

都市ごみ焼却灰を用いた鉄筋コンクリート材料
の開発に関する研究（中間報告書）

平成12年12月

建設省土木研究所材料施工部
化学研究室・コンクリート研究室
東京都土木技術研究所
麻生セメント（株）
住友大阪セメント（株）
太平洋セメント（株）
日立セメント（株）

Copyright © (2000) 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。

都市ごみ焼却灰を用いた鉄筋コンクリート材料 の開発に関する研究（中間報告書）

建設省土木研究所	材料施工部	部長	苗村 正三
	化学研究室	室長	明嵐 政司
	コンクリート研究室	室長	河野 広隆
	化学研究室	主任研究員	中村 俊彦
元 化学研究室	研究員		寺田 剛
東京都土木技術研究所			関谷 英夫
			鈴木 勲
			穴戸 薫
	麻生セメント(株)		大川 順一
			堤 博文
	住友大阪セメント(株)		小林 茂広
			本田 優
			酒木 哲也
	太平洋セメント(株)		富田 六郎
			福永 俊美
			横山 滋
			田中 敏嗣
			吉本 稔
	日立セメント(株)		木村 正尚
			高橋 一男

要 旨

都市ごみ焼却灰、下水汚泥等の生活廃棄物を主原料として製造される「普通形エコセメント」を鉄筋コンクリート材料として利用する技術を確立するため、建設省土木研究所、東京都土木技術研究所および民間会社4社が平成11年度から13年度の予定で共同研究を進めている。本報告は、平成11年度から平成12年度にかけて実施した研究成果を中間報告として取りまとめたものである。

キーワード：都市ごみ焼却灰、普通形エコセメント、鉄筋コンクリート、コンクリート製品

はじめに

都市ごみ焼却灰や下水汚泥など生活廃棄物は年々増加し、その処分方法や処分場の確保が非常に大きな社会問題となっている。建設省では、平成3年度から平成7年度にかけて実施した総合技術開発プロジェクト「省資源・省エネルギー型国土建設技術の開発」において、省エネルギー型土木工法の開発の一環として、省エネルギー型セメントの利用技術の開発を行った。そこでは、3種類のセメントが検討されており、その内のひとつが都市ごみ焼却灰、下水汚泥等の生活廃棄物を主原料として製造される環境負荷低減型セメント（エコセメント）であった。そこで検討されたエコセメントは、廃棄物に由来した塩化物イオンを0.5%程度含む速硬形のセメントであり、利用用途として無筋コンクリートや地盤改良用固化材が想定されていた。その後、製造技術の進展により、塩化物イオン量を低減し普通ポルトランドセメントに近い性状を有する「普通形エコセメント」の製造が可能となり、鉄筋コンクリートへの適用も視野に入ってきている。

都市ごみ焼却灰、下水汚泥等の生活廃棄物を主原料として製造されるエコセメントを建設資材として積極的に活用することにより、資源循環型社会の構築に寄与できるものと期待される。また、先のプロジェクトにおける試算では、エコセメント製造時のエネルギー消費量は普通ポルトランドセメントのその約90%、CO₂排出量は約50%との結果も得られており、地球温暖化対策としてのCO₂排出量の削減にも有効である。

本共同研究は、これらの生活廃棄物を主原料としたセメントを鉄筋コンクリート材料として利用するための技術を確立すべく、建設省土木研究所、東京都土木技術研究所および民間会社4社（麻生セメント(株)、住友大阪セメント(株)、太平洋セメント(株)、日立セメント(株)）との間で平成11年度から平成13年度までの予定で行われている。本報告書は、平成11年度から平成12年度にかけて実施した研究成果を中間報告として取りまとめたものである。

共同研究参加者名簿

苗村 正三 建設省土木研究所 材料施工部 部長
明嵐 政司 建設省土木研究所 材料施工部 化学研究室長
河野 広隆 建設省土木研究所 材料施工部 コンクリート研究室長
中村 俊彦 建設省土木研究所 材料施工部 化学研究室 主任研究員
寺田 剛 建設省土木研究所 元 材料施工部 化学研究室 研究員 (～H12.3)
関谷 英夫 東京都土木技術研究所 技術部長
土井内 元 元 東京都土木技術研究所 技術部長 (～H12.3)
鈴木 勲 東京都土木技術研究所 技術部 主任研究員
穴戸 薫 東京都土木技術研究所 技術部 主任研究員
大川 順一 麻生セメント(株)中央研究所 常務取締役所長
堤 博文 麻生セメント(株)中央研究所 主任研究員
吉瀬 寛 麻生セメント(株)中央研究所 主任研究員
小林 茂広 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 副所長
本田 優 住友大阪セメント(株)生産技術部 品質保証グループリーダー
酒木 哲也 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 主任研究員
高野 幸男 太平洋セメント(株)中央研究所 テクノロジーマネジメントグループ セネラルマネージャー (～H12.11)
富田 六郎 太平洋セメント(株)中央研究所 第1研究部長
横山 滋 太平洋セメント(株)中央研究所 第1研究部 エコセメントグループ リーダー
田中 敏嗣 太平洋セメント(株)中央研究所 第1研究部 エコセメントグループ 主席研究員
須田 重雄 太平洋セメント(株)元 中央研究所 第1研究部 コンクリート製品グループ リーダー (～H.12.6)
吉本 稔 太平洋セメント(株)中央研究所 第1研究部 コンクリート製品グループ 主任研究員
尾花 博 太平洋セメント(株)ゼロエミッション事業部 担当部長
福永 俊美 太平洋セメント(株)ゼロエミッション事業部 事業推進グループ リーダー
月崎 信和 太平洋セメント(株)ゼロエミッション事業部 事業推進グループ リーダー (～H12.8)
羽山 雅仁 太平洋セメント(株)技術営業部 技術グループ サブリーダー
宇田川延範 太平洋セメント(株)ゼロエミッション事業部 リサイクルグループ リーダー (～H12.8)
熊澤 憲一 太平洋セメント(株)ゼロエミッション事業部 事業推進グループ チームサブリーダー (～H12.8)
木村 正尚 日立セメント(株)研究開発部 部長
高橋 一男 日立セメント(株)研究開発部 技術サービス課 課長
椎野 宏明 日立セメント(株)研究開発部 研究開発課 課長

委員会名簿

委員長	苗村 正三	建設省土木研究所 材料施工部 部長
委員	明嵐 政司	建設省土木研究所 材料施工部 化学研究室長
	河野 広隆	建設省土木研究所 材料施工部 コンクリート研究室長
	関谷 英夫	東京都土木技術研究所 技術部長
	土井内 元	元 東京都土木技術研究所 技術部長 (～H12.3)
	鹿又 和夫	東京都建設局 総務部 技術管理課長
	山崎 伸郎	元 東京都建設局 総務部 技術管理課長 (～H12.7)
	山根 修一	東京都環境局 廃棄物対策部 副参事
	元吉 勇	元 東京都清掃局 環境指導部 市町村技術指導担当課長 (～H12.3)
	島田 光正	東京都三多摩地域廃棄物広域処分組合 参事
	片岡 正造	元 東京都三多摩地域廃棄物広域処分組合 参事 (～H12.7)
	大川 順一	麻生セメント(株)中央研究所 常務取締役所長
	堤 博文	麻生セメント(株)中央研究所 主任研究員
	小林 茂広	住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 副所長
	酒木 哲也	住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 主任研究員
	富田 六郎	太平洋セメント(株)中央研究所 第1研究部長
	高野 幸男	太平洋セメント(株)中央研究所 テクノロジーマネジメントグループ センtralマネージャー (～H12.11)
	横山 滋	太平洋セメント(株)中央研究所 第1研究部 エコセメントグループリーダー
	木村 正尚	日立セメント(株)研究開発部 部長
オブザーバー	小林 一夫	埼玉県土木部 技術管理室 主査
	柳 四郎	元 埼玉県土木部 建設管理課 技術管理担当主査 (～H12.3)
	奥津喜久雄	神奈川県環境農政部 廃棄物対策課 広域化推進班 主査
	畑澤 智	横浜市環境事業局 施設部 廃棄物資源開発室長
	井原 岩夫	千葉県環境生活部 一般廃棄物課 副課長
	植村 清美	千葉県土木部 技術管理指導課 副主幹
	重原 俊朗	千葉県土木部 技術管理指導課 副主幹
事務局	鷹取 勲	(財)土木研究センター 研究開発四部長
	坂本 浩行	元 (財)土木研究センター 調査試験二部長 (～H12.3)
	金井 浩一	(財)土木研究センター 研究開発四部

幹事会名簿

幹事長	明嵐 政司	建設省土木研究所 材料施工部 化学研究室長
幹事	河野 広隆	建設省土木研究所 材料施工部 コンクリート研究室長
	中村 俊彦	建設省土木研究所 材料施工部 化学研究室 主任研究員
	寺田 剛	建設省土木研究所 元 材料施工部 化学研究室 研究員 (～H12. 3)
	鈴木 勲	東京都土木技術研究所 技術部 主任研究員
	穴戸 薫	東京都土木技術研究所 技術部 主任研究員
	堤 博文	麻生セメント㈱中央研究所 主任研究員
	吉瀬 寛	麻生セメント㈱中央研究所 主任研究員
	本田 優	住友大阪セメント㈱生産技術部 品質保証グループリーダー
	酒木 哲也	住友大阪セメント㈱セメント・コンクリート研究所 主任研究員
	高野 幸男	太平洋セメント㈱中央研究所 テクノロジーマネジメントグループ セネラルマネージャー (～H12. 11)
	横山 滋	太平洋セメント㈱中央研究所 第1研究部 エコセメントグループ リーダー
	田中 敏嗣	太平洋セメント㈱中央研究所 第1研究部 エコセメントグループ 主席研究員
	下山 善秀	太平洋セメント㈱中央研究所 第1研究部 コンクリート製品グループ リーダー
	須田 重雄	太平洋セメント㈱元中央研究所 第1研究部 コンクリート製品グループ リーダー (～H. 12. 6)
	尾花 博	太平洋セメント㈱セメントロエミッション事業部 担当部長
	福永 俊美	太平洋セメント㈱セメントロエミッション事業部 事業推進グループ リーダー
	月崎 信和	太平洋セメント㈱セメントロエミッション事業部 事業推進グループ リーダー (～H12. 8)
	羽山 雅仁	太平洋セメント㈱技術営業部 技術グループ サブリーダー
	宇田川延範	太平洋セメント㈱セメントロエミッション事業部 リサイクルグループ リーダー (～H12. 8)
	熊澤 憲一	太平洋セメント㈱セメントロエミッション事業部 事業推進グループ チームサブリーダー (～H12. 8)
	高橋 一男	日立セメント㈱研究開発部 技術サービス課 課長
	椎野 宏明	日立セメント㈱研究開発部 研究開発課 課長
オブザーバー	小林 一夫	埼玉県土木部 技術管理室 主査
	柳 四郎	元 埼玉県土木部 建設管理課 技術管理担当主査 (～H12. 3)
	野口 瑞子	埼玉県土木部 技術管理室 技師
	奥津喜久雄	神奈川県環境農政部 廃棄物対策課 広域化推進班 主査
	畑澤 智	横浜市環境事業局 施設部 廃棄物資源開発室長
	井原 岩夫	千葉県環境生活部 一般廃棄物課 副課長
	植村 清美	千葉県土木部 技術管理指導課 副主幹
	重原 俊朗	千葉県土木部 技術管理指導課 副主幹
事務局	鷹取 勲	(財) 土木研究センター 研究開発四部長
	坂本 浩行	元 (財) 土木研究センター 調査試験二部長 (～H12. 3)
	金井 浩一	(財) 土木研究センター 研究開発四部

目 次

1	研究概要	1
1.1	研究目的	1
1.2	本研究で対象とする環境負荷低減型セメントの定義	1
1.3	研究計画	2
2	普通形エコセメントのレディーミクストコンクリートへの適用性に関する研究	3
2.1	生コンクリート出荷量と普通形エコセメントの用途－東京都－	3
2.1.1	普通形エコセメントの生産量	3
2.1.2	普通形エコセメントの用途と需要見通し	3
2.2	普通形エコセメントを用いたコンクリートの特性	4
2.2.1	実験概要	4
2.2.2	フレッシュコンクリートおよび強度試験結果	8
2.2.3	耐久性試験結果	9
2.3	普通形エコセメントを用いたコンクリートによる園路舗装の施工試験	12
2.3.1	試験施工の概要	12
2.3.2	実験概要	12
2.3.3	配合選定試験結果	12
2.3.4	フレッシュコンクリートの試験結果	14
2.3.5	施工時におけるフレッシュコンクリートの性質および施工性の評価	16
2.3.6	強度性状	17
2.3.7	耐久性試験結果	20
2.4	2章のまとめ	23
3	普通形エコセメントのコンクリート製品への適用性に関する研究	24
3.1	設計強度と製造方法による製品の分類	24
3.2	蒸気養生を施したコンクリートの特性	26
3.2.1	実験概要	26
3.2.2	フレッシュコンクリートの試験結果	32
3.2.3	強度試験結果	34
3.2.4	乾燥収縮試験結果	39
3.2.5	凍結融解抵抗性試験結果	40
3.2.6	促進中性化試験結果	45
3.2.7	蒸気養生後の型枠面の発錆状況観察結果	45
3.2.8	重金属溶出試験結果	46
3.3	3章のまとめ	47

4 普通形エコセメントを用いた鉄筋コンクリートの力学性状	48
4.1 はじめに	48
4.2 普通形エコセメントを用いたコンクリートの鉄筋付着強度試験	48
4.2.1 実験概要	48
4.2.2 実験結果および考察	49
4.3 普通形エコセメントを用いた鉄筋コンクリートはりの曲げ・せん断性状	54
4.3.1 実験概要	54
4.3.2 実験結果	55
4.3.3 荷重－ひずみの関係	56
4.3.4 荷重－たわみの関係	58
4.3.5 ひび割れ発生荷重、終局荷重	59
4.4 4章のまとめ	60
5 まとめ	61
写真編	65
資料編	71
付録	101

1 研究概要

1.1 研究目的

近年、都市ごみ焼却灰や下水汚泥など生活廃棄物は年々増加し、その処分方法や処分場の確保が非常に大きな社会問題となっている。これらの生活廃棄物を主原料として製造される環境負荷低減型セメント（以下エコセメント）の生産技術が開発され、建設資材としての活用が図られることにより資源循環型社会の構築に寄与できるものと期待される。

従来、エコセメントは原料に含まれる塩素をクリンカー鉱物中に取り込むことにより製造され、速硬性を有するセメントである。したがって、硬化性状や塩分の含有のためその用途が限られたものとなっていた。その後の生産技術の進展によりエコセメントの低塩素化が可能となってきた。鉄筋コンクリートへの適用が可能となれば、大幅な用途拡大につながるものと期待される。

本共同研究の目標は、低塩素化されたエコセメントを建設分野において活用可能とするため、「普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同等の性能を有し、環境面においても普通ポルトランドセメントと同様の取扱いが可能なコンクリート材料を開発すること」である。すなわち、低塩素化されたエコセメントの利用方法、品質性状、安全性、施工性および耐久性を明らかにし、エコセメントを用いたコンクリート材料の開発・改良およびその利用技術の開発を行うものである。なお、本報告書は、平成11年度から平成12年度にかけて実施した調査および試験結果を取りまとめたものである。

1.2 本研究で対象とする環境負荷低減型セメントの定義

環境負荷低減型セメントとは、都市ごみ焼却灰や下水汚泥などの廃棄物を主原料とし、石灰石などを補填原料として成分調製してセメントクリンカを焼成・粉碎し、セメント 1 トンにつきこれらの廃棄物を 500kg 程度使用してつくられるもので、通商産業省標準情報（TRR 0002：2000、平成 12 年 5 月 22 日公表）においてエコセメントと定義された。エコセメントはその特徴によって次の 2 種に大別される。

本研究では普通形エコセメントを対象とした。

(1) 普通形エコセメント

セメントの製造過程で都市ごみ焼却灰に含まれる塩素を取り除き、塩化物イオン量がセメント質量の 0.1% 以下で、普通ポルトランドセメントに類似する性質を持つもの。

(2) 速硬形エコセメント

都市ごみ焼却灰に含まれる塩素を積極的に利用し、速硬性の高いカルシウムクロロアルミネート ($C_{11}A_7 \cdot CaCl_2$) として、塩素を固定させたものである。塩化物イオン量は、セメント質量の 0.5 から 1.5% であり、主として無筋コンクリートに利用されるもの。

1.3 研究計画

本共同研究は、平成11年度から平成13年度までの3年間研究を行う予定である。

その全体計画を表 1-1に示す。

表 1-1 研究全体計画

研 究 項 目	研 究 細 目	研 究 分 担			年次計画		
		土研	東京都	民間	11 年	12 年	13 年
1. 開発目標の設定	1) 開発目標の設定	◎	○	○	—		
2. 評価方法に関する研究	1) 評価試験方法の検討	◎	◎	○	—		
3. 環境負荷低減型セメントの開発・評価および利用技術の開発	1) エコセメントの開発・改良	○	○	◎	—		
	2) 性状・安全性評価試験	◎	○	○	—		
	3) 適用場所の検討	◎	○	○	—		
	4) 利用技術の開発	◎	◎	◎			
4. 試験施工	1) 試験施工計画の作成		◎	○	—		
	2) 試験施工		◎	○	—		
	3) 追跡試験	○	◎	○	—		
5. 研究成果のとりまとめ	1) 適用技術ガイドライン(案)の作成	◎	◎	○			—
	2) 研究成果のとりまとめ	○	○	○	—		

2 普通形エコセメントのレディーミクストコンクリートへの適用性に関する研究

2.1 生コンクリート出荷量と普通形エコセメントの用途—東京都—

2.1.1 普通形エコセメントの生産量

現在、都市ごみ焼却灰等のエコセメント化は、千葉県および東京都において事業化計画が進んでいる。千葉県においては、エコタウン計画における中核的な事業に位置づけられ、平成 13 年度から市原市においてセメント製造プラントの稼働が予定されており、普通形エコセメントの年間生産量は約 11 万トンが見込まれている。

東京都における都市ごみ焼却灰のエコセメント化は、多摩地域 27 市町の自治体で組織する東京都三多摩地域廃棄物広域処分組合（以下処分組合）で事業化される。処分組合の「エコセメント化施設導入基本計画」によると、エコセメント製造プラントは平成 16 年度から稼働を予定しており、普通形エコセメントの年間生産量は約 16 万トンが見込まれている。

2.1.2 普通形エコセメントの用途と需要見通し

普通形エコセメントは J I S 製品としての普通ポルトランドセメントとはほぼ同等の性質を有する材料として開発されたため、その用途は全てのコンクリート構造物、コンクリート製品等が対象となる。しかしながら、普通ポルトランドセメントとの鉱物組成の違いによる耐久性への影響等今後解明すべき事項もあり、当面の対象用途としては、場所打ち杭および呼び強度 21N/mm^2 以下の公共工事に限定して、東京都における普通形エコセメントの需要を推計した。

推計結果を表 2-1 に示す。東京都の土木公共工事で使用される生コン出荷量の推計には、通商産業省統計生コン四半期報¹⁾の平成 10 年 10～12 月期および平成 11 年 1～3 月期の合計半年間のデータを用いた。東京都における需要先別出荷数量において、土木工事の内、道路工事およびその他工事を東京都の公共工事とみなした。その合計出荷量を年ベースに換算すると、生コン出荷量は 92.1万m^3 となった。一方、東京都工事で使用する材料試験の受付試料数の比率(表 2-1)をもとに、配合種別ごとの生コン使用量を算出した。さらに、セメント水比(C/W)と強度の関係式をもとにセメント使用量を算出した。これらから、当面の生コンクリート供給対象市場として、年間約 16 万トンの需要が推計された。今後、エコセメントの公共事業への積極的利用を図るための技術基準類等の整備が重要である。

表 2-1 コンクリート種類別の受付試料数からの需要推計

種類	平成9年		平成10年		小計		生コン 出荷量 (千m ³ /年)	推定 単位C量 (kg/m ³)	セメント 使用量 (千t/年)	配合別の コンクリート 適用箇所	エコセメントの 適用性	◎計 (千t/年)	◎+○計 (千t/年)
	組数	比率 (%)	組数	比率 (%)	組数	比率 (%)							
N16	19	1.3	19	1.4	38	1.3	12.0	222	2.7	無筋構造物	◎	2.7	2.7
H16	82	5.4	68	4.9	150	5.2	47.5	222	10.6		○		10.6
BB16	215	14.3	165	11.8	380	13.1	120.4	222	26.7		◎	26.7	26.7
N21	52	3.5	90	6.4	142	4.9	45.0	265	11.9	鉄筋コンクリート	◎	11.9	11.9
H21	91	6.0	45	3.2	136	4.7	43.1	265	11.4		○		11.4
BB21	391	25.9	449	32.1	840	28.9	266.2	265	70.6		◎	70.6	70.6
N24	83	5.5	61	4.4	144	5.0	45.6	284	13.0	鉄筋コンクリート	○		13.0
H24	17	1.1	23	1.6	40	1.4	12.7	284	3.6		○		3.6
BB24	279	18.5	216	15.4	495	17.0	156.9	284	44.6		○		44.6
N30	36	2.4	7	0.5	43	1.5	13.6	322	4.4	高強度用(PC)	—		
H30		0.0	11	0.8	11	0.4	3.5	322	1.1	〃	—		
BB30	242	16.1	245	17.5	487	16.8	154.3	322	49.7	水中コンクリート (場所打ち杭用)	◎	49.7	49.7
計	1,507	100.0	1,399	100.0	2,906	100.0	921.0	—	250.3			161.7	244.8

生コンクリートからセメント量の換算は、以下の式およびC/Wを用いた*。

162B: $f'c$ (kgf/cm²) = $-158.4 + 257.4 C/W$ (C/W=1.470)

212B以上: $f'c$ (kgf/cm²) = $-152.8 + 243.0 C/W$ (21N: C/W=1.740、24N: C/W=1.863、30N: C/W=2.110)

*コンクリート骨材の実態調査(地方公共団体建設技術試験研究機関連絡協議会、コンクリート分科会資料、昭和62年1月)より引用

2.2 普通形エコセメントを用いたコンクリートの特性

2.2.1 実験概要

(1) 実験計画

これまで普通形エコセメントを用いたコンクリートのフレッシュおよび強度に関する基本性状は報告されているが²⁾、中性化性状、鉄筋腐食性状および重金属の溶出性状に関しては十分に明らかになっていない。また、実用に供するためには施工性の評価も不可欠である。

ここでは、中性化、鉄筋腐食および溶出試験を実施するとともに、試験施工を通じて生コンの製造安定性、施工性および耐久性の検証を行うことを目的とした。表 2-2に実験計画を示す。

(2) 使用材料

表 2-3に使用材料を、表 2-4にセメントの化学成分を、表 2-5にセメントの物理化学的性質を、表 2-6に骨材の物理的性質を示す。使用した普通形エコセメント(E)の化学成分は塩化物イオン量が0.054%(540ppm)、SO₃が3.9%であり、普通ポルトランドセメント(N)の規格値より大きい。また、鉱物組成はC₃SおよびC₂Sが普通ポルトランドセメントに比べ少なく、C₃Aが14%と多いことおよびセメントの水和活性を高めるために粉末度が普通ポルトランドセメントに比べて高いことが特徴である。

表 2-2 実験計画

	セメント		普通形エコセメント(E)						普通ポルトランドセメント(N)					
	W/C(%)		65		55		45		65		55		45	
	スランプ(cm)		8	18	8	18	8	18	8	18	8	18	8	18
	混和剤		AE	AE	AE	AE	AE	AE	AE	AE	AE	AE	AE	AE
硬化性状	中性化	促進	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	発錆	促進	—	—	○	○	—	—	—	—	○	○	—	—
		暴露	—	—	○	—	—	—	—	—	○	—	—	—
	溶出	室内	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
施工性	製造	実機	○*	—	—	—	—	—	○*	—	—	—	—	—
	施工	施工性	○	—	—	—	—	—	○	—	—	—	—	—
	耐久性	暴露	○	—	—	—	—	—	○	—	—	—	—	—

