

マイクロフィルム用資料

土木研究所資料

ポーラスコンクリートの
強度および耐久性試験報告書

平成13年3月

国土交通省土木研究所
材料施工部コンクリート研究室

Copyright © (2001) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

“建設省は、平成13年1月6日付けで国土交通省に再編”

ポーラスコンクリートの強度および 耐久性試験報告書

コンクリート研究室 室 長 河野広隆
主任研究員 片平 博

要旨

ポーラスコンクリートは従来のコンクリートに近い強度を有し、かつ緑化が可能であることから、河川護岸への適用に関心が高まっている。

本報文は、ポーラスコンクリートの硬化後の基本的性状である強度および耐久性について実験的検討を行った結果をとりまとめたものである。

この結果から、緑化を目的とした一般的なポーラスコンクリートでは 10N/mm^2 程度以上の圧縮強度が得られること、凍結融解に対する耐久性では水中で完全な凍結融解作用を受ける条件での耐久性は低いものの、気中および水際沿いの凍結融解作用に対しては十分な耐久性を有していること、粗骨材粒径が大きい場合には乾湿繰り返しに対する耐久性が低いこと、骨材に再生骨材を使用すると強度・耐久性が低下すること等が明かとなった。

キーワード：ポーラスコンクリート、強度、耐久性、凍結融解試験、乾湿繰り返し試験、河川護岸、緑化

はじめに

「自然を生かした川づくり」を目指した河川整備事業の推進が求められているが、この実現には治水面での安全性が高く、かつ豊かで多様な動植物の生息・生育の可能な低コストの護岸工法の確立が急務である。

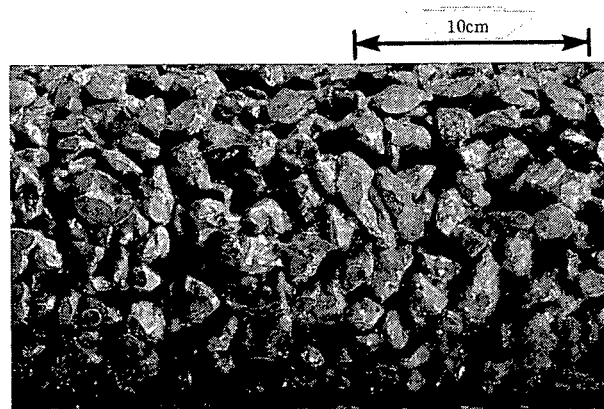
ポーラスコンクリートは単一粒径の粗骨材にセメントペーストをからめた「オコシ」状のコンクリートである。比較的高い強度を有し、また空隙部に植生基盤材を充填することで緑化や微小生物の生息が可能となることから河川護岸への適応に期待が高まっている。ポーラスコンクリートは、これまでの研究結果から 25% 以上の空隙率を確保することで緑化が可能であること、圧縮強度は 10N/mm^2 程度は確保できることが分かっている¹⁾。しかしながらその一方で、水中での凍結融解に対する耐久性は極めて低いことが報告されている²⁾。

凍結融解試験は JSCE-G501 で規定されている水中での凍結融解試験法が一般的である。この試験法をポーラスコンクリートに適用すると、ポーラスコンクリートは空隙が大きいため、空隙中の水が凍結する際の氷結圧にコンクリートが耐えられずに引張破壊が発生すると考えられる。しかしながら、この試験方法が必ずしも実際の河川護岸の状況を的確に捉えているとは言い難い。すなわち、水面から水深数十 cm にわたって凍結するような河川はよほどの厳寒地を除いて日本では稀であろう。また水面から上部では浸透水はポーラスコンクリートの空隙を貫通するため、上記のような氷結圧による破壊が生じる可能性はかなり低い。

このため、本研究では実際の環境条件を考慮した種々の凍結融解試験を実施し、ポーラスコンクリートの護岸材料としての凍結融解耐久性について検討した。また、乾湿繰り返しに対する耐久性についても実験的検討を行った。さらに骨材に再生骨材を使用したポーラスコンクリートの強度および耐久性についても検討を行った。

これらの研究は平成 10 年度から 12 年度までの 3 年間にわたって実施したものであり、本報告書では各年度ごとにその研究成果を整理した。各年度に実施した試験内容は以下のとおりであった。また、実験データは巻末の資料集にとりまとめた。

- 10 年度：①ポーラスコンクリートの配合と強度の関係
②ポーラスコンクリート自体の凍結融解耐久性
②材料に再生骨材を使用した場合の影響
- 11 年度：①緑化充填材を充填したポーラスコンクリートの凍結融解耐久性
②凍結融解温度とサイクルタイムを変えた場合の凍結融解耐久性
- 12 年度：①実際の河川堤防を模擬した条件での凍結融解耐久性
②乾湿繰り返しに対する耐久性



ポーラスコンクリート

目 次

はじめに

第1章 平成10年度の実験内容	1
1.1 実験目的	1
1.2 実験方法	1
1.2.1 ポーラスコンクリートの配合の考え方	1
1.2.2 実験配合	1
1.2.3 練り混ぜ方法とフレッシュ性状	2
1.2.4 供試体の作製方法	3
1.2.5 強度試験の方法	3
1.2.6 凍結融解試験の方法	3
1.3 一般的な骨材を使用した実験結果	6
1.3.1 圧縮強度試験結果	6
1.3.2 引張強度試験結果	6
1.3.3 水中凍結融解試験(α)の結果	6
1.3.4 気中凍結融解試験(β)の結果	9
1.3.5 部分水中凍結融解試験(γ)の結果	9
1.4 再生骨材を使用した実験結果	9
1.4.1 圧縮強度試験結果	9
1.4.2 引張強度試験結果	10
1.4.3 水中凍結融解試験(α)の結果	10
1.4.4 気中凍結融解試験(β)の結果	10
1.4.5 部分水中凍結融解試験(γ)の結果	10
1.5 まとめ	12
第2章 平成11年度の実験内容	13
2.1 実験目的	13
2.2 実験方法	13
2.2.1 実験配合	13
2.2.2 練り混ぜ方法とフレッシュ性状	14
2.2.3 コンクリート供試体の作製方法	14
2.2.4 緑化充填材の充填	15
2.2.5 圧縮強度試験の方法	15
2.2.6 凍結融解試験の方法	15
2.3 実験結果	19
2.3.1 圧縮強度試験結果	19
2.3.2 水中凍結融解試験結果	19
2.3.3 気中凍結融解試験結果	22
2.3.4 気乾保存中の動弾性係数の低下について	22
2.4 まとめ	24

第3章 平成12年度の実験内容	25
3.1 実験目的	25
3.2 河川堤防の条件を考慮した凍結融解試験	25
3.2.1 ポーラスコンクリート供試体の作製方法	25
3.2.2 河川堤防の条件を考慮した凍結融解試験の方法	26
3.2.3 実験結果	31
3.3 乾湿繰り返し試験	32
3.3.1 供試体の作製方法	32
3.3.2 乾湿繰り返し試験の方法	32
3.3.3 実験結果	32
3.4 まとめ	35
おわりに	36
資料集	39

第1章 平成10年度の実験内容

1.1 実験目的

ポーラスコンクリートの基本的な性状である強度・耐久性を確認することを目的として、水セメント比、粗骨材寸法および空隙率を変化させた供試体を作製し、圧縮強度、引張強度および凍結融解耐久性について実験的検討を行った。また、ポーラスコンクリートの骨材に再生骨材を使用した場合の強度、耐久性への影響について実験的検討を行った。

実験目的を以下に整理する。

- (1) ポーラスコンクリートの配合と強度との関係を把握する。
- (2) ポーラスコンクリートの配合と凍結融解耐久性との関係を把握する。
- (3) ポーラスコンクリートに再生骨材を使用した場合の影響について把握する。

1.2 実験方法

1.2.1 ポーラスコンクリートの配合の考え方

ポーラスコンクリートは主に[セメント]+[水]+[単粒径粗骨材]で構成される。ただし空隙率や強度の調整のために細骨材を少量混入する場合もある。空隙が大きいという構造上の弱点を克服するために水セメント比は25%前後と小さく、また、ペーストの流動性を確保する目的から高性能 AE 減水剤が使用される場合が多いようである。

本研究におけるポーラスコンクリート 1 m³ あたりの配合設計は以下の手順によることとした。

- (1) 粗骨材寸法、水セメント比、空隙率を設定する。
- (2) 粗骨材量の算出：ポーラスコンクリート 1 m³ あたりの粗骨材容積は、[粗骨材の実積率]×[α]で求められる。αとは、骨材の隙間にペーストが入り込むために 1 m³ あたりの粗骨材量が粗骨材の実積率よりも幾分少なくなることの修正係数(骨材容積修正係数)であり、0.94～0.98 程度が用いられる。
- (3) セメント量、水量の算出：1 m³ から粗骨材容積と空隙の容積を差し引いた残りがペースト容積であり、ペースト量から所定の水セメント比となる結合材量、水量を算出する(細骨材を混入する場合は空隙率を減少させる量の細骨材量を混入する)。
- (4) 混和剤量の設定：混和剤として使用する高性能 AE 減水剤の量は適切なペーストの流動性が確保できるように試し練りによって決定する。

1.2.2 実験配合

実験を行ったポーラスコンクリートの配合は表-1.1 に示す 10 配合とした。表中のケース 1 から 7 はグループⅠとして堅硬な骨材を使用し、水セメント比、骨材の粒径および空隙率をそれぞれ変化させた条件とし、ケース 8, 9, 10 はグループⅡとして骨材に再生骨材を使用した条件とした。試験に使用した材料の物性は表-1.2 のとおりである。再生骨材はジョークラッシャーで 1 次破碎のみされた一般的な再生クラッシャーランであり、「コンクリート副産物の再利用に関する用途別暫定基準(案)」の再生骨材の品質基準にあてはめると 2 種または 3 種に該当するものである。

表－1.1 ポーラスコンクリートの配合

実験 グループ	ケース名	W/C (%)	粗骨材の種類	目標空隙率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水	セメント	粗骨材	細骨材	混和剤*
I	1.基本配合	25	4号碎石	25	76	305	1,532	—	3.355
	2.W/C=30	30	"	"	84	280	1,532	—	0.700
	3.W/C=35	35	"	"	91	260	1,532	—	—
	4.5号碎石	25	5号碎石	"	74	296	1,545	—	3.256
	5.6号碎石	"	6号碎石	"	72	287	1,557	—	3.157
	6.空隙率 20 %	"	4号碎石	20	84	335	1,501	115	3.685
	7.空隙率 15 %	"	"	15	91	365	1,469	229	4.015
II	8.再生4号	25	再生骨材 4号	25	87	347	1,316	—	3.817
	9.再生5号	"	再生骨材 5号	"	86	342	1,352	—	3.762
	10.再生6号	"	再生骨材 6号	"	83	330	1,354	—	3.630

* 混和材：ケース2,3 以外は高性能 AE 減水剤
ケース2 は AE 減水剤

表－1.2 材料物性

セメント	高炉セメント，密度 3.04g/cm ³ ，比表面積 3,760cm ² /g	
細骨材	大井川産河床砂，粒径 0-5mm，密度 2.60，吸水率 1.06 %	
粗骨材	4号碎石	笠間産硬質砂岩，粒径 20-30mm，密度 2.67g/cm ³ ，吸水率 0.43 %，実積率 58.5 %
	5号碎石	笠間産硬質砂岩，粒径 13-20mm，密度 2.67g/cm ³ ，吸水率 0.46 %，実積率 59.0 %
	6号碎石	笠間産硬質砂岩，粒径 5-13mm，密度 2.67g/cm ³ ，吸水率 0.68 %，実積率 59.6 %
	再生骨材 4号	粒径 20-30mm，密度 2.40g/cm ³ ，吸水率 5.29 %，実積率 56.1 %
	再生骨材 5号	粒径 13-20mm，密度 2.45g/cm ³ ，吸水率 4.43 %，実積率 56.3 %
	再生骨材 6号	粒径 5-13mm，密度 2.42g/cm ³ ，吸水率 5.27 %，実積率 57.0 %
混和剤	高性能 AE 減水剤，ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体	
	AE 減水剤，リグニンスルホン酸化合物ポリオール複合体	

1.2.3 練り混ぜ方法とフレッシュ性状

練り混ぜには 100 リットルの二軸強制練りミキサを使用し、以下の方法によることとした。

(1) 細骨材を使用しない配合の練り混ぜ方法

- 1) ミキサ内に粗骨材、セメントを投入し、30 秒間空練り、
- 2) 水、混和剤を投入し、90 秒間練り混ぜ、排出。

(2) 細骨材を使用する配合の練り混ぜ方法(ケース 6，7)

- 1) ミキサ内に細骨材、セメントを投入し、10 秒間空練り、
- 2) 水、混和剤を投入し、120 秒間練り混ぜ、
- 3) 粗骨材を投入し、90 秒間練り混ぜ、排出。

細骨材を使用した配合の練り混ぜ方法が他と異なった理由は、細骨材を使用したケース 6，7 の配合は空隙率を小さくする目的からモルタル量が多く、締め固め時に発生するモルタルのダレを押さえる目的から、モルタルの流動性を低くする必要があり、(1)の方法では十分に練り混ぜられなかったためである。

練り上がったコンクリートのフレッシュ性状の確認試験として、練り上がり温度、ペースト(またはモルタル)のフロー値、空隙率³⁾を測定した。測定方法は以下のとおりとした。

フロー値：ポーラスコンクリートからセメントペースト(またはモルタル)を採取し、JIS A 5201 の方法によりフロー値を測定した。ペーストの採取方法はフルイ目 10mm(6号碎石に対してはフルイ目 5mm)、φ 20cm の丸フルイ上にポーラスコンクリートを採取し、上面から平板パイププレートによる振動を与えることによってペーストを落下させ、採取した。

空隙率：圧力式エアメータを使用し、まず、エアメータ容器内にポーラスコンクリート試料を詰める。試料の詰めかたは 2 層詰めとし、突き棒による突き固めを 1 層あたり 25 回実施し、2 層目の突き固め終了後に、さらに試料上部から振動タンバによる振動締め固めを 1 秒間実施した。次に試料の空隙に静かに水を注入し、水面が容器上縁に達した時点での注水質量を測定した。次にエア

メータの蓋を締め、空気量を測定した。注水質量に相当する空隙を連続空隙率、これに空気量測定値を加えた値を全体空隙率とした(試験法の詳細は文献 3) 参照)。

これらの測定結果を表- 1.3 に示す。

表- 1.3 フレッシュ性状試験結果

実験 グループ	ケース名	練上り温度 (℃)	フロー値 (mm)	連続空隙率 (%)	全体空隙率 (%)
I	1.基本配合	22.5	213 × 213	27.6	29.7
	2.W/C=30	21.5	158 × 155	30.0	31.5
	3.W/C=35	20.6	175 × 176	27.6	29.2
	4.5号碎石	21.1	196 × 201	24.8	27.6
	5.6号碎石	21.3	—	22.6	27.4
	6.空隙率 20 %	21.0	181 × 185	22.1	25.1
	7.空隙率 15 %	21.2	154 × 155	17.7	21.2
II	8.再生 4 号	20.4	198 × 194	25.0	27.6
	9.再生 5 号	20.5	171 × 187	25.7	28.4
	10.再生 6 号	20.5	209 × 218	21.6	26.2

1.2.4 供試体の作製方法

圧縮試験、引張試験、凍結融解試験に必要な供試体を以下の方法によって作製した。

圧縮試験用供試体の寸法はφ 15 × 30cm とし、供試体本数は各配合ごとに 5 本とした。供試体の作製方法としては、まず型枠底面にキャッピング用のペーストを約 500g 敷き詰め、その上にポーラスコンクリートを 3 層に分けて打ち込むこととし、1 層あたり突き棒による突き固めを 25 回実施した。さらに 3 層目の突き固め終了後に試料上部から振動タンパによる振動締め固めを 1 秒間実施した。24 時間後に上面をキャッピングし、その翌日に脱型した。脱型後は 20℃ の水中養生を行った。

引張試験用供試体の寸法はφ 15 × 20cm とし、供試体本数は各配合ごとに 3 本とした。供試体の作製方法としては、型枠内にポーラスコンクリートを 2 層に分けて打ち込むこととし、1 層あたり突き棒による突き固めを 25 回実施した。さらに 2 層目の突き固め終了後に試料上部から振動タンパによる振動締め固めを 1 秒間実施した。翌日に脱型し、脱型後は 20℃ の水中養生を行った。

凍結融解試験は 1.2.6 に示すように α, β, γ の 3 とおりの試験を実施することとし、供試体寸法は α, β は 10 × 10 × 40cm の長方形、 γ は 10 × 10 × 19cm の長方形とした。供試体本数は各配合、試験法ごとに 3 本とした。供試体の作製方法としては、型枠内にポーラスコンクリートを 2 層に分けて打ち込むこととし、1 層あたり突き棒による突き固めを 40 回(γ については 20 回)実施した。さらに 2 層目の突き固め終了後に試料上部から振動タンパによる振動締め固めを 1 秒間実施した。翌日に脱型し、脱型後は 20℃ の水中養生を行った。

1.2.5 強度試験の方法

圧縮試験と引張(割裂)試験を実施することとし、圧縮試験は JIS A 1108、引張試験は JIS A 1113 に準拠して実施した。試験材齢は凍結融解試験開始材齢である 14 日とした。

1.2.6 凍結融解試験の方法

凍結融解試験は JSCE-G501 の規準を満足する凍結融解試験装置を用い、以下の 3 通りの試験を試みた。試験条件を表- 1.4 に、試験の概念図を図- 1.1 に示す。

α . 水中凍結融解試験：JSCE-G501 に準拠した水中凍結-水中融解試験である。ゴム容器内に水を入れ、水中において凍結融解を繰り返す、コンクリートの材料試験としては最も一般的な試験法である。河川護岸での条件としては河川水面から下部の水中全体が凍結融解を繰り返す過酷な条件である。温度設定は供試体中心温度で最低温度 -18℃、最高温度 5℃、1 サイクルの行程は凍結行程 3 時間、融解行程 3 時間とした。サ

表-1.4 凍結融解試験方法

	サイクル時間		温度範囲 (℃)	供試体 寸法 (cm)	測定項目		備 考
	凍結	融解			一次共鳴 振動数	損失 質量	
α.水中凍結融解	3 h	3 h	-18 ~ +4	10 × 10 × 40	○	○	
β.気中凍結融解	2.5 h	1.5 h	-18 ~ +4	10 × 10 × 40	○	○	供試体は湿潤状態
γ.部分水中凍結融解	3 h	3 h	-18 ~ +4	10 × 10 × 15	—	○	水中凍結範囲は4 ~ 5cm

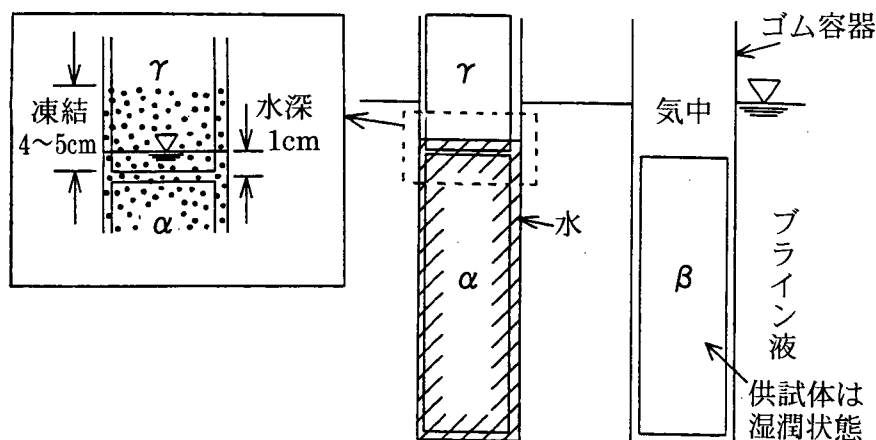


図-1.1 凍結融解試験の概念図

イクルタイムが JSCE-G501 の規準に比較して長いのは、ゴム容器内に充填される水の量が一般のコンクリートよりも多いために熱交換に長い時間を必要とするためである。

β.気中凍結融解試験：ゴム容器内に水を入れず、空气中で凍融解を繰り返す条件とした。河川護岸としては水面から上の部分を対象とした条件である。温度設定は供試体中心温度で最低温度-18、最高温度 5℃、1 サイクルの行程は凍結行程 2.5 時間、融解行程 1.5 時間とした。なお、供試体は動弾性係数測定毎に水に一度浸し、湿潤状態を保持することとした。

γ.部分水中凍結融解試験：供試体の一部が水中に没している状態で凍結融解を繰り返す条件。実際の河川護岸では水面から数 cm の水深まで凍結融解が生じる状態を模した条件である。実験では図-1.1 に示すように α の供試体の上部に γ の供試体を乗せた状態で試験を行っており、γ の供試体に対する水深は融解時で約 1 cm、凍結時の氷結厚は 4 ~ 5cm 程度であった。

凍結融解試験の開始材齢は 14 日とし、凍結融解の繰り返し回数は JSCE-G501 に準拠し 300 回とした。数サイクルごとに一次共鳴振動数と質量（γ は質量のみ）を測定し、次式により相対動弾性係数と質量減少率を算出した。

$$\text{相対動弾性係数 (\%)} = \frac{f_n}{f_0} \times 100 \quad (1.1)$$

ここに、 f_n ：試験中の一次共鳴振動数

f_0 ：試験開始前の一次共鳴振動数

$$\text{質量減少率 (\%)} = \frac{W_0 - W_n}{W_0} \times 100 \quad (1.2)$$

ここに、 W_n ：試験中の供試体質量

W_0 ：試験開始前の供試体質量

試験中のブライン液と供試体の温度履歴は図-1.2, 1.3 に示すとおりであった。ここで、 γ 供試体の底部 (α 供試体との境界面) の最高温度が 0°C となっているが、氷が融解していることを目視により確認している。

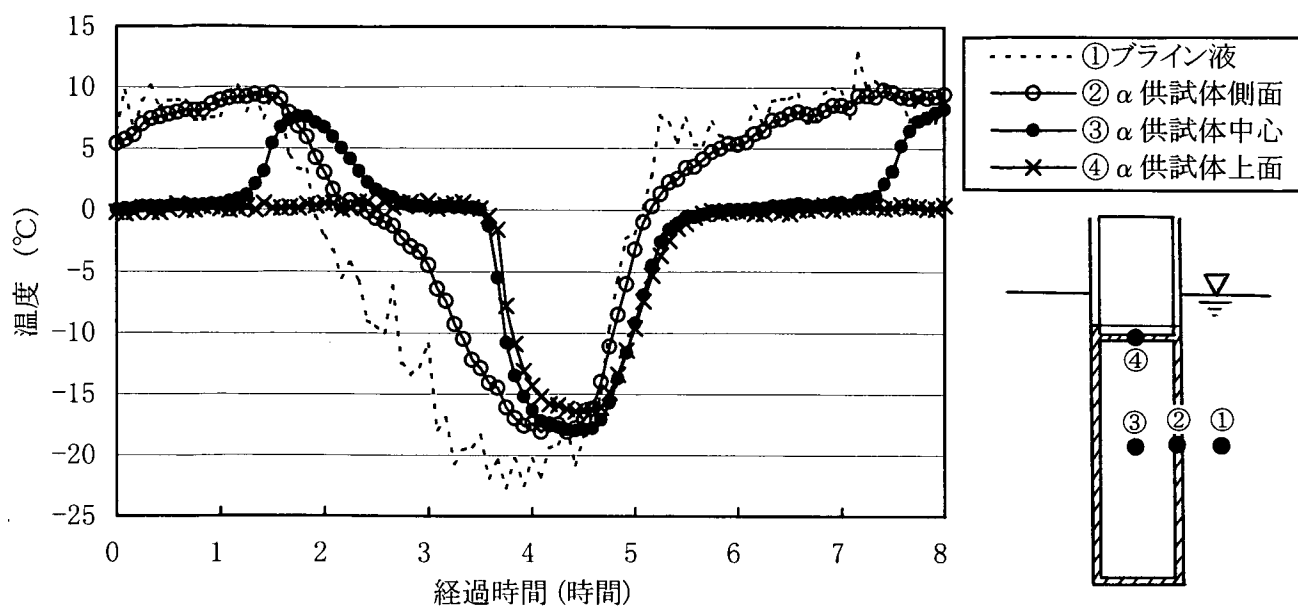


図-1.2 ブライン液と供試体の温度履歴(α)

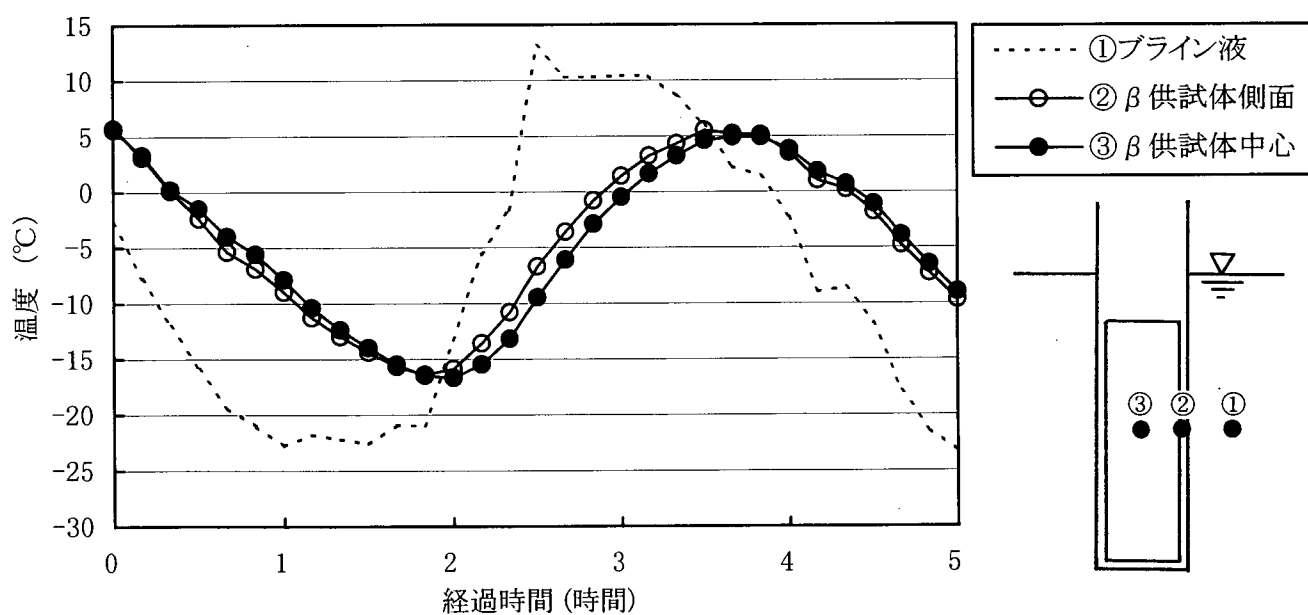


図-1.3 ブライン液と供試体の温度履歴(β)

1.3 一般的な骨材を使用した実験結果

グループⅠとして堅硬な骨材を使用し、水セメント比、骨材の物性、粒径および空隙率をそれぞれ変化させたケース1～7の実験結果について述べる。

1.3.1 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果の中からキャッピングの不良による異常値を棄却し、整理した結果を図－1.4に示す。

水セメント比を変化させたケース1，2，3の比較では、一般のコンクリートと同様に水セメント比が小さくなるほど圧縮強度は増加する傾向を示し、水セメント比25%の配合では 10 N/mm^2 以上の圧縮強度が確保できることを確認した。

空隙率を変化させたケース1，6，7の比較では、空隙率5%の減少に対して圧縮強度は 4 N/mm^2 程度増加していく傾向を示した。

骨材寸法を変えたケース1，4，5の比較では、4号碎石を用いた強度に比較して、5号，6号碎石を用いた強度のほうがやや高めに出る傾向を示した。

1.3.2 引張強度試験結果

引張強度試験結果は図－1.5に示すとおりであり、配合との関係は圧縮強度試験結果と概ね同一の傾向を示した。図－1.6は各ケースの圧縮強度と引張強度の平均値を比較したものであるが、ポーラスコンクリートの圧縮強度と引張強度との関係はほぼ線形関係にあり、圧縮強度が小さい配合ほど圧縮強度に対する引張強度の割合は高くなる傾向を示した。

1.3.3 水中凍結融解試験(α)の結果

凍結融解試験では各配合ごとに3本の供試体の一次共振周波数、質量を測定しているが、個々の供試体の測定結果は巻末の資料集に示し、本編では3本の平均値を示すこととする。

水中凍結融解試験(α)における相対動弾性係数を図－1.7に、質量減少率を図－1.8に示す。水中での凍結融解試験では全ケースとも試験開始後のわずか数サイクルで、写真－1.1に示すように供試体に大きな亀裂が生じ、バラバラに崩壊した。この原因は骨材間の粗大な空隙中の水が凍結する際の膨張圧によってコンクリートに引張破壊が生じるためと考えられる。

