次共鳴振動数、(b) に動弾性係数、(c) に曲げ剛性 (EI) の関係を示す。曲げ剛性は、PM とコンクリートの動弾性係数比、等価換算断面積から中立軸を求め、中立軸に対する PM、コン

クリートの各部の動弾性係数と断面二次モーメントの積の総和とした。脆弱部を上 (PM 上) にした場合と下 (PM 下) にした場合には、一次共鳴振動数、動弾性係数、曲げ剛性ともに測定方向による差はほとんどない。PM 上 (或いは PM 下) と脆弱部を横 (PM 横) にした場合の比較では、一次共鳴振動数、動弾性係数、曲げ剛性ともに PM 横の方が大きくなった。一次共鳴振動数、動弾性係数、曲げ剛性の値が小さくなるほどその傾向は大きくなり、動弾性係数の差の最大は約 5.5GPa (約 35%) となった。PM 上、PM 下、PM 横による曲げ剛性と動弾性係数の関係を図-1.3 に示す。曲げ剛性と動弾性係数は高い相関を示していることから、脆弱層の位置によるそれぞれの差は曲げ剛性の違いにより生じたものと思われる。また、たわみ振動による一次共鳴振動数、動弾性係数は、梁 (供試体) のたわみ特性との関係が強いことが分かった。本実験では強度の違う材料を積層しているため、設置方向が変わることで脆弱部の位置が変わり、曲げ剛性の値に変化を与えたと考えられる。凍害のように表面から劣化していくとされる現象では、同じような傾向がみられる可能性が高い。JIS A1127 で規定されている一次共鳴振動数の測定方法では供試体の設置方向に関しては特筆されていないが、留意する必要がある。

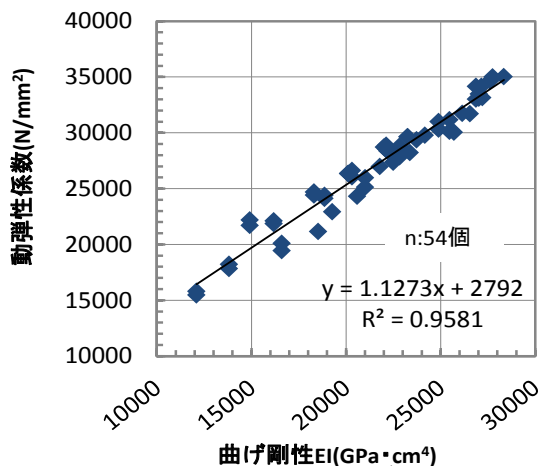


図-1.3 動弾性係数と曲げ剛性の相関

1.4 まとめ

積層供試体において、測定時の設置方向によって、結果に大きな差がみられた。供試体の打設面を横にして計測すると、曲げ剛性が大きくなり、たわみにくくなる。JIS A1127 に規定されている一次共鳴振動数の計測方法には供試体の向きに関する記述は記されていないが、留意する必要がある。

以上の結果から、凍害が進行した場合には供試体を 90°回転させて計測した一次共鳴振動数の値の平均を用いると安定した結果を得ることができると考えられる。

2. 小型供試体をもちいた凍結融解試験期間の短縮

2.1 はじめに

JIS A1148「コンクリートの凍結融解試験」では、一般的に曲げ試験に用いられる 100×100×400mm の角柱供試体が用いられる。劣化度の評価は JIS A1127「共鳴振動法によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」に規定されているたわみ振動による一次共鳴振動数を計測し、動弾性係数を算出することで行われる。凍結融解試験では、一つの供試体を継続的に試験するので、重量、サイズが扱えばらいと計測作業の負担が大きくなる。また、1 サイクル3 時間～4 時間を、最大で 300 サイクル行うので約 3 か月の長い試験期間を要するので、性能評価に時間がかかるうえに、試験行うに当たっての労働力が大きいという問題がある。

本研究では、凍結融解試験における標準的な供試体サイズを小型化した供試体を何種類か作製し、凍結融解試験を行った。供試体の小型化により、供試体内部への水の浸透や温度変化の影響が大きくなり、凍害劣化速度を速くできると考えた。また、凍結融解試験機の容量は限られているので、小型化により同時に多くの供試体を試験できることや供試体が扱いやすくなるという利点も生まれる。今回は JIS 規定のサイズを含め、合計 4 種類のサイズの供試体を作製し、供試体サイズが凍結融解試験の結果に及ぼす影響を明らかにすることで、試験の改良・期間の短縮を図った。