*水セメント比の詳細は、2.3 を参照。

表 2-3 使用材料一覧

使用材料	産地／銘柄
セメント	普通形エコセメント (E) 普通ポルトランドセメント (N)
細骨材	静岡県小笠郡浜岡町産陸砂
粗骨材	茨城県西茨城郡岩瀬町産砕石
AE 減水剤	リグニンスルホン酸系(ボゾリス No. 70、エヌエムビー社製)
AE 剤 (空気量調整剤)	アルキルアリルスルホン酸化合物系陰イオン界面活性剤(マイクロエア 303A、エヌエムビー社製)

表 2-4 セメントの化学成分

セメント 種類	化学成分 (%)								
	Ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	Cl
E	1.1	17.8	7.2	4.1	61.1	1.8	3.9	0.3	0.054
N	2.4	21.5	4.9	2.8	64.6	1.2	2.0	0.6	0.008

表 2-5 セメントの物理化学的性質

セメント 種類	鉱物組成(%)				密度 (g/cm ³)	粉末度 (cm ² /g)	凝 結			圧縮強さ (N/mm ²)		
							水量	始発	終結			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF			(%)	(h-m)	(h-m)	3 日	7 日	28 日
E	49	12	14	13	3.19	4130	31.2	2-40	4-10	28.8	36.3	51.2
N	57	19	8	8	3.15	3490	26.9	2-20	3-10	28.2	43.4	59.0

表 2-6 骨材の物理的性質

骨材種類	最大寸法 (mm)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
細骨材	5	2.59	1.52	2.91
粗骨材	20	2.63	0.79	6.91

(3) コンクリート配合

コンクリート配合を表 2-7に示す。水セメント比を 45、55 および 65%の 3 水準とし、スランブは単位水量により $8 \pm 2.5\text{cm}$ および $18 \pm 2.5\text{cm}$ となるよう、また空気量は空気量調整剤により $4.5 \pm 1.5\%$ となるように調整した。

(4) コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜは、強制練りパン型ミキサ(公称容量 50L)を用いた。粗骨材、セメント、細骨材の順に材料をミキサ内に投入し 30 秒間空練りを行った後、水を投入し 2 分間練混ぜを行った。

表 2-7 コンクリート配合

セメント 種類	目標 スランプ°	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)					AE 剤 (C×%)
				W	C	S	G	AE 減水剤	
E	8cm	45.0	42.0	158	351	750	1052	0.88	0.0055
		55.0	44.0	158	287	809	1045	0.72	0.0050
		65.0	46.0	158	243	862	1028	0.61	0.0050
N		45.0	44.0	156	347	789	1019	0.87	0.0050
		55.0	46.0	156	284	848	1011	0.71	0.0030
		65.0	48.0	156	240	902	993	0.60	0.0030
E	18cm	45.0	44.0	178	396	747	965	0.99	0.0050
		55.0	46.0	178	324	808	963	0.81	0.0050
		65.0	48.0	178	274	863	949	0.68	0.0050
N		45.0	46.0	176	391	784	934	0.98	0.0025
		55.0	48.0	176	320	846	930	0.80	0.0025
		65.0	50.0	176	271	901	915	0.68	0.0025

(5) 試験方法

① スランブおよび空気量

スランブおよび空気量試験は、JIS A 1101「コンクリートのスランブ試験方法」および JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法」に準拠した。

② 圧縮強度

圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠した。

③ 中性化試験

中性化試験は、建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)」に規定されている「コンクリートの促進中性化試験方法(案)」に準拠した。すなわち、前養生として標準養生を 4 週間行った後、相対湿度 $60 \pm 5\%$ 、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の環境に 4 週間静置した。その後、中性化の促進条件は、温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ 、炭酸ガス濃度 $5 \pm 0.2\%$ とした。供試体は、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ とし、供試体の個数は各条件 2 個とした。測定材齢は、1、4、8、13 および 26 週とした。試験は、コンクリート配合すべての水準について行った。

④溶出試験

溶出試験は、環境庁告示46号により、六価クロム、水銀、砒素、セレン、カドミウム、鉛の6項目について行った。試験は、材齢28日まで標準養生した供試体(φ10×20cm)を全量粉碎(2mm以下)したものを試料として用い、コンクリート配合すべての水準について行った。なお、本来この試験方法は、土壌に対して適用されるものであるため、実際にコンクリートとして利用される状況よりも厳しい条件での評価となっている。

⑤鉄筋腐食試験

鉄筋腐食試験は、材齢28日まで標準養生を行い試験を開始した。試験は、水セメント比55%、スランプ8cmの水準について行った。促進試験の温湿度条件は、「塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進腐食試験方法—乾湿繰返し法—(日本コンクリート工学協会、JCI-SC3)」に準拠した。すなわち、温度10℃、相対湿度60%の乾燥状態を4日間、温度60℃、相対湿度95%の湿潤状態を3日間を1サイクルとし、20サイクル行った。暴露試験は、供試体を土木研究所暴露試験所(茨城県つくば市)および新潟県親不知^{おやしらず}の2箇所に設置し、試験材齢は1年、2年、3年および5年以上とした。なお、標準養生終了時(促進試験および暴露試験開始前)に、鉄筋発錆状況の確認を行った。

供試体形状および寸法を図2-1に示す。鉄筋のかぶり厚さは10および20mmの2水準とし、かぶり厚方向面以外の4面はエポキシ樹脂によりシールをした。供試体の個数は各条件2個とし、鉄筋腐食の測定範囲は鋼材の長さ方向の中心から7.5cmずつ計15cmの部分とした。

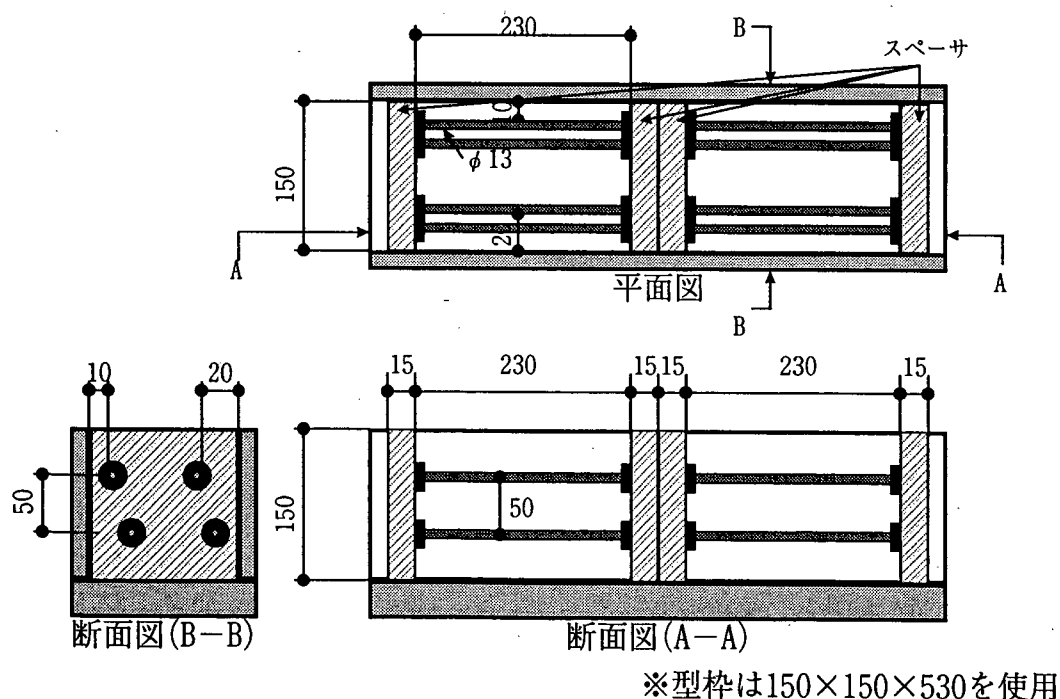


図 2-1 鉄筋腐食試験型枠形状(単位:mm)

2.2.2 フレッシュコンクリートおよび強度試験結果

表 2-8にスランプ、空気量および圧縮強度試験結果を示す。普通形エコセメントは、粉末度が普通ポルトランドセメントより高いため、単位水量およびAE 剤(空気量調整剤)を若干増加させることで、普通ポルトランドセメントを用いた場合と同等のスランプおよび空気量性状を示しており既往の報告と²⁾、同様な傾向が認められた。なお、スランプおよび空気量の経時変化に関しては、普通形エコセメントを用いたコンクリート(以下、エコセメントコンクリート)と普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート(以下、普通セメントコンクリート)は同程度であると報告されている²⁾。

図 2-2にセメント水比と圧縮強度(材齢 28 日)の関係を示す。エコセメントコンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係は、普通セメントコンクリートの場合と同様に一次式で近似でき、セメント水比則が成立することが認められた。また、同一のセメント水比において比較するとエコセメントコンクリートの強度は普通セメントコンクリートより若干低くなる傾向が認められた。

表 2-8 フレッシュコンクリートおよび圧縮強度試験結果

セメント 種類	目標 スランプ°	W/C (%)	単位水量 (kg/m³)	AE 剤 (C×%)	スランプ° (cm)	空気量 (%)	28 日圧縮強度 (N/mm²)
E	8cm	45.0	158	0.0055	6.0	4.6	50.9
		55.0	158	0.0050	6.0	4.3	37.6
		65.0	158	0.0050	7.5	4.5	28.8
N		45.0	156	0.0050	8.0	4.8	49.4
		55.0	156	0.0030	9.0	4.6	41.3
		65.0	156	0.0030	9.0	5.0	32.0
E	18cm	45.0	178	0.0050	16.5	4.1	47.5
		55.0	178	0.0050	16.5	4.5	34.6
		65.0	178	0.0050	18.0	4.7	24.6
N		45.0	176	0.0025	17.5	4.0	52.1
		55.0	176	0.0025	18.0	4.2	41.4
		65.0	176	0.0025	18.5	4.6	32.2

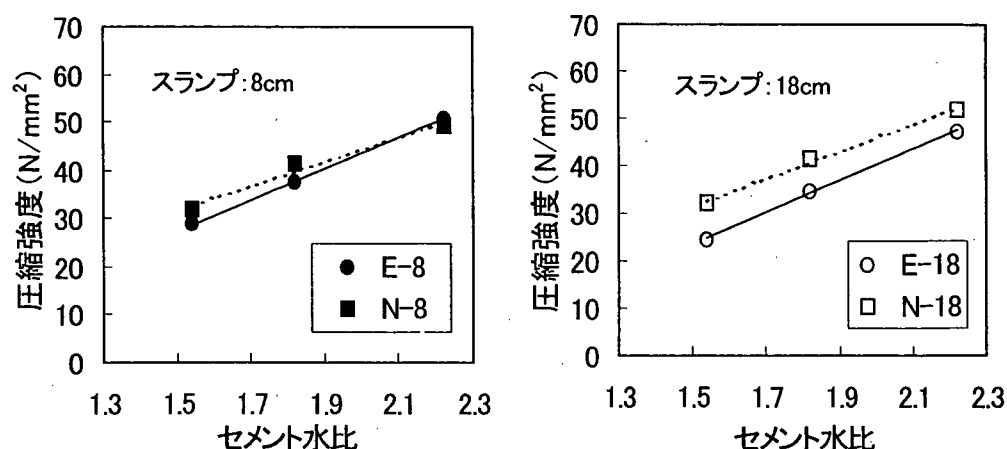


図 2-2 セメント水比と圧縮強度(材齢 28 日)

2.2.3 耐久性試験結果

(1) 中性化試験結果

表 2-9に促進材齢4週までの中性化深さ試験結果を、図 2-3に中性化深さの経時変化を示す。なお、資料編①に中性化測定データを掲載した。エコセメントコンクリートの中性化深さは、同一の水セメント比で比較した場合、普通セメントコンクリートよりやや大きくなり、水セメント比が大きくなるほどその差は大きくなる傾向にあった。スランプの影響に関しては、普通セメントコンクリートはスランプによらずほぼ同等であったが、エコセメントコンクリートはスランプ18cmのほうがやや大きい傾向が認められた。

図 2-4は、材齢28日の圧縮強度と中性化速度係数の関係を示したものである。中性化速度係数は、4週材齢までのデータから求めたものである。同一圧縮強度で比較した場合でも、エコセメントコンクリートの中性化速度係数は普通セメントコンクリートより、若干大きい傾向が認められ、さらに長期のデータが判明した時点で検討する必要がある。

表 2-9 中性化試験結果

セメント種類	スランプ°	W/C (%)	中性化深さ (mm)	
			1 週	4 週
E	8cm	45.0	0.88	3.05
		55.0	2.84	8.08
		65.0	6.60	12.12
N		45.0	0.79	1.62
		55.0	2.54	5.03
		65.0	5.53	9.21
E	18cm	45.0	1.59	3.59
		55.0	3.79	9.04
		65.0	7.23	14.23
N		45.0	0.51	1.64
		55.0	3.26	5.06
		65.0	4.35	8.20

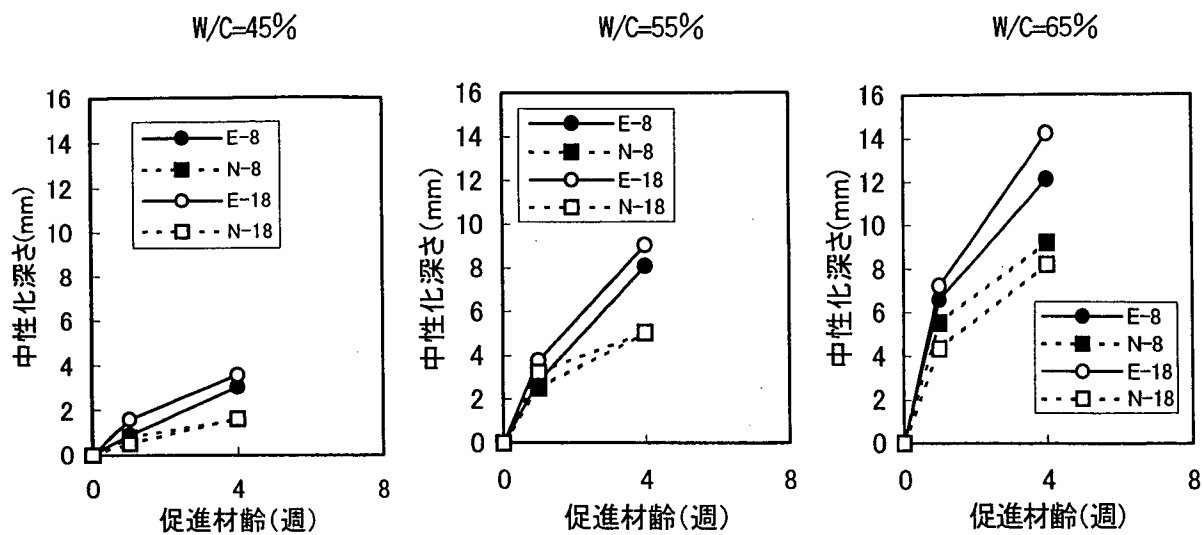


図 2-3 促進材齢と中性化深さの関係

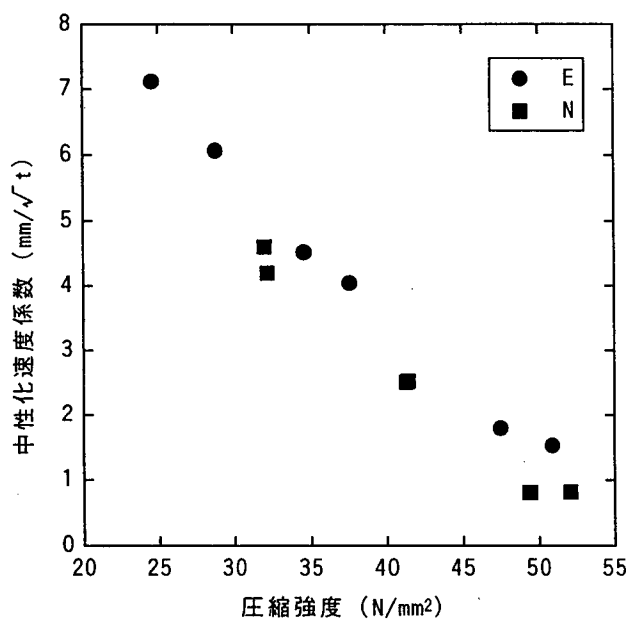


図 2-4 圧縮強度と中性化速度係数の関係

(中性化速度係数は、材齢 4 週までのデータにより算出)

(2) 溶出試験結果

表 2-10に溶出試験結果を示す。エコセメントコンクリートからの重金属溶出量は、いずれの配合条件においても環境基準値以下であった。普通セメントコンクリートの場合においても、すべての水準において、すべての測定項目について環境基準値以下であった。本試験結果からコンクリートとしての利用においては、環境に対する安全性は十分確保されているものと考えられる。

表 2-10 溶出試験結果 (mg/L)

記号*	E-45-8	E-45-18	E-55-8	E-55-18	E-65-8	E-65-18	環境基準値
pH**	12.4(27)	12.4(27)	12.4(26)	12.4(25)	12.4(25)	12.4(24)	—
六価クロム	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.05
水銀	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0005
砒素	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01
セレン	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01
カドミウム	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01
鉛	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	0.01
記号*	N-45-8	N-45-18	N-55-8	N-55-18	N-65-8	N-65-18	環境基準値
pH**	12.4(27)	12.4(27)	12.4(26)	12.4(25)	12.4(25)	12.4(26)	—
六価クロム	0.013	0.013	0.012	0.013	0.013	0.012	0.05
水銀	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0005
砒素	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01
セレン	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01
カドミウム	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01
鉛	0.003	0.003	0.003	<0.001	0.003	0.004	0.01

* 記号は、E：普通形エコセメント、N：普通セメント、セメント-水セメント比-スランプの順

** pHの数値横の()内の数値は、測定時の溶液温度(℃)

(3) 鉄筋腐食試験

促進試験および暴露試験開始前の発錆状況を水セメント比 55%の水準について確認した結果を表 2-11に示す。写真 1～写真 4 に試験開始時にコンクリートから取り出した鉄筋の写真を掲載した。養生期間中にはいずれのセメントを用いた場合も発錆は認められなかった。なお、暴露試験は、写真 5 および写真 6 に示すように、茨城県つくば市(平成 12 年 4 月 7 日～)および新潟県親不知(平成 12 年 3 月 29 日～)において実施中であり、材齢 1 年、2 年、3 年および 5 年以上において発錆性状を評価する予定である。

表 2-11 促進試験および暴露試験開始前の発錆状況

セメント種類	水セメント比 (%)	発錆面積 *(%)
E	55	0.0
N	55	0.0

*供試体 2 体(各鉄筋 4 本)の平均

2.3 普通形エコセメントを用いたコンクリートによる園路舗装の施工試験

2.3.1 試験施工の概要

普通形エコセメントを用いたコンクリート（エコセメントコンクリート）を現場に適用していくためには、強度・耐久性などの物理的性能を確保することはもとより、施工性が確保できることを確認する必要がある。ここでは、普通形エコセメントを実供用される公園内の園路舗装に適用した事例から、施工性などについて検討した。

試験施工は東京都西部公園緑地事務所の協力のもとに、井の頭恩賜公園内の園路舗装で行った。園路舗装の舗装構成は、厚さ15cmの粒度調整路盤、厚さ10cmのコンクリート舗装（設計基準強度 $f_{ck}=21\text{N/mm}^2$, $G_{max}=20\text{mm}$, スランプ8cm）であり、施工延長は約120mである。この試験舗装区間を、エコセメントコンクリートと普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート（普通セメントコンクリート）の2タイプのコンクリートで試験施工した。なお、施工区間のうち、約80m区間をエコセメントコンクリートで、約40m区間を普通セメントコンクリートで舗装することとし、打設量はエコセメントコンクリートの場合が 24m^3 、普通セメントコンクリートの場合が 12m^3 である。コンクリート打設は、平成12年2月7日にエコセメントコンクリート、2月8日に普通セメントコンクリートをそれぞれ行った。写真7に施工状況を示す。

2.3.2 実験概要

本試験施工は、施工性の確認を行うという観点から、エコセメントコンクリートの打設にあたり、特別な施工方法は採用していない。すなわち、一般のレディーミクストコンクリート工場での練混ぜ、アジテータ車による運搬、ポンプ圧送による打設、マット養生といった一連のコンクリート舗装の施工手順で、エコセメントコンクリートおよび普通セメントコンクリートを施工した。

使用材料は次のとおりである。セメントは普通形エコセメントおよび普通ポルトランドセメントである。細骨材は東京都青梅産砕砂と千葉県佐原産山砂の混合砂（65:35）、粗骨材は東京都奥多摩産碎石（ $G_{max}=20\text{mm}$ ）、混和剤はリグニンスルホン酸系のAE減水剤をそれぞれ使用した。

施工性の評価試験として、運搬によるスランプ・空気量の変化、ポンプ圧送前後のスランプ・空気量の変化、塩化物イオン量（簡易法）、こて仕上げ等の施工性に関する聞き取り調査を行った。また、耐久性試験として、乾燥収縮試験（JIS A 1129 「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法」）、促進中性化試験（建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）「コンクリートの促進中性化試験方法（案）」）および凍結融解抵抗性試験（土木学会規準 JSCE-G501-1986 「コンクリートの凍結融解試験方法」）を実施した。なお、レディーミクストコンクリートは、エコセメントコンクリートおよび普通セメントコンクリートとも、（株）鹿島レミコン調布工場において製造した。

2.3.3 配合選定試験結果

示方配合を決定するために、あらかじめセメント水比（C/W）と強度（ f'_{28} ）の関係式を求めた。関係式は次式のとおりである。

$$\text{(エコセメントコンクリート)} \quad f'_{28} = 19.9C/W - 6.98 \quad (\text{式 2-1})$$

$$\text{(普通セメントコンクリート)} \quad f'_{28} = 27.4C/W - 16.6 \quad (\text{式 2-2})^*$$

*鹿島レミコン調布工場の実績による

表 2-12に示方配合を示す。エコセメントコンクリートの場合、過去に出荷の実績がないことから JASS5を参考に標準偏差(σ)を 2.5N/mm^2 、正規偏差を 2.0 とし、設計基準強度 21N/mm^2 に対して配合強度を 26N/mm^2 とした。よって、水セメント比は式 2-1 より 60.0%となった。この値は、普通セメントコンクリートの場合より小さくなっているが、これは普通形エコセメントの強度発現性が普通ポルトランドセメントに比べ若干小さいことに起因している。また、普通形エコセメントは C_3A 量が多く粉末度が高いため、スランプロスが普通ポルトランドセメントの場合よりやや大きくなることが予想されたので、練上がりスランプ値は 13cm とし単位水量を設定した。なお、普通セメントコンクリートの場合は工場の実績を参考にして、練上がり後のスランプロスを 10cm とし単位水量を設定した。その他エコセメントコンクリートにおける配合上の特徴は、普通形エコセメントの粉末度が普通ポルトランドセメントに比べ高いため、プラスティシティー確保のための細骨材率 (s/a) が小さくなっている点である。

表 2-13に試験練りの結果を示す。フレッシュコンクリートの性状では、予想されたようにエコセメントコンクリートにおける 30 分静置後のスランプロスが大きかった。この結果、試験施工においては、エコセメントコンクリートの場合、運搬によるスランプロスが過大となることが危惧された。このため、練混ぜ後 90 分の実機試験（エコセメントコンクリートをアジテータ車に積載し、低速回転にて所定時間運転し、性状変化を調べる試験）を行ったところ、表 2-14に示すように、試験施工で想定される運搬時間である 30 分～45 分後のスランプロスは 2cm～3cm 程度となることが確認された。