なお、この試験法は一般の河川護岸の環境条件に比較して過酷な条件である。凍結温度が $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ と低く、また、河川護岸では氷結は水面から下方向に向けて一方向に進行するが、本試験法では供試体の全周から凍結するため、氷結時の膨張圧が供試体内部に蓄積されやすい条件である。



写真－1.1 水中凍結融解試験でのポーラスコンクリート供試体の破壊状況

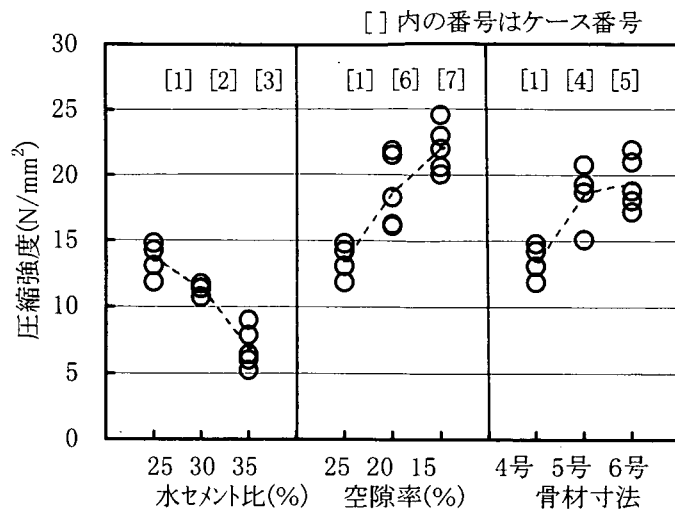


図-1.4 圧縮強度試験結果

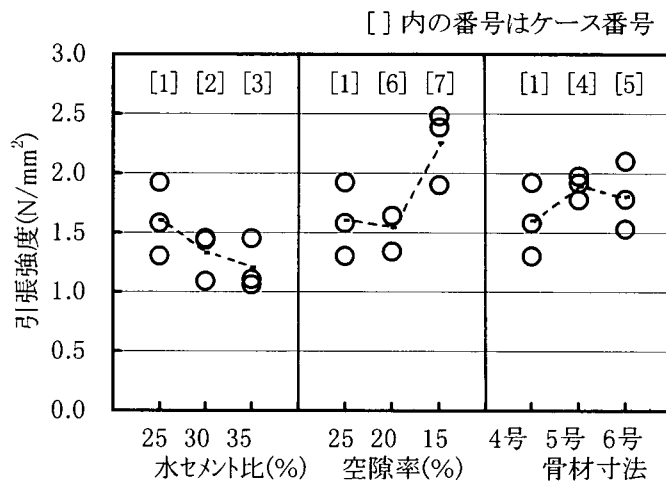


図-1.5 引張強度試験結果

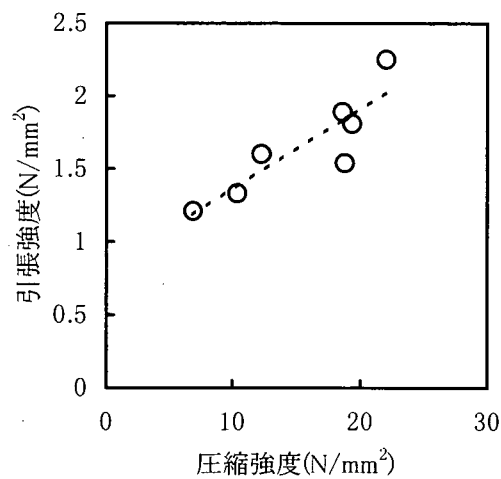


図-1.6 圧縮強度と引張強度の関係

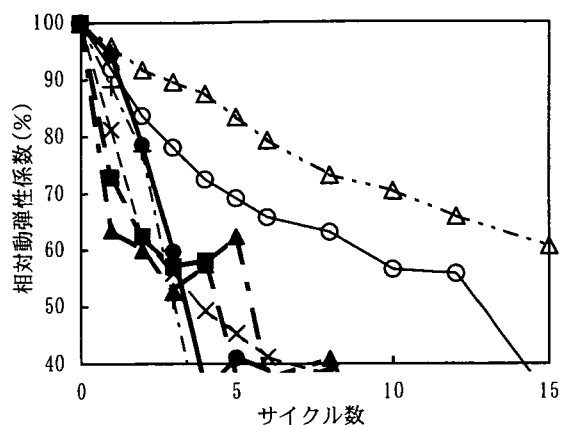


図-1.7 水中凍結融解試験(α)の相対動弾性係数
(グループ I)

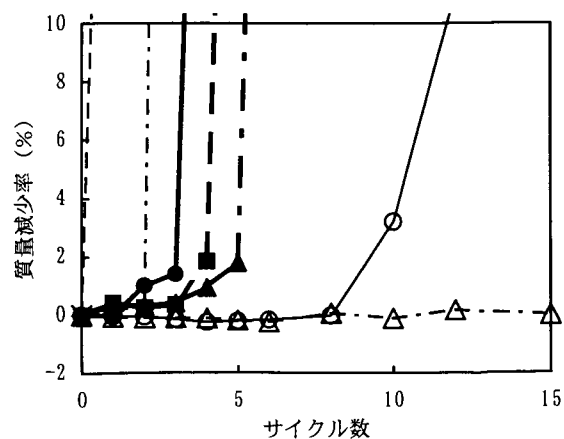


図-1.8 水中凍結融解試験(α)の質量減少率
(グループ I)

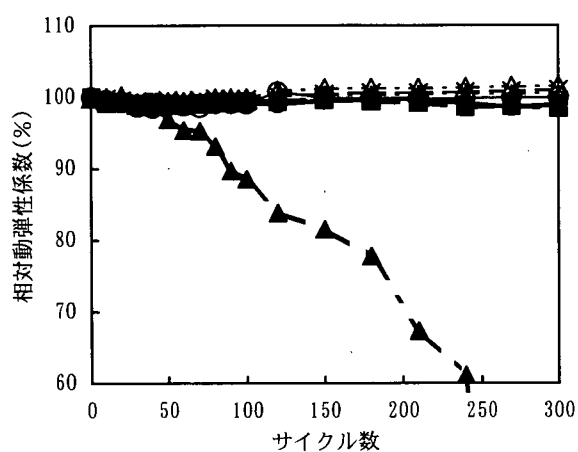


図-1.9 気中凍結融解試験(β)の相対動弾性係数
(グループ I)

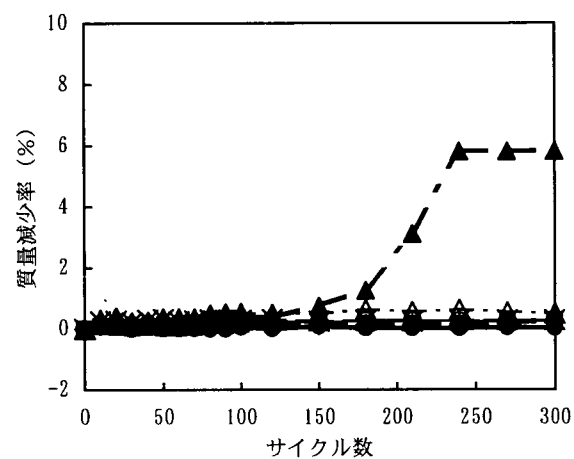


図-1.10 気中凍結融解試験(β)の質量減少率
(グループ I)

凡例 (図-1.7~1.11 共通)

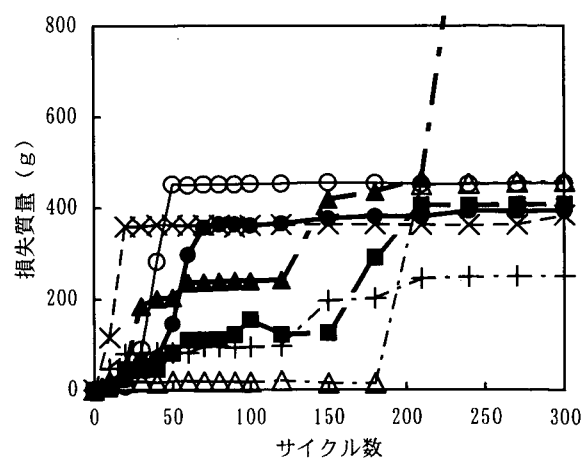
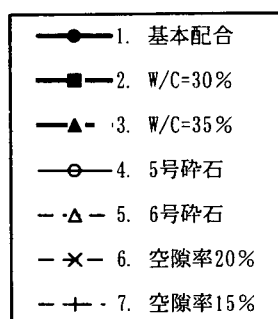


図-1.11 部分水中凍結融解試験(γ)の損失質量
(グループ I)

1.3.4 気中凍結融解試験(β)の結果

相対動弾性係数を図－ 1.9 に質量減少率を図－ 1.10 に示す。水セメント比が 35 % (最も貧配合) のケースでは相対動弾性係数が除々に低下し、質量減少率も増加していく傾向を示したが、それ以外の配合では劣化はまったく見られなかった。この結果から、水面から上部の位置ではかなり高い凍結融解耐久性を備えていると考えられる。

1.3.5 部分水中凍結融解試験(γ)の結果

γ の試験では供試体の形状関係で一次共鳴振動数の測定は困難であったため、凍結融解の劣化で失われる供試体の損失質量のみを測定した。この結果を図－ 1.11 に示す。この試験で水中凍結する部分のコンクリート質量は概ね 600 ～ 800g であるが、その部分が凍結融解を繰り返すごとに除々に崩壊していく様子がかえる。ただし 6 号砕石を使用したケースでは 180 サイクルまで崩壊が発生しておらず、骨材寸法の小さい配合であれば比較的高い耐久性が得られるものと考えられる。

この試験は水面付近の数 cm の厚さの水が凍結融解する条件を想定して行ったものである。しかしながら、 α の供試体の上に γ の供試体を乗せて試験を行ったことから、凍結時には氷結によって α の供試体と一体化してしまい、 α 供試体の挙動に引きずられて膨張変形を起こしている可能性があり、実際の環境条件よりも厳しい条件となったと考えられる。

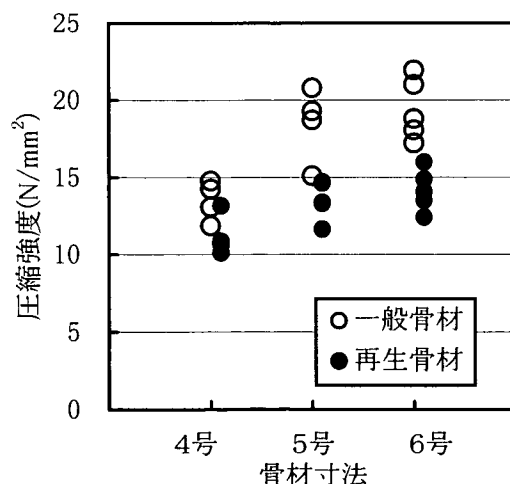
1.4 再生骨材を使用した実験結果

グループⅡとして骨材に再生骨材を使用したケース 8, 9, 10 の実験結果について述べる。

1.4.1 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果を図－ 1.12 に示す。図には再生骨材を使用したケースの他に堅硬な骨材を使用したケース 1, 4, 5 の結果も合わせて示したが、再生骨材を使用した場合の圧縮強度は堅硬な骨材を使用した場合の概ね 8 割程度の強度となった。

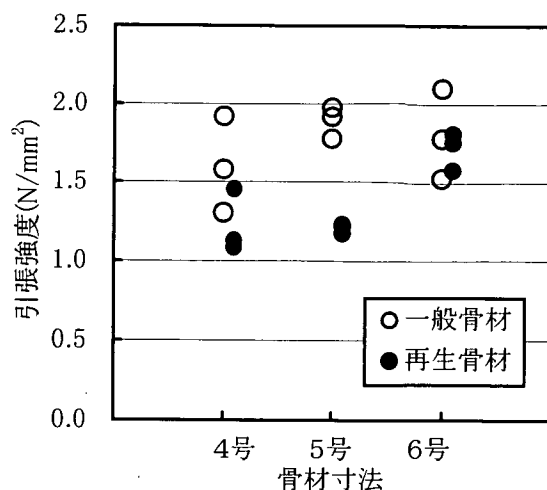
強度が低下した原因としては次のように考えられる。再生骨材は堅硬な骨材とそれに付着する旧モルタル部によって構成されている。この旧モルタル部は破碎再生時の衝撃による微小クラック等の弱点を含むものである。ポーラスコンクリートの強度は骨材が堅硬な場合には主にペーストの強度によって決まるが、再生骨材を使用すると、再生骨材中の強度的な弱点を内在する旧モルタル部に破壊が発生し、圧縮強度が低下するものと考えられる。



図－ 1.12 圧縮強度試験結果

1.4.2 引張強度試験結果

引張強度試験結果を図－ 1.13 に示す。圧縮強度と同様に引張強度についても、再生骨材を使用することで強度は低下する傾向を示した。



図－ 1.13 引張強度試験結果

1.4.3 水中凍結融解試験(α)の結果

相対動弾性係数を図－ 1.14 に、質量減少率を図－ 1.15 に示す。これらの図では比較のために一般の骨材を使用したケース 1, 4, 5 の結果も併わせて示した。これによると再生骨材を使用したケースも一般の骨材を使用したケースと同様に、数サイクルで動弾性係数は大きく低下し、質量減少率は増加した。

図のなかで、再生骨材 6 号を使用したケース 10 の動弾性係数の低下割合が比較的小さい。この理由としては、再生骨材では、骨材の実積率が一般の骨材に比較してやや小さく、ポーラスコンクリートとしての空隙率を一定に揃える目的からペースト量をやや増やしており、このペースト量の違いが影響している可能性がある。しかしながら、わずか 25 サイクルで相対動弾性係数は 60 % 以下となり、他のケースと同様に水中での凍結融解耐久性は低いと考えられる。

1.4.4 気中凍結融解試験(β)の結果

相対動弾性係数を図－ 1.16 に、質量減少率を図－ 1.17 に示す。一般の骨材を使用したケースでは、実験終了の 300 サイクルまで、動弾性係数の低下はほとんど生じなかったのに対し、再生骨材を使用したケースでは動弾性係数の低下ならびに質量減少率の増加が認められた。実験終了時点の相対動弾性係数は 40 % 程度まで低下しており、気中における凍結融解耐久性も低いと考えられる。原因としては 1.4.1 項で述べた理由と同様、再生骨材中の旧モルタル部分の欠陥が影響しているものと考えられる。

1.4.5 部分水中凍結融解試験(γ)の結果

この試験では供試体寸法が他の試験と異なり、動弾性係数の測定が困難であったため、損失質量のみの測定結果を図－ 1.18 に示す。一般の骨材を使用したケースと同様に、再生骨材を使用したケースも凍結融解を繰り返すごとに徐々に崩壊していく様子がうかがえる。一般の 6 号碎石を使用したケースでは 180 サイクルまで崩壊が発生しなかったが、再生骨材 6 号を使用したケースでは崩壊が生じなかったのは 100 サイクルまでで、一般の骨材を使用したケースに比較して、やや耐久性が落ちる結果となった。

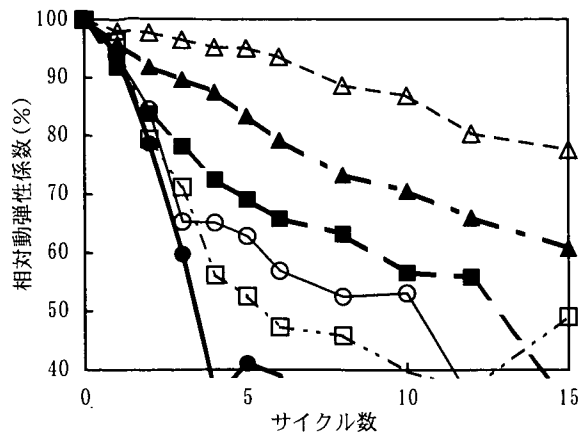


図-1.14 水中凍結融解試験(α)の質量減少率
(グループII)

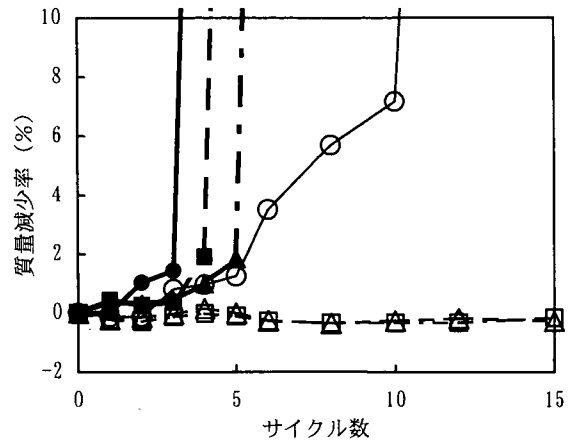


図-1.15 水中凍結融解試験(α)の質量減少率
(グループII)

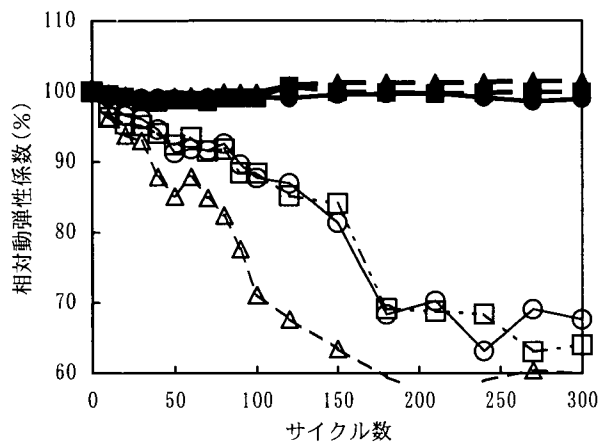


図-1.16 気中凍結融解試験(β)の質量減少率
(グループII)

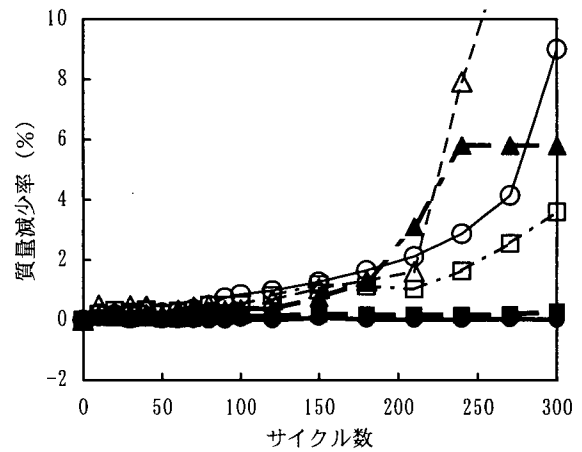


図-1.17 気中凍結融解試験(β)の質量減少率
(グループII)

凡例 (図-1.14~1.18共通)

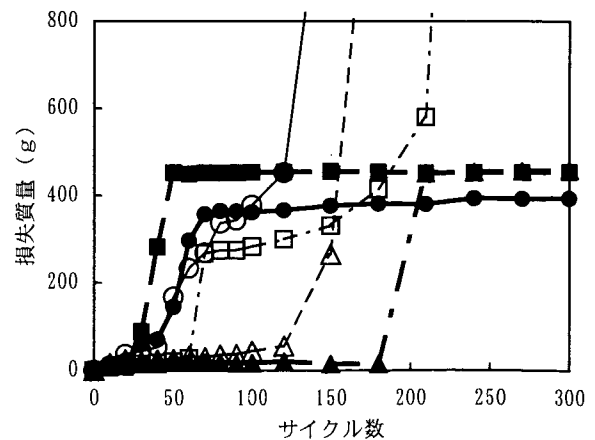
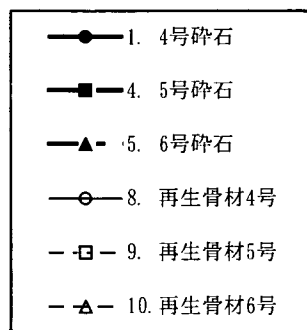


図-1.18 部分水中凍結融解試験(γ)の損失質量
(グループII)

1.5 まとめ

10 年度は(1)ポーラスコンクリートの配合と強度の関係、(2)ポーラスコンクリート自体の凍結融解耐久性、(3)材料に再生骨材を使用した場合の影響について実験的研究を行った。結果を以下に整理する。

(1) ポーラスコンクリートの配合と強度の関係

- 1) 圧縮強度は配合によって異なり、水セメント比が小さいほど、空隙率が小さいほど、また骨材寸法が小さいほど圧縮強度は高くなる傾向を示した。
- 2) 一般の骨材を使用し、水セメント比 25 %、空隙率 25 % の条件では 10 N/mm^2 以上の圧縮強度を確保できることを確認した。
- 3) ポーラスコンクリートの圧縮強度と引張強度との関係はほぼ線形関係にあり、圧縮強度が小さい配合ほど圧縮強度に対する引張強度の割合は高くなる傾向を示した。

(2) ポーラスコンクリートの凍結融解耐久性

- 1) 水中での完全な凍結融解を想定した実験では、ポーラスコンクリートの耐久性はかなり低い結果となった。この原因は骨材間の粗大な空隙中の水が凍結する際の膨張圧によってコンクリートに引張破壊が生じるためと考えられる。しかしながら、本試験の条件は河川護岸の環境条件に比較して過酷な条件である。
- 2) 気中での凍結融解を想定した実験では、適切な配合を行ったポーラスコンクリートの物性は低下しない結果となった。このことから、水面よりも上部に位置するポーラスコンクリートの凍結融解耐久性は高いと考えられる。
- 3) 水際部のような部分的な水中凍結融解を想定した実験では、供試体の破壊は進行するものの、堅硬で骨材粒径の小さな骨材を使用したケースでは破壊の進行は緩慢であった。なお、この実験条件は実際の水際部の凍結融解の条件よりも厳しい条件であったと考えられる。

(3) 材料に再生骨材を使用した場合の影響

- 1) 再生骨材を材料としたポーラスコンクリートの強度は一般の骨材を使用した場合に比較して低下することを確認した。この原因としてはコンクリート解体材を破碎する際に旧モルタル内に発生する微細なクラックが弱点となるためと考えられる。
- 2) 再生骨材を材料としたポーラスコンクリートの凍結融解耐久性は一般の骨材を使用した場合に比較して低下することを確認した。特に、一般の骨材を使用した場合に高い耐久性を示した気中での凍結融解試験でも、再生骨材を使用すると耐久性が著しく低下する結果となった。

以上のように 10 年度の実験結果からは、ポーラスコンクリートの配合と強度との関係、および再生骨材を使用した場合の影響については確認することができた。しかしながら凍結融解耐久性については、気中での耐久性は高いことが確認できたが、水中および水際部に対しては実際の環境条件に比較して試験条件が厳しすぎ、的確な実験結果を得ることはできなかった。このため次年度以降も耐久性に対する検討を継続するものである。

第2章 平成11年度の実験内容

2.1 実験目的

11年度は10年度に引き続き、ポーラスコンクリートの凍結融解耐久性を確認することを目的として実験的研究を行った。

JSCE-G501に規定されるコンクリートの水中凍結融解試験法は促進法であることから、自然界の条件に比較すると過酷な条件である。このため凍結融解試験法の設定温度およびサイクルタイムを自然界に近い条件に設定した凍結融解試験を実施し、ポーラスコンクリートの凍結融解耐久性を検討することとした。

また、10年度の実験ではポーラスコンクリート単体の供試体に対して凍結融解試験を実施したが、実際のポーラスコンクリートには緑化のために緑化充填材が施工される。このため、この緑化充填材がポーラスコンクリートの凍結融解耐久性に与える影響について検討した。あわせて骨材寸法が凍結融解耐久性に与える影響について検討した。

この他にも供試体作製時の振動締固めの有無が強度や凍結融解耐久性に与える影響について検討した。

実験目的を以下に整理する。

- (1) 水中凍結融解試験の最低温度とサイクルタイムが供試体の劣化速度に与える影響を把握する。
- (2) 緑化充填材の有無や骨材寸法がポーラスコンクリートの凍結融解耐久性に与える影響を把握する。
- (3) 供試体作製時の振動締固めの有無が強度、凍結融解耐久性に与える影響を把握する。

2.2 実験方法

2.2.1 実験配合

ポーラスコンクリートの配合は一般的な配合を想定し、表-2.1に示すように粗骨材には4号、5号、6号砕石を使用した3つの配合を設定し、いずれの配合でも水セメント比は25%、目標空隙率は25%とした。これらの配合をそれぞれ4号配合、5号配合、6号配合と呼ぶこととする。

使用した材料の物性は表-2.2に示すとおりである。

表-2.1 配合表

配合名	W/C (%)	空隙率 (%)	粗骨材	骨材容積 修正係数 α	単位量 (kg/m ³)				バッチ数
					水	セメント	粗骨材	混和剤	
4号配合	25	25	4号砕石	0.96	79	317	1501	2.85	1
5号配合	25	25	5号砕石	0.96	79	317	1513	2.82	3
6号配合	25	25	6号砕石	0.96	79	317	1525	3.17	2

表-2.2 材料物性

セメント	高炉セメント、密度：3.04g/cm ³ 、比表面積：3,720cm ² /g
4号砕石	笠間産硬質砂岩、20-30mm、密度2.67g/cm ³ 、吸水率0.43%、実積率58.5%
5号砕石	笠間産硬質砂岩、13-20mm、密度2.67g/cm ³ 、吸水率0.46%、実積率59.0%
6号砕石	笠間産硬質砂岩、5-13mm、密度2.67g/cm ³ 、吸水率0.68%、実積率59.6%
混和剤	高性能A E減水剤SP8HS
緑化充填材A	性状：粉体、成分：珪石粉にパーライト、ゼオライト、有機質肥料を混入したもの
緑化充填材B	性状：スラリー、成分：水、有機質繊維、緩効性肥料、モンモリロナイト系鉱物

2.2.2 練り混ぜ方法とフレッシュ性状

練り混ぜには 100 リットルの二軸強制練りミキサを使用し、以下の方法によることとした。

- 1)ミキサ内に粗骨材、セメントを投入し、30 秒間空練り
- 2)水、混和剤を投入し、90 秒間練り混ぜ
- 3)ミキサを止め、5 分間待機（高性能 A E 減水剤の効果発現時間を考慮）
- 4)ミキサを再運転し、30 秒後に練り板上に排出

練り上がったコンクリートのフレッシュ性状の確認試験として、ペーストのフロー値、平板バイブレータによるペースト落下量³⁾、および空隙率(測定方法は 1.2.3 項参照)を測定した。

平板バイブレータによるペースト落下量とは、ペーストの流動性を簡易に測定する方法としてコンクリート研究室で独自に提案した方法である。手順を以下に示す(詳細は文献 3)参照)。

- ①底蓋を付けたφ 20cm、フルイ目 10mm(6 号配合では 5mm)の丸フルイ上に試料を約 2 kg 採取し、試料質量を測定する。
- ②試料の上部から平板バイブレータによる振動を所定の時間かけたときに落下するペースト量を測定する。振動時間は 4、5 号配合では 5 秒、10 秒、6 号配合では 10 秒、20 秒、30 秒とした。
- ③落下したペースト量を試料 2 kg 当たりの落下量として整理する。

これらの測定法によって得られた各配合のペーストのフロー値、ペースト落下量および空隙率を表－ 2.3 に示す。目標とするペーストフロー値は 175mm であったが、練り混ぜ温度が高かったことからペーストフローはやや大きめとなった。

表－2.3 フレッシュ性状と供試体の締固め条件

配合名	バッチ No.	練り混ぜ量 (リットル)	練り上がり温度 (℃)	ペーストフロー (mm)	ペースト落下量 (g/2,000g)				空隙率 (%)		供試体の締固め	備考
					5秒	10秒	20秒	30秒	連続	全体		
4 号配合	1	100	29. 2	203×193	111	206	—	—	29	29. 8	有振動	ダレ多い
5 号配合	1	100	30. 5	219×206	67	159	—	—	25. 2	26. 8	有振動	ダレ多い
	2	110	31. 7	174×185	18	56	—	—	27. 7	28. 9	有振動	
	3	100	30. 4	198×188	64	142	—	—	25. 8	27. 1	無振動	
6 号配合	1	100	28. 9	175×169	—	7	70	121	21. 1	24. 8	有振動	
	2	100	30. 4	171×187	—	20	90	137	24. 6	27. 3	有振動	

2.2.3 コンクリート供試体の作製方法

圧縮試験、凍結融解試験に使用する供試体を以下の方法によって作製した。

圧縮試験用供試体の寸法はφ 15 × 30cm とし、供試体本数は各配合ごとに 3 本とした。供試体の作製方法としては、まず型枠底面にキャッピング用のペーストを約 500g 敷き詰め、その上にポーラスコンクリートを 3 層に分けて打ち込むこととし、1 層あたり突き棒による突き固めを 25 回実施した。さらに 3 層目の突き固め終了後に試料上部から振動タンパによる振動締め固めを 1 秒間実施した。ただし、表－ 2.3 に示すように 5 号配合の第 3 バッチに対しては振動締め固めを行わない条件とした。24 時間後に上面をキャッピングし、その翌日に脱型した。脱型後は 20℃の水中養生を行った。