2.2 実験概要

(1) 配合

本実験の供試体に用いた配合を表-2.1 に示す。今回の実験では通常サイズの供試体を想定した場合に 300 サイクルまで耐久性を保つように空気量を調整したコンクリートで供試体を作製した。通説として、コンクリート内部の空気（気泡）が耐凍害性に大きな影響を及ぼすといわれている。コンクリート中にエントレインドエア（連行空気）を生成することで、水分の凍結膨張による圧力を緩衝し、耐凍害性の大きいコンクリートを作製することができる。エントレインドエアは AE 剤を添加することで、表面活性作用によりコンクリート中に生成される。本配合では、AE 剤の添加により空気量を約 4% に調整することで、300 サイクル時点の相対弾性係数が 80% 程度となるような配合を定めた。

(2) 供試体概要

通常の凍結融解試験に用いられるサイズ（100×100×400mm）を N 供試体、通常のサイズを横方向に半分したサイズ（48×100×400mm）を HL 供試体、通常のサイズを縦方向に半分にしたサイズ（100×100×200mm）を HS 供試体、通常サイズを 1/4 に分割したサイズ（48×100×200mm）を Q 供試体と呼ぶ。N、HL、HS、Q の 4 種類の供試体を各 6 体ずつ作製し、合計 24 体の供試体を作製した。HL 供試体と Q 供試体は幅 100mm のゴムスリーブに重ねて挿入する為、高さを 48mm にすることで供試体同士の隙間を確保した。養生条件は水中養生とし、3 週間行った。凍結融解試験は供試体を水中に浸漬した状態で行われるので、試験開始初期にコンクリートが吸水し供試体質量が大きくなる可能性がある。これを防ぐために 2 週間の水中養生に加えて、1 週間の吸水期間として合計 3 週間の水中養生を行った。

(3) 試験方法

1.2 (3) 試験方法で示した JIS A1148「コンクリートの凍結融解試験」に準拠し、相対動弾性係数(式(2))と質量減少率を求めた。

2.3 実験結果及び考察

(1) 質量減少率

供試体種類ごとの質量減少率の平均値グラフを図-3.4 に示す。質量減少率は、300 サイクル時点の 6 体の平均値で大きい方から HL 供試体 5.1%、Q 供試体 4.2%、HS 供試体 3.4%、N 供試体 2.8% となった。N 供試体の質量減少率が最も小さい値となった。N 供試体は、表面のセメントペースト部分及びモルタル部分のスケールリングによる質量減少がほとんどで粗骨材の剥

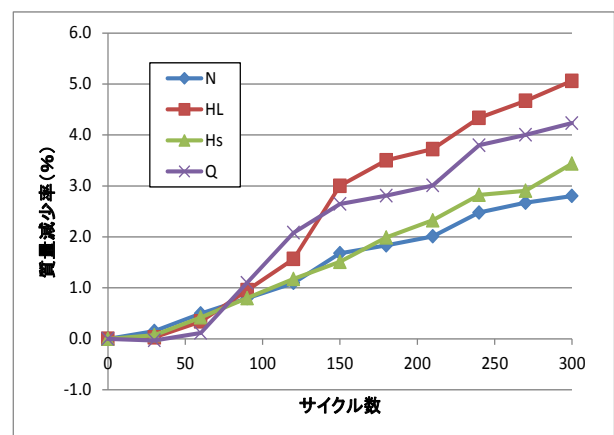


図-3.4 質量変化率（平均）

表-2.1 使用材料

Gmax (mm)	W/C	s/a (%)	空気量 (V%)	単位量(kg/m ³)					
				W	C	S	G	AE減水剤	AE剤
15	0.55	48.0	4.0	175	318	850	927	0.994	0.318

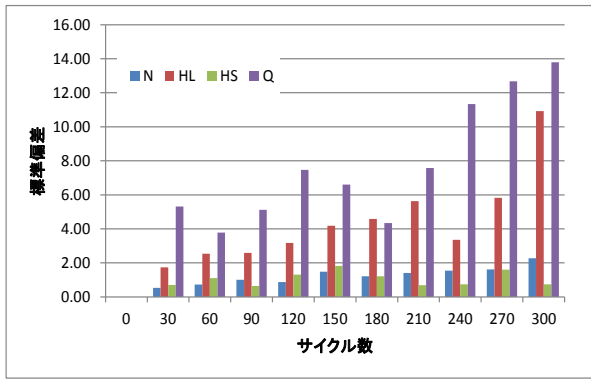


図-3.5 各供試体の標準偏差 (n=6)

落や大きな断面欠損は見られなかった。一方、HL 供試体はポップアウトにより、多数の砂利を損失することで供試体の質量減少率が最も大きくなったと考えられる。また、スケーリングの進展により、大きく表面が剥落している供試体も見られた。Q 供試体も HL 供試体とほぼ同様の劣化がみられた。後述する相対弾性係数の結果をみても、HL 供試体が 4 種類の中で最も劣化した結果となっている。