塩化物イオン量試験結果(簡易法)は、いずれも低濃度の検出となり、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」の基準値 0.3kg/m^3 を満足した。これは、塩素がセメント鉱物中に固定されておりその一部しか溶出しないことによるものと考えられる。なお、材齢 28 日の圧縮強度は配合強度を上まわり、所定の強度が得られた。

表 2-12 示方配合

セメント	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	Ad (L/m ³)
E	60.0	45.4	170	283	829	1,011	1.065
N	64.0	47.7	162	254	891	992	0.952

表 2-13 試験練りの結果

セメント	スランプ (cm)		空気量 (%)		温度 (℃)		塩化物 イオン量 (kg/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)		f' _{c7} /f' _{c28} (%)
	直	30'	直	30'	直	30'		f' _{c7}	f' _{c28}	
E	12.5	5.5	5.1	4.4	15.0	15.5	0.011	17.2	30.6	56.2
N	8.5	5.0	5.0	4.2	14.5	15.5	0.016	20.2	30.9	65.4

注) '直' は練混ぜ直後、'30'' 練混ぜ後 30 分静置後の試験値

表 2-14 実機による試験練りの結果(普通形エコセメント、E)

	0分	30分	45分	60分	75分	90分
スランプ	12.0	10.5	10.0	8.5	9.0	8.5
空気量	5.0	4.9	5.1	4.8	4.6	4.5
コンクリート温度	13.5	14.5	14.0	14.5	15.0	15.0

外気温: 12℃

2.3.4 フレッシュコンクリートの試験結果

表 2-15にスランプおよび空気量の変化量を運搬時間とともに示す。運搬時間とスランプの変化量の関係を図 2-5に示す。なお、プラント、現場荷卸し、ポンプ筒先における測定結果は、資料編②に掲載した。試験施工において、エコセメントコンクリートではアジテータ車6台、普通セメントコンクリートでは3台で運搬した。ここでは、これら測定結果から、スランプと空気量の変化に着目し、運搬とポンプ打設による性状の変化について考察する。

表 2-15から、スランプロスは、エコセメントコンクリートの方が普通セメントコンクリートよりやや大きくなった。図 2-5に運搬時間とスランプロスの関係を示すように、これはエコセメントコンクリートでは運搬時間が普通セメントコンクリートの場合より長くなっていることから、スランプロスが大きくなったものと考えられる。ポンプ圧送前後のスランプ、空気量の変化は表 2-15に示すようにエコセメントコンクリートおよび普通セメントコンクリートともに圧送による大きな差は見受けられない。

次に、塩化物イオン量について考察する。表 2-15からエコセメントコンクリートの水の中の塩化物イオン量は、0.03~0.04 kg/m³であり、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」の基準値 0.3 kg/m³を下回る結果を得たが普通セメントコンクリートのそれより若干多かった。試験施工に用いた普通形エコセメントの塩化物イオン量は 0.054% (540ppm)であるので、これが全部溶け出すとすれば 0.15kg/m³ (540×10⁻⁶×283kg/m³) の塩化物イオン量と推計されるが、表 2-15の試験結果からエコセメントに含まれる塩化物イオンの一部分しかコンクリート中に溶け出さないことが認められた。

表 2-15 スランプと空気量の変化

生コン車 台数	運搬時間 (h:m)	プラントと荷卸の差		筒先				塩化物イオン量 (kg/m³)
				ポンプ圧送前後		プラントからの差		
		スランプ (cm)	空気量 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	

エコセメントコンクリート

1台目	1:13	-4.5	-0.9	-0.5	-0.1	-5.0	-1.0	0.034
2台目	0:52	-3.0	-0.6	0.0	0.1	-3.0	-0.5	0.034
3台目	0:52	-3.5	0.2	0.5	-1.2	-3.0	-1.0	0.035
4台目	0:53	-4.5	-0.4	0.5	0.3	-4.0	-0.1	0.035
5台目	0:46	-5.5	-0.1	1.0	0.2	-4.5	0.1	0.035
6台目	0:46	-3.0	-0.2	-1.0	-0.2	-4.0	-0.4	0.037
平均	0:53	-4.00	-0.33	0.08	-0.15	-3.92	-0.48	0.035

普通セメントコンクリート

1台目	0:30	-3.5	-0.7	1.5	0.6	-2.0	-0.1	0.030
2台目	0:40	-4.0	-1.0	0.0	0.4	-4.0	-0.6	0.029
3台目	0:30	-3.0	-1.5	0.0	0.0	-3.0	-1.5	0.025
平均	0:33	-3.50	-1.07	0.50	0.33	-3.00	-0.73	0.028

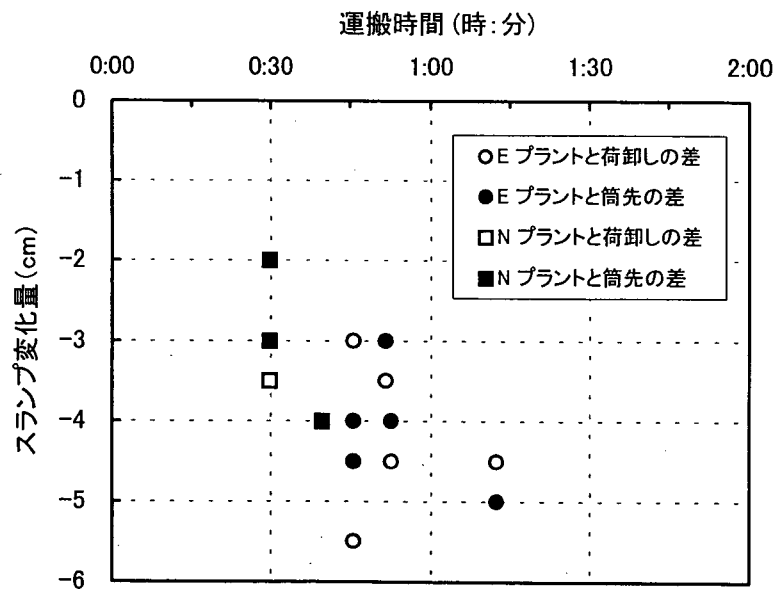


図 2-5 運搬時間とスランプの変化

2.3.5 施工時におけるフレッシュコンクリートの性質および施工性の評価

施工性の評価として、普通セメントコンクリートと比較したエコセメントコンクリートの特徴について、現場作業員に対する聞き取り調査を行った。要約すると以下のとおりである。

- I. こてに粘り付く。
- II. 水の揚がり方が少なく、こてをかける回数が増える。
- III. ポンプの圧送性は同等である。
- IV. 硬い。
- V. 表面仕上げは夜中 10 時までかかった。水の引きは大差ない。
- VI. 表面に水膜ができにくい、仕上がり状態は上々である。

いずれのコンクリートも、筒先でのスランプ値（コンシステンシー）は 9.0～9.5cm ではほぼ同一であるにもかかわらず、上記のような聞き取り調査結果を得たことから、本試験施工の条件においてはエコセメントコンクリートのワーカビリティは、普通セメントコンクリートと比べて必ずしも良好であるとはいえない。

コンクリートの敷き均し状況を、写真 8, 9 に示す。表面仕上げに要するレーキの回数はエコセメントコンクリートの方で多くなる結果となった。これは、エコセメントコンクリートではモルタル分の上昇が少ないためであり、「硬い」「ねばり付く」といった聞き取り調査結果と符合している。しかし、こて仕上げが不可能なほどのフィニッシュビリティの低下ではなく、配合上 s/a の調整などで改善することも可能である。プラスティシティーは良好であり、材料分離に対する抵抗性は十分保有していると判断される。

写真 10 と写真 11 にコンクリート打設完了時の状況を示す。両者を比較すると、普通セメントコンクリートでは、表面仕上げ完了時に、ブリーディングによる水膜が生じ、表面が光っている箇所が見受けられる（写真 11 参照）。これに対し、エコセメントコンクリートでは表面の水膜は見受けられない（写真 10 参照）。この現象は、エコセメントコンクリートにおいてはブリーディングが普通セメントコンクリートより少ないことを意味している。エコセメントコンクリートの示方配合では単位水量が多いにもかかわらず、ブリーディングが減少したのは、普通形エコセメントの粉末度が高いことが主因と考えられる。

施工後 1 週間養生した後供用した。2 トントラック程度の作業車の通行があるものの、その後舗装面にひび割れ、欠けなどの変状は認められていない。写真 12 に施工境の遠景を、写真 13 に施工境の拡大を示す。エコセメントコンクリートと普通セメントコンクリートの相違点は、色調である。写真 13 の中央の黒い部分は目地板（エラストイト）部分である。エコセメントコンクリートを用いた部分は、やや黄色味を帯びているが、このような色調の相違が見られたのはコンクリートの上面のみであり、写真 12 中の囲みに示すように、型枠に面した側面についてはほとんど差は認められなかった。

表面仕上げ状況を比較した写真 14 と写真 15 によると、エコセメントコンクリートの表面は普通セメントコンクリートに比べてきめ細かく仕上がっており、ほうき目も細かく入っている。これも、エコセメントコンクリートは普通セメントコンクリートに比べてブリーディングが少ないことに起因している。

2.3.6 強度性状

次に硬化後のコンクリートの性質（強度および静弾性係数試験）について考察する。強度および静弾性係数等の試験結果を資料編②に掲載した。

(1) 強度発現性および静弾性係数

図 2-6および図 2-7に材齢(t)と強度(f'_c)および静弾性係数(E_c)の関係を示す。これらから、エコセメントコンクリートの圧縮強度および静弾性係数とも、普通セメントコンクリートと同等であることが認められた。また、材齢 28 日の圧縮強度は、設計基準強度を満足しており、所定の性能が得られた。

(2) 強度と静弾性係数の関係

圧縮強度と静弾性係数(E_c)の関係を図 2-8に示す。エコセメントコンクリートと普通セメントコンクリートについて、 $E_c = a \cdot \sqrt{f'_c}$ 式で回帰すると、

$$\text{エコセメントコンクリート} \quad E_c = 3,964 \sqrt{f'_c} \quad (\text{式 2-3})$$

$$\text{普通セメントコンクリート} \quad E_c = 3,965 \sqrt{f'_c} \quad (\text{式 2-4})$$

となり、両者に差は見られない。図中にコンクリート標準示方書（施工編；マスコンクリート）に記載されている関係式($E_c = 4,700 \sqrt{f'_c}$)を併記した。これによると、今回試験施工に用いたコンクリートは、強度に比べて静弾性係数が小さい傾向を示している。この傾向は、セメントの種類の影響ではなく、使用骨材などの影響と考えられる。

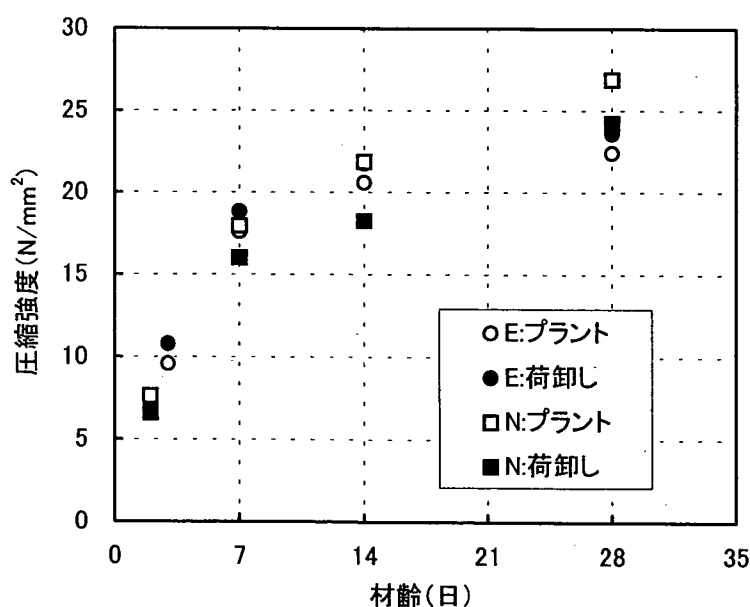


図 2-6 材齢と強度の関係

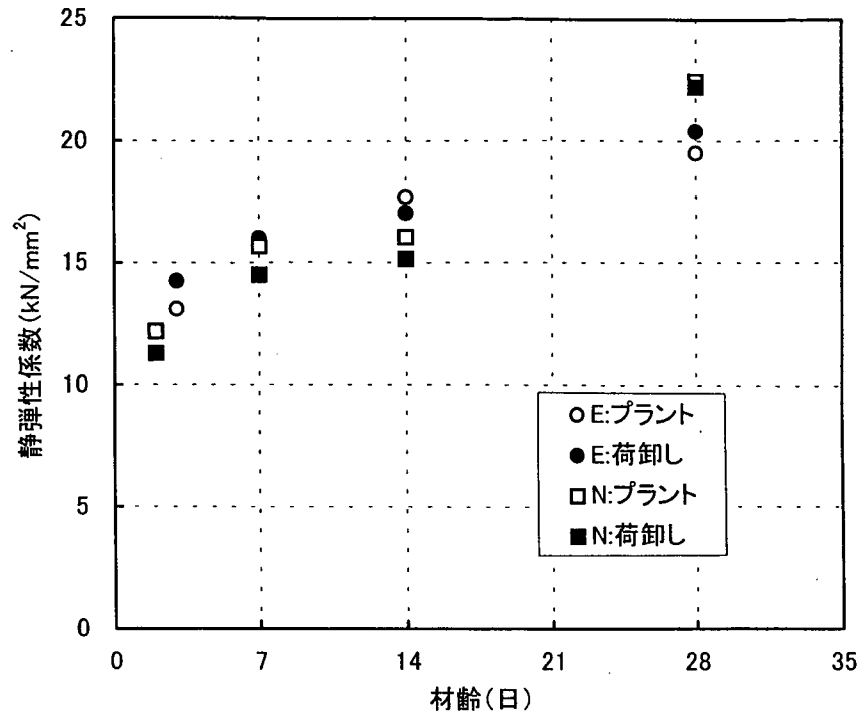


図 2-7 材齢と静弾性係数の関係

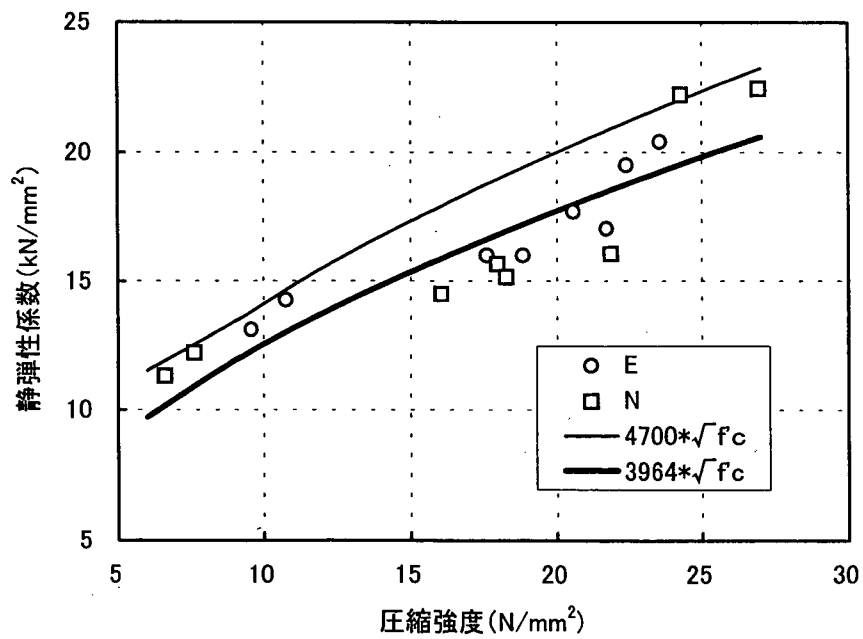


図 2-8 圧縮強度と静弾性係数の関係

(3)ポアソン比

表 2-16にポアソン比の測定結果を示す。ポアソン比は、エコセメントコンクリートと普通セメントコンクリートの間に大きな差はなく、一般のコンクリートでの値（ $1/5 \sim 1/7$ ）の範囲であることが認められた。

表 2-16 ポアソン比測定結果

セメント	材齢（日）	ポアソン比	
		プラントで採取した供試体	荷卸時点で採取した供試体
E	7	0.17	0.18
	14	0.20	0.19
	28	0.20	0.22
N	7	0.17	0.17
	14	0.19	0.17
	28	0.19	0.19

2.3.7 耐久性試験結果

(1) 乾燥収縮試験

図 2-9 に長さ変化率を、図 2-10 に乾燥による質量変化率を示す。なお、資料編③に乾燥収縮試験結果を掲載した。エコセメントコンクリートは普通セメントコンクリートよりも質量の減少がやや大きいですが、長さ変化率はエコセメントコンクリートの方が普通セメントコンクリートよりも小さくなる傾向が認められた。

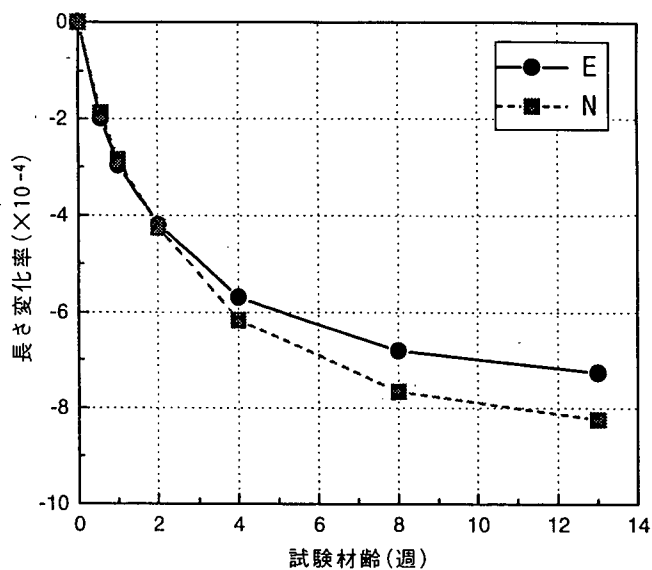


図 2-9 材齢と長さ変化率の関係

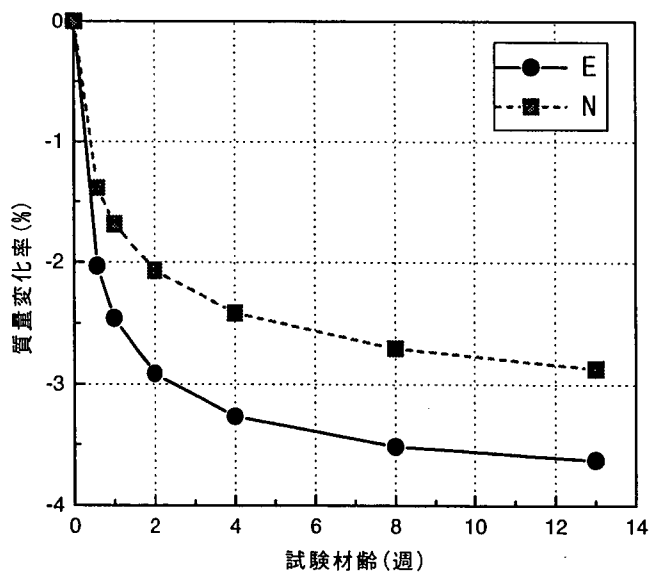


図 2-10 材齢と質量変化率の関係

(2) 凍結融解抵抗性試験

相対動弾性係数の変化を図 2-11に、凍結融解による質量変化を図 2-12示す。なお、資料編④に凍結融解抵抗性試験結果を掲載した。エコセメントコンクリートの相対動弾性係数は普通セメントコンクリートと同様に 300 サイクル終了後もほぼ 100%であり、十分な凍結融解抵抗性を有することが確認された。質量変化率に関しては、エコセメントコンクリートの方が普通セメントコンクリートより若干大きくなる傾向を示した。

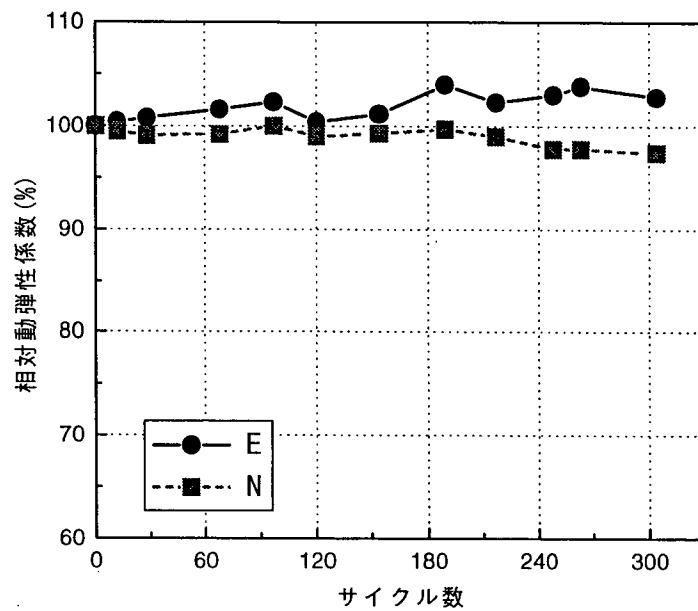


図 2-11 相対動弾性係数

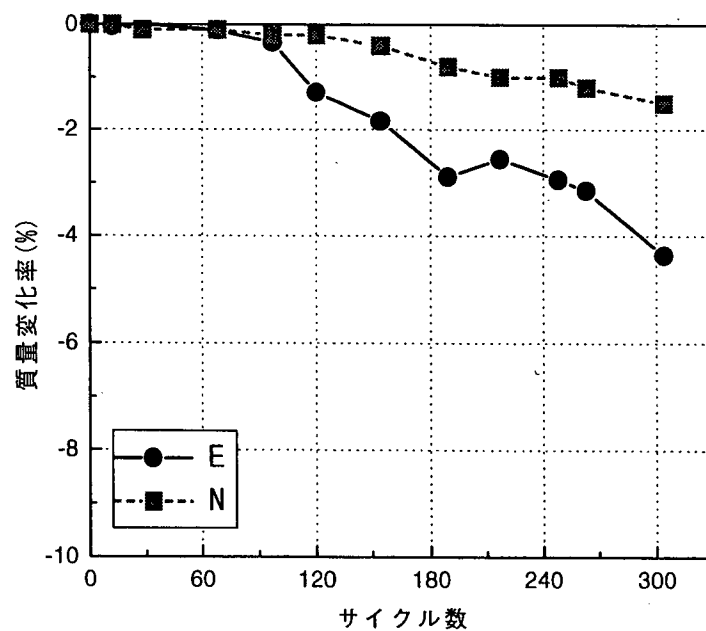


図 2-12 質量変化率

(3) 促進中性化試験

図 2-13に材齢8週までの促進中性化試験結果を示す。なお、資料編⑤に促進中性化試験結果を掲載した。材齢8週までの結果ではエコセメントコンクリートの中性化深さは普通セメントコンクリートとほぼ同等である。本試験でのコンクリートは配合強度が同一(26N/mm^2)のため、同程度の中性化深さとなったものと考えられる。