凍結融解試験用供試体の寸法は 10 × 10 × 40cm の長方形とし、供試体本数は各試験条件ごとに 3 本(一部の条件では 2 本)とした。供試体の作製方法としては、型枠内にポーラスコンクリートを 2 層に分けて打ち込むこととし、1 層あたり突き棒による突き固めを 40 回実施した。さらに 2 層目の突き固め終了後に試料上部から振動タンパによる振動締め固めを 1 秒間実施した。ただし、5 号配合の第 3 バッチに対しては振動締め固めを行わない条件とした。翌日に脱型し、動弾性係数測定の際の起振部と受信部にキャッピングを施し、その後は 20℃の水中養生を行った。

上記の方法によって圧縮試験用供試体、凍結融解試験用供試体を作製したが、4 号配合の第 1 バッチと 5 号配合の第 1 バッチについてはペーストフロー値が大きかった関係から振動締め固めによるペーストのダレが

多く発生した。

2.2.4 緑化充填材の充填

凍結融解用供試体については材齢 28 日後に表－ 2.2 に示す緑化充填材 A または B の充填を行った。充填方法は以下の通りとした。

充填材 A は粉体材料である。まず、供試体を乾燥炉内において 50℃ で 24 時間乾燥させた。次ぎに供試体の上面を除く 5 面を粘着テープで覆い、振動台に載せ、振動を与えながら上面から空隙に粉体を充填する方法とした。充填量としては空隙の約 60 % を目標とした。供試体 1 本あたりの空隙量は空隙率 25 % で 1,000cc であり、粉体のかさ密度は 0.8g/cm³ 程度なので、480g 程度を充填すれば良いが、実際の充填量としては 4 号、5 号配合では 500 ～ 600g、6 号配合では 400g 程度であった。充填終了後は粘着テープを剥がし、粉体の流出を防止するためにエマルジョン系の接着剤を供試体表面に散布した。この接着剤は強度的には弱いものであり、凍結融解抵抗性に影響を与えるものではない。充填終了後は凍結融解試験開始まで気乾状態で保存した。

充填材 B はスラリー状の充填材であり、1 m³ あたり水 900kg、有機質系繊維 120kg、緩効性肥料 2.5kg、モンモリロナイト系鉱物 60kg を混合したものである。材齢 28 日を経過した供試体を 10 × 10 × 40mm の型枠内にセットし、上面から供試体 1 本あたり約 1 リットルのスラリーを流し込んだ。なお、充填材 B は 6 号砕石を使用した 6 号配合に対しては十分な充填が期待できなかったため、4 号、5 号配合にのみ充填した。充填終了後は凍結融解試験開始まで気乾状態で保存した。

充填終了後の外観観察によれば充填材 A の充填性は比較的良好であり、充填材 B は脱水によって体積が減少するため、空隙が多く存在する状態であった。

2.2.5 圧縮強度試験の方法

圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠して実施した。試験材齢は 28 日とした。

2.2.6 凍結融解試験の方法

凍結融解試験は JSCE-G501 の規準を満足する凍結融解試験装置を用い、以下の 4 通りの試験を実施した。試験条件を表－ 2.4 に、試験に供する供試体の組合せを表－ 2.5 に示す。

表－2.4 凍結融解試験の条件

ケース名	環境条件	温度設定		サイクルタイム			凍結融解回数	測温供試体の条件 (配合－振動－充填材)
		最低温度 (℃)	最高温度 (℃)	1サイクル (時間)	凍結 (時間)	融解 (時間)		
α－1	水中	－18	5	6	3	3	300	⑤－無－無
α－2	水中	－18	5	24	12	12	300	⑤－無－無
α－3	水中	－5	5	24	12	12	300	⑤－無－無
β	気中	－18	5	4	2.5	1.5	600	0-300 ⑤－無－無 301-600 ⑤－無－A

表－2.5 凍結融解試験に用いた供試体の組合せ

充填剤の種類		充填剤無し						A (粉体)						B (スラリー)		
配合名*－バッチNo.		④-1	⑤-1	⑤-2	⑤-3	⑥-1	⑥-2	④-1	⑤-1	⑤-2	⑤-3	⑥-1	⑥-2	④-1	⑤-1	⑤-2
振動締固めの有無		有	有		無	有		有	有		無	有		有	有	
凍結 融解 試験 ケース	ケース 1		1	2		1	2		1	2		1	2		1	2
	ケース 2		1	2	2	1	2		1	2	2	1	2		1	2
	ケース 3	3	1	2	2	1	2	3	1	2	2	1	2	3	1	2
	ケース 4				2			3	3		2	3		3	3	

*配合名 ④：4号配合，⑤：5号配合，⑥：6号配合

α-1.水中凍結融解試験(-18℃, 6h) : JSCE-G501 に準拠した水中凍結－水中融解試験である。ゴム容器内に水を入れ、水中において凍結融解を繰り返す、コンクリートの材料試験としては最も一般的な試験法であるが、河川護岸の環境条件に比較すると過酷な条件である。温度設定は供試体の中心温度で最低温度-18℃、最高温度5℃、1サイクルの行程は凍結行程3時間、融解行程3時間の合計6時間とした。サイクルタイムがJSCE-G501の規準に比較して長いのは、ゴム容器内に充填される水の量が一般のコンクリートよりも多いために熱交換に長い時間を必要とするためである。なお、供試体中心温度は充填材の有無によって異なることが予想される。水中の場合に供試体の温度変化に最も熱量を必要とするのは充填材の無い条件である。このため、測温供試体は充填材の無い条件とした。

α-2.水中凍結融解試験(-18℃, 24h) : α-1と同様の水中凍結－水中融解試験であるが、温度設定は供試体の中心温度で最低温度-18℃、最高温度5℃、1サイクルの行程は凍結行程12時間、融解行程12時間の合計24時間とした。測温供試体は充填材の無い条件とした。

α-3.水中凍結融解試験(-5℃, 24h) : α-1, 2と同様の水中凍結－水中融解試験であるが、温度設定は供試体の中心温度で最低温度-5℃、最高温度5℃、1サイクルの行程は凍結行程12時間、融解行程12時間の合計24時間とした。測温供試体は充填材の無い条件とした。

β.気中凍結融解試験 : ゴム容器内に水を入れず、空气中で凍融解を繰り返す条件とした。河川護岸としては水面から上の部分を対象とした条件である。温度設定は供試体中心温度で最低温度-18℃、最高温度5℃、1サイクルの行程は凍結行程2.5時間、融解行程1.5時間とした。測温供試体は上記のα-1,2,3および10年度に実施した気中凍結融解試験と条件を揃える目的から充填材の無い条件として300サイクルまで試験を実施した。しかしながらこの条件では、充填材を有する供試体が融解行程時に中心部まで十分に融解していない可能性があった。このため、測温供試体に充填材Aを充填した条件でさらに600サイクルまでの試験を実施することとした。ただし、試験装置が他の試験でふさがっていたため、300サイクルの試験終了から300サイクル以降の試験開始まで130日間、供試体は気乾状態で保存した。なお、凍結融解試験中は動弾性係数測定毎に供試体を水に一度浸し、湿潤状態を保持することとした。

凍結融解試験を開始するまでの供試体の養生条件としては、打設・脱型後28日までは20℃の水中養生、それ以降は気乾状態で保存した。凍結融解試験槽が2槽しかないので、全ての試験を同時に開始することはできず、試験開始材齢はβの試験が36日、α-1が36日、α-2が58日、α-3が84日となった。

凍結融解試験中は数サイクルごとに一次共鳴振動数と損失質量を測定し、相対動弾性係数と質量減少率を算出した(算出法は1.2.6項参照)。

試験中のブライン液と測温供試体中心温度の履歴は図-2.1～2.5に示すとおりであった。

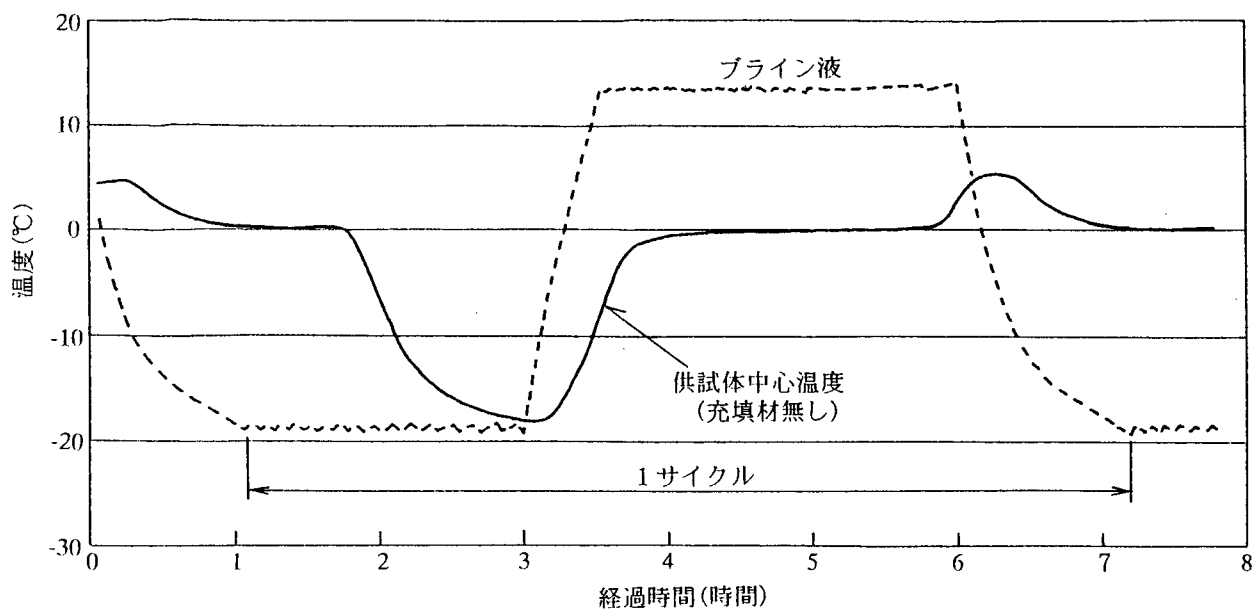


図- 2.1 ブライン液と供試体中心温度(α-1.水中凍結融解試験)

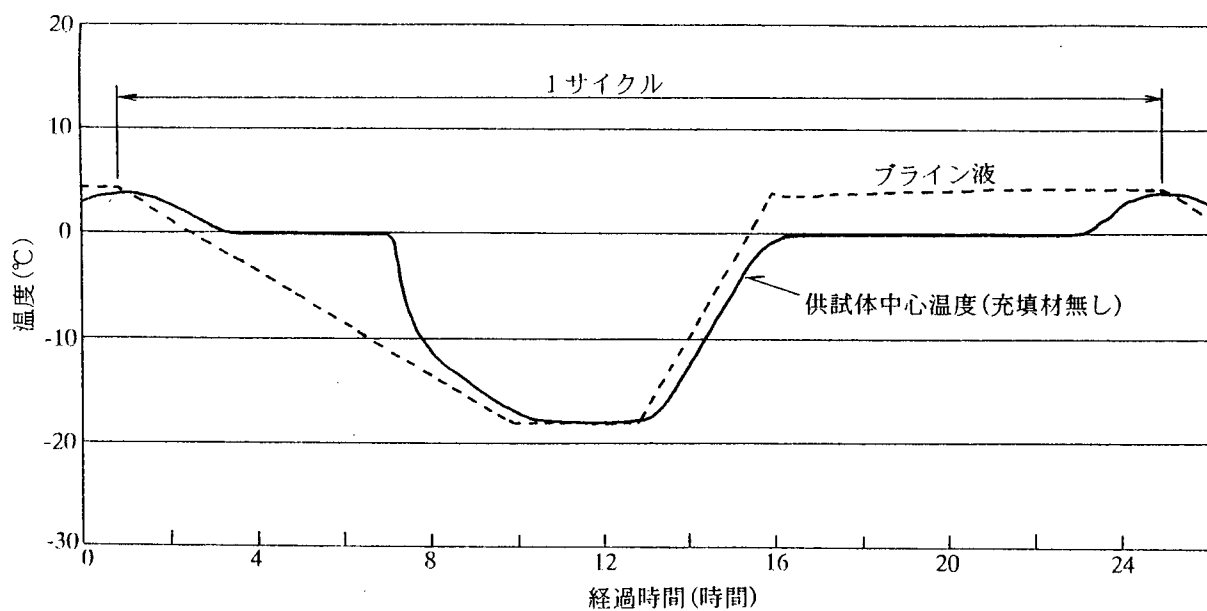


図- 2.2 ブライン液と供試体中心温度(α-2.水中凍結融解試験)

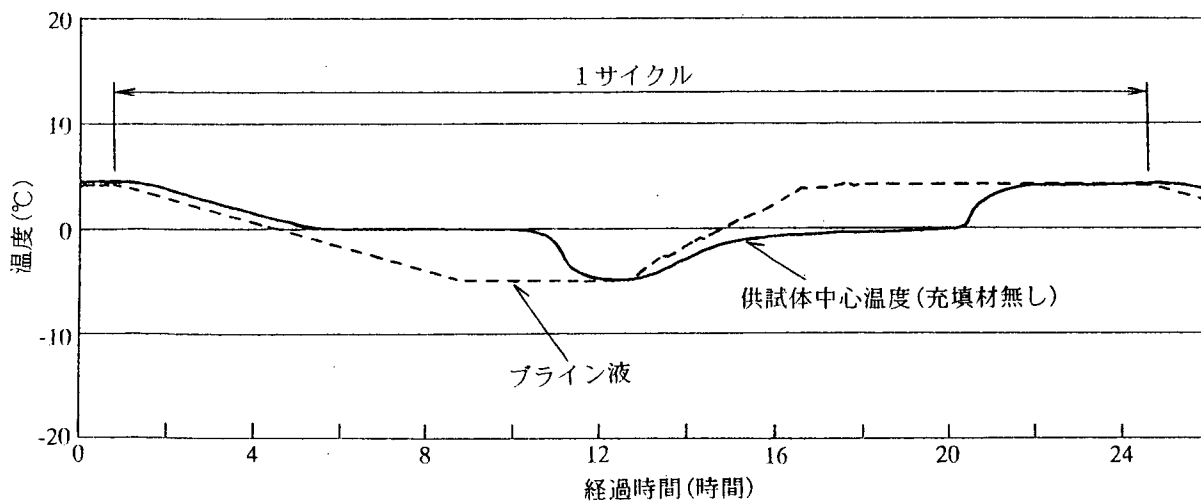


図- 2.3 ブライン液と供試体中心温度(α-3.水中凍結融解試験)

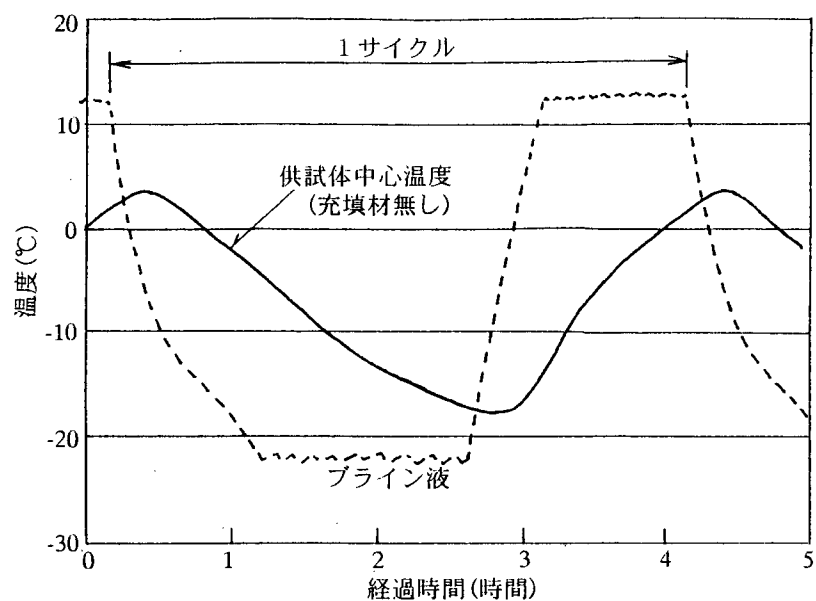


図- 2.4 ブライン液と供試体中心温度(β . 気中凍結融解試験, 0 ~ 300 サイクル)

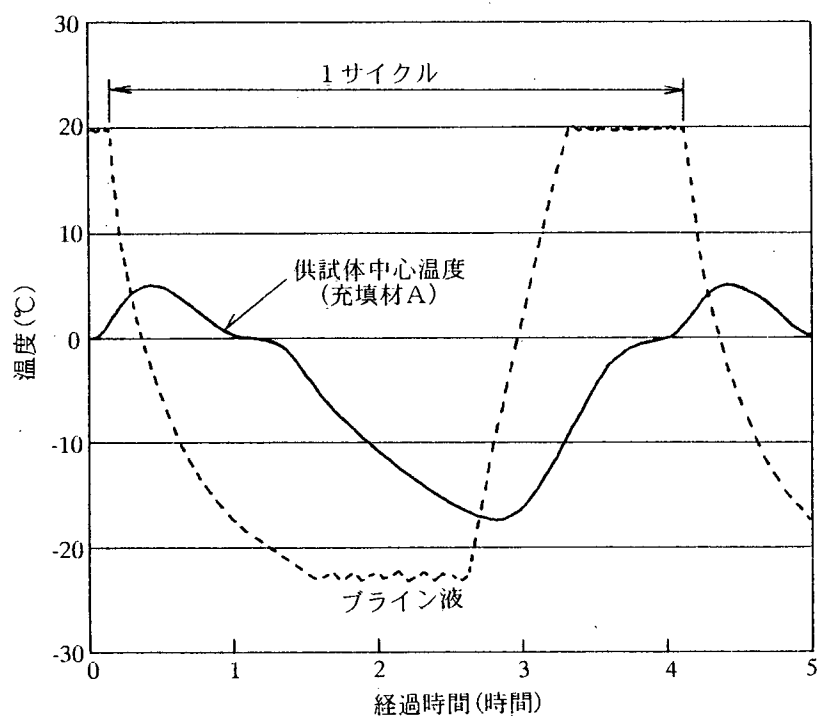


図- 2.5 ブライン液と供試体中心温度(β . 気中凍結融解試験, 300 ~ 600 サイクル)

2.3 実験結果

2.3.1 圧縮強度試験結果

圧縮強度試験結果を図-2.6 示す。

供試体作製時に振動締固めを行った供試体の強度(図中の●▲)については、6号配合の強度がやや高い傾向を示したが、いずれも $15 \sim 20 \text{ N/mm}^2$ の範囲であった。これに対して供試体作製時に突き棒による突き固めのみを行い、振動締固めを行わなかった供試体の強度(図中の○)は 13 N/mm^2 程度であり、振動締固めを行うことによって圧縮強度は2～3割程度増加する結果となった。

また、4号、5号配合の第1バッチはペーストのフロー値が大きく、振動締固めによるペーストのダレが多く発生したが、強度についてはダレの少ない供試体(5号配合の第2バッチ)と比べ遜色ない結果であった。

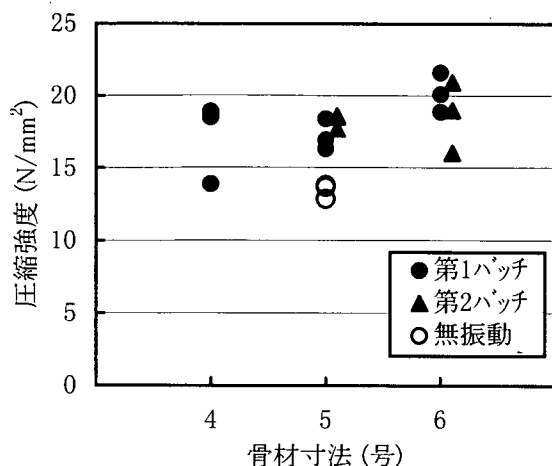


図-2.6 圧縮強度試験結果

2.3.2 水中凍結融解試験結果

水中凍結融解試験の結果について、最低温度とサイクルタイムを変化させたケース $\alpha-1, \alpha-2, \alpha-3$ の相対動弾性係数を図-2.7, 2.8, 2.9に、質量減少率を図-2.10, 2.11, 2.12に示す。凍結融解試験では同一条件の供試体を3本(ケースによっては2本)ずつ試験しているが、3本ともほぼ同等の傾向を示していたので、この図では3本の平均値を示した(個々のデータは資料集を参照)。

相対動弾性係数の低下傾向について図-2.7, 2.8, 2.9を比較すると、 $\alpha-1$ よりもサイクルタイムが長い $\alpha-2$ のほうが、さらに $\alpha-2$ よりも最低温度が高い $\alpha-3$ のほうが、相対動弾性係数の低下傾向は緩和される結果となった。これは凍結速度が遅いほうが、また最低温度が高いほうが氷結時の膨張圧が小さくなるためと考えられる。しかしながらサイクルタイム24時間、最低温度 -5°C の条件である $\alpha-3$ でも100サイクルまでに全ての配合の相対動弾性係数は60%を下回っており、凍結融解耐久性は低いと云わざるをえない。今回実施した凍結融解試験は基本的にJSCE-G501の方法に準拠したものであり、この方法では $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ の柱状のコンクリートが全周囲から凍結融解を受けるものであり、現実の環境条件に比較して過酷な条件と考えられる。

つぎに充填材の影響については、充填材A、充填材B、充填材無しの順で相対動弾性係数の低下傾向が緩和される傾向を示した。また、骨材寸法については、骨材寸法が小さいほど相対動弾性係数の低下傾向が緩和される傾向を示した($\alpha-3$ で5号-有-Aよりも4号-有-Aの低下量が小さくでているが、4号-有-Aはペーストのダレが多く、供試体の底面にペースト層が形成され、この部分が氷結圧に抵抗したものと考えられる)。これらの傾向をみると、供試体中の空隙の大きさが小さいものほど相対動弾性係数の低下傾向は小さくなっているようである。この理由としては、水中凍結におけるポーラスコンクリートの劣化は、空隙中の水が凍結する際の氷結圧によって生ずると予想されるが、空隙が小さいほど氷結圧による変形量が小さくなり、劣化しにくくなるものと考えられる。