(2) 整合性の評価

今回の実験では、JIS で規定される供試体サイズを変更して試験を行っているために、正しい共鳴数を計測することがより困難であると考えられる。よって、各水準の 6 体の供試体の計測値のばらつきに対する評価を行う為に、供試体各水準 6 体の標準偏差を求めた。

供試体各水準の標準偏差を比較したグラフを図-3.5 に示す。グラフ全体をみるとサイクルが進むごとに標準偏差が大きくなっていることが読み取れる。このことから劣化が進展するほど、計測値のばらつきが大きくなるということが分かる。N 供試体と HS 供試体では標準偏差の差がほとんどなく、どちらもばらつきが小さいと言える。このことから、HS 供試体の形状で凍結融解試験をおこなっても、JIS 規定のサイズ (N 供試体) の計測結果と同様の試験結果が得られる可能性があると言える。一つのゴムスリーブに対して二つの HS 供試体を挿入することができるので試験対数を増やすことができるという利点が生まれる。

HL, Q 供試体では標準偏差の値が大きくなっており、

HS 供試体よりも計測結果にばらつきが出るということが分かる。また、HL 供試体よりも Q 供試体の標準偏差が大きくなっている。前項の相対動弾性係数の結果でも述べたように、Q 供試体は値の上がり下がりが目立ち、劣化の明確な傾向がみられない。このような結果から、Q 供試体の形状で凍結融解試験を行うのは難しいと言える。HL 供試体は N, HS 供試体よりも標準偏差が大きくなっているが、劣化には明確な傾向がみられる。また、凍害劣化は劣化が進展し始めると、相対動弾性係数が急激に低下する傾向がある。HL 供試体は JIS の規定サイズである N 供試体と比較すると劣化速度が速くなっている。図-3.6 から N 供試体の 300 サイクル時のデータと HL 供試体の 120 サイクル時のデータを比較すると、相対動弾性係数の値が近くなっている。このことから、HL 供試体の形状で凍結融解試験を行うことで約半分の期間で N 供試体の 300 サイクル時に相当するデータを取得できる可能性がある。また、HL 供試体は一つのゴムスリーブに 2 体挿入することができるので、試験体数を増やすことで結果のばらつきに対処することができると思われる。

2.4 まとめ

本実験では以下のような知見が得られた。

- (1) 相対動弾性係数の傾向、結果のばらつきをみると HS 供試体は N 供試体とほぼ同様の劣化進行であることが分かった
- (2) 質量減少、相対動弾性係数の値から、HL 供試体の劣化が最も大きく、供試体形状を薄くすることで凍害の劣化を速く進行させることができる。
- (3) HL 供試体の形状で凍結融解試験を行うことで、試験期間を半分以下に短縮できる可能性があることが分かった。

以上のことから、JIS 規定の供試体の形状を薄く加工し凍結融解試験を行うことで試験期間の短縮を実現できる可能性を示した。しかし、計測結果にばらつきがあるために試験体数を増やすことなどの対処を行うことや劣化の評価を慎重に行う必要がある。

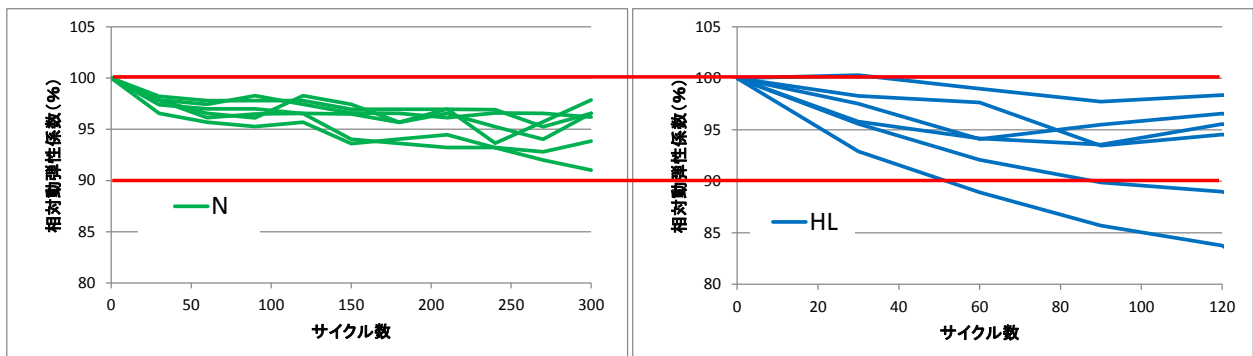


図-3.6 N 供試体と HL 供試体の比較