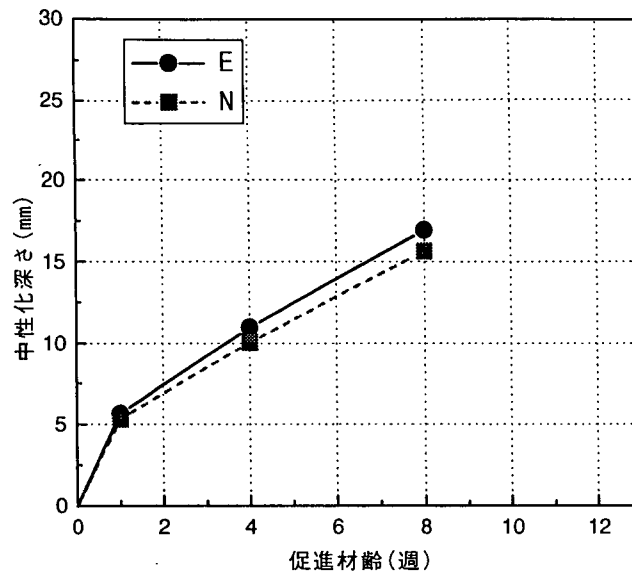


図 2-13 促進中性化試験結果

2.4 2章のまとめ

普通形エコセメントの生コンクリートへの適用性を検討するため、生コンクリートの需要調査、耐久性に関する室内試験および試験施工を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 普通形エコセメントの需要を、東京都の土木公共工事において使用される場合について推計した。東京都の生コンクリートの出荷量を種類別に推計し、適用可能な種類のコンクリートの出荷量からセメント使用量を推計した結果、年間約16万トンの需要が推計された。
- (2) 普通形エコセメントは、粉末度が普通ポルトランドセメントより高いため、単位水量および空気量調整剤量を若干増加させることで、普通ポルトランドセメントを用いた場合と同等のスランプおよび空気量性状が得られた。
- (3) 普通形エコセメントを用いたコンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係は、普通ポルトランドセメントの場合と同様に一次式で近似でき、セメント水比則が成立することが認められた。また、同一のセメント水比において、普通形エコセメントを用いたコンクリートの強度は、普通ポルトランドセメントの場合と比較すると若干低い傾向が認められた。
- (4) 普通形エコセメントを用いたコンクリートの中性化深さは、同一の水セメント比で比較した場合、普通ポルトランドセメントの場合よりやや大きくなった。同一圧縮強度で比較した場合、普通形エコセメントと普通ポルトランドセメントは同程度の中性化に対する抵抗性が得られると考えられるが、さらに長期材齢の結果を含めて検討する必要がある。
- (5) 普通形エコセメントを用いたコンクリート硬化体(材齢28日)からの重金属溶出量(六価クロム、水銀、砒素、セレン、カドミウム、鉛)は、水セメント比45%から65%の範囲においては、環境基準値(環境庁告示第46号)以下であった。
- (6) 普通形エコセメントを用いたコンクリートを園路舗装に適用し、施工性を評価した結果、以下のことが明らかとなった。
 - ① 一般の生コンプラントでの製造、アジテータ車での運搬、ポンプ打設において、普通ポルトランドセメントと同等の性状を示す。また、普通形エコセメントを用いた場合のフレッシュコンクリートの水の中の塩化物イオン量は $0.03\sim0.04\text{kg/m}^3$ 程度であり、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」の基準値 0.30kg/m^3 を下まわった。
 - ② 施工性の特徴として、普通形エコセメントを用いたコンクリートは、プラスチックであること、材料分離抵抗性が高くブリーディングが少ないことが挙げられ、その他の特徴として色調が黄色味を帯びていることが挙げられる。
 - ③ 施工時に採取した普通形エコセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮性状、中性化性状および凍結融解抵抗性は、普通ポルトランドセメントの場合と同等であることが認められた。

[参考文献]

- 1) 需要先別出荷数量・通商産業省統計生コン四半期報、1998 および1999
- 2) 寺田剛、明嵐政司：都市ごみ焼却灰を主原料としたセメントの低塩素化とコンクリートの特性、コンクリート工学、Vol.37、No.8、pp.26-30、1999

3 普通形エコセメントのコンクリート製品への適用性に関する研究

3.1 設計強度と製造方法による製品の分類

普通形エコセメントのコンクリート製品への適用範囲を明確化するため、製品を設計強度と製造方法により分類し、確認事項を検討した。表 3-1にコンクリート製品の分類結果を示す。分類にあたっては、設計区分を無筋コンクリート、鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリートとし、さらにそれぞれについて設計強度により細分した。また、製造方法は即脱、流し込みおよび遠心成形と大別し、流し込みについては形状の大小で細分した。この中にコンクリート製品を当てはめ整理した結果、次の7グループに分類された。

- ① 無筋：無筋コンクリート全般
- ② RC-1：設計強度が 24N/mm^2 までの小型製品
- ③ RC-2：設計強度が 30N/mm^2 以上の中型製品で、水和熱の影響を無視できるもの
- ④ RC-3：設計強度が 30N/mm^2 以上の大型製品で、水和熱の影響を考慮する必要があるもの
- ⑤ RC-4：遠心成形を行う RC 製品
- ⑥ PC-1：流し込みによる PC 製品
- ⑦ PC-2：遠心成形による PC 製品

普通形エコセメントに含有される塩化物量、構造物の重要度、製造の難易度、並びにセメントの需要等を考慮し適用範囲を検討した結果、無筋コンクリート、RC-1、RC-2 および RC-3 までを本共同研究での目標とした。PC-1 については技術的課題の整理等を行い、適用の可能性について検討する必要がある。また、遠心成形 (RC-4) に関しては製造方法が特殊であること、プレストレストコンクリート分野の PC-2 については、普通形エコセメント中に含まれる塩化物イオン量が 0.05% (500ppm) 程度であるためコンクリート中の塩化物イオン量の規格値 0.20kg/m^3 を満たすことが困難な場合も考えられることから、対象外とした。

表3-1 コンクリート製品の分類

設計区分		無筋コンクリート				RC				PC			
製造方法	強度	18	24	30	40<	18	24	30	40<	18	24	30	40<
即 脱	形状 小 ↓ 大	平板 境界ブロック 土木ブロック	無筋	インターロッキングB									
流し込み	形状 小 ↓ 大	平板 境界ブロック L型 土木ブロック 消波ブロック					RC-1 L型 側溝 土木ブロック	RC-2 擬木 擁壁 セグメント					PC-1 枕木 ボックスカルバート 橋桁
その他 特殊な 製造方法	遠 心							RC-3 ボックスカルバート ↓ RC-4 ヒューム 推進 パイル					PC-2 ボール パイル

分類	対象製品概要	確認事項						
		耐久性	溶出	発錆	構造特性	水和熱	製造	設計
無筋	無筋コンクリート製品全般	○	◎			△	△	
RC-1	24N/mm ² までの小型製品。道路用製品、土木ブロック	○	◎	○				
RC-2	30N/mm ² 以上の中型製品で水和熱の影響を無視できるもの	○	◎	○	○			
RC-3	30N/mm ² 以上の大型製品で水和熱の影響を考慮する必要があるもの	○	◎	○	○	◎	○	○
RC-4	遠心成形を行うRC製品	○	◎	○	○		○	○
PC-1	流し込みによるPC製品	◎	◎	◎	◎	○		○
PC-2	遠心成形によるPC製品	◎	◎	◎	◎		○	○

○：確認が必要、◎：確認が必ず必要、△：一部に確認が必要

3.2 蒸気養生を施したコンクリートの特性

3.2.1 実験概要

表 3-2にコンクリート製品に関する全体の試験概要を示す。本章では普通形エコセメント（記号：E）のコンクリート製品への適用性を検討するため、フレッシュコンクリートの性状ならびに蒸気養生を行った場合の強度特性、耐久性について調査し、さらに、4 章では鉄筋コンクリート部材としての力学的特性について水セメント比の水準を変化させ、普通ポルトランドセメント（記号：N）と比較・検討した。

表 3-2 試験概要

配合				セメントの種類			E					N					
				W/C (%)			55	50	45	40	35	55	50	45	40	35	
				スランプ° (cm)			16					16					
				空気量 (%)			4.5					4.5					
				混和剤の種類			高性能 AE 減水剤					高性能 AE 減水剤					
				養生方法			蒸気養生					蒸気養生					
フレッシュ 性状		スランプ° (皿)		室内	JIS A 5308	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
		塩化物			JIS A 5308	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
硬化 コンクリート		強度 特性	強度 静弾性係数	室内	1 日	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
					14 日	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
				暴露	6 ヶ月	—	○	—	○	—	—	○	—	○	—		
					1 年	—	○	—	○	—	—	○	—	○	—		
					2 年	—	○	—	○	—	—	○	—	○	—		
					3 年	—	○	—	○	—	—	○	—	○	—		
			曲げ強度	室内	1 日	—	○	—	○	—	—	○	—	○	—		
					14 日	—	○	—	○	—	—	○	—	○	—		
		耐久性	乾燥収縮	室内	JIS A 1129	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
			凍結融解	促進	JSCE- G501	Non-AE	—	—	○	—	—	—	—	○	—	—	
					4.5%	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
					6.0%	○	○	—	—	—	—	○	○	—	—		
			暴露				—	○	—	○	—	—	○	—	○	—	
				中性化	促進	温度:20℃ 湿度:60% CO ₂ 濃度:5%		○	○	○	○	○	○	○	○	○	
			暴露						—	○	—	○	—	—	○	—	
			発錆	促進	JCI-SC3		—	○	—	○	—	—	○	—	○	—	
					暴露	つくば、親不知		—	○	—	○	—	—	○	—	○	—
			溶出	室内	環境庁 46 号		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
			型枠発錆	室内	目視		—	○	—	○	—	—	○	—	○	—	
			力学 特性	鉄筋付着	室内	JIS 原案		—	—	○	—	—	—	—	○	—	—
				はり 引張試験		引張破壊		—	—	○	—	—	—	—	○	—	—
				曲げ試験		圧縮破壊		—	—	○	—	—	—	—	○	—	—
				はり せん断試験				—	—	○	—	—	—	—	○	—	—

水セメント比は、3.1 で述べた適用範囲におけるコンクリート製品の配合を包含するように 35%～55%とした。なお、コンクリート製品に関する JIS においては、水セメント比は 50%以下と規定されているが、強度および耐久性をより広い範囲において評価する目的で水セメント比 55%の水準を取り上げた。また、凍結融解抵抗性試験においては、空気量の影響を検討するため、練上がり直後の空気量を標準の 4.5%に加えて、6.0%および Non-AE コンクリート(2.0%)を水準として検討した。

(1) 使用材料

本実験に使用した材料を表 3-3に、使用したセメントの化学成分と鉱物組成を表 3-4に示す。使用材料はセメントとして普通形エコセメント(E)および普通ポルトランドセメント(N)、細骨材には静岡県小笠産陸砂(密度:2.60g/cm³、粗粒率:2.87)、粗骨材には茨城県岩瀬産碎石(密度:2.63g/cm³、最大寸法 20mm)を用いた。

高性能 AE 減水剤(SP)にはポリカルボン酸系を用い、空気量の調整には変性ロジン酸化合物系(A)および変性アルキルカルボン酸化合物系(B)の AE 剤を使用した。使用した骨材の試験を JIS A 1109「細骨材の密度および吸水率試験方法」および、JIS A 1103「骨材の洗い試験方法」に準じて行った。骨材試験成績を表 3-5、図 3-1および図 3-2に示す。いずれの骨材も規格値を満足している。

表 3-3 使用材料一覧

使用材料	銘柄/成分
セメント	普通形エコセメント(E)
	普通ポルトランドセメント(N)
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系(コアフローNP-55、太平洋セメント社製、記号 SP)
AE 剤	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤(CAE-30、太平洋セメント社製、記号 A)
	変性アルキルカルボン酸化合物系(マイクロエア 775S、エヌエムビー社製、記号 B)
粗骨材	茨城県西茨城郡岩瀬町産碎石 5 号、6 号 (65:35 で混合)
細骨材	静岡県小笠郡浜岡町産陸砂
水	水道水

表 3-4 セメントの化学成分と鉱物組成

セメント種類	化 学 成 分 (%)									鉱 物 組 成 (%)			
	Ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	Cl ⁻	C ₃ S	C ₂ S	C ₄ A	C ₄ AF
E	1.1	17.8	7.2	4.1	61.1	1.8	3.9	0.3	0.054	49	12	14	13
N	1.5	22.2	5.1	3.2	65.1	1.4	2.0	0.7	0.004	52	23	8	10

表 3-5 細骨材および粗骨材の試験結果一覧

骨材種類	岩瀬産碎石 5 号	岩瀬産碎石 6 号	小笠産陸砂
F.M.	7.06	6.34	2.87
表乾密度(g/cm ³)	2.64	2.62	2.60
絶乾密度(g/cm ³)	2.62	2.59	2.56
吸水率 (%)	0.65	1.03	1.37
単位容積質量(kg/L)	1.59	1.56	—
実積率(%)	60.7	60.2	—
洗い試験 (%)	—	—	0.81

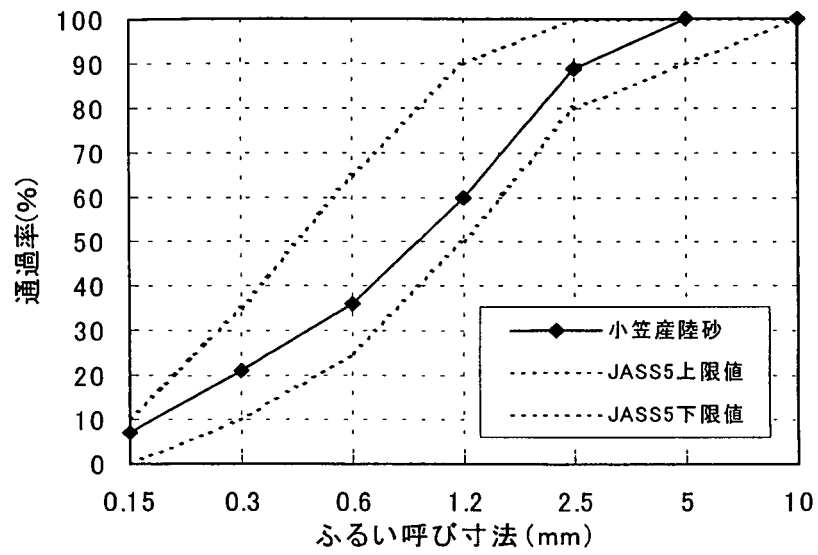


図 3-1 細骨材の粒度曲線

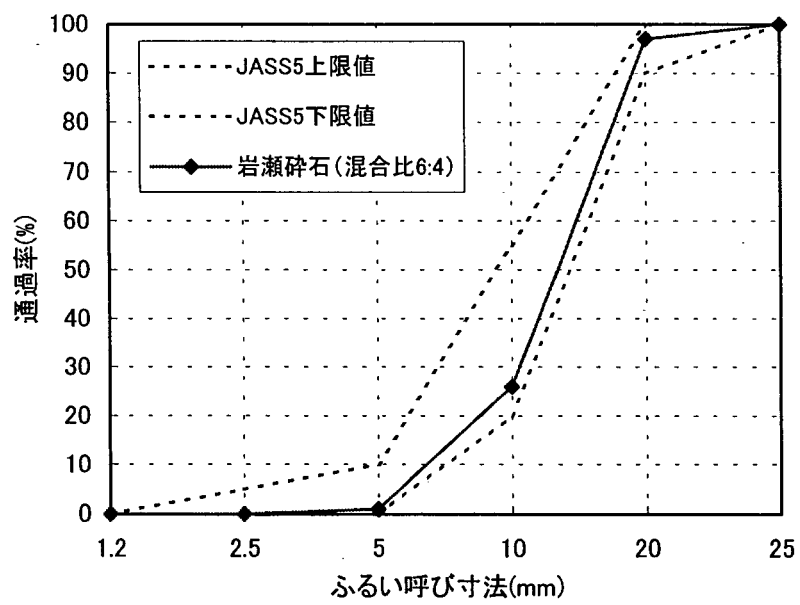


図 3-2 粗骨材の粒度曲線

(2) 配合

コンクリートの基本配合を表 3-6に示す。製品用配合を参考にして単位水量は 168kg/m^3 とし、いずれの水セメント比においても一定にした。また、スランプはポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤の添加量により、練上がり直後の値が 16cm となるように調整した。空気量は、AE 剤の添加量により、練上がり直後の値が 2.0% 、 4.5% および 6.0% になるように調整した。

表 3-6 コンクリートの基本配合

セメント の種類	配合条件			単位量 (kg/m^3)					添加率 (%)	
	W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	W	C	S	G5号	G6号	SP C× (%)	AE剤* C× (%)
E	35	43	4.5	168	480	712	575	381	1.00	0.0160
	40	44	4.5	168	420	750	582	385	0.80	0.0090
	45	45	4.5	168	373	784	584	386	0.75	0.0070
	50	46	4.5	168	336	816	583	386	0.80	0.0060
	55	47	4.5	168	305	845	581	384	0.80	0.0040
N	35	44	4.5	168	480	727	563	373	0.45	0.0035
	40	45	4.5	168	420	765	570	377	0.45	0.0030
	45	46	4.5	168	373	800	572	379	0.35	0.0020
	50	47	4.5	168	336	832	571	378	0.30	0.0020
	55	48	4.5	168	305	862	569	376	0.30	0.0010

*AE 剤：変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤(A)

(3) 供試体の作製

コンクリートの練混ぜは、湿度 80% 、温度 20°C の恒温室において、強制練りパン型ミキサ（公称容量 100L ）を用いて行った。粗骨材、セメント、細骨材の順に材料をミキサ内に投入し 30 秒間空練りを行った後、水を投入し 90 秒間練り混ぜた。練混ぜ終了後は $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 、 $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 、 $15 \times 15 \times 53\text{cm}$ の型枠内に詰め、その後、蒸気養生を行った。蒸気養生は図 3-3に示すように、前置 3 時間、昇温 20°C/h 、最高温度 65°C を 3 時間保持、以後自然降温のパターンとした。

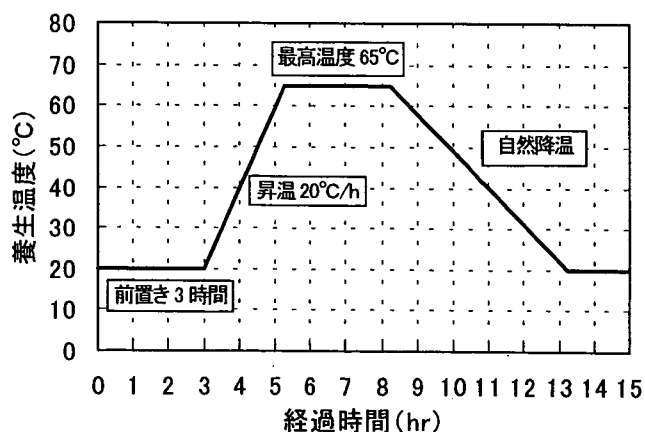


図 3-3 蒸気養生パターン

(4) 試験項目およびその方法

① フレッシュコンクリート試験

練上がり直後と練上がり 30 分後(静置)において、スランプ試験(JIS A 1101)、空気量試験(JIS A 1128)および塩化物イオン量測定試験(簡易法)を実施した。

② 圧縮強度・静弾性係数

圧縮強度は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠した。静弾性係数は、土木学会規準 JSCE-G502-1988「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠した。

蒸気養生後は、恒温恒湿室(温度 20℃、相対湿度 60%)で養生し、試験材齢は 1 日(蒸気養生後)および 14 日とした。暴露の場合は、恒温恒湿室にて 14 日間養生した供試体を土木研究所暴露試験所(茨城県つくば市)および新潟県親不知の 2 ヶ所に設置し、試験材齢を 6 ヶ月、1 年、2 年および 3 年とした。

③ 曲げ強度

JIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」に準拠した。蒸気養生後は、恒温恒湿室(温度 20℃、相対湿度 60%)で養生し、試験材齢は 1 日(蒸気養生後)および 14 日とした。

④ 乾燥収縮

JISA 1129「モルタルおよびコンクリートの長さ変化試験方法」に準拠した。供試体寸法は 10×10×40cm とし、1 水準 3 本とした。蒸気養生後、供試体温度を恒温恒湿室内で安定させ、基長を測定した。試験は温度 20℃、相対湿度 60%の室内で実施し、測定材齢は 2, 3, 4, 6, 10, 15, 28 週および 1 年とした。

⑤ 凍結融解抵抗性

蒸気養生後、材齢 14 日まで水中養生を行い、試験を開始した。促進試験は、土木学会規準 JSCE-G501-1986「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠し、300 サイクルまで原則として 30 サイクル毎に、動弾性係数および質量を測定した。暴露の場合は、凍結融解を受ける新潟県親不知に供試体を設置し、材齢 1 年、2 年および 3 年において動弾性係数および質量を測定することとした。また、水セメント比 50%の水準において、ASTM C 457「リニアトラバース法」に準拠し、気泡間隔係数の測定を行った。

⑥ 中性化

供試体寸法は、10×10×40cm とし、1 水準 2 本とした。蒸気養生後、恒温恒湿室(温度 20℃、相対湿度 60%Rh)で 14 日間養生し、試験を開始した。促進試験の場合、温度 20℃、相対湿度 60%、CO₂濃度 5%の雰囲気中で保存し、フェノールフタレイン噴霧法により材齢 1, 4, 8, 13, 26 週にて測定した。暴露試験の場合は、土木研究所暴露試験所(茨城県つくば市)に静置し、測定材齢は 6 ヶ月、1 年、2 年および 3 年とした。

⑦発錆試験

供試体の形状は、2章で示したものと同様である。蒸気養生後、恒温恒湿室(温度 20℃、相対湿度 60%)にて14日間養生した。促進試験方法は、「塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進腐食試験方法—乾湿繰返し法—(日本コンクリート工学協会、JCI-SC3)」に準拠した。暴露の場合は、供試体を土木研究所暴露試験所(茨城県つくば市)および新潟県親不知の2ヶ所に設置し、試験材齢は、1年、2年、3年および5年以上とした。

⑧溶出試験

溶出試験は、環境庁告示46号により、六価クロム、水銀、砒素、セレン、カドミウム、鉛の6項目について行った。試験は、蒸気養生後、恒温恒湿室(温度 20℃、相対湿度 60%)で材齢28日まで養生した供試体(ϕ 10×20cm)を全量粉碎(2mm以下)したものを試料として用い、コンクリート配合すべての水準について行った。なお、本来この試験方法は、土壌に対して適用されるものであるため、実際にコンクリートとして利用される状況よりも厳しい条件での評価となっている。

⑨鋼製型枠の発錆の有無

蒸気養生後において、型枠内面の発錆状況を調べた(写真撮影)。

3.2.2 フレッシュコンクリートの試験結果

(1) スランプ

フレッシュ性状の試験結果一覧を表 3-7に示す。また、図 3-4に目標空気量 4.5%の配合条件についてスランプの経時変化を示す。普通形エコセメントを用いたコンクリート(エコセメントコンクリート)のスランプロス(普通ポルトランドセメントを用いたコンクリート(普通セメントコンクリート)の場合より若干大きくなる傾向が認められた。

(2) 空気量

図 3-5に、AE 剤 A を用い目標空気量が 4.5%の配合条件について空気量の経時変化を示す。エコセメントコンクリートの空気量の経時変化は、普通セメントコンクリートより若干大きくなる傾向が認められた。すなわち、全配合の練混ぜ 30 分後(静置)の空気量の平均低下量は、普通セメントコンクリートの場合約 1%、エコセメントコンクリートの場合約 2%となった。また、AE 剤の種類の影響については、セメントの種類によらず、AE 剤 A を用いた場合の方が AE 剤 B を用いた場合より空気量の経時変化がやや大きくなる傾向が認められた。

(3) コンクリート温度

エコセメントコンクリートの練上がり直後の温度は、普通セメントコンクリートより、1~2℃程度高くなった。これは、普通形エコセメントの粉末度が高く C_3A 含有量が多いため、水和初期の発熱が増大するためと推察される。