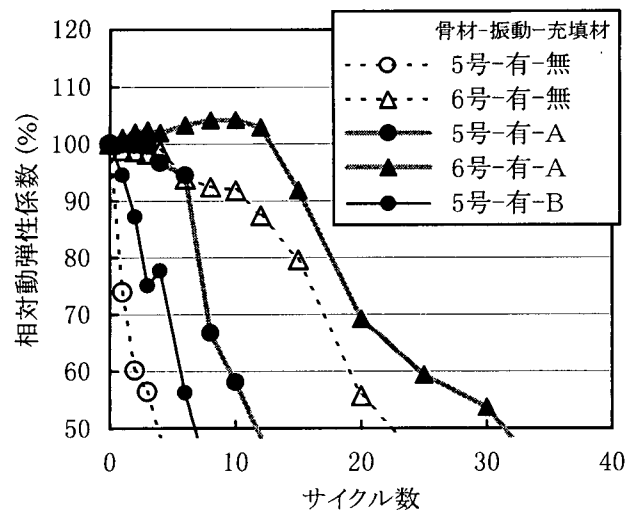


図-2.7 水中凍結融解試験($\alpha-1$)の相対動弾性係数

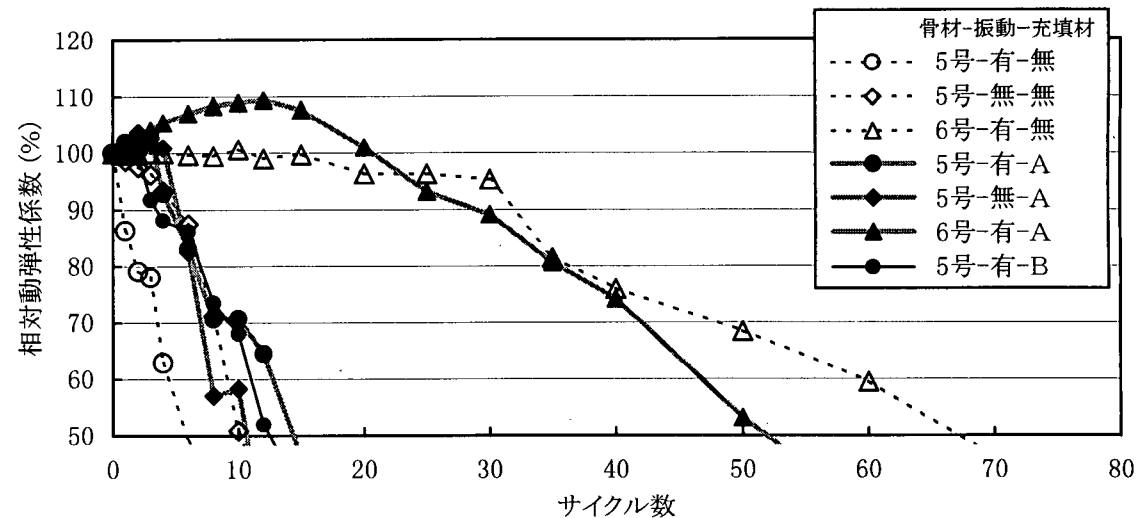


図-2.8 水中凍結融解試験($\alpha-2$)の相対動弾性係数

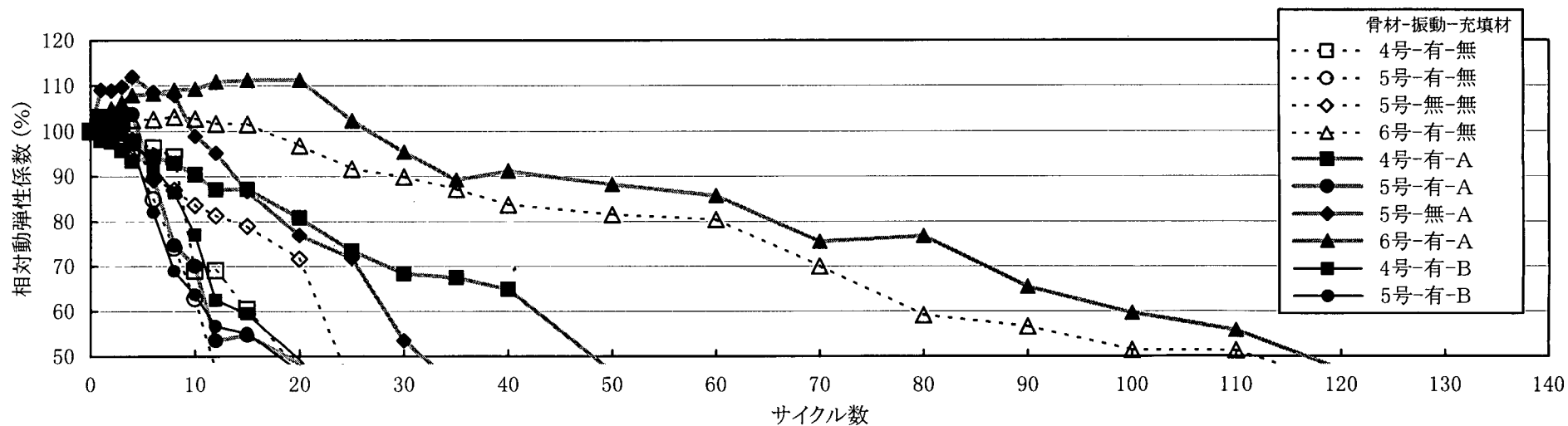


図-2.9 水中凍結融解試験($\alpha-3$)の相対動弾性係数

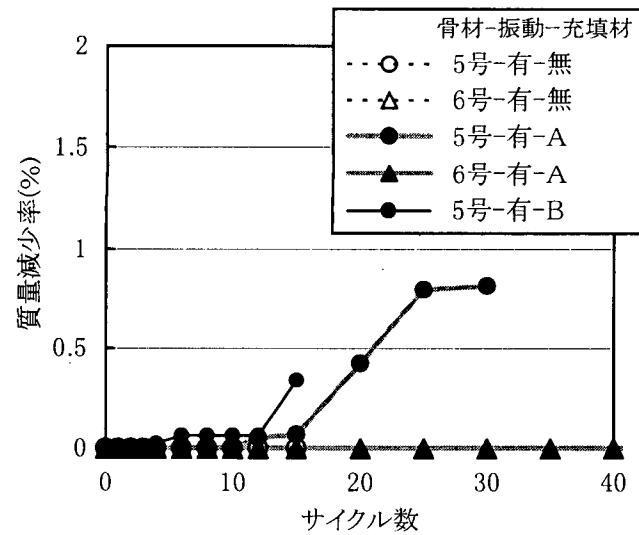


図-2.10 水中凍結融解試験(α-1)の質量減少率

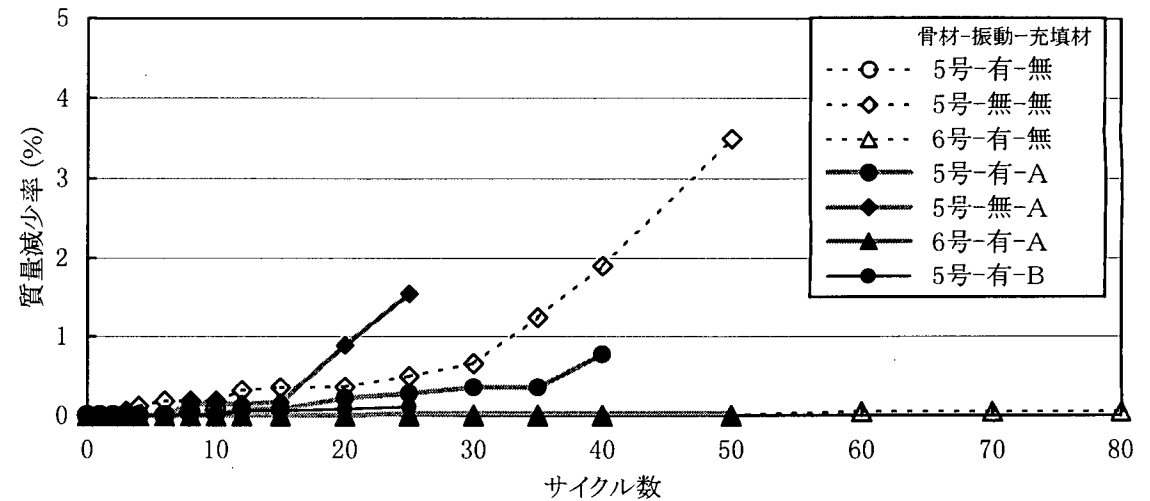


図-2.11 水中凍結融解試験(α-2)の質量減少率

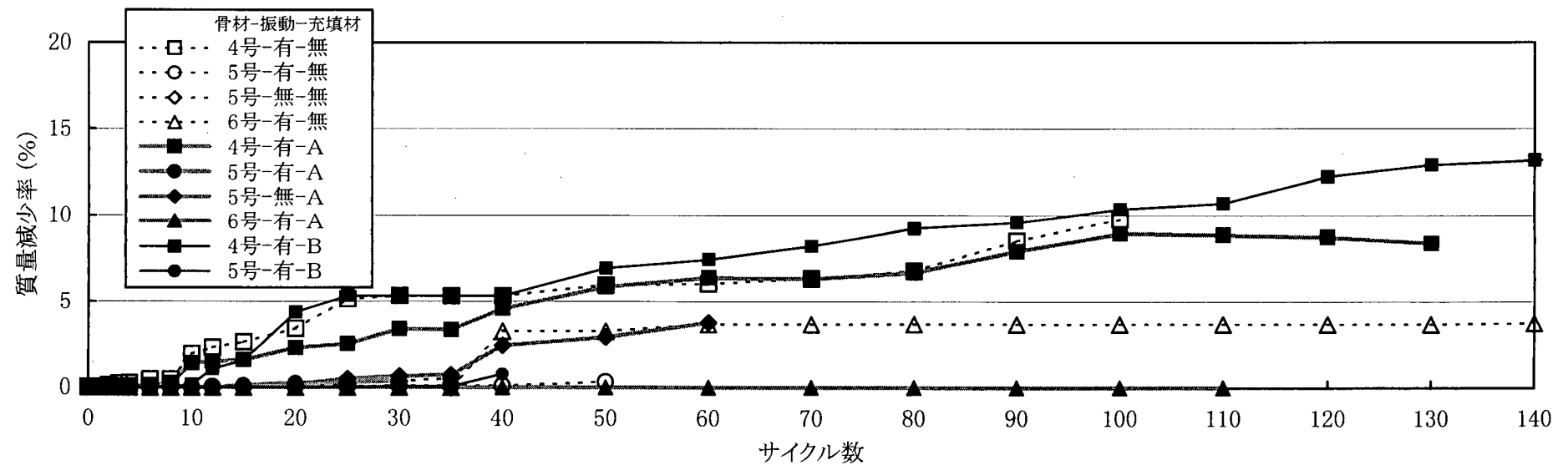


図-2.12 水中凍結融解試験(α-3)の質量減少率

質量減少率については、早期に相対動弾性係数が低下した $\alpha-1$ の試験での質量減少率は小さく、相対動弾性係数の低下傾向が緩和される $\alpha-2$ 、 $\alpha-3$ となるに従い、試験終了までの質量減少率が大きくなる傾向を示した。この理由としては、凍結速度の早い $\alpha-1$ では破壊が供試体全域でほぼ同様に発生し、供試体全体が分裂して試験が終了となるが、凍結速度が緩和される $\alpha-2$ 、 $\alpha-3$ では表面から徐々に欠損が生じるためと考えられる。このように凍結速度や凍結温度によって破壊の進行過程が多少異なってくるのが分かった。

振動締固めの有無が凍結融解耐久性に及ぼす影響については、今回の試験の範囲では顕著な差は認められなかった。

2.3.3 気中凍結融解試験結果

気中凍結融解試験 β の結果について相対動弾性係数を図-2.13に、質量損失率を図-2.14に示す。凍結融解試験では同一条件の供試体を3本(ケースによっては2本)づつ試験しているが、3本ともほぼ同等の傾向を示していたので、この図では3本の平均値を示した(個々のデータは資料集を参照)。

図-2.13、2.14から分かるように、0～300サイクルの試験と300～600サイクルの試験とでは結果が大きく異なっている。0～300サイクルの試験結果では全てのケースで相対動弾性係数の低下や質量損失は見られず、気中での凍結融解耐久性は十分に確保できると解釈できる。ところが、300～600サイクルの試験結果では供試体の条件によっては相対動弾性係数が低下し、質量損失率も増加する傾向を示した。

2.2.6で述べたように0～300サイクルの試験では充填材の無い供試体を測温供試体に使用した。このため充填材を有する供試体が融解行程時に中心部まで十分に融解していない可能性があった。このため、測温供試体に充填材Aを充填した条件で300～600サイクルの試験を実施した。ブライン液の温度制御の実態は図-2.4、2.5に示すとおりで温度条件としては300～600サイクルのほうが厳しい条件となった。しかしながら、図-2.13で注目すべき点は300サイクル終了時点では全ての相対動弾性係数が100%であったのに、300サイクル以降の試験を開始する段階で相対動弾性係数が低下してしまっている点である。300サイクルの試験終了から試験再開までは、供試体は気乾状態で130日間保存していたが、この間に劣化したとすると、ポーラスコンクリートは乾燥に弱い構造体である可能性がある。

気乾保存期間での相対動弾性係数の低下量が大きかったのは4号配合、5号配合のうちの充填材無しと充填材Bの供試体であり、相対的に大きな空隙を有する供試体ほど相対動弾性係数の低下量が大きい結果であった。300～600サイクルの試験での相対動弾性係数の低下や質量損失率の増加の傾向も同様であった。

2.3.4 気乾保存中の動弾性係数の低下について

前項で、気中凍結融解試験の結果について、ポーラスコンクリートは気中保存中に動弾性係数が低下する傾向が認められた。一方、水中凍結融解試験についても、2.2.6項で述べたように試験開始材齢がそれぞれ異なるものであり、試験開始まで気中保存していたため、試験開始までの間に動弾性係数が低下していた可能性がある。

そこで試験開始までの気乾保存期間と試験開始時点の動弾性係数の関係を図-2.14に示す。図に示したデータは各条件ごとの供試体の平均値である。水中凍結融解試験において気乾保存期間の長かった $\alpha-2$ 、 $\alpha-3$ の動弾性係数が $\alpha-1$ に比較して低下しているのは、5号配合のうちの充填材無しと充填材Bの供試体であった。一方、気中凍結融解試験において300サイクル以降の試験を再開するまでの気乾保存期間中に動弾性係数が低下したのは4号配合、5号配合のうちの充填材無しと充填材Bの供試体であった。このようにいずれのケースでも、相対的に大きな空隙を有する供試体で相対動弾性係数の低下量が大きい結果となった。

また、水中凍結融解 $\alpha-1$ の試験開始時の動弾性係数について、充填材Aを使用した供試体の動弾性係数が充填材無しやBに比較してやや低目となっているが、このケースでは充填材挿入前に乾燥炉において40℃、24時間の乾燥を行っており、この乾燥の影響と、粉体充填時の振動の影響が考えられる。

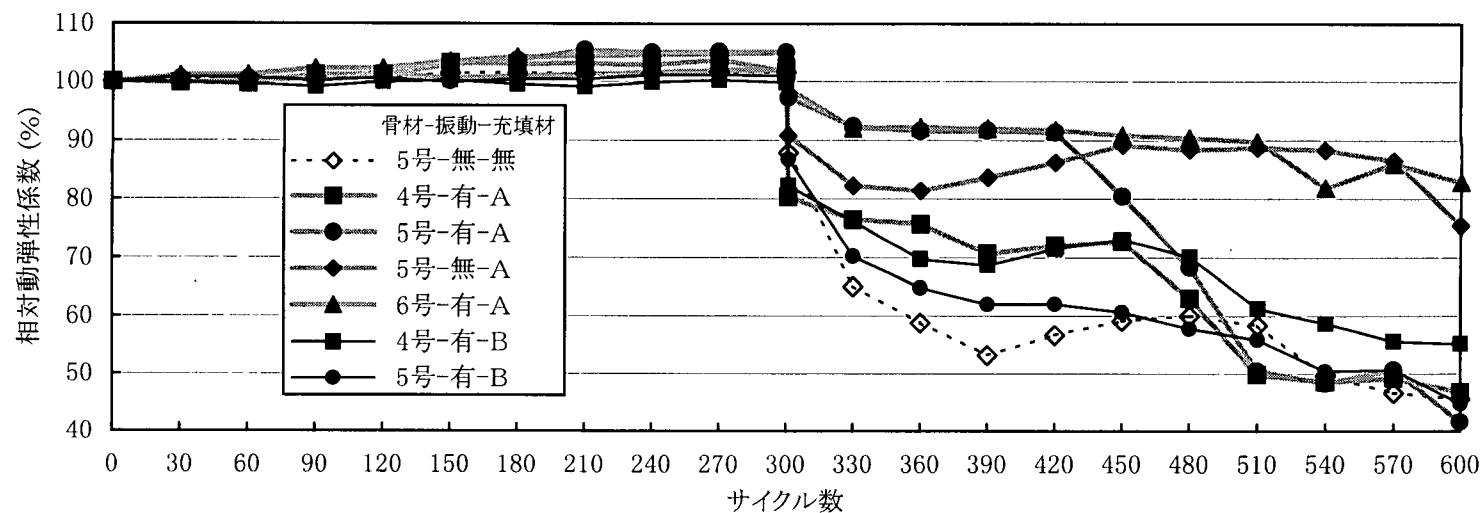


図-2.13 気中凍結融解試験(β)の相対動弾性係数

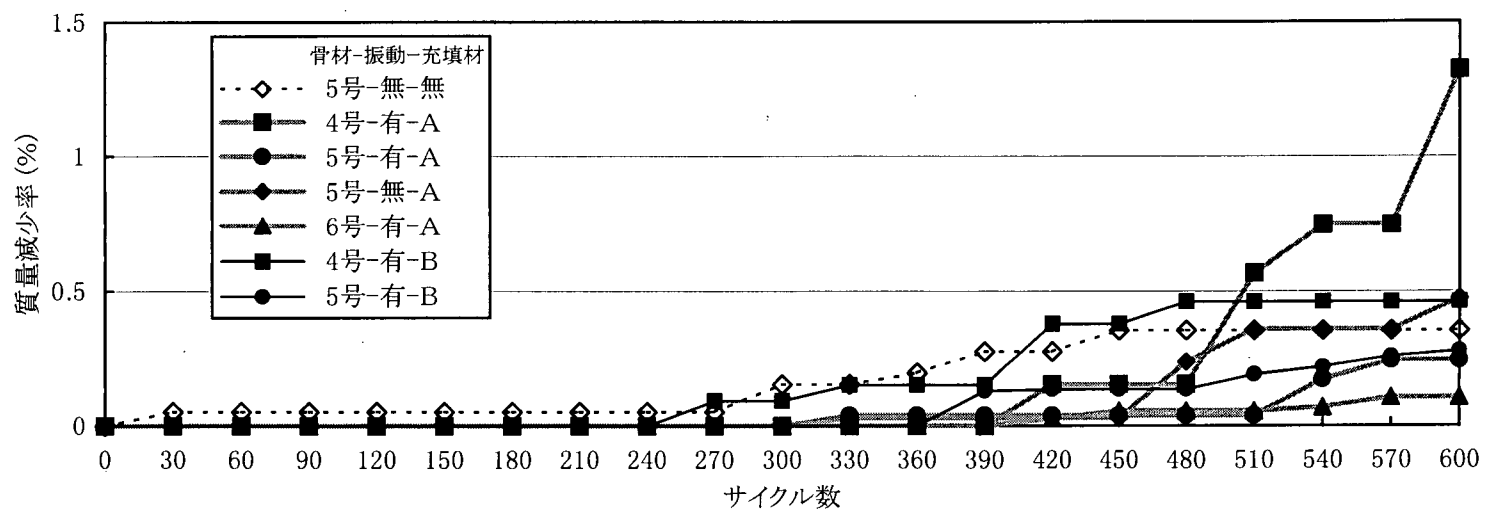
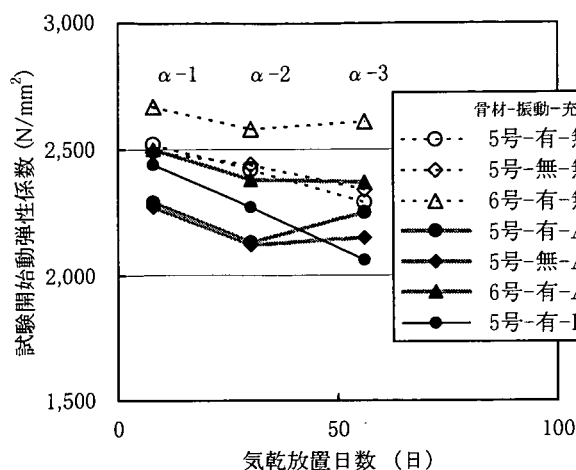
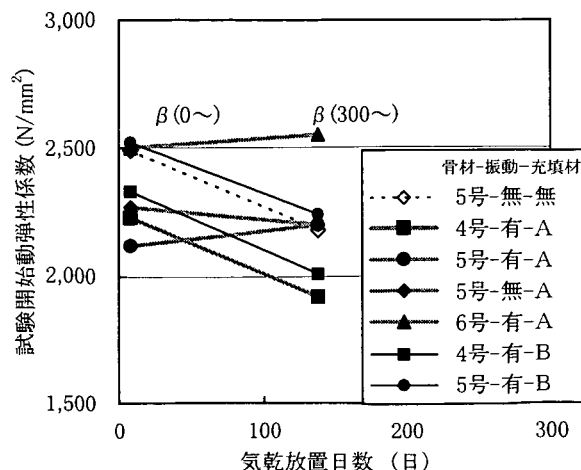


図-2.14 気中凍結融解試験(β)の質量減少率



(1) 水中凍結融解試験 α の場合



(2) 気中凍結融解試験 β の場合

図－2.14 試験開始までの気乾放置日数と動弾性係数の関係

2.4 まとめ

11 年度は、(1) 水中凍結融解試験の最低温度とサイクルタイムが供試体の劣化速度に与える影響、(2) 緑化充填材の有無と骨材寸法がポーラスコンクリートの凍結融解耐久性に与える影響、(3) 供試体作製時の振動締固めの有無が強度、凍結融解耐久性に与える影響を把握する目的で実験的検討を行った。また、実験の結果から、ポーラスコンクリートは乾燥によって物性が低下することを確認した。

実験結果を以下に整理する。

(1) 水中凍結融解試験の最低温度とサイクルタイムが供試体の劣化速度に与える影響

- 1) 凍結温度が遅いほど、また最低温度が高いほど供試体の劣化速度は緩和される傾向を示した。
- 2) 供試体が劣化して試験が終了するまでに生じる質量減少率は凍結温度が遅いほど、また最低温度が高いほど大きくなる傾向を示した。これは、凍結速度が遅いケースほど供試体表面から徐々に破壊が進行するためと考えられる。
- 3) JSCE-G501 の方法に準拠した今年度の試験では1 サイクル 24 時間、最低温度-5 ℃の条件でも相対動弾性係数は 60 % を下回り、凍結融解耐久性は低い結果となった。

(2) 緑化充填材の有無と骨材寸法がポーラスコンクリートの凍結融解耐久性に与える影響

- 1) 水中での凍結融解に対しては充填材を有するほうが凍結融解耐久性は向上する結果となった。
- 2) 水中での凍結融解に対しては骨材寸法の小さな配合ほど凍結融解耐久性は向上する結果となった。
- 3) 1) 2) の結果から、ポーラスコンクリート中の空隙の大きさが小さいほど、氷結時の変形量が小さくなり、凍結融解耐久性は向上するものと考えられる。
- 4) 気中での凍結融解試験の結果では、乾燥による劣化がなければ、いずれの配合でも動弾性係数の低下は生じないと考えられ、緑化充填材や骨材寸法の影響は認められなかった。

(3) 供試体作製時の振動締固めの有無が強度、凍結融解耐久性に与える影響

- 1) 振動締固めを行うことにより、圧縮強度は 20 ～ 30 % 程度増加する結果となった。
- 2) 凍結融解耐久性に対しては、振動締固めの影響は認められなかった。

(4) 乾燥による影響

- 1) ポーラスコンクリートは乾燥により動弾性係数が低下する傾向を示した。この傾向は空隙の大きな供試体ほど顕著であった。

次年度は、実際の河川護岸の環境条件を考慮した凍結融解試験を実施することで、ポーラスコンクリートの実用上の凍結融解耐久性を確認するとともに、乾燥に対する劣化について更に詳細な検討を行うこととする。

第3章 平成12年度の実験内容

3.1 実験目的

12年度は11年度に引き続き、ポーラスコンクリートの凍結融解耐久性を確認することを目的として実験的研究を行った。また、ポーラスコンクリートの乾燥に対する耐久性について検討を行った。

凍結融解耐久性については試験法を工夫し、実際の河川護岸の環境条件をできるだけ考慮した条件で試験を実施することとした。

乾燥に対する耐久性については11年度の試験の結果から、ポーラスコンクリートは乾燥によって品質が低下する傾向が確認された。このため、乾湿繰り返し試験を実施することで耐久性を検討することとした。

実験目的を以下に整理する。

- (1) 実際の河川護岸の環境条件を考慮した凍結融解試験を実施することにより、ポーラスコンクリートの実用上の凍結融解耐久性を確認する。
- (2) 乾湿繰り返し試験を実施することで、ポーラスコンクリートの乾湿繰り返しに対する耐久性を確認する。

3.2 河川堤防の条件を考慮した凍結融解試験

3.2.1 ポーラスコンクリート供試体の作製方法

ポーラスコンクリートの配合は一般的な配合を想定し、11年度の5号配合と同一配合とした。すなわち、表-3.1に示すように粗骨材に5号を使用し、水セメント比は25%、目標空隙率は25%とした。使用した材料の物性は表-3.2に示すとおりである。

練り混ぜは50リットルの二軸強制練りミキサーを使用し、2.2.2に示す方法に準拠した。

練り上がったコンクリートのフレッシュ性状の確認試験として、平板パイププレートによるペースト落下量(測定方法は2.2.2項参照)を測定した。この結果を表-3.3に示すが、供試体作製中のペースト落下量は20～50g/2,000gの範囲であり、ペーストの流動性としては妥当な範囲であった。

また、練り上がったコンクリートの強度特性を把握するために、φ15×30cmの圧縮試験用供試体を3

表-3.1 配合表

配合名	W/C (%)	空隙率 (%)	粗骨材	骨材容積 修正係数 α	単位量 (kg/m ³)				バッチ数
					水	セメント	粗骨材	混和剤	
5号配合	25	25	5号砕石	0.96	79	317	1513	2.95	1

表-3.2 材料物性

セメント	高炉セメント、密度：3.04g/cm ³ 、比表面積：3,720cm ² /g
5号砕石	笠間産硬質砂岩、13-20mm、密度2.67g/cm ³ 、吸水率0.46%、実積率59.0%
混和剤	高性能AE減水剤SP8HS
緑化充填材A	性状：粉体、成分：珪石粉にパーライト、ゼオライト、有機質肥料を混入したもの

表-3.3 フレッシュ性状と圧縮強度試験結果

配合名	練り混ぜ 量 (リットル)	練り上り 温度 (℃)	ペースト落下量 [*] (g/2,000g)		供試体の 締固め	圧縮強度 σ_{28} (N/mm ²)
			5秒	10秒		
5号配合	50	22.1	53 21	132 86	有振動	21.9

ペースト落下量：上段は供試験体作製開始時
下段は供試験体作製終了時

本作製した。供試体の作製方法としては、まず型枠底面にキャッピング用のペーストを約 500g 敷き詰め、その上にポーラスコンクリートを 3 層に分けて打ち込むこととし、1 層あたり突き棒による突き固めを 25 回実施した。さらに 3 層目の突き固め終了後に試料上部から振動タンパによる振動締め固めを 1 秒間実施した。翌日に上面をキャッピングし、翌々日に脱型した。脱型後は 20℃ の水中養生を行い、材齢 28 に圧縮強度試験を実施した。この結果を表 3.4 に示すが配合に対して妥当な強度を示した。

凍結融解試験用の供試体は 10 × 10 × 40cm の長方形とし、6 本作製した。ただし河川護岸模型上にセットする関係上、供試体端部にハンチを設けた(図 3.1)。供試体の作製方法としては、型枠内にポーラスコンクリートを 2 層に分けて打ち込むこととし、1 層あたり突き棒による突き固めを 40 回実施した。さらに 2 層目の突き固め終了後に試料上部から振動タンパによる振動締め固めを 1 秒間実施した。翌日に脱型し、動弾性係数測定の際の起振部と受信部(2箇所)にキャッピングを施し(図 3.1 参照)、その後は 20℃ の水中養生を材齢 28 日まで行った。

材齢 28 日後に供試体 6 本のうちの 3 本について、40℃ の乾燥炉にて 24 時間の乾燥を行い、緑化充填材 A の充填を行った。充填方法は 2.2.4 項に示す方法に準拠した。

3.2.2 河川堤防の条件を考慮した凍結融解試験の方法

(1) 河川護岸模型の作製

実験方法はできるだけ河川護岸での凍結融解の条件を考慮することとした。図 3.2 に示すように水槽内に河川護岸を模擬した模型を作製し、この水槽をプログラム式高温高湿槽内に設置し、槽内の気温を -10 ～ 18℃ の範囲で変化させることによって護岸模型に凍結融解作用を与えることとした。

試験に用いた高温高湿槽は幅 1,000mm、奥行き 920mm、高さ 1,000mm の内部容積を有し、槽内の気温を -25 ～ 100℃ の範囲で任意の温度変化を設定することが可能である。河川護岸模型の作製は図 3.2 に示すように、ステンレス水槽に厚さ 20mm の発泡スチロール版を貼り、その中に河川護岸を想定した盛土模型を作製し、表面にポーラスコンクリートの供試体を布設し、湛水した。

盛土材には一般的な土質材料(砂質粘土)に崩落防止のための繊維を混入したものを使用し、自然含水状態で平板バイブレータを用いて締め固めた。盛土の斜面勾配は 1:1.7 とした。

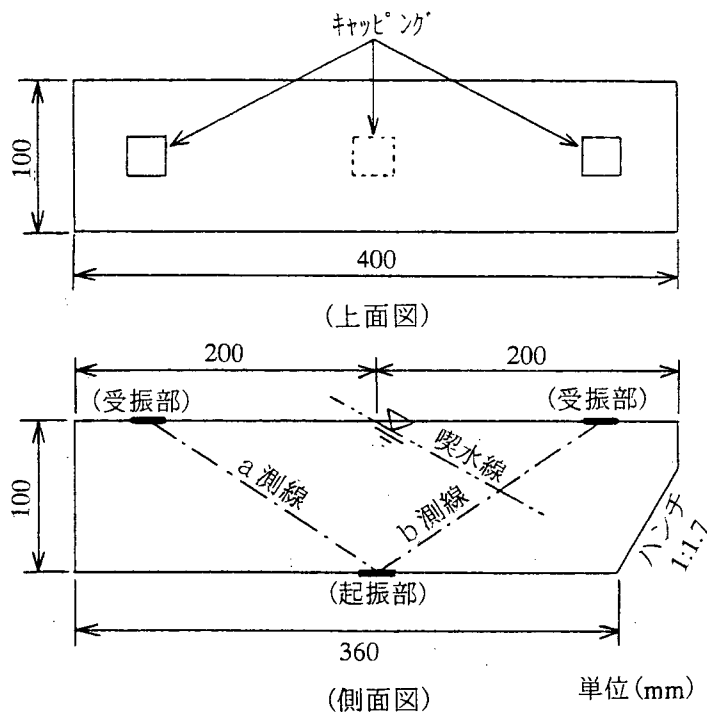
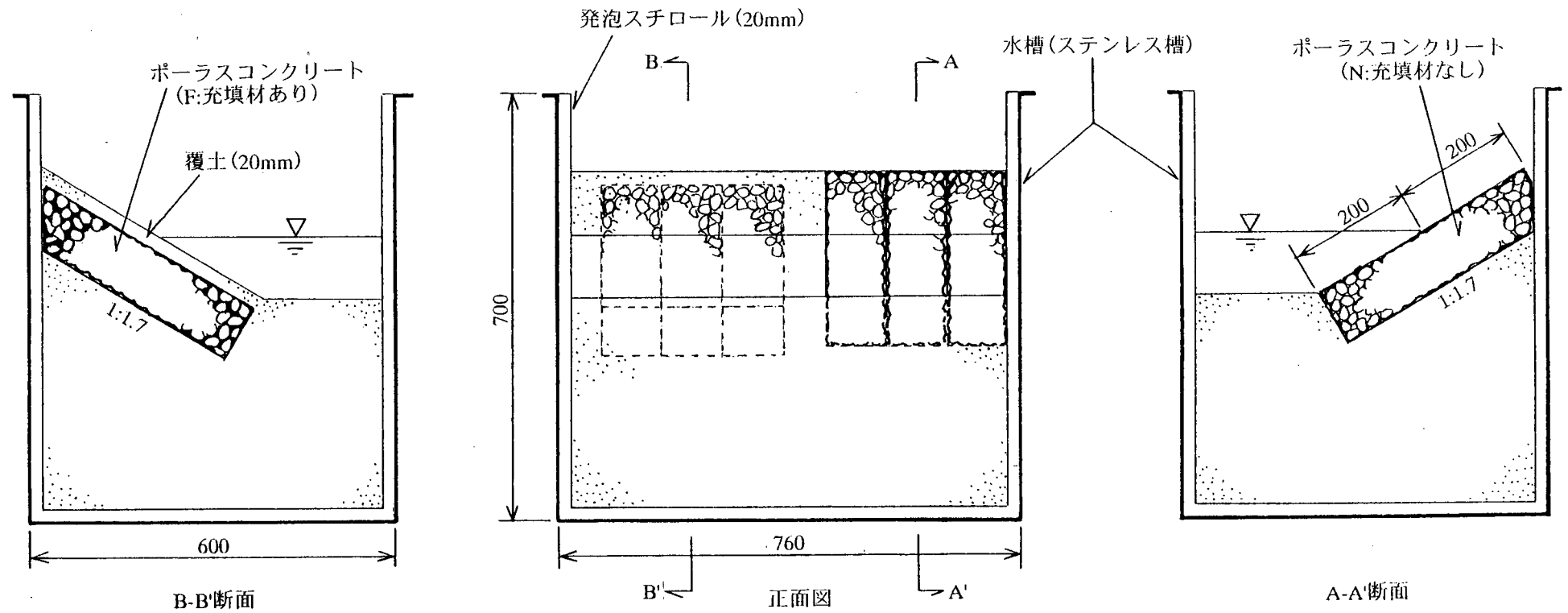


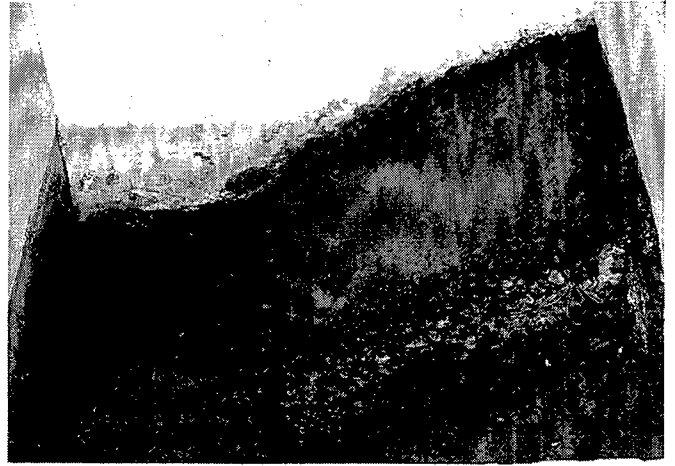
図 3.1 凍結融解試験用供試体の形状



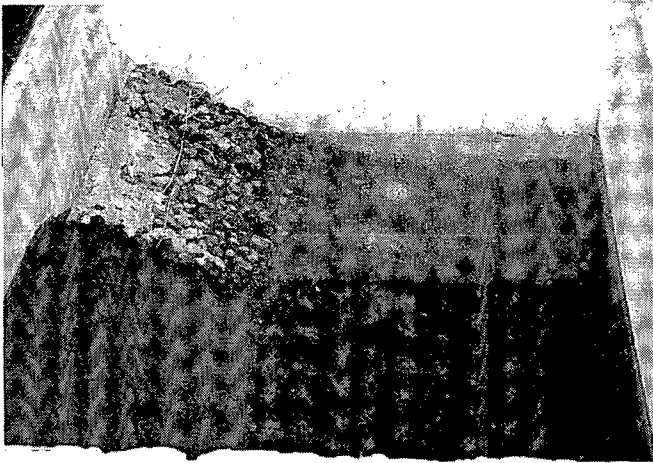
図－ 3.2 河川護岸模型



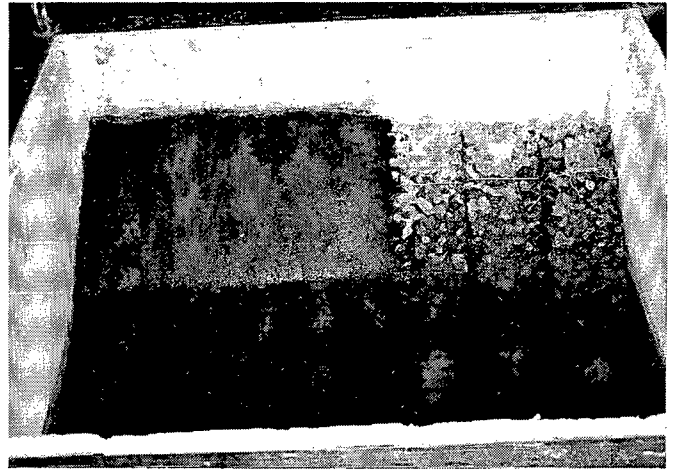
写真－ 3.1 堤防の盛土模型



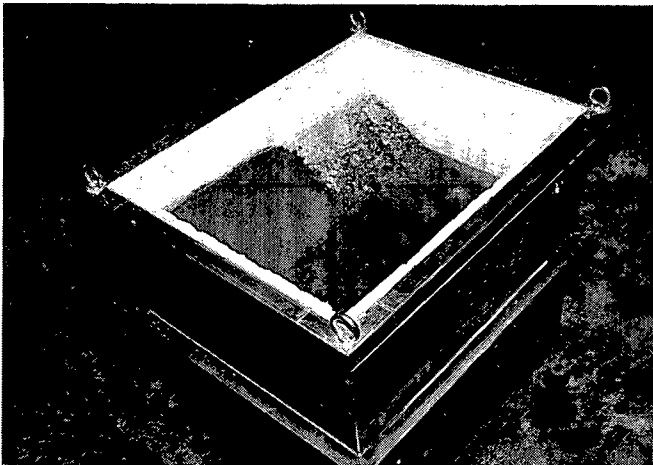
図－ 3.2 F 供試体の布設と覆土の状態



図－ 3.3 N 供試体の布設状況と湛水状況



図－ 3.4 湛水状況



図－ 3.5 河川護岸模型の全景



図－ 3.6 30 サイクル終了時の覆土の状態

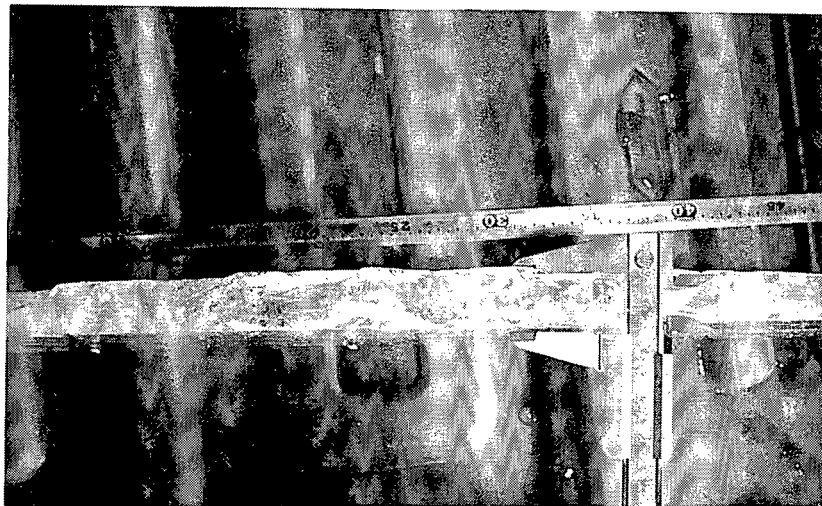
ポーラスコンクリート供試体は充填材を含まないN供試体3本と緑化充填材を含むF供試体3本があり、N供試体は護岸の表面に設置し、F供試体は設置後に表面に約2 cmの覆土を行った。この覆土表面とA供試体表面とが同一平面になるように供試体の設置を行った。

湛水面はN供試体表面の1/2の高さとした。ただし、蒸発によって湛水面は徐々に低下するため、逐次補給し、水面の高さが±1cmの範囲となるように管理した。

写真－3.1～3.6に河川護岸模型を示す。

(2)凍結融解試験の温度設定

河川護岸模型をプログラム式恒温恒湿槽に入れ、槽内の気温を変化させることにより、河川護岸模型に凍結融解作用を与えた。槽内の気温変化のサイクルは、実質的な河川護岸の環境条件を考慮しつつ、24時間のサイクルタイムで凍結と融解が繰り返される最も過酷な温度設定を模索し、結果として最低温度-10℃、最高温度+18℃のサインカーブ(1サイクル24時間)とした。この温度設定によって、河川護岸模型の表面から氷結し、湛水面での氷結厚は2～3 cmとなった(写真－3.7参照)。



写真－3.7 湛水面に張った氷の状況

河川護岸模型の各所において測定した温度変化を図－3.3に示す。この測定結果によると、まず湛水域の水温(②③④⑤)については水面から下方向に向かって徐々に凍結し、また融解していく傾向が伺える。充填材と覆土を有しないN供試体の温度履歴については、空気に面したのポーラスコンクリート表面の⑥⑦では気温変化の6割程度の温度変化(最高+12℃、最低-6℃)を示しており、水中表面の⑧⑨およびポーラスコンクリート内部の⑩では湛水域の水中②③付近とほぼ同等の温度変化であった。このことからN供試体についてはポーラスコンクリートの内部の水まで氷結していると考えられる。これに対して覆土したF供試体の表面については、湛水面付近の⑭では氷点下まで温度が下がらず、湛水面より上部の⑪⑫⑬では最低温度は0～-1℃程度であった。このことから覆土によって環境条件が大幅に緩和されているのと考えられる。ただし水面から上部については凍結した覆土の融解には長時間を要する結果であった。

(3)測定条件

凍結融解の繰り返し回数は300サイクルとし、30サイクルごとにポーラスコンクリートの供試体を取り出し、一次共鳴振動数と損失質量を測定し、相対動弾性係数と質量減少率を算出した(算出法は1.2.6項参照)。なお、一次共鳴振動数の測定では図－3.1に示すa測線とb測線の双方に対して測定を行った。

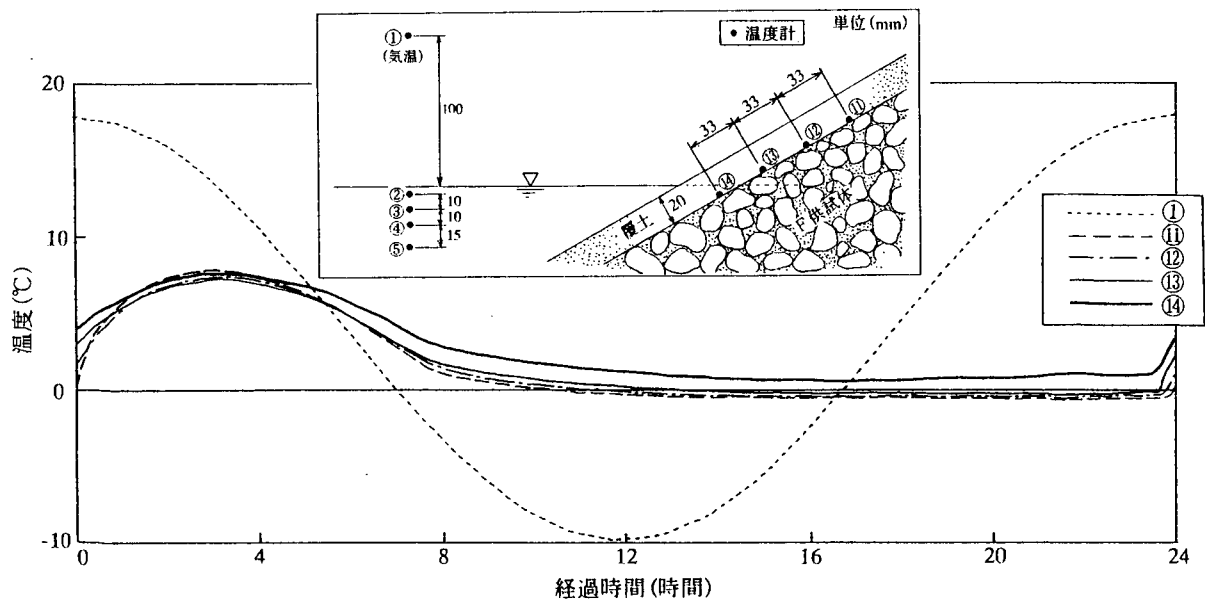
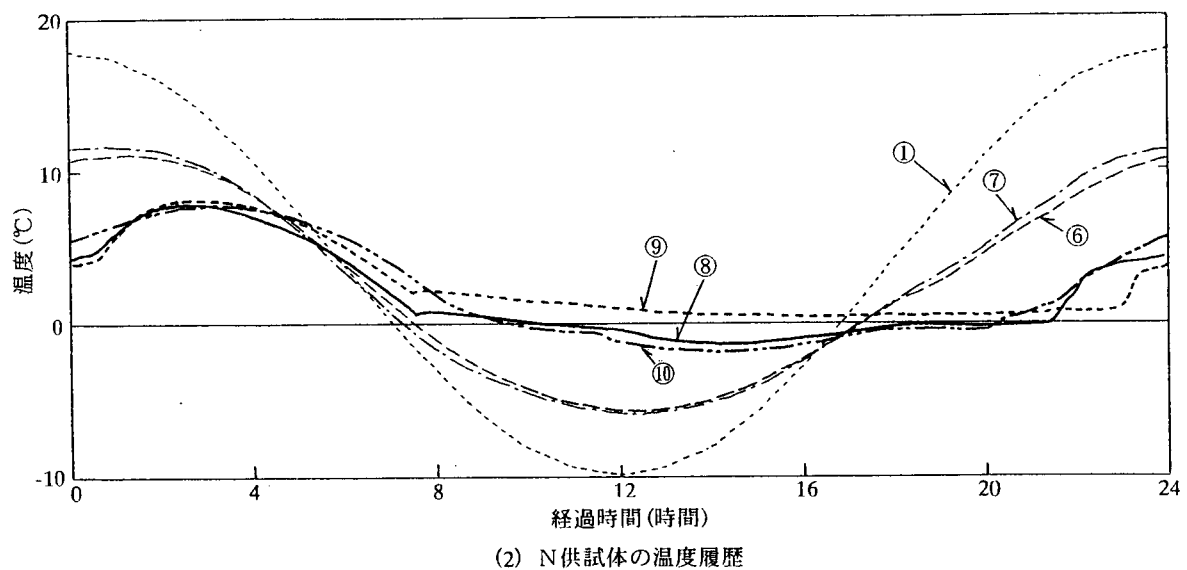
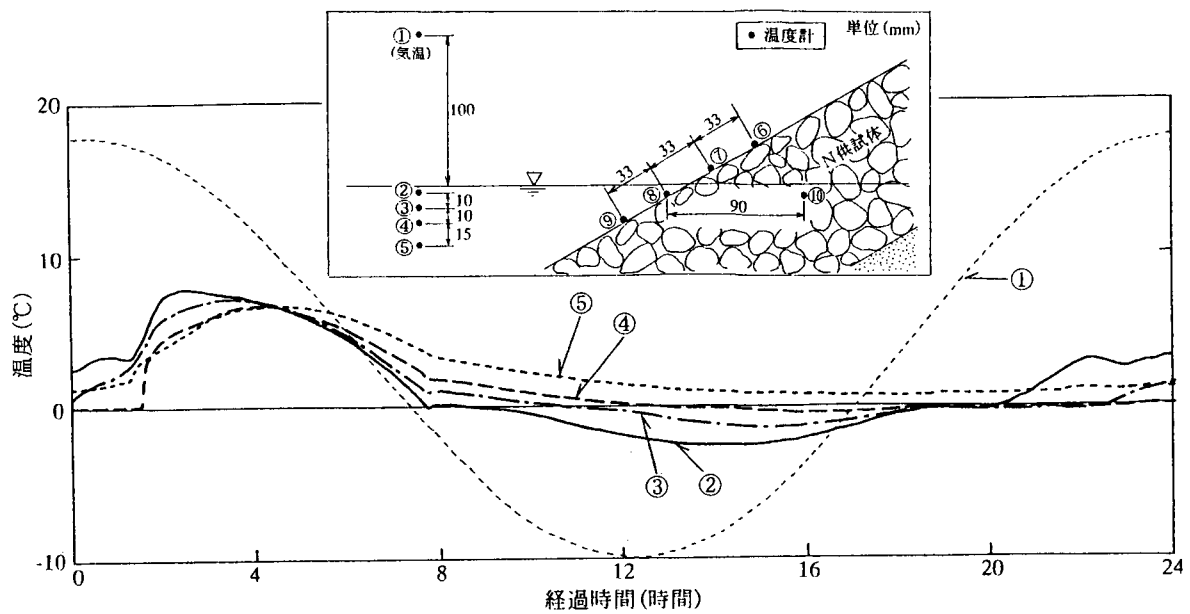


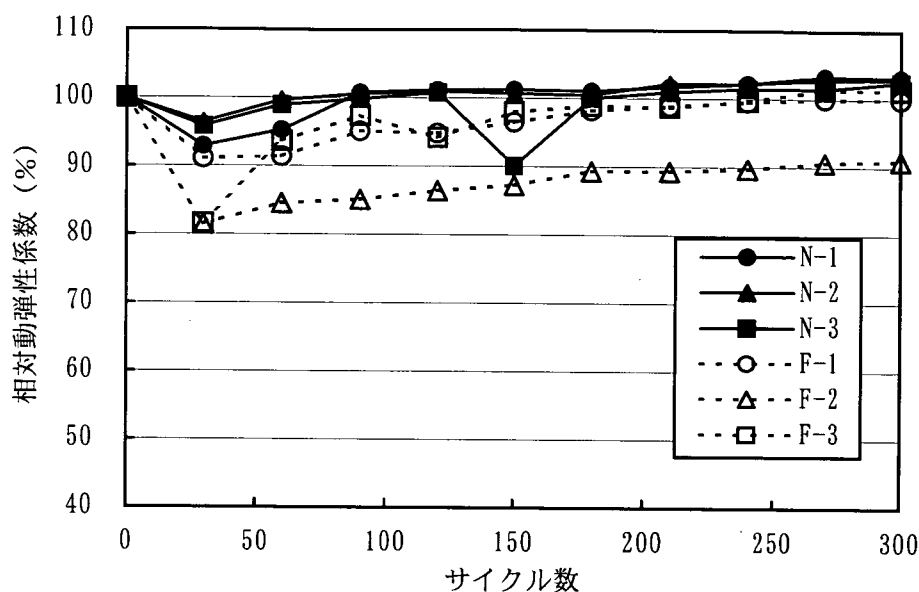
図-3.3 実験中の温度履歴

3.2.3 実験結果

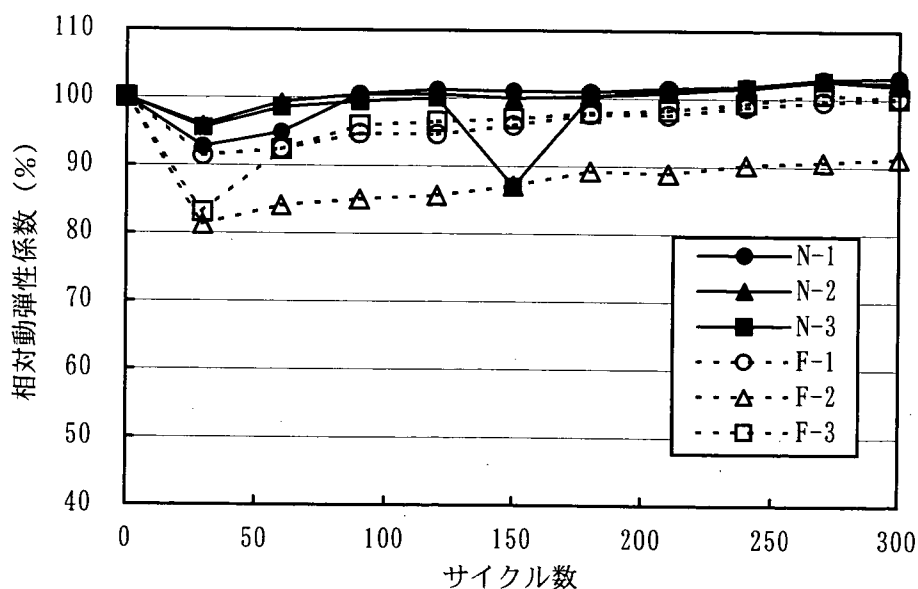
凍結融解試験から得られる相対動弾性係数を図－ 3.4, 3.5 に示す。この試験ではN供試体 3 本とF 供試体 3 本の計 6 本の試験を行っており、図には全ての測定結果を示す。この結果ではいずれの供試体も 30 サイクルでの相対動弾性係数がやや低下しているが、その後は相対動弾性係数は上昇する傾向を示した。相対動弾性係数は a 測線、b 測線の 2 カ所で測定したが、いずれの結果も同様であった。300 サイクル終了時点の相対動弾性係数はほぼ 100 % であり、目視による観察でも供試体の欠損はほとんど認められず、N 供試体の水面付近のペーストがわずかに剥がれ落ちているのが認められただけであった。

以上の結果から、今回の実際の河川護岸の環境条件を考慮した凍結融解試験では、ポーラスコンクリートの凍結融解耐久性は高い結果となった。

30 サイクルで相対動弾性係数が低下した理由としては、この現象が充填材を施した F 供試体で顕著なことや、その後は徐々に回復していることから判断して、ポーラスコンクリートの劣化によるものではなく、充填材を含む供試体の湿潤状態の違いが一次共鳴振動数に影響したものと考えられる。



図－ 3.4 実環境を考慮した凍結融解試験における相対動弾性係数の変化 (a 測線)



図－ 3.5 実環境を考慮した凍結融解試験における相対動弾性係数の変化 (b 測線)

3.3 乾湿繰り返し試験

3.3.1 供試体の作製方法

ポーラスコンクリートの配合は一般的な配合を想定し、11年度と同一配合とした。すなわち、表-3.4に示すように粗骨材に4号、5号、6号砕石を使用し、水セメント比は25%、目標空隙率は25%とした。これらの配合をそれぞれ4号配合、5号配合、6号配合と呼ぶこととする。使用した材料の物性は表-3.5に示すとおりである。

練り混ぜは50リットルの二軸強制練りミキサを使用し、2.2.2に示す方法に準拠した。

練り上がったコンクリートのフレッシュ性状の確認試験として、ペーストのフロー試験、平板パイプレータによるペースト落下量(測定方法は2.2.2項参照)、および空隙率(測定方法は1.2.3項参照)を測定した。この結果を表-3.6に示すが、供試体作製開始時のペーストのフロー値は170～190mmの範囲を示し、ペーストの流動性としては妥当な範囲であった。また、空隙率については目標値に対して4号配合ではやや大きめ、6号配合ではやや小さめであったが、概ね妥当な範囲であった。

供試体の作製は乾湿繰り返し試験用の供試体と圧縮試験用の供試体を作製した。

乾湿繰り返し試験用の供試体は10×10×40cmの長方形とし、各配合ごとに6本作製した。供試体の作製方法としては、型枠内にポーラスコンクリートを2層に分けて打ち込むこととし、1層あたり突き棒による突き固めを40回実施した。さらに2層目の突き固め終了後に試料上部から振動タンパによる振動締め固めを1秒間実施した。翌日に脱型し、動弾性係数測定の際の起振部と受信部にキャッピングを施し、その後は20℃の水中養生を材齢28日まで行った。

圧縮強度試験用の供試体はφ15×30cmの円柱とし、各配合ごとに9本作製した。供試体の作製方法としては、まず型枠底面にキャッピング用のペーストを約500g敷き詰め、その上にポーラスコンクリートを3層に分けて打ち込むこととし、1層あたり突き棒による突き固めを25回実施した。さらに3層目の突き固め終了後に試料上部から振動タンパによる振動締め固めを1秒間実施した。翌日に上面をキャッピングし、翌々日に脱型した。脱型後は20℃の水中養生を材齢28日まで行った。材齢28日に各配合ごとに3本ずつ圧縮強度試験を実施した。この結果(3本の平均値)を表-3.6に示すが、いずれの配合も妥当な圧縮強度を示した。

3.3.2 乾湿繰り返し試験の方法

各配合ごとに作製した10×10×40cmの長方形供試体6本のうちの3本とφ15×30cmの円柱供試体に対して乾湿繰り返し試験を実施した。乾湿繰り返し試験の条件は実際の自然環境を配慮し、湿潤は20℃の水中、乾燥は40℃の乾燥炉内とした。サイクルタイムは図-3.6に示すように湿潤1日、乾燥2日または3日として1週間で2サイクルとした。試験開始は材齢28日後とし、30サイクルまで実施した。長方形供試体については3～5サイクルごとに一次共鳴振動数を測定し、これから相対動弾性係数を算出した。円柱供試体については試験開始時、21サイクル終了時、30サイクル終了時にそれぞれ3本ずつ圧縮強度試験を実施した。

長方形供試体の残り3本ずつについては気温20℃、湿度40%の室内にて気乾放置し、相対動弾性係数の変化を測定した。

3.3.3 実験結果

供試体は各条件ごとに3本ずつ試験を行っているが、3本ともほぼ同等の傾向を示していたので、以下の図では3本の平均値を示した(個々のデータは資料集を参照)。

乾湿繰り返し試験から得られる相対動弾性係数の変化を図-3.7に、圧縮強度の変化を図-3.8示す。相対動弾性係数は10サイクル程度以降から徐々に低下していく傾向を示した。低下の傾向は粗骨材寸法の大きいものほど大きく、30サイクル終了時点の値としては6号配合では87%、5号配合では67%、4号配合では55%程度まで低下した。圧縮強度試験結果についても同様の傾向であった。

表-3.4 配 合 表

配合名	W/C (%)	空隙率 (%)	粗骨材	骨材容積 修正係数 α	単位量 (kg/m ³)				バッチ数
					水	セメント	粗骨材	混和剤	
4号配合	25	25	4号碎石	0.96	79	316	1501	2.84	1
5号配合	25	25	5号碎石	0.96	79	316	1513	2.84	1
6号配合	25	25	6号碎石	0.96	79	316	1524	3.10	1

表-3.5 フレッシュ性状と圧縮強度試験結果

配合名	練り混ぜ量 (リットル)	練上り 温度 (℃)	ペースト フロー (mm)	ペースト落下量 [*] (g/2, 000g)				空隙率(%)		供試体の 締固め	圧縮強度 σ_{28} (N/mm ²)
				5秒	10秒	20秒	30秒	連続 空隙率	全体 空隙率		
4号配合	100	21. 0	171×174	92	183	—	—	29. 9	31. 4	有振動	16. 3
				24	90	—	—				
5号配合	100	20. 2	194×191	79	158	—	—	24. 4	26. 1	有振動	18. 0
				7	60	—	—				
6号配合	100	21. 0	175×189	—	35	110	159	20. 7	24. 6	有振動	20. 9
				—	—	—	—				

* ペースト落下量：上段は供試験体作製開始時
下段は供試験体作製終了時

表-3.6 材 料 物 性

セメント	高炉セメント，密度：3.04g/cm ³ ，比表面積：3,720cm ² /g
4号碎石	笠間産硬質砂岩，20-30mm，密度2.67g/cm ³ ，吸水率0.43%，実積率58.5%
5号碎石	笠間産硬質砂岩，13-20mm，密度2.67g/cm ³ ，吸水率0.46%，実積率59.0%
6号碎石	笠間産硬質砂岩，5-13mm，密度2.67g/cm ³ ，吸水率0.68%，実積率59.6%
混和剤	高性能A E減水剤SP8HS

図-3.6 乾湿繰り返し試験のサイクルタイム

月	火	水	木	金	土	日
	計測					

凡例 ■：水中（20℃）

■：乾燥炉（40℃）

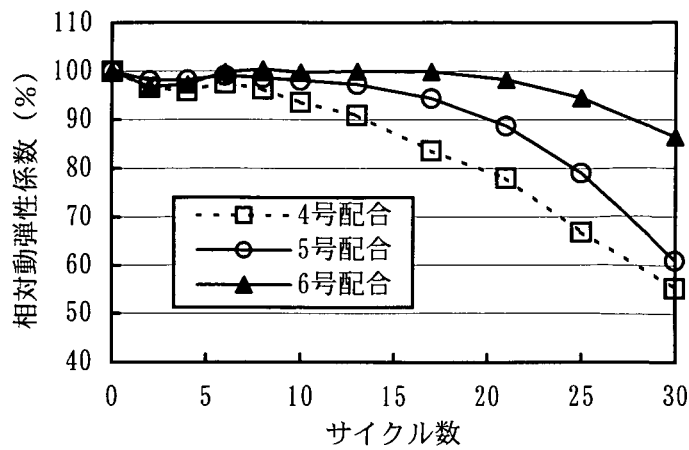


図-3.7 乾湿繰り返し試験での相対動弾性係数の変化

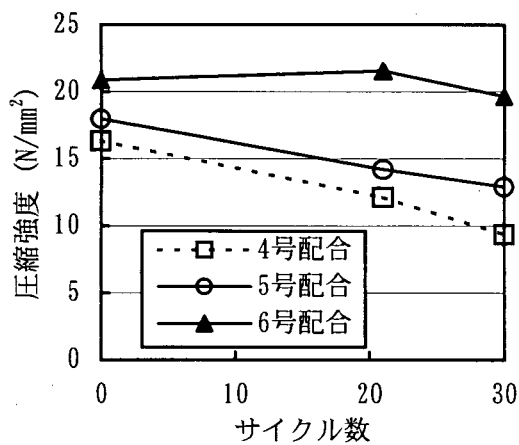


図-3.8 乾湿繰り返し試験での圧縮強度の変化

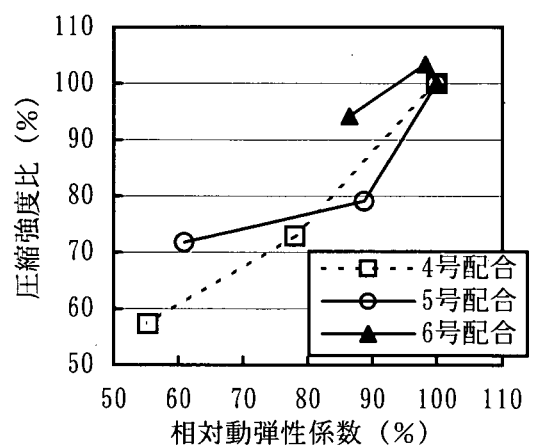


図-3.9 相対動弾性係数と圧縮強度比の関係

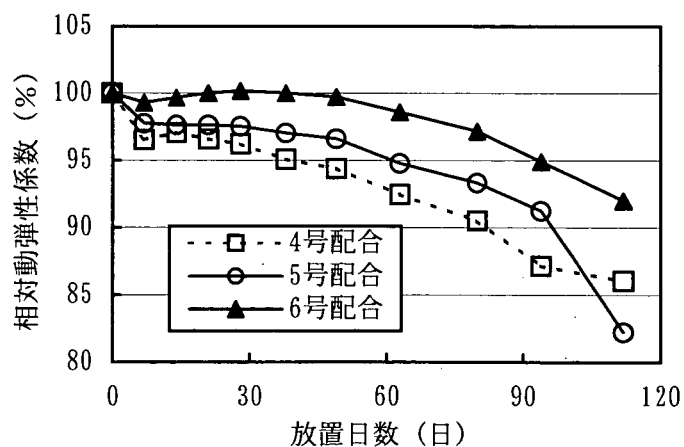


図-3.10 気中放置試験での相対動弾性係数の変化

圧縮強度試験結果を各配合ごとに試験開始時の圧縮強度を 100 %とした百分率(圧縮強度比)で表し、相対動弾性係数と比較した。この結果を図- 3.9 に示すが、双方の値は良い対応を示しており、相対動弾性係数の低下はポーラスコンクリートの力学性状の低下を比較的良く反映しているといえる。