(4) 塩化物イオン量

普通形エコセメントには 0.05%程度の塩化物イオンが含まれているが、フレッシュコンクリートの水の中の塩化物イオン量は、0.05~0.07kg/m³であり、セメント鉱物中に固定されている塩化物イオンの一部しか溶出せず、JIS A 5308 の規格値 0.30kg/m³を下まわった。

表 3-7 フレッシュ性状試験結果一覧

セメント 種類	配合条件				フレッシュ性状						
	W/C (%)	s/a (%)	目標 空気量 (%)	AE剤 種類	スランプ (cm)		空気量 (%)		コンクリート温度(℃)		塩化物 イオン量 (kg/m³)
					0分	30分	0分	30分	0分	30分	
E	35	43	4.5	A	15.8	11.7	4.0	2.2	25.0	22.0	—
	40	44	4.5	A	17.5	6.2	5.5	3.2	22.0	22.0	0.07
	45	45	Non-AE	—	16.0	—	1.9	—	24.0	—	—
			4.5	A	14.7	5.2	5.1	2.2	23.0	22.0	0.07
			6.0	B	16.0	5.0	7.0	4.1	23.5	23.5	—
	50	46	4.5	A	18.5	7.6	4.5	2.8	22.0	21.5	0.06
			6.0	A	18.5	8.5	6.4	4.2	22.0	22.0	—
				B	17.0	7.5	6.3	4.4	23.0	23.0	—
	55	47	4.5	A	15.6	8.2	3.8	2.8	22.0	21.0	0.05
			6.0	A	18.0	8.5	6.5	4.8	23.0	22.0	—
				B	17.5	10.0	6.0	5.0	22.0	22.0	—
N	35	44	4.5	A	12.5	8.5	3.7	2.4	21.5	21.0	0.04
	40	45	4.5	A	17.2	10.2	4.8	3.3	21.0	20.5	0.03
	45	46	Non-AE	—	13.0	—	1.2	—	22.0	—	—
			4.5	A	18.0	10.5	5.3	3.6	21.0	20.0	0.03
	50	47	4.5	A	16.0	9.5	5.1	4.1	21.0	20.0	0.03
			6.0	B	16.5	11.5	5.8	5.2	21.0	21.5	—
	55	48	4.5	A	14.5	11.0	4.1	3.9	21.0	20.0	0.03

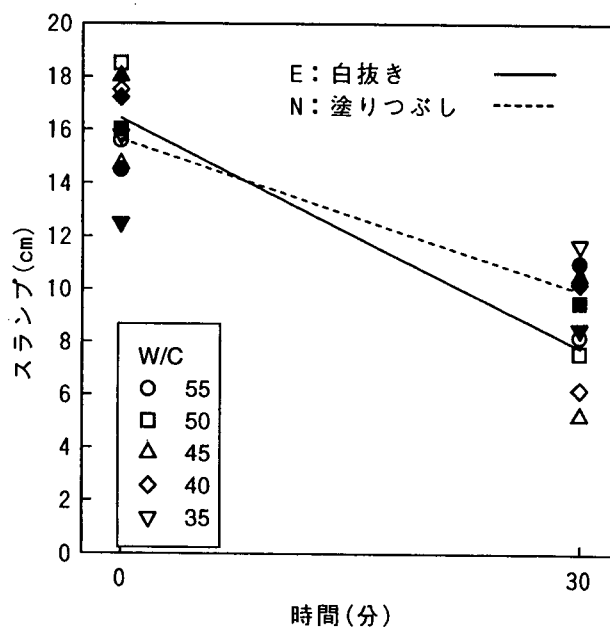


図 3-4 スランプの経時変化

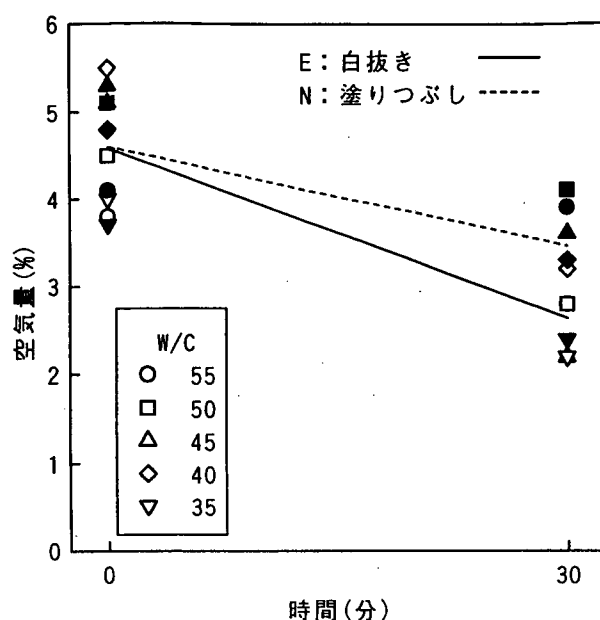


図 3-5 空気量の経時変化

3.2.3 強度試験結果

(1) 圧縮強度

圧縮強度の試験結果を表 3-8に示す。セメント水比と圧縮強度の関係を図 3-6に、材齢1日の強度で14日材齢の強度を割った値を「強度増加率」とし図 3-7に示す。個々の試験データに関しては資料編⑥に掲載した。

エコセメントコンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係は、普通セメントコンクリートと同様に一次式で表現できセメント水比則が成立することが認められた。また、同一のセメント水比であれば普通形エコセメントは普通ポルトランドセメントと同程度の強度を示した。また、水セメント比と圧縮強度の増加率の関係においても、普通形エコセメントを使用した場合と普通ポルトランドセメントを使用した場合に差は認められなかった。

表 3-8 圧縮強度試験結果一覧

セメントの種類	W/C (%)	圧縮強度 (N/mm ²)			
		f'_{cl}	標準偏差	f'_{cl4}	標準偏差
E	55	18.1	1.12	30.6	0.40
	50	19.8	0.82	31.4	0.62
	45	25.1	0.80	36.9	1.17
	40	28.6	2.04	42.8	2.05
	35	41.3	0.47	54.2	1.47
N	55	19.8	0.20	33.2	2.02
	50	20.9	0.81	33.6	2.50
	45	25.1	0.44	37.1	2.66
	40	32.6	0.98	45.2	1.42
	35	39.0	2.82	51.0	0.81

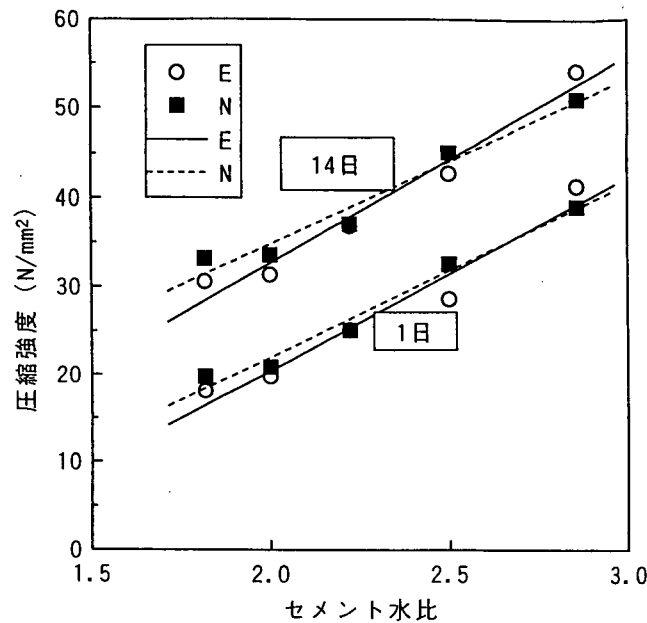


図 3-6 セメント水比と圧縮強度の関係

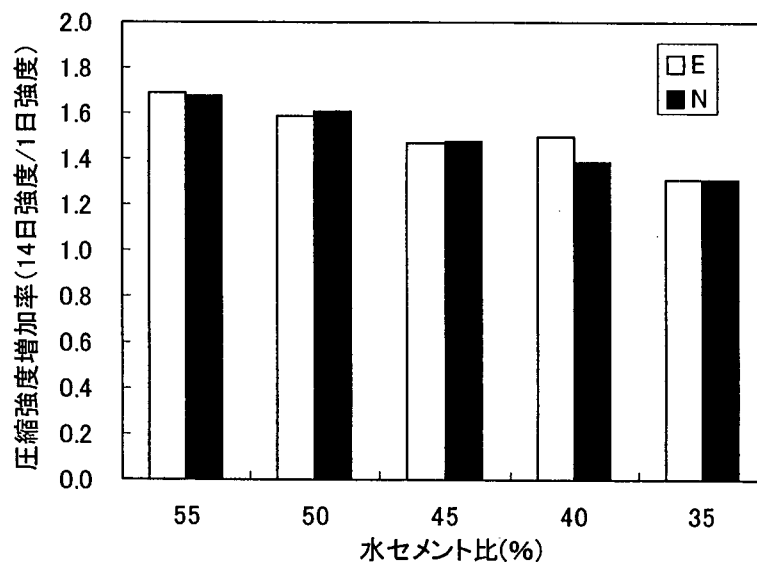


図 3-7 水セメント比と圧縮強度の増加率の関係

(2) 静弾性係数

静弾性係数の測定結果一覧を表 3-9に示す。材齢 1 日の静弾性係数で 14 日材齢の静弾性係数を割った値を「静弾性係数の増加率」とし図 3-8に、また圧縮強度と静弾性係数の関係を図 3-9に示す。個々の試験データに関しては資料編⑥に掲載した。

圧縮強度と静弾性係数の関係は、エコセメントコンクリートと普通セメントコンクリートは同様な関係を示し、その関係は土木学会標準示方書式(施工編：マスコンクリート、 $E_c=4,700\sqrt{f'_c}$)ではほぼ近似できることが認められた。また、静弾性係数の増加率は、エコセメントコンクリートと普通セメントコンクリートのいずれにおいても同程度であることが認められた。

表 3-9 静弾性係数測定結果一覧

セメントの種類	W/C (%)	静弾性係数 (kN/mm ²)	
		E ₁	E ₁₄
E	55	25.1	27.1
	50	20.6	25.1
	45	22.8	26.0
	40	23.6	25.8
	35	26.4	29.6
N	55	23.4	28.1
	50	23.0	27.2
	45	26.6	27.7
	40	26.5	32.8
	35	31.1	31.9

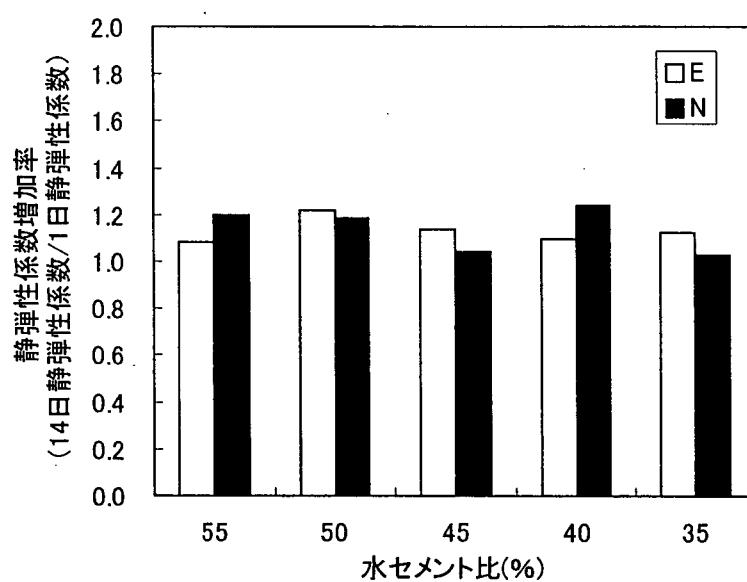


図 3-8 水セメント比と静弾性係数の増加率

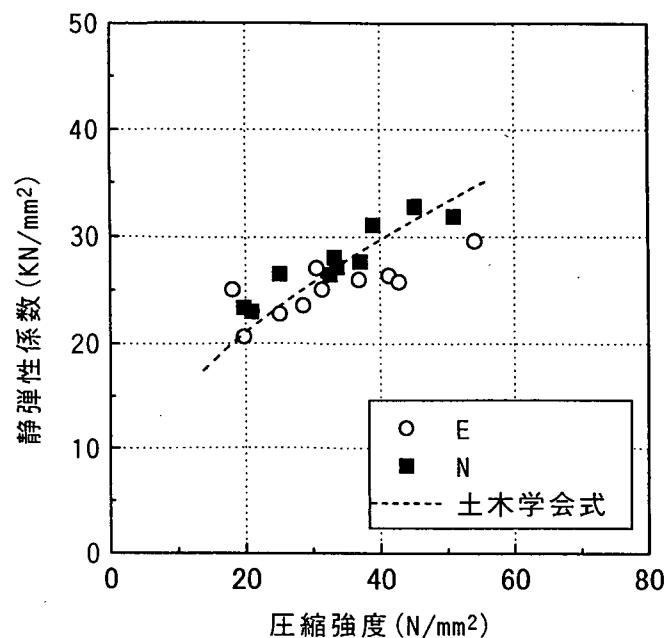


図 3-9 圧縮強度と静弾性係数

(3) 曲げ強度

曲げ試験結果を表 3-10 に、圧縮強度と曲げ強度の関係を図 3-10 に示す。また、図 3-11 に圧縮強度と圧縮強度に対する曲げ強度の比率の関係を示す。個々の試験データに関しては資料編⑦に掲載した。

圧縮強度と曲げ強度の関係については、エコセメントコンクリートは普通セメントコンクリートと同等の関係を示し、その関係は土木学会式($f_{bk}=0.42f_{ck}^{2/3}$)で近似できる可能性が認められた。この点については今後データを蓄積しさらに検討する必要がある。

圧縮強度と曲げ強度の比は、エコセメントコンクリートと普通セメントコンクリートは同様な傾向を示した。

表 3-10 曲げ強度試験結果一覧

セメントの種類	W/C (%)	曲げ強度 (N/mm²)			
		f_{bl}	標準偏差	f_{bl4}	標準偏差
E	50	3.66	0.12	4.00	0.18
	40	4.54	0.45	4.54	0.33
N	50	3.91	0.18	3.96	0.28
	40	4.74	0.09	3.91	0.19

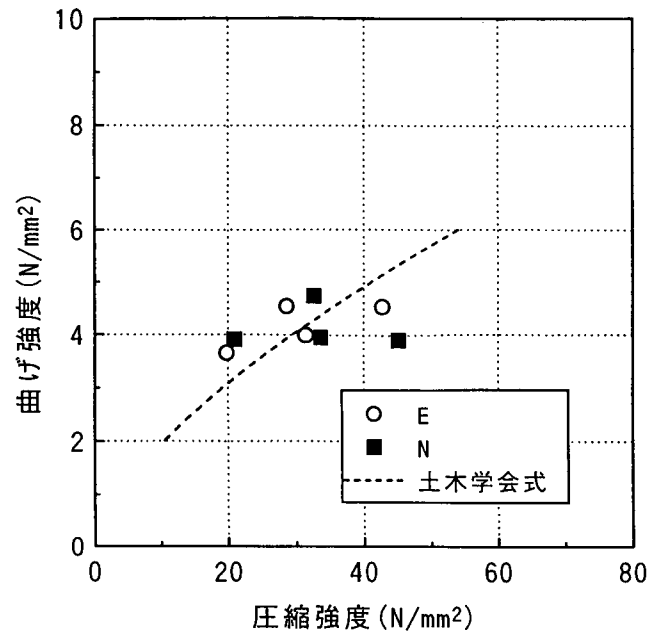


図 3-10 圧縮強度と曲げ強度の関係

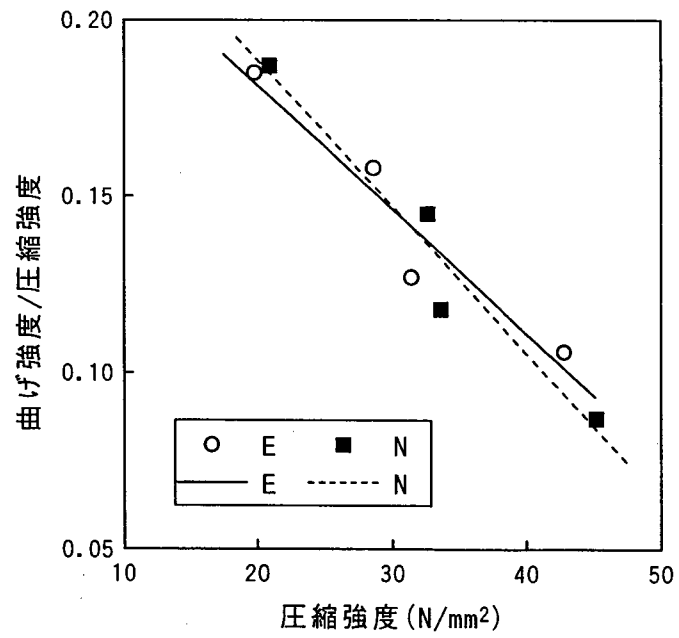


図 3-11 圧縮強度と曲げ強度の比

3.2.4 乾燥収縮試験結果

試験材齢10週までの乾燥収縮の経時変化を図 3-12に、質量変化率を図 3-13に示す。なお、資料編⑧に乾燥収縮試験結果を掲載した。エコセメントコンクリートの長さ変化率は、普通セメントコンクリートより各試験材齢とも小さくなっている。また、普通セメントコンクリートの長さ変化率は水セメント比が大きいほど大きくなる傾向を示しているのに対し、エコセメントコンクリートは、水セメント比の影響はあまり明確ではない。なお質量変化率については、エコセメントコンクリートは普通セメントコンクリートとほぼ同等の値を示した。

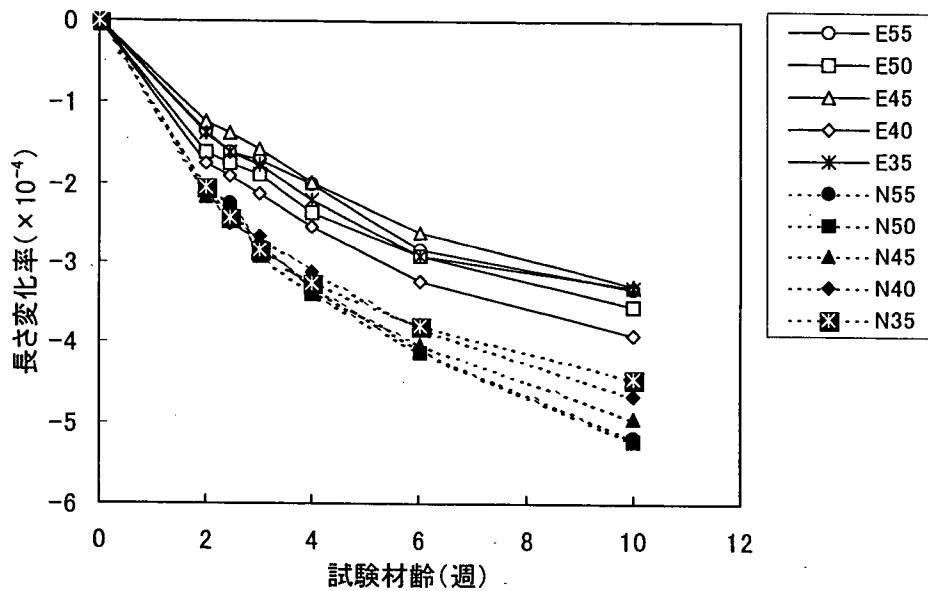


図 3-12 材齢と長さ変化率の関係

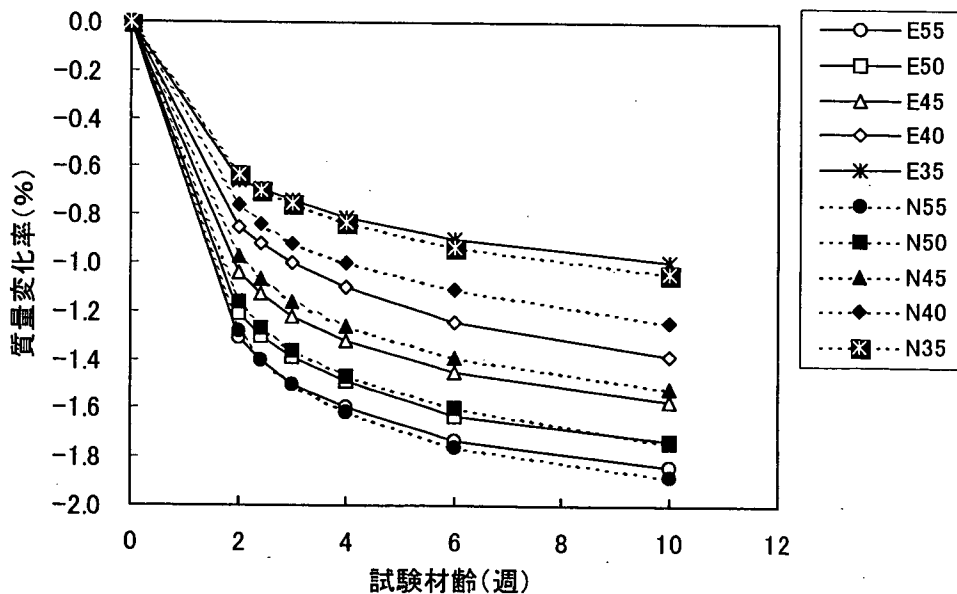


図 3-13 材齢と質量変化率の関係

3.2.5 凍結融解抵抗性試験結果

(1) サイクル数と相対動弾性係数の関係

表 3-11に相対動弾性係数の測定結果から求めた耐久性指数の一覧を示す。また、図 3-14～図 3-16に普通セメントコンクリートの場合のサイクル数と相対動弾性係数の関係を、図 3-17～図 3-19にエコセメントコンクリートの場合のサイクル数と相対動弾性係数の関係を示す。なお資料編⑨に凍結融解試験結果を掲載した。3.2.2 で述べたようにエコセメントコンクリートの空気量の経時変化は、普通セメントコンクリートよりも大きくなったため、実際に供試体に含まれる空気量に近いと思われる練混ぜ 30 分後の空気量により検討した。

図 3-14～図 3-16に示すように、普通セメントコンクリートの場合は、AE コンクリートとした場合、凍結融解 300 サイクル終了時の相対動弾性係数は 60%を上まわり、劣化は見られなかった。また、水セメント比が 40%および 35%の場合も、耐久性指数は 100 近く、十分な凍結融解抵抗性を示した。なお、Non-AE コンクリートの場合は、30 サイクル程度で相対動弾性係数 60%を下まわった。

一方、エコセメントコンクリートの場合は、図 3-17～図 3-19に示すように、水セメント比 45%以上においては、いずれの AE 剤を用いた場合も 30 分経過後の空気量が 4.0%程度であれば、凍結融解 300 サイクル終了時の相対動弾性係数は 100%程度で劣化は認められなかった。しかしながら、A タイプの AE 剤を用い目標空気量を 4.5%とした場合は、30 分後の空気量が 3.0%を下まわり、水セメント比 45%では 190 サイクル、水セメント比 50%および 55%では 30～40 サイクル終了時点で相対動弾性係数は 60%を下まわった。なお、表 3-11に示すように、水セメント比 40%および 35%の低水セメント比の場合は、耐久性指数は 100 近く、十分な凍結融解抵抗性を示した。また、Non-AE コンクリートの場合では普通セメントコンクリートと同様に、20 サイクル程度で相対動弾性係数 60%を下まわった。

表 3-11 耐久性指数一覧

セメント種類	W/C (%)	AE 剤種類および空気量			
		A-4.5%	A-6.0%	B-6.0%	Non-AE 2.0%
E	35	100.2	—	—	—
	40	88.3	—	—	—
	45	37.7	—	97.3	13.3
	50	7.90	98.3	97.0	—
	55	5.94	100.6	98.8	—
N	35	99.6	—	—	—
	40	93.9	—	—	—
	45	99.6	—	—	23.8
	50	96.5	—	97.0	—
	55	89.9	—	—	—

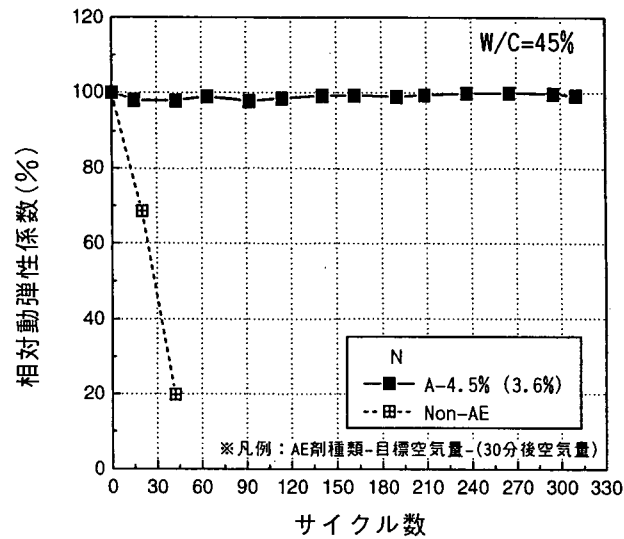


図 3-14 凍結融解試験結果 (W/C=45%, N)

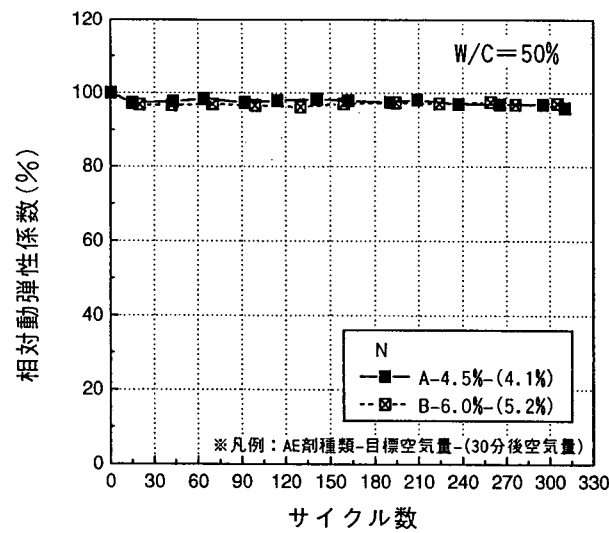


図 3-15 凍結融解試験結果 (W/C=50%, N)

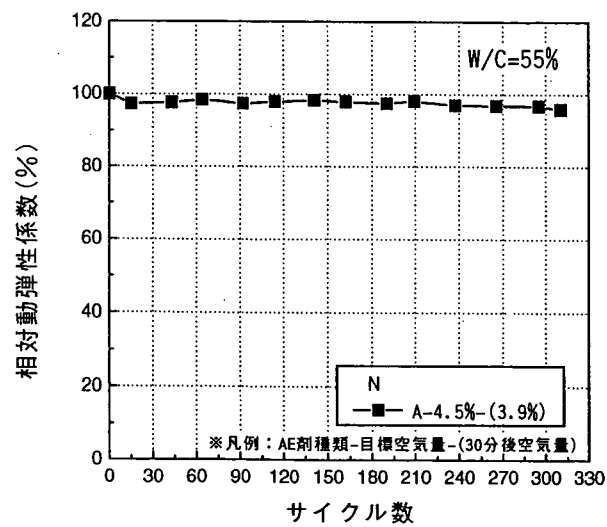


図 3-16 凍結融解試験結果 (W/C=55%, N)

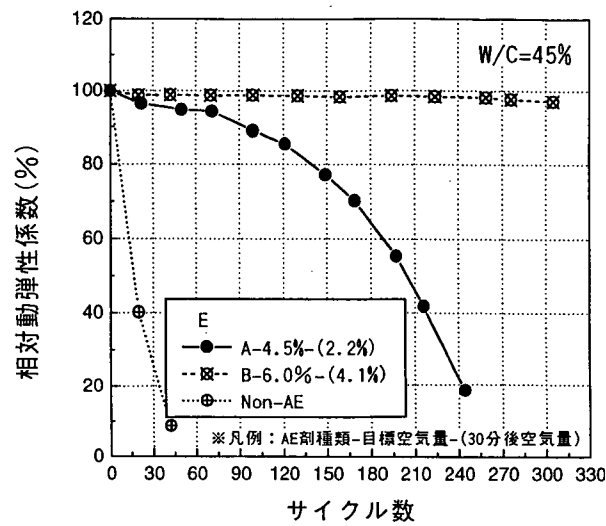


図 3-17 凍結融解試験結果(W/C=45%, E)

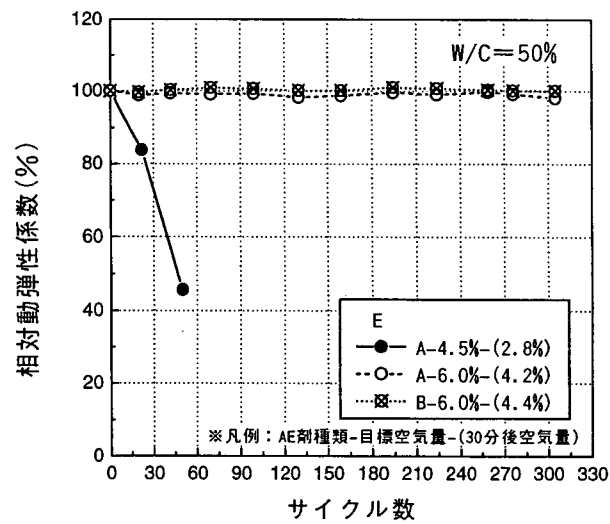


図 3-18 凍結融解試験結果 (W/C=50%, E)

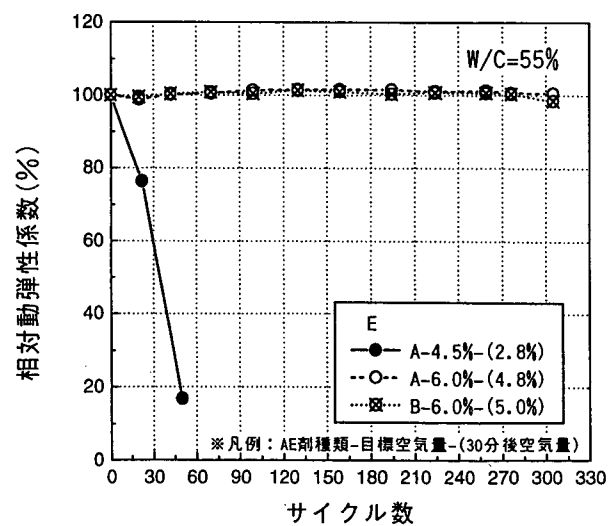


図 3-19 凍結融解試験結果 (W/C=55%, E)

(2)30 分後の空気量と耐久性指数の関係

本試験ではAタイプのAE剤を用いた場合に30分後の空気量が3.0%を下まわった水準において劣化が生じた。そこでエコセメントコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼすコンクリート中の気泡の影響を明らかにすることを目的として練混ぜ30分後の空気量および気泡間隔係数が凍結融解抵抗性に及ぼす影響を調べた。

図 3-20に水セメント比 45～55%の水準について空気量(30 分後)と耐久性指数との関係を示す。空気量が3.0%程度以上では、耐久性指数は60を上まわっており十分な凍結融解抵抗性が得られることが確認できた。

図 3-21に気泡間隔係数と耐久性指数の関係を示す。コンクリートの耐久性指数には気泡間隔係数が大きく影響し 250～300 μm を超えると凍結融解により劣化が生じるという報告がある^{1) 2)}。本実験結果では、30分後の空気量が4%程度確保されている水準は、気泡間隔係数が300 μm 未満と小さく劣化が生じていない。一方、30分後の空気量が2.8%の水準では気泡間隔係数が大きくなり(498 μm)劣化が著しくなった。これらの結果から普通形エコセメントを使用した場合においても普通ポルトランドセメントの場合と同様、空気量の影響が大きいことが認められた。

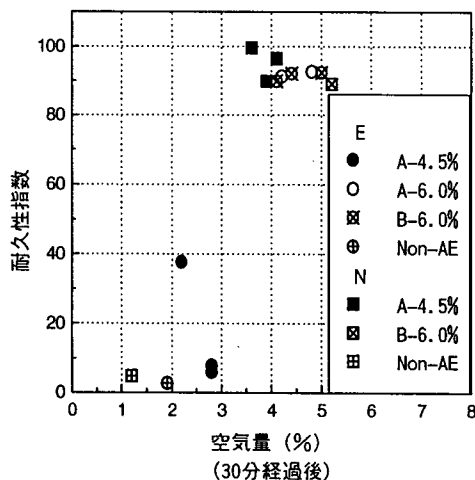


図 3-20 空気量と耐久性指数の関係

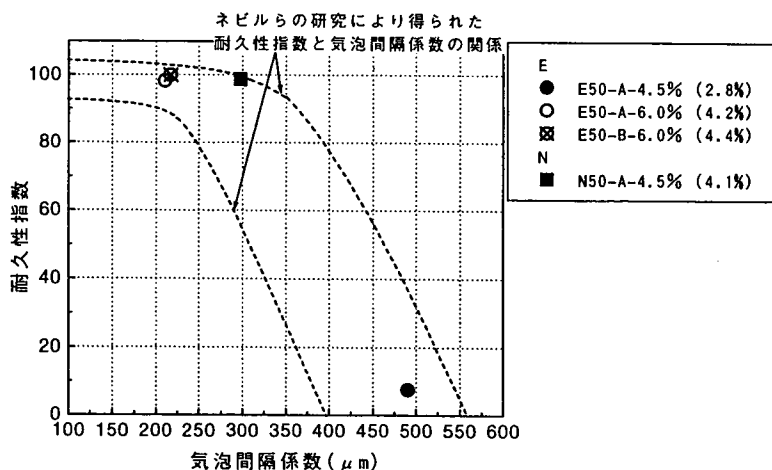


図 3-21 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

(3) 質量変化率測定結果

表 3-12に測定終了時の質量変化率を示す。測定終了時のサイクル数がほぼ等しい水準において、水セメント比別にセメント種類の影響を比較すると、水セメント比が 50%以上では普通形エコセメントを使用した場合の方が質量変化率は若干大きくなる傾向が見られたが、水セメント比が 40%以下では質量変化率はほぼ同等の結果となった。

表 3-12 質量変化率

セメント 種類	W/C (%)	AE 剤種類および空気量			
		A		B	Non-AE
		4.5%	6.0%	6.0%	2.0%
E	35	-0.7(317)	—	—	—
	40	-1.6(317)	—	—	—
	45	-5.2(197)	—	-1.9(305)	0.4(42)
	50	-1.5(50)	-4.1(305)	-3.2(305)	—
	55	-1.8(50)	-3.9(305)	-3.0(305)	—
N	35	-0.4(310)	—	—	—
	40	-2.1(310)	—	—	—
	45	-1.8(310)	—	—	-0.1(42)
	50	-2.9(310)	—	-1.9(305)	—
	55	-5.2(310)	—	—	—

※ () 内は測定終了時のサイクル数を示す。

(4) まとめ

以上より、普通形エコセメントを使用したコンクリートは所定の空気量を確保することで、普通ポルトランドセメントを使用した場合と同様に良好な凍結融解抵抗性が得られることが分かった。また、普通形エコセメントを用いた場合、AE 剤と使用材料の組合わせにより空気量の経時変化が大きくなる場合には、凍結融解抵抗性が低下することが認められた。したがって、普通形エコセメントを使用する場合においても普通ポルトランドセメントを使用する場合と同様に、事前に試験練りを行い十分な空気量を確保できるように適切な AE 剤種類や添加量等を検討し、配合の決定を行う必要がある。

3.2.6 促進中性化試験結果

表 3-13に促進中性化試験結果を示す。なお、資料編⑩に測定データを掲載した。

材齢4週までの結果では、同一水セメント比で比較した中性化深さは、エコセメントコンクリートの方が普通セメントコンクリートより大きく、その傾向は水セメント比が大きくなるほど顕著であった。

表 3-13 促進中性化試験結果 (単位:mm)

セメント種類	促進材齢 (週)	水セメント比(%)				
		35	40	45	50	55
E	1	0.0	0.2	2.3	1.6	1.3
	4	0.0	0.7	4.4	5.2	6.7
	8					
	13					
	26					
N	1	0.0	0.0	0.2	0.1	0.1
	4	0.0	0.2	0.7	1.4	2.6
	8					
	13					
	26					

3.2.7 蒸気養生後の型枠面の発錆状況観察結果

10×10×40cmの鋼製型枠について、蒸気養生前後の型枠内面の発錆状況を観察した。写真16～写真19にエコセメントコンクリートを用いた場合を、写真20～写真23に普通セメントコンクリートの場合の写真を掲載した。いずれのセメントを使用した場合も蒸気養生後の型枠内面の発錆は認められず、普通形エコセメントに含まれる塩化物の影響はないことが確認された。

3.2.8 重金属溶出試験結果

表 3-14に蒸気養生を行ったコンクリートの重金属溶出試験を環境庁告示 46 号により行った結果を示す。エコセメントコンクリートからの重金属の溶出量は、普通セメントコンクリートの場合と同様にいずれの配合条件においても環境基準値以下であった。本試験結果から、コンクリートとしての利用においては、環境に対する安全性は十分確保されているものと考えられる。

表 3-14 重金属溶出試験結果(mg/L)

記号*	E-35	E-40	E-45	E-50	E-55	環境基準値
pH**	12.4(24)	12.4(24)	12.4(25)	12.4(25)	12.4(25)	-
六価クロム	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.05
水銀	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0005
砒素	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01
セレン	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01
カドミウム	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01
鉛	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01
記号*	N-35	N-40	N-45	N-50	N-55	環境基準値
pH**	12.4(25)	12.4(25)	12.4(24)	12.5(24)	12.5(24)	-
六価クロム	0.012	0.013	0.012	0.012	0.011	0.05
水銀	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0005
砒素	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01
セレン	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01
カドミウム	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.01
鉛	0.002	0.003	0.003	0.002	0.003	0.01

* 記号は、セメント-水セメント比の順、E：普通形エコセメント、N：普通ポルトランドセメント

** pHの数値横の()内の数値は、測定時の溶液温度(℃)

3.3 3章のまとめ

普通形エコセメントのコンクリート製品への適用性を検討するため、フレッシュコンクリートの性状ならびに蒸気養生を行った場合の強度特性および耐久性状について検討を行った結果、以下のことが分かった。

- (1) 単位水量を一定とした場合、所定のスランプおよび空気量を得るための高性能AE減水剤量およびAE剤(空気量調整剤)量は、普通形エコセメントを用いた場合のほうが普通ポルトランドセメントを用いた場合より若干増加した。スランプロスは、普通形エコセメントを用いた場合のほうが普通ポルトランドセメントを用いた場合より大きくなる傾向が認められた。また、空気量の経時に伴う低下量も同様に、普通形エコセメントを用いた場合のほうが大きくなる傾向があった。普通形エコセメントを用いた場合の空気量の経時変化は、AE剤の種類や使用材料の組合せによる影響が認められた。
- (2) 普通形エコセメントを用いたコンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係は、普通ポルトランドセメントを用いた場合と同様に一次式で表現でき、セメント水比則が成立することが認められた。また同一の水セメント比であれば普通形エコセメントと普通ポルトランドセメントはほぼ同程度の強度を示した。
- (3) 普通形エコセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮は、普通ポルトランドセメントを用いた場合より若干小さくなった。中性化については、促進試験における材齢4週の結果では、同一水セメント比において比較した場合、普通ポルトランドセメントの場合より同等かやや大きくなる傾向が認められた。
- (4) 普通形エコセメントを用いたコンクリートは、十分な空気量が確保される場合、普通ポルトランドセメントを使用した場合と同等に十分な凍結融解抵抗性を示した。なお、AEコンクリートとする場合は普通ポルトランドセメントを使用する場合と同様に、事前に試験練りを行い十分な空気量を確保できるように、使用材料および配合の検討・確認を行う必要がある。
- (5) 普通形エコセメントを用いた水セメント比45%から65%のコンクリートからの六価クロム、水銀、砒素、セレン、カドミウムおよび鉛の重金属の溶出量は、普通ポルトランドセメントを用いた場合と同様にいずれの配合条件においても環境基準値(環境庁告示第46号)以下であった。本来この試験方法は、土壌に対して適用されるもので、実際にコンクリートとして利用される状況よりも厳しい評価である。本法により、環境基準値を満たす結果が得られたことから、コンクリートとしての利用においては、環境に対する安全性は十分確保されているものと考えられる。

[参考文献]

- 1) 後藤幸正、尾坂芳夫：ネビルのコンクリートの特性、技報堂出版、p359、1982
- 2) セメント協会：エンサイクロペディア[セメント・コンクリート化学の基礎解説]、p233、1996

4 普通形エコセメントを用いた鉄筋コンクリートの力学性状

4.1 はじめに

鉄筋コンクリート部材に普通形エコセメントを適用するためには、鉄筋とコンクリートの付着性状および部材としての力学的性状を確認する必要がある。ここでは、コンクリートと鉄筋との付着性状試験および鉄筋コンクリートはりの曲げ試験ならびにせん断試験を実施し、普通形エコセメントの鉄筋コンクリート部材（コンクリート製品）への適用性を確認することを目的とした。

4.2 普通形エコセメントを用いたコンクリートの鉄筋付着強度試験

4.2.1 実験概要

(1) 実験の要因と水準

実験の要因と水準を表 4-1に示す。鉄筋とコンクリートの付着強度に対しては、コンクリートの打設方向の影響が大きいのでこれを実験の要因とした。また、鉄筋の形状、ならびに鉄筋径の違いが付着強度に及ぼす影響も考えられるが、ここでは異形鉄筋で鉄筋径 D16mm の場合について検討した。

表 4-1 実験の要因と水準

要因	水準
セメントの種類	普通形エコセメント (E) 普通ポルトランドセメント (N)
鉄筋の形状	異形鉄筋
鉄筋径	D16mm
鉄筋埋設位置	垂直、水平(上)、水平(下)

(2) 使用材料およびコンクリート配合

使用材料は 3.2.1(1)に示す材料と同様である。使用した鉄筋は JIS G 3112(鉄筋コンクリート用棒鋼)に適合するもので、その種類および力学的性質を表 4-2に示す。また、コンクリート配合を表 4-3に示す。

表 4-2 使用した鉄筋の種類および力学的性質

鋼材の種類		降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	ヤング係数 (kN/mm ²)
呼び径	区分				
D16	SD345	369	530	22	183

表 4-3 コンクリート配合およびフレッシュ性状試験結果

セメント	配合条件		単位量 (kg/m ³)						SP	フレッシュ試験結果	
	W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G5号	G6号	C× (%)		スランプ (cm)	空気量 (%)
E	45	45	168	373	783	584	386	0.75		14.7	5.1
N	45	46	168	373	800	572	379	0.35		18.0	5.3

(3) 試験体の作製および付着試験概要

試験体の作製は強制練りパン型ミキサ（公称容量 100 L）を用いてコンクリートの練混ぜを行い、あらかじめ打設方向を想定して鉄筋を配筋した型枠内にコンクリートを流し込み蒸気養生を行った。蒸気養生は図 3-3 に示した方法により行った。蒸気養生後は湿布養生を行い材齢 28 日で試験を実施した。フレッシュ性状は練混ぜ直後にスランプ試験、空気量試験を実施した。

図 4-1 に試験体形状、配筋状況を示す。付着試験は JIS 原案「鉄筋とコンクリートとの付着試験方法（案）」に準じた。試験は変位を測定する目的で、鉄筋チャック上端部に変位計を取り付け、鉄筋とコンクリートのすべり量を荷重と同時に測定した。なお、試験体は各水準 3 本作製した。

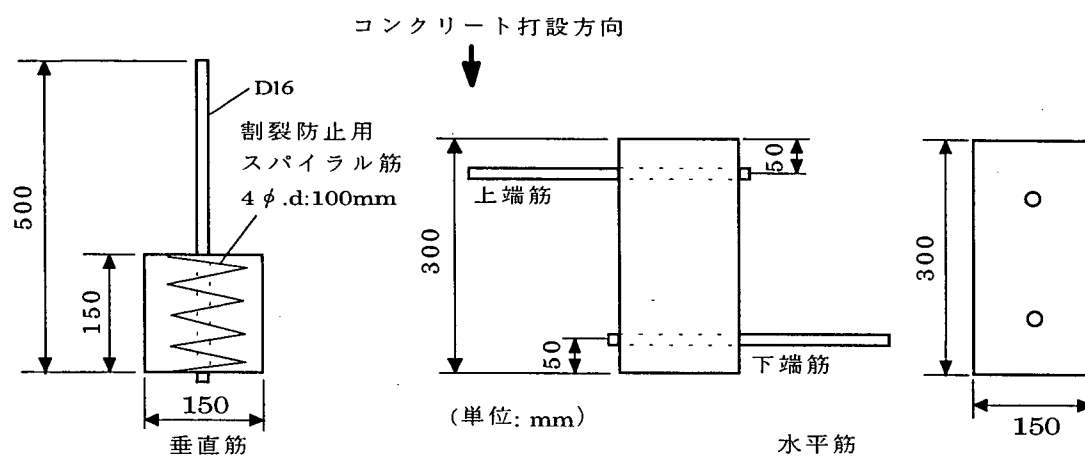


図 4-1 試験体形状、配筋および鉄筋付着試験方法

4.2.2 実験結果および考察

(1) 付着強度

①セメント種類の影響

表 4-4 に付着強度試験結果を示す。図 4-2 に普通形エコセメント (E) および普通ポルトランドセメント (N) を用いた場合の付着強度を鉄筋の埋込み方向別に示す。これによると、普通形エコセメントを用いた場合の付着強度は、普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べ 112~121% (平均 116%) の値を示し、平均で約 16% の増加を示した。また、水平筋下部に対する水平筋上部の付着強度の低下率は、普通ポルトランドセメントの場合で 8%、普通形エコセメントを用いた場合で 1% の値を示した。全体として普通形エコセメントを用いた場合の付着強度は普通ポルトランドセメントを用いた場合に比べ良好であり、鉄筋の埋込み方向および位置の違いによる影響もほとんど見られなかった。これは、普通形エコセメントを用いたコンクリートのブリーディングの量が少ないことに起因しているものと推察される。

表 4-4 付着試験結果一覧

セメント の種類	埋込み 状況	コンクリート 圧縮 強度 f' _c (N/mm ²)	供試体 番号	異形棒鋼(D16)						τ _b /f' _c (%)
				すべり量 0.002D 時 付着応力度 τ _i (N/mm ²)		最大引張荷重時				
						すべり量 (mm)		付着応力度 τ _b (N/mm ²)		
E	垂直筋	35.8	1	2.01	1.68	1.04	1.19	21.8	21.9	61.2
			2	1.50		1.41		22.0		
			3	1.53		1.11		22.0		
	水平筋 上端		1	1.86	1.87	1.33	1.21	22.0	21.6	60.3
			2	1.79		1.08		22.1		
			3	1.96		1.21		20.8		
	水平筋 下端		1	1.76	1.84	1.07	0.94	22.0	21.9	61.2
			2	1.86		0.89		22.0		
			3	1.89		0.85		21.8		
N	垂直筋	40.5	1	—	1.50	—	1.20	—	19.3	47.7
			2	1.45		1.11		19.4		
			3	1.54		1.29		19.2		
	水平筋 上端		1	1.43	1.53	0.76	0.88	16.5	17.9	44.2
			2	1.65		0.97		18.7		
			3	1.52		0.91		18.4		
	水平筋 下端		1	1.57	1.68	0.97	1.02	19.6	19.5	48.1
			2	1.68		0.92		19.4		
			3	1.79		1.18		19.5		