図- 3.10 は気中放置した長方形供試体の相対動弾性係数の変化を示したものである。試験期間は約 3 ヶ月間であったが、その間にも相対動弾性係数は除々に低下する傾向を示し、試験期間終了時点の相対動弾性係数は 6 号配合では 95 %、5 号配合、4 号配合では 90 %程度まで低下した。放置期間を延長すれば更に低下することが予想される。

以上の結果から、ポーラスコンクリートは乾燥によって物性が低下することが明らかとなった。目視による観察では、相対動弾性係数が低下した供試体ではペースト表面に微小なクラックが多く見られ、さらに粗骨材表面からペーストが剥離する傾向が見られた。これは乾燥によって骨材表面の薄いペーストのみが乾燥収縮するためと考えられる。

3.4 まとめ

12 年度は実際の河川護岸の環境条件を考慮した凍結融解試験を実施することにより、ポーラスコンクリートの実用上の凍結融解耐久性を検討した。また、ポーラスコンクリートの乾湿繰り返しに対する耐久性を検討した。結果を以下に整理する。

- (1) 実際の河川護岸の環境条件を考慮した凍結融解試験の結果では、ポーラスコンクリートに劣化は認められなかった。
- (2) 乾湿繰り返し試験の結果では、ポーラスコンクリートは乾燥によって劣化することを確認した。
- (3) 粗骨材寸法の大きな配合ほど乾湿繰り返しによる劣化速度が早い傾向を示した。
- (4) 乾湿繰り返し試験での相対動弾性係数の低下傾向と圧縮強度の低下傾向は比較的良く一致した。

以上の結果から、ポーラスコンクリートの耐久性について、凍結融解に対しては実用上必要な耐久性を有していると考えられるが、乾湿繰り返しに対しては比較的耐久性が低いと考えられ、河川護岸に使用する場合には覆土等を施すことが望ましいと考えられる。

おわりに

平成 10 年度から 12 年度にわたりポーラスコンクリートの基本的物性である強度および耐久性について検討を行ってきた。主な研究成果を整理すると以下のようになる。

- (1) 緑化を目的とした一般的なポーラスコンクリートの配合で、 10N/mm^2 以上の圧縮強度を示した。
- (2) JSCE-G501 に準拠した水中凍結融解試験では数サイクルで供試体は破壊した。
- (3) 気中凍結融解試験では高い耐久性を示した。
- (4) 緑化充填材の充填により水中凍結融解に対する耐久性はやや向上する傾向を示した。
- (5) 実際の河川護岸の環境条件を考慮した凍結融解試験ではポーラスコンクリートの劣化は生じなかった。
- (6) 乾湿繰り返しに対する耐久性は比較的低い結果となった。
- (7) 粗骨材に再生骨材を使用すると強度、耐久性は低下する傾向を示した。

以上のことから、良好な骨材を使用し、水セメント比 25 %、空隙率 25 % 程度で製造されたポーラスコンクリートは実用上必要とされる強度、耐久性を備えていると考えられるが、乾湿繰り返し作用によって劣化する傾向があり、実施工では覆土等の施工が必要と考えられる。

乾湿繰り返しに対する耐久性が低い理由は、乾燥によってペーストが収縮するためと考えられる。今後は、ペーストの収縮を低減する工夫や、実際に施工されたポーラスコンクリートの長期的な観察を行うことで様々な条件下における耐久性について調査することが必要と考えられる。

参考文献

- 1) 吉森和人、上野雅之、岡本享久、山下善秀：ポーラスコンクリートへの植栽技術，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，1996.
- 2) 玉井元治：まぶしコンクリートの動弾性係数と凍結融解に対する抵抗性，セメント・コンクリート論文集，NO.43，1989.
- 3) 片平博，河野広隆：ポーラスコンクリートのフレッシュ性状迅速判定マニュアル(案)，土木研究所資料第3765号，2000.12

資 料 集

目 次

1. 平成 10 年度の実験結果	41
資表－ 1.1 圧縮強度試験結果	41
資表－ 1.2 引張強度試験結果	43
資表－ 1.3 α :水中凍結融解試験での一次共振周波数	44
資表－ 1.4 α :水中凍結融解試験での供試体質量	45
資表－ 1.5 β :気中凍結融解試験での一次共振周波数	46
資表－ 1.6 β :気中凍結融解試験での供試体質量	47
資表－ 1.7 γ :部分水中凍結融解試験での供試体質量	48
2. 平成 11 年度の実験結果	49
資表－ 2.1 圧縮強度試験結果	49
資表－ 2.2 α -1:水中凍結融解試験での一次共振周波数	50
資表－ 2.3 α -1:水中凍結融解試験での損失質量	51
資表－ 2.4 α -2:水中凍結融解試験での一次共振周波数	52
資表－ 2.5 α -2:水中凍結融解試験での損失質量	53
資表－ 2.6 α -3:水中凍結融解試験での一次共振周波数	54
資表－ 2.7 α -3:水中凍結融解試験での損失質量	55
資表－ 2.8 β :気中凍結融解試験での一次共振周波数	56
資表－ 2.9 β :気中凍結融解試験での供試体質量	57
3. 平成 12 年度の実験結果	58
資表－ 3.1 凍結融解試験用の圧縮強度試験結果	58
資表－ 3.2 凍結融解試験での一次共振周波数	58
資表－ 3.3 乾湿繰り返し試験用の圧縮強度試験結果	59
資表－ 3.4 乾湿繰り返し試験での一次共振周波数	60
資表－ 3.5 気乾放置試験での一次共振周波数	60
4. セメントの試験成績表	
資表－ 4.1 平成 10 年度のセメント試験成績表	61
資表－ 4.2 平成 11 年度のセメント試験成績表	62
資表－ 4.3 平成 12 年度のセメント試験成績表	63

1. 平成 10 年度の実験結果

資表 - 1.1 圧縮強度試験結果 (H10) 1/2

ケース No.	供試体No.	キャッピング量(g)		気中質量 (g)	水中質量 (g)	実容積1 (cm ³)	実容積2 (cm ³)	供試体直径(cm)			供試体高さ(cm)			かさ容積 (cm ³)	空隙率1 (%)	空隙率2 (%)	破壊荷重 (kN)	圧縮強度	
		下部	上部					①	②	平均値	①	②	平均値					(N/mm ²)	平均値
1. 基本配合	①-C-1	500	655	10,422	6,256	4,166	3,629	14.9	14.9	14.9	30.1	30.1	30.1	5,272	21.0	31.2	208	11.9	9.3
	①-C-2	500	500	10,660	6,374	4,286	3,821	14.8	14.7	14.7	29.9	29.9	29.9	5,106	16.1	25.2	252	14.8	
	①-C-3	500	645	10,415	6,221	4,194	3,661	14.8	14.9	14.8	29.9	30.0	30.0	5,172	18.9	29.2	246	14.2	
	①-C-4	500	790	10,664	6,398	4,266	3,666	15.0	15.0	15.0	30.1	30.1	30.1	5,315	19.7	31.0	132	(7.5)	
	①-C-5	500	595	10,472	6,285	4,187	3,678	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,329	21.4	31.0	232	13.1	
2. W/C=30	②-C-1	500	480	10,199	6,134	4,065	3,609	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,296	23.2	31.8	207	11.7	7.7
	②-C-2	500	570	10,381	6,226	4,155	3,657	15.0	14.9	15.0	30.1	30.1	30.1	5,301	21.6	31.0	118	(6.7)	
	②-C-3	500	725	10,154	6,084	4,070	3,500	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,307	23.3	34.0	202	11.4	
	②-C-4	500	590	10,259	6,149	4,110	3,603	14.9	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,273	22.1	31.7	189	10.8	
	②-C-5	500	705	10,316	6,178	4,138	3,578	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,297	21.9	32.5	201	11.4	
3. W/C=35	③-C-1	500	595	10,423	6,229	4,194	3,685	15.0	15.0	15.0	30.1	30.1	30.1	5,324	21.2	30.8	160	9.0	6.9
	③-C-2	500	685	10,399	6,213	4,186	3,635	14.9	14.9	14.9	30.2	30.2	30.2	5,295	20.9	31.4	138	7.9	
	③-C-3	500	560	10,513	6,288	4,225	3,732	15.0	15.0	15.0	30.3	30.2	30.2	5,318	20.6	29.8	113	6.4	
	③-C-4	500	585	10,411	6,233	4,178	3,673	14.9	15.0	15.0	30.1	30.1	30.1	5,289	21.0	30.5	106	6.0	
	③-C-5	500	545	10,587	6,332	4,255	3,769	14.9	15.0	15.0	30.3	30.3	30.3	5,333	20.2	29.3	92	5.2	
4. 5号碎石	④-C-1	500	580	10,727	6,364	4,363	3,861	15.0	15.0	15.0	30.1	30.1	30.1	5,314	17.9	27.3	341	19.3	18.6
	④-C-2	500	520	10,666	6,337	4,328	3,854	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,294	18.2	27.2	340	19.3	
	④-C-3	500	470	10,721	6,352	4,369	3,918	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,324	17.9	26.4	332	18.7	
	④-C-4	500	540	10,744	6,364	4,381	3,897	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,289	17.2	26.3	367	20.8	
	④-C-5	500	520	10,614	6,337	4,277	3,803	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,270	18.8	27.8	265	15.1	
5. 6号碎石	⑤-C-1	500	360	10,506	6,223	4,283	3,883	15.0	15.0	15.0	30.1	30.0	30.1	5,308	19.3	26.8	319	18.1	19.4
	⑤-C-2	500	330	10,565	6,284	4,281	3,895	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,309	19.4	26.6	388	21.9	
	⑤-C-3	500	370	10,510	6,258	4,253	3,848	15.0	15.0	15.0	30.1	30.0	30.1	5,312	19.9	27.6	371	21.0	
	⑤-C-4	500	360	10,547	6,277	4,270	3,870	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,284	19.2	26.8	303	17.2	
	⑤-C-5	500	340	10,530	6,255	4,276	3,885	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,301	19.3	26.7	332	18.8	
6. 空隙率 20%	⑥-C-1	500	520	10,738	6,440	4,298	3,824	14.9	14.9	14.9	30.1	30.0	30.1	5,273	18.5	27.5	285	16.2	18.8
	⑥-C-2	500	500	10,858	6,485	4,373	3,908	15.0	15.0	15.0	30.0	30.1	30.0	5,326	17.9	26.6	381	21.5	
	⑥-C-3	500	460	10,924	6,541	4,383	3,937	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,270	16.8	25.3	384	21.8	
	⑥-C-4	500	460	10,936	6,542	4,395	3,948	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,290	16.9	25.4	322	18.3	
	⑥-C-5	500	450	10,867	6,505	4,362	3,920	15.0	15.0	15.0	30.1	30.1	30.1	5,292	17.6	25.9	284	16.1	
7. 空隙率 15%	⑦-C-1	500	380	11,375	6,792	4,583	4,174	15.0	15.0	15.0	30.0	30.1	30.0	5,311	13.7	21.4	434	24.5	22.0
	⑦-C-2	500	410	11,312	6,772	4,540	4,117	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,332	14.8	22.8	390	22.0	
	⑦-C-3	500	390	11,096	6,634	4,462	4,048	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,297	15.8	23.6	364	20.6	
	⑦-C-4	500	480	11,066	6,618	4,448	3,992	15.0	15.0	15.0	30.0	30.1	30.0	5,275	15.7	24.3	352	20.0	
	⑦-C-5	500	360	11,268	6,728	4,540	4,140	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,311	14.5	22.1	406	23.0	

備考 実容積1はキャッピング部も含む 実容積2はキャッピング部を除く 空隙率1はキャッピング部を含む 空隙率2はキャッピング部を除く ()は異常値

資表- 1.1 圧縮強度試験結果 (H10) 2/2

ケース No.	供試体No.	キャッピング量(g)		気中質量 (g)	水中質量 (g)	実容積1 (cm ³)	実容積2 (cm ³)	供試体直径(cm)			供試体高さ(cm)			かさ容積 (cm ³)	空隙率1 (%)	空隙率2 (%)	破壊荷重 (kN)	圧縮強度	
		下部	上部					①	②	平均値	①	②	平均値					(N/mm ²)	平均値
8. 再生4号	⑧-C-1	500	560	10,233	5,770	4,463	3,970	15.0	15.0	15.0	30.1	30.0	30.0	5,302	15.8	25.1	189	10.7	11.1
	⑧-C-2	500	600	9,969	5,653	4,316	3,804	14.9	14.9	14.9	30.0	30.0	30.0	5,249	17.8	27.5	190	10.9	
	⑧-C-3	500	650	9,846	5,586	4,261	3,726	14.9	14.9	14.9	30.0	30.1	30.0	5,225	18.5	28.7	185	10.6	
	⑧-C-4	500	600	10,025	5,685	4,341	3,829	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,282	17.8	27.5	178	10.1	
	⑧-C-5	500	550	9,912	5,608	4,305	3,816	14.9	15.0	15.0	29.9	30.0	29.9	5,262	18.2	27.5	231	13.1	
9. 再生5号	⑨-C-1	500	550	10,052	5,778	4,273	3,785	15.0	15.0	15.0	30.1	30.1	30.1	5,332	19.8	29.0	206	11.6	13.5
	⑨-C-2	500	550	10,197	5,857	4,339	3,851	15.0	15.0	15.0	30.1	30.1	30.1	5,336	18.7	27.8	259	14.6	
	⑨-C-3	500	450	10,182	5,866	4,316	3,874	15.0	15.0	15.0	30.1	30.1	30.1	5,330	19.0	27.3	237	13.4	
	⑨-C-4	500	440	10,164	5,839	4,324	3,887	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,295	18.3	26.6	260	14.7	
	⑨-C-5	500	570	9,983	5,742	4,241	3,743	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,307	20.1	29.5	235	13.3	
10. 再生6号	⑩-C-1	500	440	10,183	5,753	4,430	3,993	14.9	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,273	16.0	24.3	218	12.4	14.2
	⑩-C-2	500	550	10,170	5,736	4,434	3,946	15.0	14.9	14.9	29.9	29.9	29.9	5,242	15.4	24.7	280	16.0	
	⑩-C-3	500	400	10,329	5,843	4,486	4,068	15.0	15.0	15.0	30.1	30.1	30.1	5,323	15.7	23.6	263	14.9	
	⑩-C-4	500	430	10,156	5,763	4,393	3,961	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,297	17.1	25.2	238	13.5	
	⑩-C-5	500	380	10,298	5,814	4,485	4,075	15.0	15.1	15.1	30.1	30.1	30.1	5,352	16.2	23.9	250	14.0	

備考 実容積1はキャッピング部も含む 実容積2はキャッピング部を除く 空隙率1はキャッピング部を含む 空隙率2はキャッピング部を除く ()は異常値

資表-1.2 引張強度試験結果 (H10)

ケース No.	供試体No.	供試体 質量(g)	供試体直径 (cm)			供試体高さ (cm)			破壊荷重 (kN)	引張強度	
			①	②	平均値	①	②	平均値		(N/mm ²)	平均値
1. 基本配合	①-T-1	6,712	14.9	15.0	14.9	20.7	20.2	20.4	92	1.92	1.60
	①-T-2	6,624	14.9	15.0	15.0	19.7	20.2	20.0	74	1.58	
	①-T-3	6,447	15.0	15.0	15.0	18.7	19.1	18.9	58	1.30	
2. W/C=30	②-T-1	6,798	15.0	15.0	15.0	20.6	20.0	20.3	69	1.44	1.33
	②-T-2	6,385	15.0	15.0	15.0	19.2	18.9	19.0	65	1.45	
	②-T-3	6,613	15.0	15.0	15.0	20.5	20.6	20.6	53	1.09	
3. W/C=35	③-T-1	7,056	15.0	15.0	15.0	21.6	21.7	21.6	54	1.06	1.21
	③-T-2	6,792	15.0	15.0	15.0	20.3	20.4	20.3	53	1.10	
	③-T-3	6,957	15.0	15.0	15.0	21.4	21.3	21.4	73	1.45	
4. 5号碎石	④-T-1	6,954	15.0	15.0	15.0	20.7	21.4	21.0	95	1.92	1.89
	④-T-2	7,285	15.0	15.0	15.0	22.4	22.3	22.4	104	1.97	
	④-T-3	7,349	15.0	15.0	15.0	22.7	22.7	22.7	95	1.78	
5. 6号碎石	⑤-T-1	6,984	15.0	15.0	15.0	21.4	21.4	21.4	106	2.10	1.80
	⑤-T-2	6,963	15.0	15.0	15.0	21.0	21.0	21.0	88	1.78	
	⑤-T-3	7,249	15.0	15.0	15.0	22.0	21.8	21.9	79	1.53	
6. 空隙率 20%	⑥-T-1	6,819	15.0	15.0	15.0	21.5	21.5	21.5	83	1.64	1.54
	⑥-T-2	7,183	15.0	15.0	15.0	22.0	22.0	22.0	85	1.64	
	⑥-T-3	6,997	15.0	14.9	14.9	22.2	22.3	22.2	70	1.34	
7. 空隙率 15%	⑦-T-1	8,071	15.0	15.0	15.0	24.3	24.1	24.2	108	1.90	2.25
	⑦-T-2	7,977	15.0	15.0	15.0	23.7	23.6	23.6	138	2.48	
	⑦-T-3	7,890	15.0	15.0	15.0	23.7	23.3	23.5	132	2.38	
8. 再生4号	⑧-T-1	6,390	15.0	15.0	15.0	20.8	21.2	21.0	72	1.45	1.22
	⑧-T-2	6,336	14.9	14.9	14.9	21.6	21.6	21.6	57	1.13	
	⑧-T-3	6,536	15.0	15.0	15.0	20.9	21.3	21.1	54	1.08	
9. 再生5号	⑨-T-1	6,003	15.0	15.0	15.0	19.7	19.7	19.7	57	1.23	1.21
	⑨-T-2	6,244	15.0	15.0	15.0	20.3	20.1	20.2	56	1.17	
	⑨-T-3	6,529	14.8	14.9	14.9	21.1	21.1	21.1	60	1.22	
10. 再生6号	⑩-T-1	6,518	15.0	15.0	15.0	20.3	20.4	20.4	76	1.58	1.72
	⑩-T-2	7,077	15.0	14.9	15.0	21.8	21.7	21.8	90	1.76	
	⑩-T-3	6,714	15.0	15.0	15.0	20.8	20.9	20.8	89	1.81	

資表- 1.3 α :水中凍結融解試験での一次共振周波数 (H10)

(単位:Hz)

ケース No.	供試体番号	サイクル数																	
		0	1	2	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	60	70
1. 基本配合	1- α -1	1,827	1,769	1,633	1,340	989	996	1,052	破壊										
	1- α -2	1,820	1,809	1,350	1,021	破壊													
	1- α -3	1,850	1,603	1,331	914	965	1,266	1,097	破壊										
2. W/C=30	2- α -1	1,806	1,300	1,082	987	1,107	999	963	1,016	破壊									
	2- α -2	1,680	1,257	1,088	1,077	1,091	破壊												
	2- α -3	1,760	1,254	1,091	917	840	1,041	946	1,075	破壊									
3. W/C=35	3- α -1	1,660	1,085	1,040	941	962	979	破壊											
	3- α -2	1,701	1,032	995	887	951	1,081	929	1,074	破壊									
	3- α -3	1,697	1,085	989	838	985	1,089	974	1,010	965	破壊								
4. 5号碎石	4- α -1	1,999	-	1,643	-	1,468	-	1,271	1,174	1,141	1,114	1,076	1,031	999	932	807	717	破壊	
	4- α -2	1,923	-	1,507	-	1,378	-	1,300	1,286	945	931	937	破壊						
	4- α -3	1,941	-	1,752	-	1,395	-	1,273	1,230	1,226	1,226	破壊							
5. 6号碎石	5- α -1	1,890	-	1,702	-	1,586	-	1,489	1,477	1,322	1,287	1,248	1,245	966	破壊				
	5- α -2	1,888	-	1,749	-	1,656	-	1,499	1,398	1,360	1,279	1,136	1,082	961	破壊				
	5- α -3	1,883	-	1,740	-	1,707	-	1,496	1,262	1,297	1,160	1,048	1,041	破壊					
6. 空隙率 20%	6- α -1	1,860	-	破壊															
	6- α -2	1,951	-	1,731	-	1,356		1,167	1,159	1,104	1,047	1,028	破壊						
	6- α -3	2,010	-	1,967	-	1,574		1,278	1,102	1,064	1,071	983	破壊						
7. 空隙率 15%	7- α -1	1,991	-	1,590	-	1,482	-	1,368	1,298	1,256	1,209	破壊							
	7- α -2	2,031	-	1,521	-	破壊													
	7- α -3	1,975	-	1,532	-	破壊													
8. 再生4号	8- α -1	1,842	1,764	1,595	1,247	1,208	1,126	1,119	988	1,015	破壊								
	8- α -2	1,693	1,541	1,493	1,099	1,059	998	956	967	941	886	808	990	988	915	935	958	936	945
	8- α -3	1,858	1,755	1,451	1,166	1,237	1,261	981	862	897	960	968	970	972	981	1,083	破壊		
9. 再生5号	9- α -1	1,705	1,669	1,448	1,383	1,157	982	988	986	802	662	992	953	破壊					
	9- α -2	1,777	1,647	1,312	1,107	840	762	624	486	442	457	867	破壊						
	9- α -3	1,805	1,767	1,427	1,256	951	1,019	874	940	852	818	725	932	996	破壊				
10. 再生6号	10- α -1	1,746	1,717	1,692	1,683	1,665	1,658	1,633	1,516	1,536	1,479	1,426	1,179	1,013	1,012	952	破壊		
	10- α -2	1,780	1,746	1,772	1,718	1,689	1,688	1,657	1,616	1,607	1,536	1,444	1,109	1,028	1,008	980	破壊		
	10- α -3	1,792	1,750	1,729	1,727	1,707	1,706	1,684	1,582	1,466	1,240	1,238	1,059	994	993	1,065	破壊		

資表－1.4 α :水中凍結融解試験での供試体質量 (H10)

(単位: g)

ケース No.	供試体番号	サ イ ク ル 数																	
		0	1	2	3	4	5	6	8	10	12	15	20	25	30	40	50	60	70
1. 基本配合	1- α -1	7,423	7,415	7,410	7,404	7,396	7,401	7,360	破損										
	1- α -2	7,074	7,074	6,867	6,781	破損													
	1- α -3	7,003	7,009	7,005	7,011	6,999	6,840	6,702	破損										
2. W/C=30	2- α -1	7,195	7,202	7,210	7,213	6,923	6,920	6,486	6,489	破損									
	2- α -2	6,855	6,754	6,770	6,756	6,753	破損												
	2- α -3	7,045	7,050	7,061	7,052	7,021	7,031	7,024	7,026	破損									
3. W/C=35	3- α -1	7,045	7,032	7,038	7,009	6,979	6,825	破損											
	3- α -2	7,233	7,230	7,229	7,227	7,194	7,174	6,673	6,676	破損									
	3- α -3	7,111	7,048	7,053	7,062	7,010	7,003	7,002	6,850	6,530	破損								
4. 5号碎石	4- α -1	7,717	-	7,716	-	7,739	-	7,728	7,700	7,604	5,814	5,753	5,756	5,735	5,665	5,605	5,556	破損	
	4- α -2	7,420	-	7,424	-	7,437	-	7,431	7,431	6,932	6,903	6,878	破損						
	4- α -3	7,531	-	7,537	-	7,545	-	7,542	7,539	7,417	7,407	破損							
5. 6号碎石	5- α -1	7,400	-	7,408	-	7,405	-	7,419	7,392	7,407	7,379	7,395	7,399	7,407	破損				
	5- α -2	7,423	-	7,427	-	7,430	-	7,442	7,417	7,428	7,414	7,423	6,957	6,950	破損				
	5- α -3	7,406	-	7,411	-	7,415	-	7,417	7,402	7,413	7,392	7,415	7,377	破損					
6. 空隙率 20%	6- α -1	7,617	-	破壊															
	6- α -2	7,353	-	7,359	-	7,356	-	6,639	6,602	6,462	6,468	6,071	破損						
	6- α -3	7,614	-	7,623	-	7,545	-	7,486	6,794	6,781	6,053	5,885	破損						
7. 空隙率 15%	7- α -1	7,962	-	7,943	-	7,911	-	7,927	7,883	7,786	7,796	破損							
	7- α -2	7,854	-	7,813	-	破壊													
	7- α -3	7,819	-	7,792	-	破壊													
8. 再生4号	8- α -1	7,608	7,617	7,619	7,591	7,587	7,590	7,594	7,380	7,369	破損								
	8- α -2	7,338	7,350	7,342	7,315	7,315	7,316	7,228	7,207	6,892	6,341	6,341	6,126	6,052	6,044	5,997	5,915	5,859	5,382
	8- α -3	7,509	7,518	7,521	7,370	7,340	7,274	6,856	6,596	6,595	6,515	6,359	6,195	6,185	6,155	6,130	破損		
9. 再生5号	9- α -1	7,106	7,118	7,126	7,113	7,106	7,114	7,126	7,147	7,131	7,124	7,111	7,105	破損					
	9- α -2	7,110	7,129	7,132	7,118	7,111	7,115	7,130	7,126	7,133	7,130	7,125	破損						
	9- α -3	7,296	7,311	7,315	7,309	7,302	7,307	7,318	7,317	7,321	7,328	7,311	6,424	5,877	破損				
10. 再生6号	10- α -1	7,255	7,271	7,266	7,257	7,248	7,254	7,277	7,281	7,278	7,269	7,270	7,281	6,961	6,941	6,951	破損		
	10- α -2	7,264	7,272	7,271	7,260	7,249	7,263	7,280	7,293	7,280	7,271	7,287	7,302	7,289	7,289	7,301	破損		
	10- α -3	7,322	7,345	7,336	7,333	7,314	7,330	7,344	7,347	7,345	7,342	7,343	7,363	7,366	7,363	7,371	破損		

資表- 1.5 β : 気中凍結融解試験での一次共振周波数 (H10)

(単位: Hz)

ケース No.	供試体番号	サイクル数																	
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	150	180	210	240	270	300
1. 基本配合	1- β -1	1,859	1,845	1,849	1,848	1,850	1,847	1,842	1,845	1,844	1,843	1,846	1,841	1,855	1,856	1,861	1,857	1,861	1,861
	1- β -2	1,718	1,701	1,703	1,700	1,700	1,701	1,700	1,704	1,701	1,697	1,703	1,701	1,710	1,709	1,713	1,713	1,714	1,718
	1- β -3	1,883	1,862	1,865	1,863	1,863	1,859	1,858	1,863	1,862	1,859	1,863	1,863	1,866	1,873	1,871	1,837	1,802	1,818
2. W/C=30	2- β -1	1,748	1,730	1,736	1,727	1,731	1,729	1,725	1,731	1,729	1,729	1,731	1,728	1,734	1,731	1,727	1,713	1,711	1,707
	2- β -2	1,749	1,732	1,735	1,735	1,737	1,731	1,728	1,733	1,731	1,730	1,736	1,738	1,741	1,739	1,734	1,730	1,734	1,729
	2- β -3	1,775	1,763	1,767	1,764	1,767	1,761	1,756	1,760	1,769	1,768	1,773	1,772	1,775	1,770	1,767	1,754	1,759	1,751
3. W/C=35	3- β -1	1,701	1,727	1,735	1,721	1,718	1,699	1,684	1,687	1,648	1,614	1,607	1,530	1,429	1,287	1,149	1,112	987	944
	3- β -2	1,533	1,532	1,533	1,523	1,517	1,468	1,443	1,445	1,418	1,317	1,306	1,269	1,259	1,220	1,043	1,095	キャッピング部剥離	
	3- β -3	1,596	1,574	1,576	1,551	1,545	1,515	1,483	1,475	1,436	1,409	1,372	1,256	1,251	1,246	1,060	744	キャッピング部剥離	
4. 5号碎石	4- β -1	1,923	1,906	1,903	1,897	1,894	1,902	1,899	1,891	1,904	—	1,903	1,990	1,912	1,911	1,905	1,910	1,916	1,914
	4- β -2	2,029	2,000	2,014	2,000	1,996	2,004	2,004	2,001	2,009	—	2,009	2,020	2,023	2,024	2,024	2,027	2,023	2,028
	4- β -3	1,951	1,934	1,941	1,925	1,920	1,927	1,926	1,923	1,934	—	1,934	1,934	1,958	1,955	1,955	1,953	1,958	1,955
5. 6号碎石	5- β -1	1,932	1,912	1,918	1,908	1,906	1,914	1,913	1,911	1,921	—	1,920	1,948	1,953	1,955	1,956	1,954	1,953	1,954
	5- β -2	1,904	1,895	1,895	1,889	1,885	1,890	1,890	1,888	1,901	—	1,902	1,920	1,930	1,930	1,927	1,928	1,933	1,933
	5- β -3	1,881	1,875	1,872	1,869	1,862	1,871	1,873	1,872	1,883	—	1,881	1,894	1,900	1,902	1,904	1,908	1,912	1,913
6. 空隙率 20%	6- β -1	1,956	1,950	1,951	1,950	1,946	1,950	1,951	1,951	1,956	—	1,954	1,962	1,965	1,975	1,974	1,980	1,979	1,982
	6- β -2	1,875	1,863	1,861	1,862	1,857	1,863	1,860	1,862	1,866	—	1,866	1,871	1,878	1,881	1,880	1,882	1,885	1,888
	6- β -3	1,971	1,960	1,962	1,957	1,960	1,964	1,964	1,962	1,966	—	1,964	1,981	1,983	1,980	1,981	1,983	1,986	1,988
7. 空隙率 15%	7- β -1	2,057	2,070	2,075	2,073	2,072	2,074	2,079	2,077	2,079	—	2,079	2,093	2,097	2,098	2,099	2,104	2,099	2,103
	7- β -7	2,087	2,065	2,067	2,065	2,066	2,067	2,074	2,071	2,085	—	2,083	2,090	2,089	2,088	2,090	2,096	2,092	2,096
	7- β -3	2,084	2,032	2,035	2,033	2,035	2,038	2,039	2,038	2,046	—	2,044	2,055	2,059	2,058	2,060	2,063	2,060	2,068
8. 再生4号	8- β -1	1,664	1,618	1,575	1,565	1,544	1,519	1,530	1,476	1,518	1,457	1,406	1,401	1,297	1,188	1,218	1,082	1,170	1,086
	8- β -2	1,884	1,865	1,857	1,850	1,816	1,799	1,808	1,775	1,775	1,716	1,703	1,670	1,566	1,219	1,321	1,127	1,240	1,259
	8- β -3	1,740	1,700	1,679	1,670	1,646	1,516	1,523	1,598	1,604	1,568	1,535	1,530	1,445	1,199	1,173	1,122	1,237	1,231
9. 再生5号	9- β -1	1,686	1,622	1,607	1,602	1,579	1,551	1,569	1,550	1,540	1,455	1,469	1,421	1,364	1,201	1,194	1,156	1,114	1,117
	9- β -2	1,701	1,637	1,623	1,613	1,590	1,549	1,581	1,516	1,539	1,472	1,456	1,373	1,379	1,199	1,187	1,210	1,052	1,112
	9- β -3	1,807	1,744	1,726	1,730	1,717	1,701	1,705	1,688	1,690	1,671	1,670	1,636	1,630	1,188	1,189	1,183	1,105	1,091
10. 再生6号	10- β -1	1,861	1,800	1,737	1,729	1,676	1,636	1,645	1,610	1,584	1,484	1,301	1,266	1,129	1,106	990	989	1,133	1,113
	10- β -2	1,834	1,780	1,748	1,724	1,592	1,523	1,643	1,571	1,487	1,425	1,344	1,306	1,311	1,108	955	1,074	1,054	1,082
	10- β -3	1,738	1,653	1,612	1,601	1,508	1,466	1,489	1,433	1,408	1,312	1,218	1,109	1,012	1,016	1,135	1,132	1,092	1,060