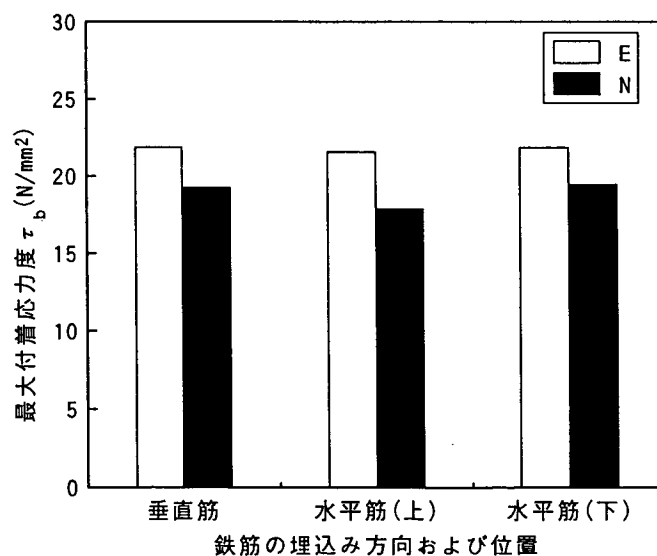


図 4-2 鉄筋の埋込み方向および位置の違いによるコンクリートの最大付着応力度

②圧縮強度との関係

図 4-3に圧縮強度に対する最大付着応力度 (τ_b) の比を鉄筋の埋込み方向別に示す。普通ポルトランドセメントの場合、44～48% (平均約 47%) の値を示し、水平筋上部では、水平筋下部に比べ約 4 %の低下が見られた。それに対し普通形エコセメントを使用した場合では、鉄筋の埋込み方向および位置の違いに関係なく約 60%の値を示した。これも、普通形エコセメントを用いたコンクリートのブリーディングの量が少ないことに起因しているものと推察される。

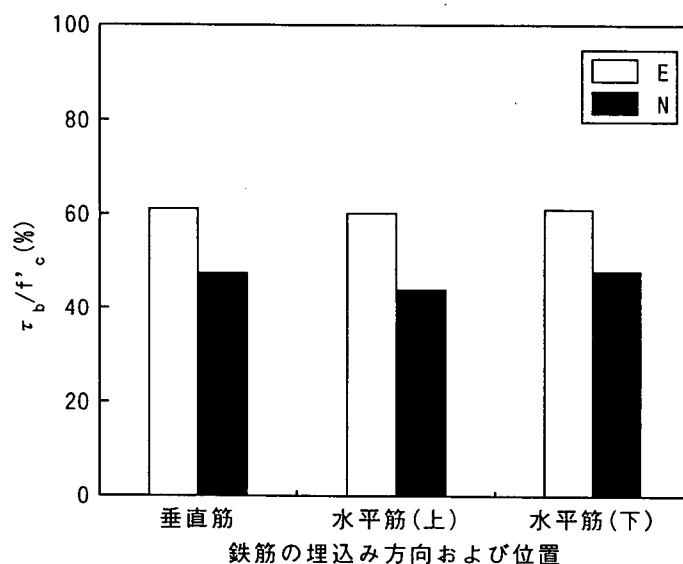


図 4-3 圧縮強度に対する最大付着応力度 (τ_b) の比の関係

③許容付着応力度との比較

表 4-5に土木学会「コンクリート標準示方書・設計編」に規定されている許容付着応力度を示すが、異形鉄筋を使用した場合には、普通形エコセメントおよび普通ポルトランドセメントを用いた場合ともに、許容付着応力度を十分に上回る付着応力度を示した。

表 4-5 許容付着応力度 (N/mm^2)

鉄筋の種類	設計基準強度 f'_{ck} (N/mm^2)			
	18	24	30	40 以上
普通丸鋼	0.7	0.8	0.9	1.0
異形鉄筋	1.4	1.6	1.8	2.0

(2) すべり量

①最大付着応力度 (τ_b) 時のすべり量

図 4-4に最大付着応力度 (τ_b) 時における鉄筋の埋込み方向および位置の違いによる自由端の鉄筋すべり量の値を示す。これによると鉄筋を垂直に配置した場合および水平下端に配置した場合の鉄筋すべり量は普通ポルトランドセメントの場合と普通形エコセメントの場合は同程度であったが、水平上端に配置した場合の普通ポルトランドセメントの場合の鉄筋すべり量は普通形エコセメントの場合の約 70%であった。

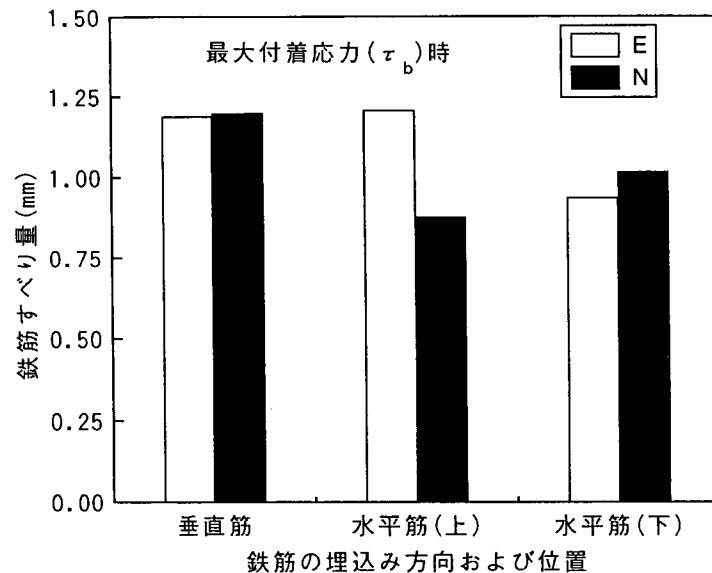


図 4-4 最大付着応力度 (τ_b) 時における鉄筋すべり量

②すべり量と τ_{bs}/f'_c との関係

図 4-5および図 4-6に自由端の鉄筋すべり量と τ_{bs}/f'_c の関係をプロットした例を示す。なお、3つの試験体いずれも同様の傾向が認められた。普通形エコセメントを用いたコンクリートにおいて鉄筋を垂直に配置した場合では、応力度が低い段階では大きな差異は認められないが、徐々に普通コンクリートに比べ同一すべり量における付着応力度 (τ_{bs}) は若干大きくなる傾向が見られた。また水平筋を上端および下端に配置した場合では、普通形エコセメントを使用したコンクリートと普通コンクリートの間に明確な差異は認められなかった。これらより、普通形エコセメントを用いた場合のすべり量と τ_{bs}/f'_c との関係は、普通ポルトランドセメントの場合と同等であることが確認された。

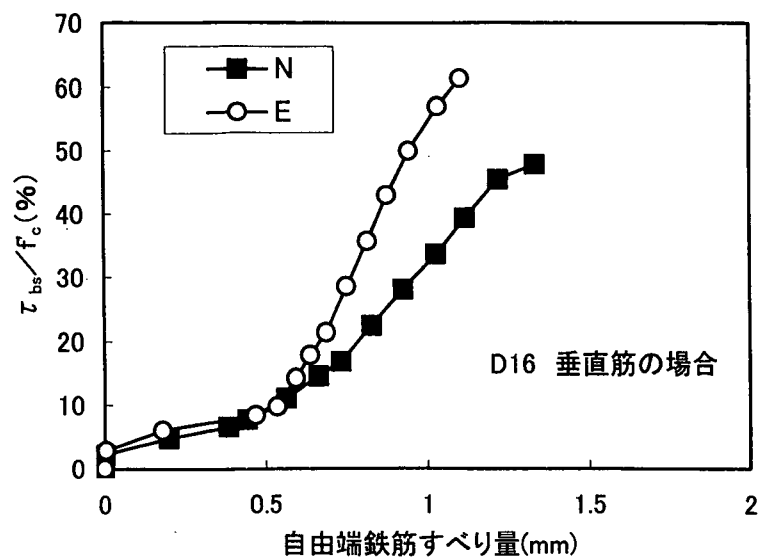


図 4-5 垂直に配置した鉄筋の自由端鉄筋すべり量と τ_{bs}/f_c の関係

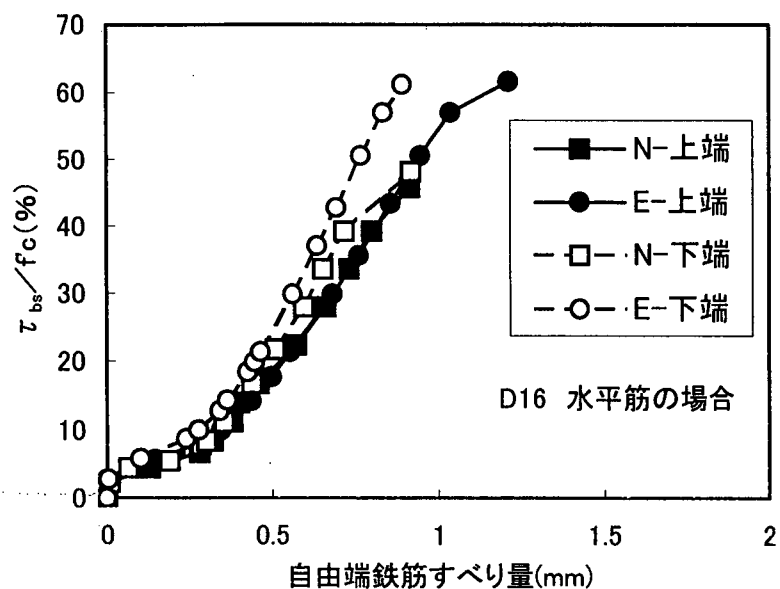


図 4-6 水平に配置した鉄筋の自由端鉄筋すべり量と τ_{bs}/f_c の関係

4.3 普通形エコセメントを用いた鉄筋コンクリートはりの曲げ・せん断性状

4.3.1 実験概要

(1) 実験の要因と水準

実験の要因と水準を表 4-6に示す。鉄筋比ならびにせん断補強筋間隔は、はり部材の破壊性状が曲げ引張破壊、曲げ圧縮破壊およびせん断破壊となるように変化させた。なお、曲げ引張破壊を想定した試験体に関してはその鉄筋比を、釣り合い鉄筋比の 75%、釣り合い鉄筋比の 50%以下の 2 水準とした。

表 4-6 実験の要因と水準

要因	水準
セメントの種類	E、N
鉄筋比 (%)	2.5、4.0、5.6
せん断補強筋間隔 (mm)	40、80、120

(2) 使用材料およびコンクリート配合

使用材料は 3.2.1(1)と同様である。使用した鉄筋を表 4-7に、コンクリートの配合を表 4-8に示す。

表 4-7 使用した鉄筋の種類

使用箇所	鉄筋の径	規格
主筋	D25、D32、D38	SD345
せん断補強筋	D10	SD345

表 4-8 コンクリート配合

セメント	配合条件		単位量(kg/m ³)				SP
	W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G	C× (%)
E	45	43	168	373	783	1050	0.75
N	45	43	168	373	781	1048	0.30

(3) 試験体の作製および載荷試験概要

試験体の作製は強制練りパン型ミキサ（公称容量 100L）を用いてコンクリートの練混ぜを行い、あらかじめ所定の鉄筋を配筋した型枠内にコンクリートを流し込み蒸気養生を行った。蒸気養生は図 3-3 の方法により行った。蒸気養生後は湿布養生を行い材齢 28 日で載荷試験を実施した。フレッシュ性状は練混ぜ直後にスランプ試験、空気量試験を実施した。試験体形状および載荷方法を図 4-7に示す。はりの曲げ、せん断試験時の載荷は残留変位を確認する目的で、ひび割れ発生荷重に達した時点で一旦除荷し再び破壊まで載荷した。ひずみは、はり試験体のコンクリート圧縮面、引張面ならびに側面にワイヤストレーンゲージを貼り付け、たわみは中央、支点位置にたわみ計を設置し、測定した。

せん断補強には D10mm（SD345）を 40mm、80mm 並びに 120mm 間隔で使用し、破壊性状を曲げ破壊、せん断破壊となるように設計した。曲げ試験の試験体の種類を表 4-9に示す。

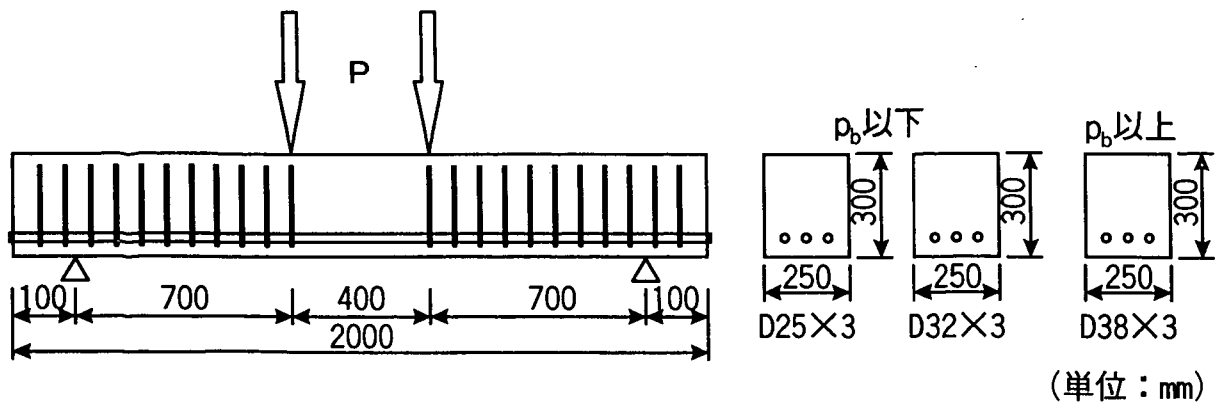


図 4-7 配筋、供試体形状および載荷方法

表 4-9 試験体の種類 (曲げ試験)

試験体の種類 \ 諸元	b (mm)	d (mm)	p	破壊性状
E-25-40	250	244	0.0249	曲げ引張
E-32-40	250	244	0.0391	
E-38-40	250	243	0.0563	曲げ圧縮
E-38-80	250	241	0.0568	せん断
E-38-120	250	242	0.0565	
N-25-40	250	243	0.0250	曲げ引張
N-32-40	250	242	0.0394	
N-38-40	250	243	0.0563	曲げ圧縮
N-38-80	250	240	0.0570	せん断
N-38-120	250	242	0.0565	

ここに b : はり幅、d : はりせい、p : 鉄筋比

凡例 : E-25-40 (セメントの種類-主筋-せん断補強筋間隔)

4.3.2 実験結果

コンクリートのフレッシュ時、載荷時点での強度試験結果を表 4-10に、また鉄筋の試験結果を図 4-8と表 4-11に示す。はりの曲げ、せん断試験結果一覧を表 4-12に示す。ひび割れ発生荷重は目視によるものであり、最大たわみは測定可能範囲における最大値を示した。

表 4-10 コンクリートの試験結果一覧

セメント の種類	フレッシュ性状		硬化性状			
	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
E	17.0	3.3	48.9	2.6	5.6	32.3
N	15.5	3.4	52.7	3.1	6.2	32.9

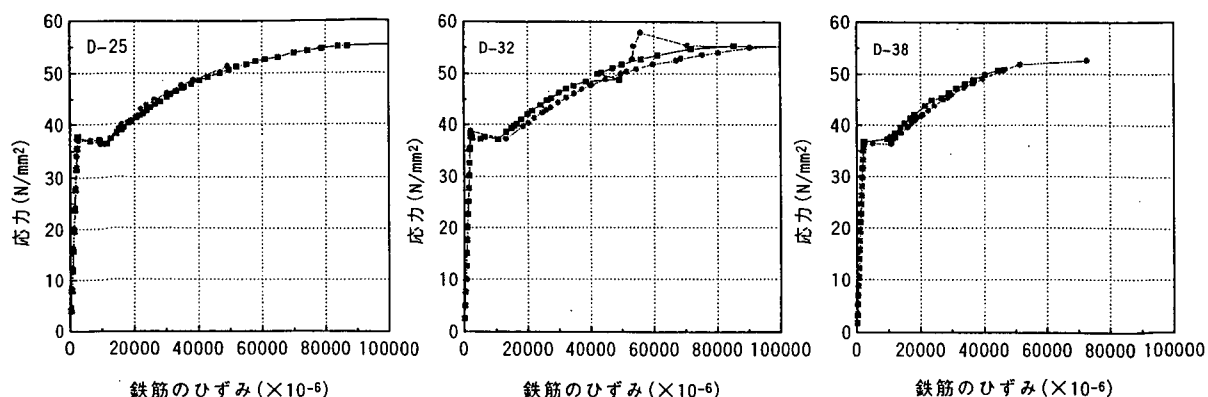


図 4-8 鉄筋の引張試験結果

表 4-11 鉄筋の引張試験結果一覧

鉄筋の種類	降伏強度 (N/mm^2)	降伏ひずみ ($\times 10^{-6}$)	ヤング係数 (kN/mm^2)
D25 (SD345)	376	2070	181
D32 (SD345)	382	2070	185
D38 (SD345)	365	2090	175

表 4-12 はりの曲げ試験、せん断試験結果

試験項目 セメントの種類		ひび割れ 発生荷重 P_{cr} (kN)	ひび割れ モーメント M_{cr} (kN・m)	破壊荷重 P_u (kN)	破壊 モーメント M_u (kN・m)	M_u/M_{cr}	最大 たわみ δ_u (mm)	破壊 性状
E	E-25-40	60.0	21.0	408.0	142.8	6.80	11.71	曲げ引張
	E-32-40	60.0	21.0	575.2	201.3	9.59	8.41	
	E-38-40	50.0	17.5	715.2	250.3	14.30	7.04	曲げ圧縮
	E-38-80	55.0	19.3	671.3	—	—	7.01	せん断
	E-38-120	50.0	17.5	622.4	—	—	8.05	
N	N-25-40	80.0	28.0	405.0	141.8	5.06	14.04	曲げ引張
	N-32-40	60.0	21.0	581.2	203.4	9.69	6.02	
	N-38-40	60.0	21.0	753.0	263.6	12.55	6.62	曲げ圧縮
	N-38-80	45.0	15.8	684.9	—	—	9.40	せん断
	N-38-120	80.0	28.0	631.4	—	—	8.05	

4.3.3 荷重—ひずみの関係

はりの荷重と圧縮側コンクリートおよび引張鉄筋のひずみの測定結果を図 4-9、図 4-10および図 4-11に示す。また、図中にひび割れ発生後から鉄筋降伏またはコンクリート圧縮縁応力が圧縮強度に達するまでを弾性範囲とし、コンクリートの引張強度を無視した許容応力度設計法により算出した圧縮コンクリートと鉄筋ひずみの計算結果も併せて示した。これらの図から鉄筋量が少ないD25—3本、D32—3本の場合には、鉄筋降伏が先行することが示されている。特にD25—3本の場合は鉄筋の降伏後もコンクリートのひずみが増加し急激な耐力低下が少ない鉄筋降伏型の破壊であることがひずみの図にも示されている。一方、鉄筋量の最も多いD38—3本の試験体においては終局時の釣り合い鉄筋比に近い鉄筋比であり、鉄筋の降伏とはほぼ同時にコンクリートの圧縮破壊に至ったことが示されている。これらの傾向は普通形エコセメント(E)と普通

ポルトランドセメント(N)で同様の傾向を示しており、セメントの種類が曲げ挙動に及ぼす影響は認められない。

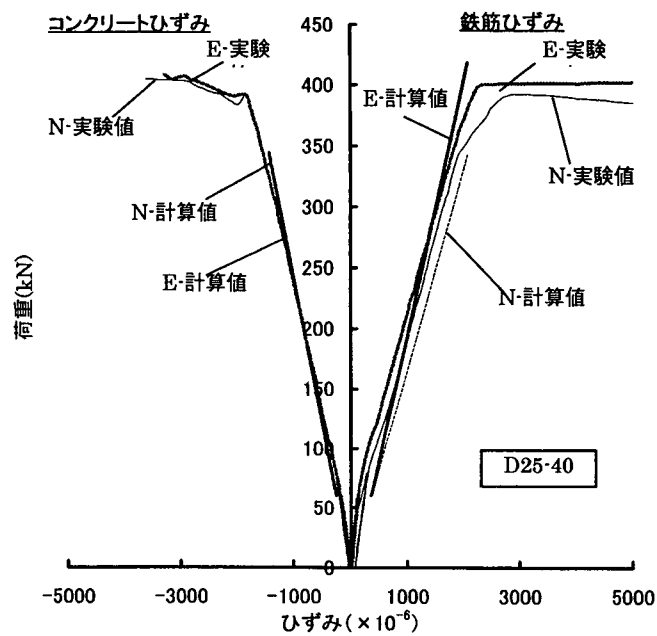


図 4-9 荷重—ひずみの関係(D25-40)

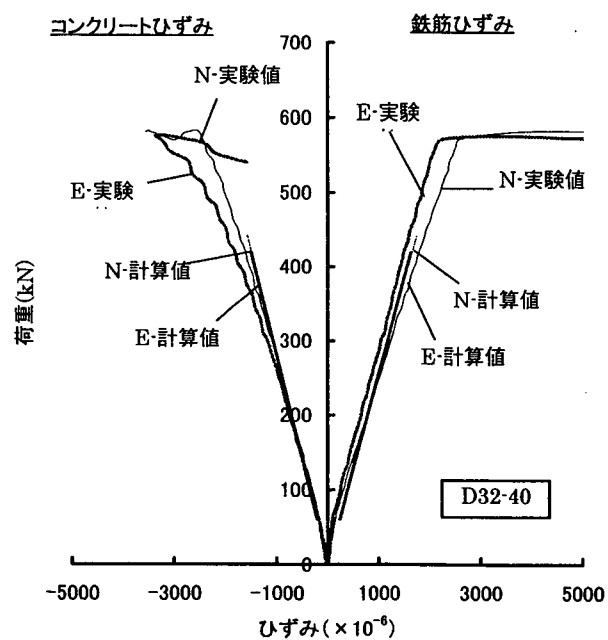


図 4-10 荷重—ひずみ関係(D32-40)

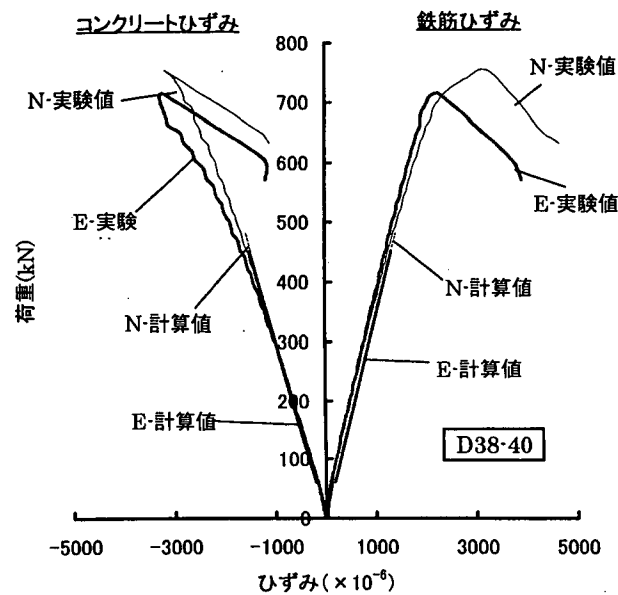


図 4-11 荷重—ひずみの関係(D38-40)

4.3.4 荷重—たわみの関係

荷重—たわみの関係を図 4-12に示す。荷重—たわみの関係においても普通形エコセメントと普通ポルトランドセメントで同様の関係を示しており、セメントの種類がたわみに及ぼす影響がないことが認められた。