資表-1.6 β : 気中凍結融解試験での供試体質量 (H10)

(単位: g)

ケース No.	供試体番号	サイクル数																	
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	150	180	210	240	270	300
1. 基本配合	1- β -1	7,203	7,200	7,197	7,207	7,201	7,206	7,205	7,202	7,206	7,205	7,201	7,207	7,200	7,200	7,205	7,206	7,202	7,204
	1- β -2	7,506	7,501	7,502	7,507	7,503	7,508	7,508	7,507	7,508	7,512	7,506	7,508	7,503	7,510	7,506	7,507	7,505	7,506
	1- β -3	7,286	7,283	7,283	7,285	7,282	7,284	7,286	7,286	7,287	7,282	7,280	7,284	7,278	7,284	7,281	7,281	7,282	7,281
2. W/C=30	2- β -1	6,932	6,922	6,924	6,929	6,924	6,927	6,927	6,926	6,927	6,928	6,923	6,925	6,922	6,921	6,924	6,923	6,921	6,923
	2- β -2	6,989	6,985	6,984	6,986	6,986	6,985	6,987	6,985	6,987	6,989	6,986	6,987	6,982	6,986	6,985	6,985	6,982	6,961
	2- β -3	6,881	6,879	6,880	6,880	6,879	6,883	6,882	6,880	6,862	6,864	6,863	6,860	6,860	6,860	6,859	6,862	6,859	6,861
3. W/C=35	3- β -1	6,998	6,991	6,987	6,990	6,986	6,991	6,958	6,957	6,959	6,958	6,957	6,955	6,935	6,936	6,846	6,743	6,734	6,740
	3- β -2	6,842	6,839	6,835	6,832	6,834	6,837	6,835	6,835	6,838	6,834	6,831	6,834	6,796	6,689	6,395	6,389	キャッピング部剥離	
	3- β -3	6,960	6,936	6,931	6,934	6,933	6,934	6,931	6,932	6,936	6,932	6,929	6,933	6,914	6,914	6,915	6,461	キャッピング部剥離	
4. 5号碎石	4- β -1	7,414	7,406	7,403	7,411	7,407	7,407	7,407	7,404	7,400	-	7,404	7,403	7,408	7,403	7,403	7,402	7,405	7,405
	4- β -2	7,349	7,338	7,337	7,339	7,336	7,332	7,333	7,333	7,330	-	7,337	7,332	7,337	7,332	7,334	7,331	7,336	7,331
	4- β -3	7,411	7,394	7,391	7,393	7,393	7,390	7,391	7,391	7,381	-	7,387	7,383	7,387	7,378	7,380	7,383	7,387	7,380
5. 6号碎石	5- β -1	7,541	7,516	7,504	7,521	7,523	7,510	7,510	7,513	7,506	-	7,508	7,506	7,506	7,489	7,500	7,495	7,502	7,499
	5- β -2	7,542	7,523	7,520	7,527	7,525	7,527	7,518	7,518	7,506	-	7,499	7,501	7,503	7,498	7,497	7,491	7,500	7,507
	5- β -3	7,478	7,453	7,455	7,466	7,460	7,448	7,456	7,455	7,445	-	7,439	7,446	7,442	7,433	7,441	7,434	7,437	7,443
6. 空隙率 20%	6- β -1	7,517	7,499	7,498	7,502	7,503	7,498	7,504	7,505	7,502	-	7,501	7,498	7,502	7,501	7,505	7,500	7,501	7,500
	6- β -2	7,422	7,407	7,404	7,407	7,405	7,404	7,410	7,407	7,404	-	7,406	7,404	7,410	7,412	7,393	7,407	7,408	7,406
	6- β -3	7,420	7,399	7,399	7,405	7,388	7,387	7,393	7,388	7,387	-	7,390	7,389	7,392	7,389	7,409	7,390	7,389	7,391
7. 空隙率 15%	7- β -1	7,970	7,946	7,954	7,954	7,956	7,953	7,957	7,956	7,956	-	7,959	7,965	7,960	7,960	7,962	7,960	7,957	7,958
	7- β -2	7,751	7,739	7,741	7,741	7,741	7,740	7,741	7,743	7,742	-	7,744	7,744	7,744	7,746	7,744	7,745	7,743	7,743
	7- β -3	7,760	7,740	7,746	7,741	7,743	7,741	7,742	7,746	7,746	-	7,747	7,742	7,745	7,746	7,747	7,744	7,743	7,741
8. 再生4号	8- β -1	7,055	7,042	7,049	7,049	7,046	7,037	7,033	7,030	7,009	7,001	6,984	6,982	6,956	6,915	6,870	6,792	6,588	6,423
	8- β -2	7,546	7,531	7,536	7,536	7,534	7,542	7,545	7,539	7,533	7,537	7,532	7,514	7,491	7,477	7,452	7,417	7,376	6,539
	8- β -3	7,350	7,330	7,327	7,331	7,308	7,320	7,314	7,303	7,302	7,252	7,250	7,242	7,228	7,200	7,168	7,116	7,086	7,003
9. 再生5号	9- β -1	7,099	7,088	7,069	7,072	7,063	7,069	7,066	7,056	7,048	7,050	7,046	7,032	7,010	6,994	6,992	6,953	6,824	6,675
	9- β -2	7,051	7,036	7,033	7,039	7,033	7,049	7,043	7,040	7,034	7,036	7,039	7,006	6,999	6,998	7,012	6,966	6,931	6,891
	9- β -3	7,141	7,126	7,119	7,124	7,122	7,130	7,119	7,125	7,103	7,100	7,098	7,079	7,031	7,058	7,068	7,024	6,993	6,958
10. 再生6号	10- β -1	7,456	7,418	7,434	7,424	7,426	7,445	7,430	7,425	7,422	7,452	7,443	7,412	7,389	7,406	7,403	7,118	6,795	6,347
	10- β -2	7,413	7,380	7,395	7,379	7,376	7,398	7,387	7,372	7,370	7,378	7,375	7,320	7,294	7,220	7,208	6,810	6,291	5,957
	10- β -3	7,269	7,228	7,247	7,229	7,233	7,260	7,248	7,245	7,236	7,260	7,262	7,254	7,223	7,222	7,170	6,462	6,235	5,868

資表- 1.7 γ :部分水中凍結融解試験での供試体質量 (H10)

(単位: g)

ケース No.	供試体番号	サ イ ク ル 数																	
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	150	180	210	240	270	300
1. 基本配合	1- γ -1	2,541	2,535	2,492	2,378	2,347	2,343	2,347	2,166	2,166	2,167	2,169	2,165	2,163	2,165	2,166	2,164	2,167	2,165
	1- γ -2	2,698	2,692	2,696	2,695	2,696	2,474	2,475	2,474	2,455	2,455	2,457	2,453	2,425	2,407	2,408	2,370	2,370	2,370
	1- γ -3	2,563	2,557	2,547	2,548	2,547	2,548	2,088	2,088	2,088	2,088	2,090	2,087	2,085	2,087	2,089	2,088	2,088	2,086
2. W/C=30	2- γ -1	2,612	2,609	2,583	2,585	2,582	2,581	2,494	2,493	2,492	2,479	2,481	2,479	2,475	2,476	2,124	2,124	2,123	2,122
	2- γ -2	2,654	2,653	2,656	2,656	2,656	2,548	2,549	2,548	2,548	2,529	2,529	2,530	2,526	2,153	2,163	2,165	2,162	2,162
	2- γ -3	2,567	2,565	2,462	2,463	2,461	2,461	2,464	2,462	2,461	2,462	2,361	2,460	2,457	2,331	2,331	2,331	2,330	2,328
3. W/C=35	3- γ -1	2,504	2,471	2,473	2,474	2,440	2,437	2,438	2,437	2,430	2,428	2,429	2,426	1,902	1,898	1,859	1,860	1,857	1,832
	3- γ -2	2,533	2,530	2,513	2,333	2,317	2,314	2,217	2,216	2,216	2,215	2,217	2,214	2,212	2,167	2,143	破損		
	3- γ -3	2,407	2,404	2,323	2,085	2,086	2,083	2,083	2,083	2,082	2,082	2,082	2,081	2,078	2,077	2,051	2,051	2,049	2,011
4. 5号碎石	4- γ -1	2,567	2,563	2,564	2,331	2,330	2,330	2,330	2,328	2,328	2,330	2,329	2,327	2,326	2,328	2,328	2,330	2,329	2,328
	4- γ -2	2,714	2,710	2,703	2,693	2,114	2,113	2,117	2,114	2,114	2,116	2,114	2,114	2,112	2,114	2,114	2,115	2,114	2,114
	4- γ -3	2,854	2,847	2,846	2,845	2,845	2,338	2,341	2,338	2,338	2,335	2,334	2,334	2,332	2,333	2,339	2,335	2,334	2,333
5. 6号碎石	5- γ -1	2,895	2,874	2,876	2,875	2,878	2,875	2,875	2,876	2,876	2,876	2,877	2,873	2,880	2,880	2,437	2,431	2,424	2,417
	5- γ -2	2,847	2,827	2,830	2,830	2,830	2,827	2,828	2,831	2,829	2,830	2,831	2,828	2,833	2,832	2,394	2,392	2,390	2,390
	5- γ -3	2,724	2,707	2,708	2,705	2,710	2,706	2,706	2,704	2,705	2,707	2,706	2,704	2,708	2,708	2,283	2,284	2,285	2,284
6. 空隙率 20%	6- γ -1	2,786	2,781	2,522	2,522	2,521	2,522	2,524	2,522	2,522	2,527	2,523	2,521	2,521	2,523	2,522	2,523	2,523	2,523
	6- γ -2	2,842	2,838	2,366	2,365	2,355	2,355	2,358	2,356	2,356	2,360	2,356	2,355	2,355	2,355	2,356	2,356	2,355	2,354
	6- γ -3	2,711	2,375	2,375	2,375	2,374	2,375	2,376	2,375	2,375	2,379	2,375	2,374	2,373	2,372	2,373	2,373	2,373	2,312
7. 空隙率 15%	7- γ -1	2,978	2,976	2,888	2,886	2,886	2,886	2,888	2,885	2,885	2,888	2,886	2,883	2,883	2,866	2,738	2,721	2,720	2,720
	7- γ -2	2,749	2,615	2,616	2,614	2,614	2,614	2,614	2,575	2,575	2,577	2,576	2,574	2,575	2,575	2,574	2,576	2,575	2,574
	7- γ -3	2,907	2,904	2,894	2,890	2,889	2,889	2,889	2,889	2,889	2,892	2,890	2,887	2,591	2,591	2,591	2,593	2,593	2,592
8. 再生4号	8- γ -1	2,502	2,500	2,494	2,488	2,460	2,142	2,108	2,064	1,870	1,855	1,841	1,678	1,633	1,622	破損			
	8- γ -2	2,735	2,733	2,727	2,727	2,725	2,706	2,549	2,488	2,483	2,479	2,448	2,395	破損					
	8- γ -3	2,529	2,502	2,435	2,418	2,421	2,416	2,410	2,408	2,403	2,403	2,345	2,336	2,331	2,298	2,148			
9. 再生5号	9- γ -1	2,677	2,686	2,661	2,659	2,656	2,652	2,644	2,635	2,626	2,622	2,618	2,617	2,610	2,571	2,330			
	9- γ -2	2,783	2,783	2,768	2,769	2,766	2,761	2,750	2,747	2,742	2,743	2,732	2,688	2,529	2,415	2,209			
	9- γ -3	2,549	2,550	2,539	2,537	2,536	2,538	2,532	1,825	1,818	1,820	1,811	1,805	1,880	1,780	1,733			
10. 再生6号	10- α -1	3,053	3,059	3,029	3,035	3,034	3,033	3,024	3,022	3,018	3,021	3,016	2,998	2,748	2,116	破損			
	10- α -2	2,865	2,867	2,838	2,837	2,834	2,835	2,827	2,834	2,824	2,820	2,814	2,810	2,668	2,346	破損			
	10- α -3	2,729	2,730	2,705	2,713	2,706	2,702	2,698	2,699	2,697	2,694	2,684	2,670	2,435	破損				

2. 平成 11 年度の実験結果

資表－2.1 圧縮強度試験結果 (H10)

配合名	バッチ No.	供試体 No.	キャッピング量(g)		空中質量 (g)	水中質量 (g)	実容積 (cm3)	供試体直径(cm)			供試体高さ(cm)			かさ容積 (cm ³)	空隙率		破壊荷重 (kN)	圧縮強度	
			下部	上部				①	②	平均値	①	②	平均値		(%)	平均値		(N/mm ²)	平均値
4号配合	1	④－1	500	780	10.744	6.406	4.338	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5.302	18.2	19.7	326	18.5	17.1
		④－2	500	700	10.764	6.449	4.315	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5.312	18.8		334	18.9	
		④－3	500	620	10.337	6.196	4.141	15.0	15.0	15.0	30.1	30.1	30.1	5.323	22.2		245	13.9	
5号配合 (有振動)	1	⑤－1	500	420	10.527	6.292	4.235	15.0	15.0	15.0	30.1	30.2	30.2	5.332	20.6	21.0	325	18.4	17.2
		⑤－2	500	480	10.385	6.210	4.175	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5.287	21.0		287	16.3	
		⑤－3	500	470	10.316	6.166	4.150	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5.286	21.5		298	16.9	
	2	⑤－4	500	690	10.653	6.395	4.258	15.0	15.0	15.0	30.1	30.1	30.1	5.313	19.9	19.5	328	18.6	18.3
		⑤－5	500	590	10.669	6.390	4.279	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5.278	18.9		326	18.5	
		⑤－6	500	450	10.580	6.348	4.232	15.0	15.0	15.0	29.9	29.9	29.9	5.278	19.8		312	17.7	
5号配合 (無振動)	3	⑤－101	500	510	10.303	6.181	4.122	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5.311	22.4	22.4	244	13.8	13.4
		⑤－102	500	490	10.296	6.175	4.121	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5.266	21.7		240	13.7	
		⑤－103	500	480	10.154	6.096	4.059	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5.282	23.2		226	12.8	
6号配合	1	⑥－1	500	410	10.584	6.287	4.297	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5.292	18.8	18.5	333	18.9	20.2
		⑥－2	500	390	10.680	6.341	4.339	15.0	15.0	15.0	30.1	30.1	30.1	5.313	18.3		355	20.1	
		⑥－3	500	420	10.611	6.302	4.309	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5.279	18.4		380	21.6	
	2	⑥－4	500	310	10.308	6.133	4.176	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5.279	20.9	19.2	282	16.0	18.7
		⑥－5	500	300	10.606	6.292	4.314	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5.303	18.7		335	19.0	
		⑥－6	500	380	10.660	6.332	4.329	15.0	15.0	15.0	30.0	29.9	30.0	5.279	18.0		369	20.9	
備考 実容積はキャッピング部も含む ④－3 キャッピング不良																			

資表-2.2 α -1:水中凍結融解試験での一次共振周波数 (H11)

(単位: Hz)

凍結融解 条件	充填材	配合	振動	供試体 番号	サ イ ク ル 数															
					0	1	2	3	4	6	8	10	12	15	20	25	30	35	40	50
水中 6 h (-18~+5)	無	5号 配合	有	⑤-3	1,987	1,719	1,677	1,589	1,300	1,331	1,239	997	1,010	948	破損					
				⑤-20	1,992	1,683	1,489	1,520	1,296	1,033	946	945	816	1,019	950					
				⑤-21	1,902	1,654	1,391	1,306	1,484	1,169	995	955	937	952	破損					
		6号 配合	有	⑥-3	2,057	2,051	2,048	2,045	2,048	2,002	1,978	1,958	1,952	1,941	1,758	1,532	1,312	1,124	1,016	932
				⑥-14	1,960	1,939	1,937	1,935	1,938	1,901	1,893	1,889	1,809	1,666	1,473	1,216	1,222	1,001	1,005	破損
				⑥-15	1,981	1,974	1,975	1,967	1,977	1,907	1,896	1,900	1,848	1,744	1,215	1,208	996	997	1,038	破損
	A (粉体)	5号 配合	有	⑤-9	1,889	1,887	1,884	1,888	1,891	1,890	1,722	1,541	1,378	1,157	945	625	848	破損		
				⑤-26	1,914	1,917	1,919	1,911	1,886	1,907	1,457	1,472	1,277	1,171	948	753	953	破損		
				⑤-27	1,809	1,807	1,805	1,810	1,742	1,659	1,392	1,263	1,251	1,068	破損					
		6号 配合	有	⑥-9	1,967	1,996	1,999	2,001	1,993	2,006	2,014	2,018	2,022	1,989	1,834	1,649	1,518	1,254	935	941
				⑥-20	1,902	1,906	1,914	1,920	1,913	1,921	1,937	1,931	1,887	1,611	1,428	1,354	1,294	1,220	1,088	978
				⑥-21	1,908	1,910	1,924	1,928	1,927	1,945	1,947	1,950	1,952	1,923	1,531	1,444	1,420	1,196	1,000	961
	B (スリ-)	5号 配合	有	⑤-15	1,861	1,810	1,806	1,723	1,729	1,639	1,307	1,273	993	881	936	449	438	破損		
				⑤-32	1,909	1,906	1,800	1,569	1,638	1,363	1,153	993	984	921	破損					
				⑤-33	1,911	1,807	1,694	1,621	1,635	1,214	1,118	978	933	906	破損					

資表－ 2.3 α -1:水中凍結融解試験での損失質量 (H11)

(単位 : g)

凍結融解 条件	充填材	配合	振動	供試体 番号	試験前 質量 (g)	サイクル数														
						1	2	3	4	6	8	10	12	15	20	25	30	35	40	50
水中 6 h (-18~+5)	無	5 号 配合	有	⑤-3	7,455	0	0	0	0	0	0	0	0	0	破損					
				⑤-20	7,715	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	破損				
				⑤-21	7,516	0	0	0	0	0	0	0	0	0		破損				
		6 号 配合	有	⑥-3	7,653	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				⑥-14	7,747	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	破損
				⑥-15	7,683	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	破損
	A (粉体)	5 号 配合	有	⑤-9	7,604	0	0	0	0	0	0	0	12	12	50	114	118	破損		
				⑤-26	7,469	0	0	0	0	0	0	0	0	2	45	65	65	破損		
				⑤-27	7,407	0	0	0	0	0	0	0	0	2	破損					
		6 号 配合	有	⑥-9	7,843	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				⑥-20	7,579	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				⑥-21	7,646	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	B (スリ-)	5 号 配合	有	⑤-15	7,581	0	0	0	5	5	5	5	5	5	5	16	114	破損		
				⑤-32	7,452	0	0	0	0	0	0	0	0	62	破損					
				⑤-33	7,643	0	0	0	0	9	9	9	9	9	破損					

資表-2.4 α -2:水中凍結融解試験での一次共振周波数 (H11)

(単位: Hz)

凍結融解 条件	充填材	配合	振動	供試体 番号	サ イ ク ル 数																				
					0	1	2	3	4	6	8	10	12	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90	
水中 24h (-18~+5)	無し	5号 配合	有	⑤-2	1,990	1,845	1,820	1,790	1,778	1,748	1,383	1,288	1,134	1,110	989	934	894	940	784	788	902	865	破損		
				⑤-18	1,890	1,743	1,730	1,729	1,594	1,141	1,086	1,128	1,055	1,116	1,089	947	破損								
				⑤-19	1,875	1,758	1,567	1,562	1,152	1,090	1,110	861	破損												
			無	⑤-105	1,876	1,872	1,861	1,842	1,795	1,711	1,571	1,414	1,329	1,109	1,090	1,028	962	870	734	730	914	破損			
				⑤-106	1,966	1,944	1,934	1,927	1,917	1,883	1,670	1,319	997	993	1,019	916	915	723	767	884	破損				
		6号 配合	有	⑥-2	2,008	2,006	2,003	2,002	2,006	2,007	2,003	2,013	2,011	2,012	2,006	2,010	2,007	1,964	1,960	1,895	1,874	1,672	1,455	1,162	
				⑥-12	1,966	1,963	1,970	1,979	1,973	1,973	1,963	1,976	1,976	1,976	1,973	1,974	1,955	1,834	1,722	1,649	1,458	1,247	1,100	808	
				⑥-13	1,939	1,938	1,936	1,933	1,934	1,924	1,931	1,943	1,896	1,917	1,824	1,820	1,811	1,524	1,447	1,312	1,171	1,042	984	861	
		A (粉体)	5号 配合	有	⑤-8	1,809	1,816	1,802	1,867	1,811	1,800	1,679	1,630	1,565	1,366	1,316	1,012	952	862	1,005	960	975	950	952	1,019
					⑤-24	1,816	1,824	1,813	1,869	1,701	1,436	1,472	1,462	1,378	1,134	1,063	986	924	954	971	破損				
	⑤-25				1,776	1,814	1,812	1,745	1,692	1,664	1,376	1,445	1,388	1,158	1,077	800	1,007	952	991	破損					
	無			⑤-111	1,823	1,826	1,851	1,812	1,807	1,702	1,367	1,403	1,203	890	976	948	930	919	破損						
				⑤-112	1,772	1,779	1,810	1,814	1,804	1,564	1,349	1,342	820	901	923	859	破損								
	6号 配合		有	⑥-8	1,940	1,949	1,955	1,980	1,990	2,002	2,005	2,012	2,012	1,944	1,970	1,920	1,887	1,745	1,728	1,383	破損				
				⑥-18	1,842	1,826	1,849	1,854	1,870	1,890	1,920	1,922	1,931	1,934	1,726	1,721	1,684	1,636	1,487	1,238	1,238	1,029	993	1,005	
				⑥-19	1,862	1,916	1,925	1,926	1,936	1,947	1,950	1,957	1,960	1,974	1,972	1,808	1,760	1,687	1,645	1,484	1,484	1,323	1,169	1,052	
	B (スリ-)	5号 配合	有	⑤-14	1,889	1,884	1,881	1,867	1,866	1,858	1,805	1,698	1,392	1,254	1,237	1,131	1,125	破損							
				⑤-30	1,829	1,839	1,841	1,843	1,842	1,803	1,610	1,688	1,497	1,176	1,068	1,123	1,116	915	729	破損					
				⑤-31	1,868	1,844	1,855	1,629	1,510	1,501	1,342	1,151	1,099	1,092	1,021	1,139	破損								

資表－ 2.5 α -2:水中凍結融解試験での損失質量 (H11)

(単位: g)

凍結融解 条件	充填材	配合	振動	供試体 番号	試験前 質量(g)	サイクル数																		
						1	2	3	4	6	8	10	12	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90
水中 24h (-18~+5)	無し	5号 配合	有	⑤-2	7,754	0	0	0	0	0	0	9	9	9	34	259	259	425	447	463	463	559	破損	
				⑤-18	7,443	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	破損								
				⑤-19	7,499	0	0	0	0	0	9	9	破損											
		無	無	⑤-105	7,395	0	0	9	9	19	19	19	24	24	24	24	48	53	95	118	209	破損		
				⑤-106	7,850	0	0	0	9	9	9	9	25	30	31	51	51	136	195	416	破損			
		6号 配合	有	⑥-2	7,632	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	8	8	8
	⑥-12			7,630	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	5	5	
	⑥-13			7,669	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	
	A (粉体)	5号 配合	有	⑤-8	7,556	0	0	0	0	0	0	0	18	18	37	49	49	49	137	466	546	595	770	780
				⑤-24	7,592	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	14	14	14	14	破損				
				⑤-25	7,553	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	18	25	破損				
		無	無	⑤-111	7,608	0	0	0	0	0	22	22	22	22	22	31	31	44	破損					
				⑤-112	7,477	0	0	0	0	0	0	0	0	2	111	201	破損							
		6号 配合	有	⑥-8	7,836	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	破損			
				⑥-18	7,696	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	6	6	6	6
				⑥-19	7,696	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		B (スリ-)	5号 配合	有	⑤-14	7,637	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	13	13	破損					
	⑤-30				7,412	0	0	0	0	0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	破損				
⑤-31	7,573				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	破損								

資表-2.6 α -3:水中凍結融解試験での一次共振周波数 (H11)

(単位: Hz)

凍結融解 条件	充填材	配合	振動	供試体 番号	サイクル数														
					0	1	2	3	4	6	8	10	12	15	20	25	30	35	
水中 24h (-5~+5)	無し	4号 配合	有	④-1	1.917	1.938	1.936	1.946	1.932	1.899	1.891	1.472	1.302	1.177	1.159	1.135	1.019	1.004	
				④-2	1.841	1.876	1.873	1.893	1.831	1.845	1.804	1.714	1.693	1.618	1.361	1.150	1.048	1.028	
				④-3	1.787	1.814	1.810	1.757	1.716	1.699	1.691	1.400	1.562	1.454	1.240	1.240	1.009	1.018	
		5号 配合	有	⑤-1	1.959	1.951	1.954	1.873	1.869	1.665	1.470	1.370	1.270	1.264	1.008	904	992	971	
				⑤-16	1.766	1.789	1.779	1.775	1.701	1.580	1.433	1.295	1.227	1.117	963	786	987	1.006	
				⑤-17	1.903	1.918	1.919	1.922	1.913	1.925	1.903	1.762	1.347	1.450	1.385	1.282	1.030	987	
			無	⑤-103	1.888	1.892	1.895	1.857	1.855	1.690	1.664	1.624	1.620	1.619	1.596	1.320	1.150	1.109	
				⑤-104	1.931	1.948	1.950	1.934	1.928	1.916	1.895	1.865	1.822	1.774	1.636	1.189	1.143	1.207	
		6号 配合	有	⑥-1	2.029	2.042	2.043	2.049	2.047	2.055	2.057	2.055	2.020	2.021	2.030	1.893	1.812	1.722	
				⑥-10	1.958	1.983	1.979	1.980	1.985	1.979	1.988	1.987	1.978	1.980	1.880	1.843	1.853	1.864	
				⑥-11	1.942	1.957	1.959	1.961	1.970	1.972	1.976	1.967	1.978	1.973	1.923	1.934	1.945	1.929	
	A (粉体)	4号 配合	有	④-7	1.995	2.009	2.018	2.020	2.019	2.021	2.010	2.013	2.020	2.012	2.001	2.006	2.010	2.096	
				④-8	1.997	1.916	1.903	1.828	1.788	1.809	1.806	1.740	1.662	1.682	1.593	1.402	1.282	1.285	
				④-9	1.786	1.821	1.825	1.854	1.843	1.845	1.822	1.829	1.828	1.816	1.768	1.765	1.745	1.727	
		5号 配合	有	⑤-7	1.984	1.940	1.935	1.954	1.953	1.750	1.642	1.584	1.478	1.462	1.439	1.386	1.194	1.002	
				⑤-22	1.752	1.802	1.809	1.817	1.813	1.814	1.628	1.598	1.302	1.313	1.307	1.001	978	破損	
				⑤-23	1.812	1.818	1.812	1.865	1.876	1.658	1.507	1.440	1.279	1.327	1.100	1.159	1.129	1.099	
			無	⑤-109	1.731	1.819	1.813	1.816	1.841	1.822	1.818	1.670	1.641	1.630	1.495	1.475	1.288	1.121	
				⑤-110	1.855	1.925	1.929	1.940	1.951	1.913	1.905	1.898	1.859	1.707	1.651	1.563	1.333	1.243	
		6号 配合	有	⑥-7	1.889	1.906	1.928	1.943	1.969	1.987	1.976	1.982	2.006	2.001	1.993	2.000	1.998	2.002	
				⑥-16	1.841	1.881	1.894	1.906	1.930	1.915	1.936	1.936	1.957	1.959	1.961	1.691	1.474	1.236	
				⑥-17	1.927	1.941	1.971	1.980	1.976	1.981	1.995	1.994	1.990	2.004	2.009	2.025	2.020	2.023	
		B (スリ-)	4号 配合	有	④-13	1.986	2.016	2.030	2.025	2.027	2.014	1.959	1.849	1.750	1.632	1.417	1.176	1.152	1.055
					④-14	1.825	1.869	1.867	1.863	1.825	1.726	1.676	1.560	1.319	1.247	1.135	1.077	1.090	1.009
					④-15	1.794	1.815	1.807	1.748	1.704	1.647	1.580	1.516	1.363	1.438	1.368	1.095	1.092	998
			5号 配合	有	⑤-13	1.813	1.865	1.848	1.815	1.740	1.474	1.304	1.299	1.273	1.156	1.138	1.056	1.072	1.014
					⑤-28	1.812	1.815	1.814	1.820	1.837	1.796	1.785	1.719	1.529	1.566	1.314	996	995	984
					⑤-29	1.819	1.782	1.775	1.785	1.783	1.645	1.386	1.286	1.282	1.289	1.255	1.355	1.183	1.129

(単位: Hz)

凍結融解 条件	充填材	配合	振動	供試体 番号	サ イ ク ル 数													
					40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	170	200
水中 24h (-5~+5)	無し	4号 配合	有	④-1	922	913	999	938	1,018	982	1,021	958	930	954	975	破損		
				④-2	987	1,005	981	917	967	942	986	破損						
				④-3	992	1,010	1,005	1,012	1,026	972	1,024	999	968	破損				
		5号 配合	有	⑤-1	1,001	991	破損											
				⑤-16	976	977	破損											
				⑤-17	998	1,000	1,013	破損										
			無	⑤-103	1,004	1,114	942	962	999	破損								
				⑤-104	破損													
		6号 配合	有	⑥-1	1,583	1,522	1,462	1,381	1,278	1,266	1,132	1,138	989	1,138	1,138	894	990	1,017
				⑥-10	1,862	1,846	1,853	1,596	1,306	1,245	1,147	1,157	993	1,157	1,157	破損		
				⑥-11	1,939	1,936	1,939	1,914	1,875	1,848	1,829	1,816	1,756	1,709	1,115	897	942	921
	A (粉体)	4号 配合	有	④-7	2,118	2,106	2,104	2,111	2,116	2,110	2,113	2,084	2,060	2,049	2,031	2,018	1,649	1,598
				④-8	1,211	1,084	997	1,022	1,045	988	1,050	1,045	981	957	961	972	998	998
				④-9	1,722	1,426	981	1,018	1,011	1,001	871	985	944	876	破損			
		5号 配合	有	⑤-7	991	997	破損											
				⑤-22														
				⑤-23	980	1,055	破損											
			無	⑤-109	934	968	912	879	1,005	破損								
				⑤-110	979	985	1,005	破損										
		6号 配合	有	⑥-7	2,001	2,007	1,996	2,006	2,007	2,005	2,004	2,000	2,003	2,001	2,004	2,003	1,987	1,938
				⑥-16	1,301	1,175	1,113	1,001	1,000	1,014	997	988	988	942	880	1,008	1,033	破損
				⑥-17	2,033	2,028	2,011	1,768	1,806	1,407	1,174	992	破損					
	B (スリ-)	4号 配合	有	④-13	1,026	1,027	996	1,075	1,041	1,016	1,044	962	889	923	908	989	936	980
				④-14	988	910	988	1,018	1,019	955	966	995	985	863	979	932	破損	
				④-15	979	990	1,007	994	998	969	1,019	980	972	954	965	1,012	934	958
		5号 配合	有	⑤-13	979	破損												
				⑤-28	764	破損												
				⑤-29	1,192	破損												

資表-2.7 α-3:水中凍結融解試験での損失質量 (H11)

(単位: g)

凍結融解 条件	充填材	配合	振動	供試体 番号	試験前 質量(g)	サイクル数												
						1	2	3	4	6	8	10	12	15	20	25	30	35
水中 24h (-5~+5)	無し	4号 配合	有	④-1	7.343	0	20	45	45	45	45	236	236	249	262	403	403	403
				④-2	7.515	0	0	0	1	51	51	51	62	62	224	463	501	501
				④-3	7.217	0	0	0	0	0	0	136	208	265	265	265	265	265
		5号 配合	有	⑤-1	7.536	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9
				⑤-16	7.269	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	10	10
				⑤-17	7.593	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4
			無	⑤-103	7.335	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	34	41	41
				⑤-104	7.438	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	31
		6号 配合	有	⑥-1	7.830	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
				⑥-10	7.622	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
				⑥-11	7.665	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	A (粉体)	4号 配合	有	④-7	7.662	0	0	42	42	42	77	102	139	139	188	403	555	680
				④-8	7.492	0	0	13	13	13	35	165	179	179	179	179	310	310
				④-9	7.424	0	0	0	0	0	0	42	42	55	163	196	196	188
		5号 配合	有	⑤-7	7.679	0	0	0	0	0	0	0	0	19	48	52	52	52
				⑤-22	7.440	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9	15	23	
				⑤-23	7.589	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	11
			無	⑤-109	7.500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	65	65	65
				⑤-110	7.865	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9	9	32	44
		6号 配合	有	⑥-7	7.670	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				⑥-16	7.552	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
				⑥-17	7.841	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	B (スリ-)	4号 配合	有	④-13	7.760	0	0	0	0	0	0	21	197	197	197	253	253	253
				④-14	7.601	0	0	0	0	0	12	12	12	12	649	810	810	810
				④-15	7.355	0	0	0	0	0	0	32	143	143	143	143	143	143
		5号 配合	有	⑤-13	7.096	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				⑤-28	7.298	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				⑤-29	7.285	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	14	14

(単位: g)

凍結融解 条件	充填材	配合	振動	供試体 番号	サイクル数													
					40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	170	200
水中 24h (-5~+5)	無し	4号 配合	有	④-1	403.3	505	521	542	579	579	579	579	595	595	615	破損		
				④-2	501.1	501	501	547	547	812	972	破損						
				④-3	264.5	304	304	304	366	486	602	744	886	破損				
		5号 配合	有	⑤-1	8.9	55	破損											
				⑤-16	9.5	10	破損											
				⑤-17	3.6	4	4	破損										
			無	⑤-103	41.1	45	183	189	210	破損								
				⑤-104														
		6号 配合	有	⑥-1	749.7	750	845	845	845	845	845	845	845	845	860	860	926	926
				⑥-10	-1.0	-1	-1	-1	2	2	2	2	2	2	2	破損		
				⑥-11	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57	54
	A (粉体)	4号 配合	有	④-7	679.9	680	680	680	680	680	680	680	680	680	700	700	627	684
				④-8	323.1	357	382	382	382	506	657	645	617	584	584	654	1151	1440
				④-9	357.7	515	567	559	612	672	675	674	683	666	破損			
		5号 配合	有	⑤-7	51.7	52	破損											
				⑤-22														
				⑤-23	11.3	11	破損											
			無	⑤-109	103.1	103	103	103	157	破損								
				⑤-110	269.8	344	475	破損										
		6号 配合	有	⑥-7	0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	23
				⑥-16	1.0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20	破損	
				⑥-17	0.0	0	0	0	0	0	0	0	破損					
	B (スリ-)	4号 配合	有	④-13	253.0	253	270	270	270	284	403	421	636	648	668	668	737	786
				④-14	810.1	839	865	881	905	970	1035	1056	1111	1252	1252	1270	破損	
				④-15	143.2	478	552	711	920	920	920	955	1038	1038	1078	1144	1261	1281
		5号 配合	有	⑤-13	150.9	破損												
				⑤-28	0.0	破損												
				⑤-29	13.9	破損												

資表-2.8 β : 気中凍結融解試験での一次共振周波数 (H11)

(単位: Hz)

凍結融解 条件	充填材	配合	振動	供試体 番号	サイクル数										
					0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
気中 4 h (-18~+5)	無し	5号 配合	無	⑤-101	1,984	1,989	1,988	1,989	1,985	1,998	1,997	1,997	1,994	1,998	2,000
				⑤-102	1,912	1,915	1,915	1,918	1,920	1,926	1,928	1,924	1,928	1,930	1,927
	A (粉体)	4号 配合	有	④-4	1,961	1,941	1,941	1,954	1,958	1,988	1,987	1,990	1,983	1,985	1,987
				④-5	1,872	1,875	1,871	1,896	1,889	1,886	1,905	1,912	1,907	1,897	1,881
				④-6	1,751	1,760	1,759	1,764	1,766	1,798	1,774	1,768	1,772	1,804	1,764
		5号 配合	有	⑤-4	1,820	1,810	1,813	1,809	1,815	1,858	1,880	1,890	1,875	1,873	1,869
				⑤-5	1,859	1,859	1,862	1,883	1,881	1,908	1,902	1,902	1,892	1,894	1,892
				⑤-6	1,751	1,754	1,752	1,754	1,764	1,742	1,748	1,785	1,797	1,802	1,805
			無	⑤-107	1,804	1,806	1,806	1,801	1,808	1,805	1,802	1,806	1,807	1,816	1,814
				⑤-108	1,907	1,901	1,908	1,928	1,930	1,916	1,926	1,928	1,934	1,931	1,935
		6号 配合	有	⑥-4	1,950	1,950	1,955	1,957	1,961	1,962	1,970	1,971	1,980	1,216	1,110
				⑥-5	1,895	1,903	1,903	1,909	1,914	1,923	1,931	1,932	1,935	1,935	1,938
				⑥-6	1,952	1,964	1,966	1,981	1,976	1,990	1,997	1,998	2,000	2,002	2,004
	B (スリ-)	4号 配合	有	④-10	1,953	1,956	1,954	1,939	1,953	1,951	1,949	1,941	1,955	1,954	1,951
				④-11	1,989	1,987	1,987	1,982	1,986	1,992	1,988	1,985	1,990	1,996	1,991
				④-12	1,731	1,727	1,722	1,724	1,730	1,734	1,722	1,720	1,723	1,730	1,727
		5号 配合	有	⑤-10	1,927	1,941	1,941	1,940	1,941	1,939	1,940	1,938	1,947	1,946	1,945
				⑤-11	2,060	2,062	2,056	2,049	2,053	2,048	2,051	2,048	2,053	2,059	2,056
				⑤-12	1,868	1,872	1,877	1,869	1,877	1,862	1,874	1,878	1,885	1,883	1,882

(単位: Hz)

凍結融解 条件	充填材	配合	振動	供試体 番号	一次共鳴振動数 (Hz)										
					300	330	360	390	420	450	480	510	540	570	600
気中 4 h (-18~+5)	無し	5号 配合	無	⑤-101	1,857	1,597	1,519	1,454	1,530	1,558	1,575	1,558	1,384	1,419	1,400
				⑤-102	1,795	1,544	1,468	1,388	1,403	1,437	1,442	1,417	1,360	1,242	1,231
	A (粉体)	4号 配合	有	④-4	1,798	1,759	1,764	1,732	1,790	1,785	1,650	1,583	1,495	1,544	1,552
				④-5	1,706	1,664	1,645	1,591	1,578	1,608	1,471	1,165	1,186	1,242	1,213
				④-6	1,505	1,464	1,453	1,376	1,375	1,372	1,314	1,184	1,206	1,132	1,049
		5号 配合	有	⑤-4	1,811	1,729	1,758	1,741	1,729	1,613	1,379	1,337	1,281	1,321	1,145
				⑤-5	1,820	1,786	1,767	1,784	1,804	1,582	1,619	1,309	1,288	1,301	1,345
				⑤-6	1,722	1,703	1,673	1,674	1,659	1,665	1,481	1,213	1,207	1,245	1,007
			無	⑤-107	1,675	1,587	1,591	1,605	1,642	1,685	1,670	1,671	1,670	1,640	1,470
				⑤-108	1,864	1,779	1,758	1,791	1,805	1,821	1,819	1,826	1,818	1,812	1,753
		6号 配合	有	⑥-5	1,871	1,816	1,812	1,810	1,812	1,810	1,799	1,787	1,629	1,757	1,699
				⑥-6	1,952	1,876	1,883	1,880	1,874	1,858	1,860	1,859	1,850	1,810	1,803
	B (スリ-)	4号 配合	有	④-10	1,775	1,680	1,655	1,628	1,709	1,719	1,665	1,521	1,398	1,380	1,364
				④-11	1,838	1,731	1,702	1,714	1,730	1,777	1,746	1,649	1,640	1,631	1,638
				④-12	1,536	1,535	1,386	1,365	1,366	1,362	1,348	1,277	1,303	1,219	1,212
		5号 配合	有	⑤-10	1,792	1,565	1,521	1,482	1,468	1,430	1,451	1,314	1,251	1,197	1,126
				⑤-11	1,917	1,745	1,675	1,660	1,648	1,724	1,641	1,674	1,535	1,592	1,579
				⑤-12	1,744	1,596	1,517	1,468	1,495	1,407	1,362	1,387	1,370	1,369	1,206

資表- 2.9 β : 気中凍結融解試験での供試体質量 (H11)

(単位: g)

凍結融解 条件	充填材	配合	振動	供試体 番号	試験前 質量(g)	サイクル数									
						30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
気中 4 h (-18~+5)	無し	5号 配合	無	⑤-101	7,616	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				⑤-102	7,482	8	16	23	31	39	47	55	62	70	86
	A (粉体)	4号 配合	有	④-4	7,454	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				④-5	7,688	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				④-6	7,053	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		5号 配合	有	⑤-4	7,662	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				⑤-5	7,492	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				⑤-6	7,424	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			無	⑤-107	7,396	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				⑤-108	7,768	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		6号 配合	有	⑥-4	7,760	0	0	0	0	0	0	0	0		
				⑥-5	7,482	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				⑥-6	7,903	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	B (スリ-)	4号 配合	有	④-10	7,491	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				④-11	7,670	0	0	0	0	0	0	0	0	21	21
				④-12	7,230	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		5号 配合	有	⑤-10	7,551	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				⑤-11	7,750	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				⑤-12	7,552	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(単位: g)

凍結融解 条件	充填材	配合	振動	供試体 番号	試験前 質量(g)	サイクル数									
						330	360	390	420	450	480	510	540	570	600
気中 4 h (-18~+5)	無し	5号 配合	無	⑤-101	7,616	0	0	0	0	12	12	12	12	12	12
				⑤-102	7,482	86	92	104	104	104	104	104	104	104	104
	A (粉体)	4号 配合	有	④-4	7,454	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				④-5	7,688	0	0	0	0	0	0	92	131	131	131
				④-6	7,053	0	0	0	34	34	34	34	34	34	162
		5号 配合	有	⑤-4	7,662	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
				⑤-5	7,492	0	0	0	0	0	0	0	30	30	30
				⑤-6	7,424	9	9	9	9	9	9	9	9	25	25
			無	⑤-107	7,396	0	0	0	0	0	17	35	35	35	43
				⑤-108	7,768	5	5	5	5	5	19	19	19	19	29
		6号 配合	有	⑥-5	7,482	0	0	0	4	9	9	9	9	9	9
				⑥-6	7,903	0	0	0	0	0	0	0	2	8	8
	B (スリ-)	4号 配合	有	④-10	7,491	0	0	0	40	40	40	40	40	40	40
				④-11	7,670	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
				④-12	7,230	13	13	13	24	24	42	42	42	42	42
		5号 配合	有	⑤-10	7,551	0	0	3	5	5	5	5	5	5	5
				⑤-11	7,750	0	0	0	0	0	0	13	13	13	17
				⑤-12	7,552	0	0	27	27	27	27	27	33	42	42

3. 平成 12 年度の実験結果

資表－ 3.1 凍結融解試験用の圧縮強度試験結果 (H12)

供試体 No.	キャッピング量 (g)		気中質量 (g)	水中質量 (g)	実容積 (cm ³)	供試体直径 (cm)			供試体高さ (cm)			かさ容積 (cm ³)	空隙率		破壊荷重 (kN)	圧縮強度	
	下部	上部				①	②	平均値	①	②	平均値		(%)	平均値		(N/mm ²)	平均値
⑤－1	500	530	10,626	6,342	4,283	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,288	19.0	18.4	397	22.5	21.9
⑤－2	500	490	10,701	6,370	4,330	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,290	18.1		374	21.2	
⑤－3	500	580	10,726	6,368	4,359	15.0	15.0	15.0	30.1	30.0	30.0	5,313	18.0		390	22.1	

資表－ 3.2 凍結融解試験での一次共振周波数 (H12)

(単位: Hz)

供試体 の種類	供試体 番号	測線	サイクル数										
			0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
N 供試体	①	a	2,123	2,046	2,072	2,131	2,135	2,136	2,134	2,141	2,146	2,158	2,156
		b	2,124	2,045	2,069	2,130	2,137	2,135	2,134	2,140	2,143	2,155	2,157
	②	a	2,134	2,095	2,130	2,140	2,144	2,141	2,139	2,157	2,157	2,164	2,165
		b	2,139	2,095	2,132	2,144	2,145	2,139	2,142	2,152	2,155	2,167	2,164
	③	a	2,176	2,130	2,164	2,174	2,184	2,065	2,176	2,186	2,192	2,192	2,203
		b	2,180	2,131	2,164	2,174	2,180	2,033	2,183	2,189	2,198	2,209	2,201
F 供試体	④	a	2,129	2,032	2,035	2,076	2,073	2,091	2,110	2,117	2,124	2,129	2,128
		b	2,135	2,041	2,052	2,078	2,077	2,092	2,110	2,109	2,122	2,131	2,136
	⑤	a	2,157	1,947	1,983	1,990	2,005	2,015	2,039	2,039	2,043	2,054	2,057
		b	2,159	1,946	1,980	1,991	1,998	2,015	2,040	2,036	2,051	2,056	2,063
	⑥	a	2,170	1,960	2,100	2,141	2,106	2,148	2,158	2,156	2,166	2,185	2,184
		b	2,178	1,985	2,093	2,133	2,140	2,145	2,155	2,159	2,171	2,186	2,179

資表-3.3 乾湿繰り返し試験用の圧縮強度試験結 (H12)

配合	供試体 No.	キャッピング量(g)		空中質量 (g)	水中質量 (g)	実容積 (cm ³)	供試体直径(cm)			供試体高さ(cm)			かさ容積 (cm ³)	空隙率 (%)	試験時期 ()内は材齢	破壊荷重 (kN)	圧縮強度	
		下部	上部				①	②	平均	①	②	平均					(N/mm ²)	平均値
4号 配合	④-1	500	540	10,257	6,152	4,105	14.9	15.0	14.9	30.0	30.0	30.0	5,243	21.7	0サイクル (28日)	270	15.5	16.3
	④-2	500	540	10,334	6,174	4,160	15.0	15.0	15.0	30.1	30.0	30.0	5,297	21.5		304	17.2	
	④-3	500	510	10,105	6,062	4,043	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,293	23.6		287	16.3	
	④-4	500	470	10,236	6,132	4,103	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,283	22.3	21サイクル (112日)	219	12.4	12.1
	④-5	500	540	10,106	6,075	4,031	14.9	15.1	15.0	30.0	30.0	30.0	5,305	24.0		207	11.7	
	④-6	500	550	10,323	6,203	4,120	15.0	15.0	15.0	30.0	30.1	30.1	5,295	22.2	30サイクル (141日)	215	12.2	9.3
	④-7	500	490	10,219	6,132	4,086	15.0	15.0	15.0	30.1	30.1	30.1	5,315	23.1		155	8.8	
	④-8	500	560	10,207	6,143	4,064	15.1	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,310	23.5		164	9.3	
	④-9	500	460	10,190	6,129	4,061	15.0	15.0	15.0	30.1	30.1	30.1	5,305	23.4		176	10.0	
5号 配合	⑤-1	500	480	10,704	6,372	4,332	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,274	17.9	0サイクル (28日)	332	18.9	18.0
	⑤-2	500	440	10,621	6,359	4,262	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,299	19.6		315	17.9	
	⑤-3	500	420	10,597	6,356	4,241	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,282	19.7		303	17.2	
	⑤-4	500	420	10,694	6,331	4,363	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,308	17.8	21サイクル (112日)	248	14.0	14.2
	⑤-5	500	500	10,631	6,356	4,275	15.0	15.0	15.0	30.2	30.2	30.2	5,315	19.6		238	13.5	
	⑤-6	500	370	10,691	6,415	4,276	15.0	15.0	15.0	30.1	30.1	30.1	5,313	19.5	30サイクル (141日)	267	15.1	12.9
	⑤-7	500	460	10,572	6,333	4,239	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,290	19.9		235	13.3	
	⑤-8	500	390	10,506	6,307	4,199	15.0	15.0	15.0	29.9	29.9	29.9	5,289	20.6		240	13.6	
	⑤-9	500	410	10,531	6,323	4,207	15.0	15.0	15.0	30.0	30.1	30.0	5,327	21.0		209	11.8	
6号 配合	⑥-1	500	470	10,556	6,270	4,286	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,296	19.1	0サイクル (28日)	375	21.2	20.9
	⑥-2	500	380	10,504	6,230	4,274	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,282	19.1		351	19.9	
	⑥-3	500	290	10,803	6,397	4,406	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,288	16.7		377	21.4	
	⑥-4	500	320	10,696	6,369	4,327	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,285	18.1	21サイクル (112日)	357	20.3	21.6
	⑥-5	500	420	10,735	6,360	4,375	15.0	14.9	14.9	30.0	29.9	29.9	5,248	16.6		422	24.1	
	⑥-6	500	420	10,771	6,379	4,392	15.0	14.9	14.9	29.9	30.0	29.9	5,249	16.3	30サイクル (141日)	356	20.3	19.7
	⑥-7	500	420	10,656	6,300	4,356	15.0	15.0	15.0	30.0	30.0	30.0	5,301	17.8		311	17.6	
	⑥-8	500	430	10,766	6,354	4,411	15.0	15.1	15.0	30.0	30.0	30.0	5,327	17.2		343	19.3	
	⑥-9	500	380	10,858	6,409	4,449	15.0	15.0	15.0	29.9	29.9	29.9	5,272	15.6		388	22.0	

備考 実容積はキャッピング部も含む

資表－3.4 乾湿繰り返し試験での一次共振周波数 (H12)

(単位：Hz)

供試体 番号	サイクル数										
	0	2	4	6	8	10	13	17	21	25	30
④－1	1.914	1.889	1.878	1.895	1.882	1.858	1.836	1.778	1.658	1.492	1.392
④－2	1.813	1.772	1.968	1.782	1.772	1.740	1.706	1.692	1.642	1.562	1.427
④－3	1.995	1.964	1.960	1.974	1.962	1.939	1.916	1.866	1.751	1.615	1.424
⑤－1	2.033	2.010	2.013	2.029	2.020	2.016	2.004	1.982	1.922	1.816	1.594
⑤－2	2.036	2.013	2.020	2.022	2.022	2.013	2.002	1.971	1.913	1.818	1.602
⑤－3	2.011	1.999	1.993	2.000	1.996	1.993	1.991	1.953	1.893	1.774	1.551
⑥－1	2.020	2.000	2.004	2.018	2.020	2.010	2.018	2.019	2.008	1.972	1.929
⑥－2	2.051	2.035	2.041	2.037	2.054	2.052	2.049	2.049	2.035	2.013	1.888
⑥－3	1.869	1.810	1.815	1.878	1.877	1.870	1.872	1.868	1.845	1.792	1.707

資表－3.5 気乾放置試験での一次共振周波数 (H12)

(単位：Hz)

供試体 番号	経過日数 (日)										
	0	7	14	21	28	38	49	63	80	94	112
④－4	1.873	1.843	1.848	1.840	1.839	1.819	1.821	1.807	1.792	1.759	1.735
④－5	1.972	1.943	1.943	1.944	1.940	1.931	1.922	1.902	1.883	1.847	1.833
④－6	1.824	1.784	1.794	1.787	1.782	1.778	1.765	1.743	1.719	1.687	1.691
⑤－4	2.025	2.003	2.002	2.001	2.001	1.995	1.992	1.974	1.958	1.934	1.797
⑤－5	2.013	1.987	1.988	1.987	1.985	1.980	1.981	1.959	1.944	1.922	1.782
⑤－6	1.909	1.889	1.886	1.888	1.887	1.883	1.872	1.857	1.843	1.824	1.806
⑥－4	1.992	1.984	1.985	1.989	1.991	1.990	1.985	1.974	1.958	1.933	1.879
⑥－5	2.025	2.015	2.023	2.027	2.028	2.026	2.026	2.014	2.003	1.978	1.960
⑥－6	1.992	1.989	1.991	1.993	1.995	1.993	1.990	1.979	1.962	1.943	1.924

4. セメントの試験成績表

資表－ 4.1 平成 10 年度のセメント試験成績表

セメント試験成績表

平成 10 年 8 月 4 日

秩父小野田株式会社

品 質		種 類	高炉セメントB種	JIS R 5211
			J I S 規 格 値	試 験 成 績
密 度		g/cm ³	—	3.04
比表面積		cm ² /g	3000 以上	3760
凝 結	水 量	%	—	29.2
	始 発	h-min	60min 以上	3-10
	終 結	h-min	10h 以下	4-50
安 定 性			良	良
圧縮強さ N/mm ²	3 d		10.0 以上	21.3
	7 d		17.5 以上	34.6
	28 d		42.5 以上	59.2
酸化マグネシウム		%	6.0 以下	3.6
三酸化硫黄		%	4.0 以下	2.1
強熱減量		%	3.0 以下	1.8
塩化物イオン		%	—	0.004
備考				
1. 安定性試験はパット法による。				
建設省 土木研究所				
7 月 28 日 40 袋口				

資表－ 4.2 平成 11年度のセメント試験成績表

(11 年度の実験と 12 年度の凍結融解試験に使用)

セメント試験成績表

平成 11年 7月 29日

太平洋セ



品 質		種 類	高炉セメントB種	JIS R 5211
			J I S 規 格 値	試 験 成 績
密 度		g/cm ³	—	3.04
比表面積		cm ² /g	3000 以上	3720
凝 結	水 量	%	—	28.8
	始 発	h-min	60min 以上	2-50
	終 結	h-min	10h 以下	4-15
安 定 性			良	良
圧縮強さ N/mm ²	3 d		10.0 以上	21.4
	7 d		17.5 以上	34.8
	28 d		42.5 以上	61.5
酸化マグネシウム		%	6.0 以下	3.1
三酸化硫黄		%	4.0 以下	2.0
強熱減量		%	3.0 以下	1.9
塩化物イオン		%	—	0.007
備考				
1. 安定性試験はパット法による。				
建設省 土木研究所				
7月 14日 20袋口				

資表－4.3 平成12年度のセメント試験成績表
(12年度の乾湿繰り返し試験に使用)

セメント試験成績表

平成 12 年 7 月 21 日



種 類		高炉セメントB種		JIS R 5211	
		JIS 規 格 値		試 験 成 績	
品 質					
密 度		g/cm ³		—	3.04
比表面積		cm ² /g		3000 以上	3700
凝 結	水 量	%		—	28.5
	始 発	h-min		60min 以上	2-55
	終 結	h-min		10h 以下	4-20
安 定 性		良		良	
圧縮強さ	3 d		10.0 以上	21.1	
	7 d		17.5 以上	33.1	
	28 d		42.5 以上	58.6	
酸化マグネシウム		%		6.0 以下	3.16
三酸化硫黄		%		4.0 以下	2.20
強熱減量		%		3.0 以下	2.00
塩化物イオン		%		—	0.004
備考					
1. 安定性試験はパット法による。					
2. 化学分析試験は規格本体の分析方法による。					
建設省土木研究所 材料施工部向け					
7月20日 50袋口					