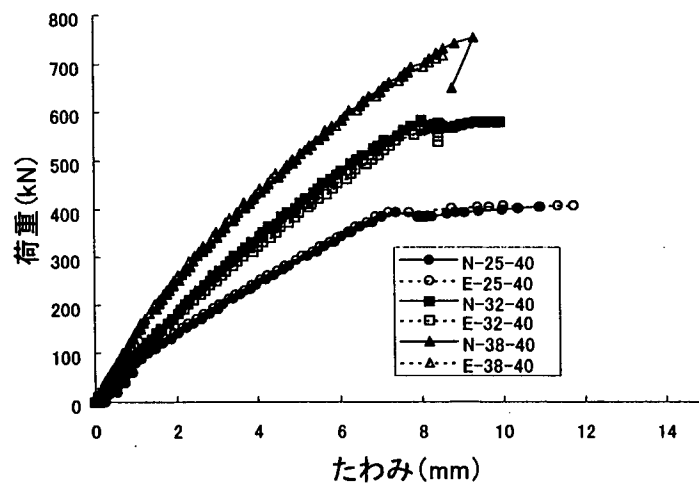


図 4-12 荷重—たわみの関係

4.3.5 ひび割れ発生荷重、終局荷重

ひび割れ発生荷重、終局荷重の実測値、並びに計算結果を表 4-13に、また、計算結果に用いた、物性値を前掲の表 4-10および表 4-11に示す。なお、資料編⑪にひび割れ発生荷重および終局荷重の計算方法を示す。

曲げ引張破壊の場合、終局耐力 M_u に及ぼすはりの有効高さ d 、引張鉄筋比 p および鉄筋の降伏点 f_y の影響が大きいので、これらの関係を無次元の形で表した M_u/bd^2 と $p \cdot f_y$ との関係を図 4-13に示す。図中に計算結果も併せて示す。

ひび割れ発生荷重および終局荷重は計算結果とよく一致し、またセメントの種類による差は見られない。終局荷重はどちらのセメントを使用した場合でも実測値が計算値より大きく安全側の結果となっている。

M_u/bd^2 と $p \cdot f_y$ の関係においては $p \cdot f_y$ の増加に伴い M_u/bd^2 の増加傾向が計算値とほぼ一致し、それはセメントの種類に影響されないことがわかった。以上より、普通形エコセメントを使用したコンクリートはり部材は、終局強度設計に一般的に使用されている計算方法を用いて設計できることが認められた。

表 4-13 ひび割れ荷重、最大荷重の実測値と計算値一覧

試験体	ひび割れ荷重					終局荷重					
	実験結果(目視)		計算結果		実験 計算 比	実験結果			計算結果		実験 計算 比
	荷重 (kN)	モーメント (kN・m)	荷重 (kN)	モーメント (kN・m)		荷重 (kN)	モーメント (kN・m)	最大 たわみ (mm)	荷重 (kN)	モーメント (kN・m)	
N-25-40	80	28.0	66.8	23.4	1.20	405.0	141.8	over 14.04	357.8	125.2	1.13
E-25-40	60	21.0	60.2	21.1	1.00	408.0	142.8	over 11.71	354.1	123.9	1.15
N-32-40	60	21.0	66.8	23.4	0.90	581.2	203.4	6.02	521.7	182.6	1.11
E-32-40	60	21.0	60.2	21.1	1.00	575.2	201.3	8.41	512.9	179.5	1.12
N-38-40	60	21.0	66.8	23.4	0.90	753.0	263.6	6.62	651.0	227.9	1.16
E-38-40	50	17.5	60.2	21.1	0.83	715.2	250.3	7.04	632.3	221.3	1.13
N-38-80	45	15.8	66.8	23.4	0.67	684.9	239.7	9.40	—	—	—
E-38-80	55	19.3	60.2	21.1	0.91	671.3	235.0	7.01	—	—	—
N-38-120	80	28.0	66.8	23.4	1.20	631.4	221.0	5.65	—	—	—
E-38-120	50	17.5	60.2	21.1	0.83	622.4	217.8	8.05	—	—	—

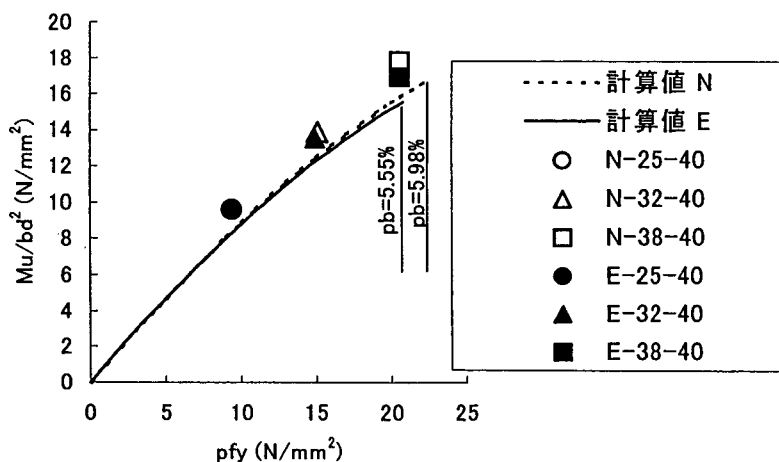


図 4-13 終局耐力と鉄筋比の関係

4.4 4章のまとめ

普通形エコセメントを用いたコンクリートと鉄筋との付着性状試験および鉄筋コンクリートはりの曲げ試験ならびにせん断試験を実施し、普通形エコセメントの鉄筋コンクリート部材（コンクリート製品）への適用性の確認を行ったところ以下のことが明らかになった。

- (1) 普通形エコセメントを使用したコンクリートと鉄筋の付着性状は、鉄筋が水平状態、垂直状態のいずれの場合においても普通ポルトランドセメントを用いた場合と比較して同程度以上であることが認められた。
- (2) コンクリート製品を対象とし、蒸気養生を行った鉄筋コンクリート部材の力学的挙動について検討した。
普通形エコセメントを用いたコンクリートを用い蒸気養生を施した鉄筋コンクリート部材の曲げおよびせん断性状は、普通ポルトランドセメントを用いた場合と同等であり、従来の設計方法を適用できる。

5 まとめ

本共同研究の目標は、低塩素化されたエコセメントを建設分野において活用可能とするため、「普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと同等の性能を有し、環境面においても普通ポルトランドセメントと同様の取扱いが可能なコンクリート材料を開発すること」である。すなわち、低塩素化されたエコセメントの利用方法、品質性状、安全性、施工性および耐久性を明らかにし、エコセメントを用いたコンクリート材料の開発・改良およびその利用技術の開発を行うものである。

本報告書は、平成 11 年度から平成 12 年度にかけて実施した、レディーミクストコンクリートを対象とした耐久性試験および施工性評価のための試験施工、コンクリート製品を対象とした基本特性および部材の力学特性の評価試験の中間結果を取りまとめたものである。本実験の範囲内で得られた結論を要約すると以下の通りである。

I. レディーミクストコンクリートへの適用性の評価試験結果

- (1) 普通形エコセメントの需要を、東京都の土木公共工事において使用される場合について推計した。東京都の生コンクリートの出荷量を種類別に推計し、当面の用途として考えられる生コンクリート使用量を算出してセメントの使用量に換算し普通形エコセメントの需要を推計した結果、年間約 16 万トンの需要が推計された。
- (2) 普通形エコセメントは、粉末度が普通ポルトランドセメントより高いため、単位水量および AE 剤(空気量調整剤)量を若干増加させることで、普通ポルトランドセメントを用いた場合と同等のスランプおよび空気量性状が得られた。
- (3) 普通形エコセメントを用いたフレッシュコンクリートの水の中の塩化物イオン量は、簡易法による結果では $0.03 \sim 0.04 \text{ kg/m}^3$ 程度であり、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」の基準値 0.30 kg/m^3 を下まわった。これは、普通形エコセメントに含まれる塩化物はセメント鉱物中に固定されておりその一部しか溶出しないことによるものと考えられる。
- (4) 普通形エコセメントを用いたコンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係は、普通ポルトランドセメントの場合と同様に一次式で近似でき、セメント水比則が成立することが認められた。また、同一のセメント水比において、普通形エコセメントを用いたコンクリートの強度は、普通ポルトランドセメントの場合と比較して若干低い傾向が認められた。
- (5) 普通形エコセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮性状は、普通ポルトランドセメントの場合と同等か若干小さくなった。
- (6) 普通形エコセメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性は、普通ポルトランドセメントの場合と同等であった。
- (7) 普通形エコセメントを用いたコンクリートの中性化性状は、促進試験における材齢 4 週の結果では、同一水セメント比で比較した場合、普通ポルトランドセメントの場合よりやや大きくなった。
- (8) 普通形エコセメントを用いた水セメント比 45% から 65% のコンクリートからの六価クロム、水銀、砒素、セレン、カドミウムおよび鉛の重金属の溶出量は、環境基準値(環境庁告示第 46 号)以下であった。本来

この試験方法は、土壌に対して適用されるもので、実際にコンクリートとして利用される状況よりも厳しい評価である。本法により、環境基準値を満たす結果が得られたことから、コンクリートとしての利用においては、環境に対する安全性は十分確保されているものと考えられる。

- (9) 普通形エコセメントを用いたコンクリートの施工性等をコンクリート舗装工事を通じて評価した結果、一般の生コンプラントでの製造、アジテータ車での運搬、ポンプ打設において、普通ポルトランドセメントと同等に取り扱えることが確認された。施工上の特徴としては、普通ポルトランドセメントを用いた場合と比較して、粘性がやや高くプラスチックであり、ブリーディングが少ないことから仕上げ回数が増加したが、表面性状は良好であった。

II. コンクリート製品への適用性の評価試験結果

- (10) 単位水量を一定とした場合、所定のスランプおよび空気量を得るための高性能 AE 減水剤量および AE 剤（空気量調整剤）量は、普通形エコセメントを用いた場合のほうが普通ポルトランドセメントを用いた場合より若干増加した。スランプロスは、普通形エコセメントを用いた場合のほうが普通ポルトランドセメントを用いた場合より大きくなる傾向が認められた。また、空気量の経時に伴う低下量も同様に、普通形エコセメントを用いた場合のほうが大きくなる傾向があった。普通形エコセメントを用いた場合の空気量の経時変化は、AE 剤の種類や使用材料の組合せによる影響が認められた。
- (11) 普通形エコセメントを用いたコンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係は、普通ポルトランドセメントを用いた場合と同様に一次式で表現でき、セメント水比則が成立することが認められた。また同一の水セメント比であれば普通形エコセメントと普通ポルトランドセメントはほぼ同程度の強度を示した。
- (12) 普通形エコセメントを用いたコンクリートの乾燥収縮は、普通ポルトランドセメントを用いた場合より若干小さくなった。中性化については、促進試験における材齢 4 週の結果では、同一水セメント比において比較した場合、普通ポルトランドセメントの場合より同等かやや大きくなる傾向が認められた。
- (13) 普通形エコセメントを用いたコンクリートは、十分な空気量が確保される場合、普通ポルトランドセメントを使用した場合と同等に十分な凍結融解抵抗性を示した。なお、AE コンクリートとする場合は普通ポルトランドセメントを使用する場合と同様に、事前に試験練りを行い十分な空気量を確保できるように、使用材料および配合の検討・確認を行う必要がある。
- (14) 普通形エコセメントを用いた水セメント比 45% から 65% のコンクリートからの六価クロム、水銀、砒素、セレン、カドミウムおよび鉛の重金属の溶出量は、普通ポルトランドセメントを用いた場合と同様にいずれの配合条件においても環境基準値（環境庁告示第 46 号）以下であった。本来この試験方法は、土壌に対して適用されるもので、実際にコンクリートとして利用される状況よりも厳しい評価である。本法により、環境基準値を満たす結果が得られたことから、コンクリートとしての利用においては、環境に対する安全性は十分確保されているものと考えられる。
- (15) 普通形エコセメントを用いたコンクリートと鉄筋との付着性状および鉄筋コンクリート部材の力学的特性は、普通ポルトランドセメントを用いた場合と同等の性状を示し、既存の設計法の適用が可能であることが認められた。

以上のように、これまでに実施した調査・実験から普通形エコセメントを実用に供するための基礎データを得ることができた。鉄筋コンクリート材料としての適用性を判断するためには、鉄筋の発錆性状の把握を行う必要があるため、現在、発錆試験に関しては乾湿繰り返しによる促進試験も実施している。また、茨城県つくば市および新潟県親不知においては、強度発現性、発錆試験および凍結融解抵抗性等の長期的な耐久性試験を実施しており、今回得られた結果と比較、検討し長期的な耐久性の確認を行う予定である。さらに、コンクリート製品に関しては、現在、製品の製造試験および試験施工を行い適用性の評価を行っている。今後、これらの結果を用いて、普通形エコセメントの鉄筋コンクリート材料としての適用性を総合的に検討する予定である。

写真編

<レディーミクストコンクリートへの適用性：発錆試験（促進、暴露）>

写真 1	発錆試験開始時の鉄筋の状況（E-55-8-1）	65
写真 2	発錆試験開始時の鉄筋の状況（E-55-8-2）	65
写真 3	発錆試験開始時の鉄筋の状況（N-55-8-1）	65
写真 4	発錆試験開始時の鉄筋の状況（N-55-8-2）	65

<暴露試験>

写真 5	暴露試験状況（茨城県つくば市）	66
写真 6	暴露試験状況（新潟県親不知）	66

<井の頭公園園路舗装工事>

写真 7	コンクリートの施工状況（普通形エコセメント）	66
写真 8	敷均し状況（普通形エコセメント）	67
写真 9	敷均し状況（普通ポルトランドセメント）	67
写真10	打設完了時（普通形エコセメント）	67
写真11	打設完了時（普通ポルトランドセメント）	67
写真12	硬化後の舗装表面	68
写真13	舗装表面の発色状況	68
写真14	舗装表面仕上げ状況（普通形エコセメント）	68
写真15	舗装表面仕上げ状況（普通ポルトランドセメント）	68

<コンクリート製品への適用性：型枠の発錆試験>

写真16	打ち込み前の型枠内面（E-40）	69
写真17	蒸気養生後の型枠内面（E-40）	69
写真18	打ち込み前の型枠内面（E-50）	69
写真19	蒸気養生後の型枠内面（E-50）	69
写真20	打ち込み前の型枠内面（N-40）	70
写真21	蒸気養生後の型枠内面（N-40）	70
写真22	打ち込み前の型枠内面（N-50）	70
写真23	蒸気養生後の型枠内面（N-50）	70

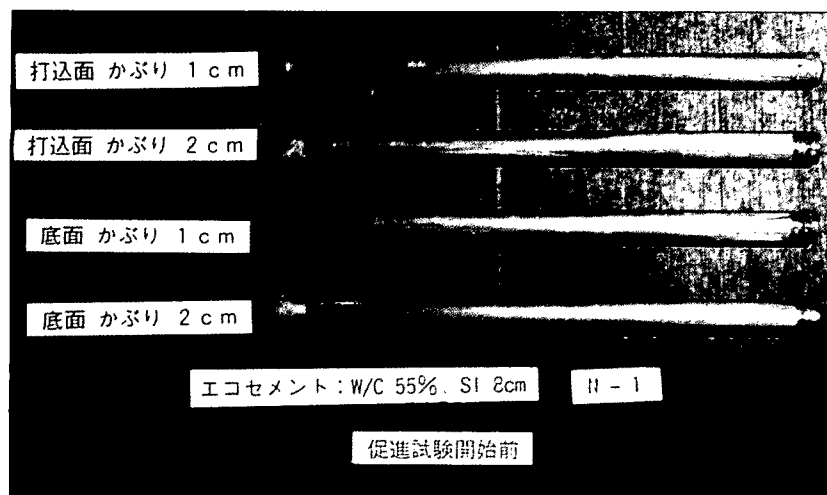


写真 1 発錆試験開始時の鉄筋の状況 (E-55-8-1)

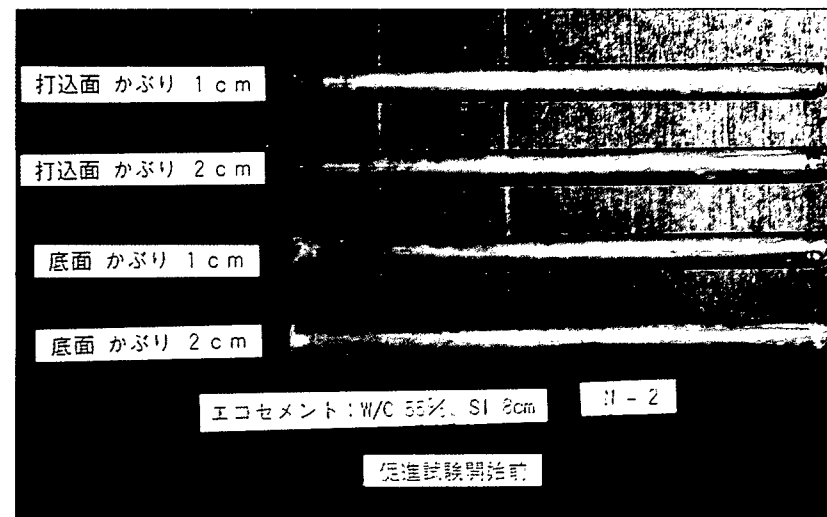


写真 2 発錆試験開始時の鉄筋の状況 (E-55-8-2)

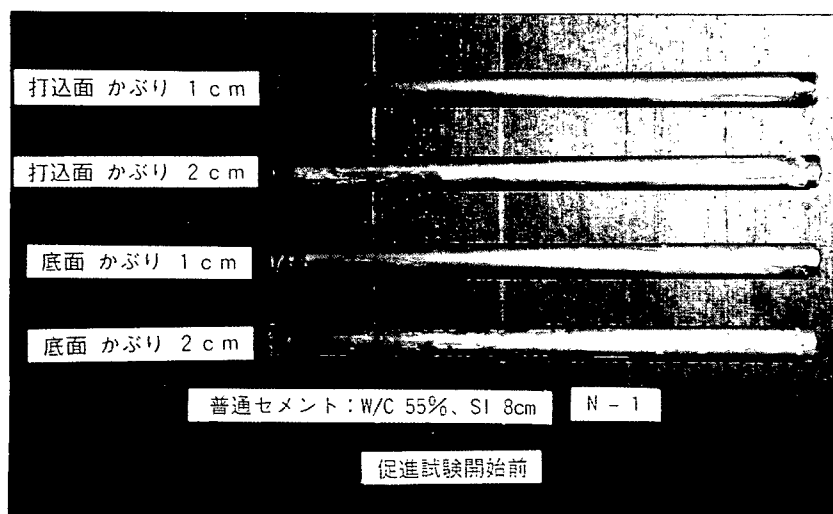


写真 3 発錆試験開始時の鉄筋の状況 (N-55-8-1)

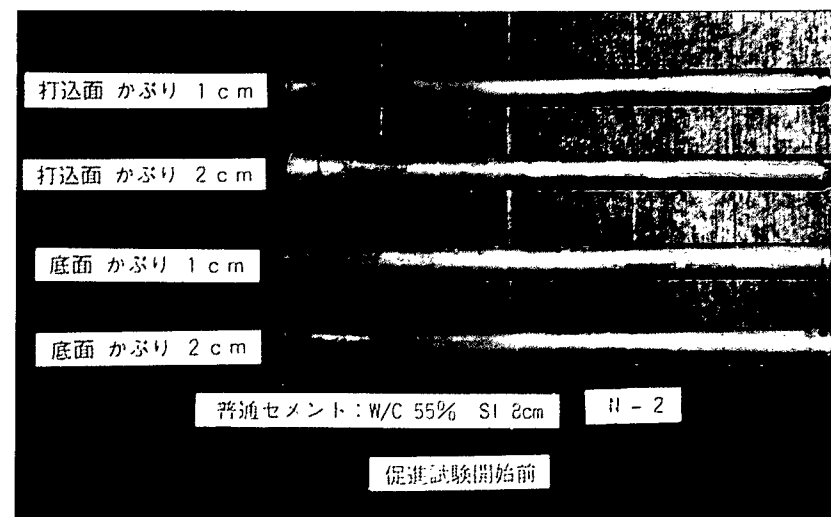


写真 4 発錆試験開始時の鉄筋の状況 (N-55-8-2)



写真 5 暴露試験状況（茨城県つくば市）

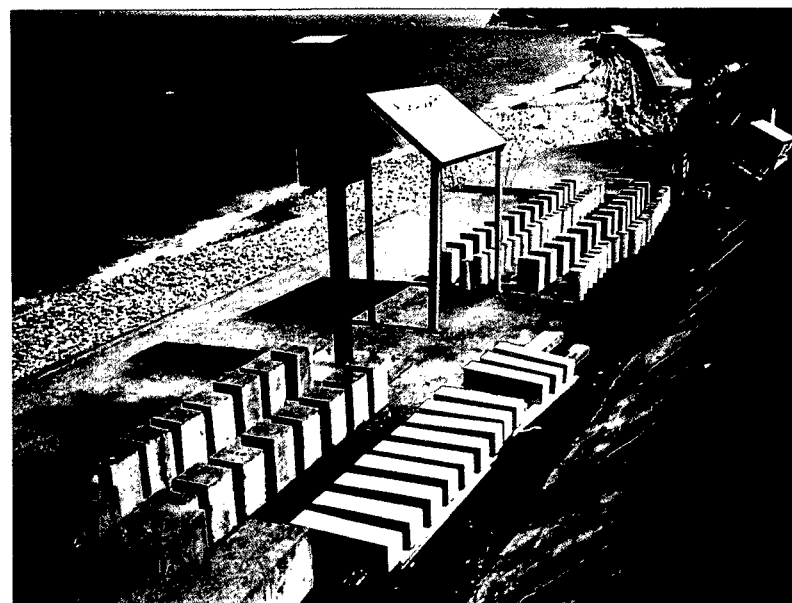


写真 6 暴露試験状況（新潟県親不知）



写真 7 コンクリートの施工状況（普通形エコセメント）



写真 8 敷均し状況（普通形エコセメント）



写真 9 敷均し状況（普通ポルトランドセメント）



写真 10 打設完了時（普通形エコセメント）



写真 11 打設完了時（普通ポルトランドセメント）



写真 12 硬化後の舗装表面

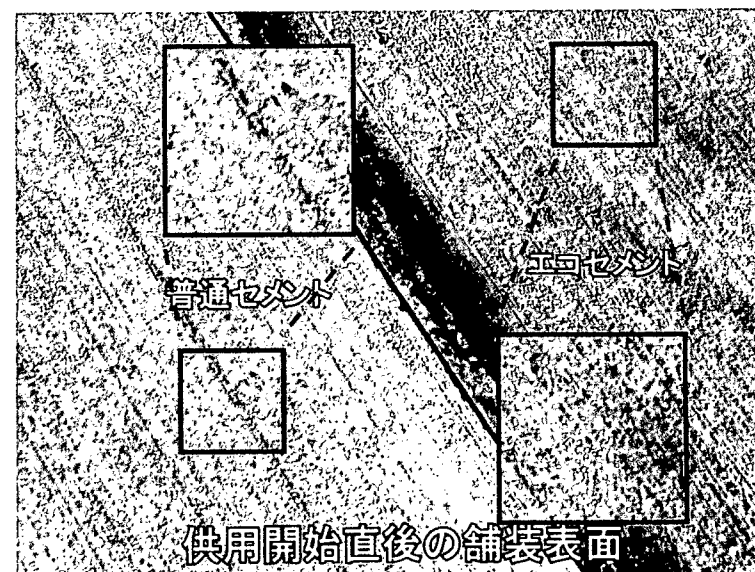


写真 13 舗装表面の発色状況

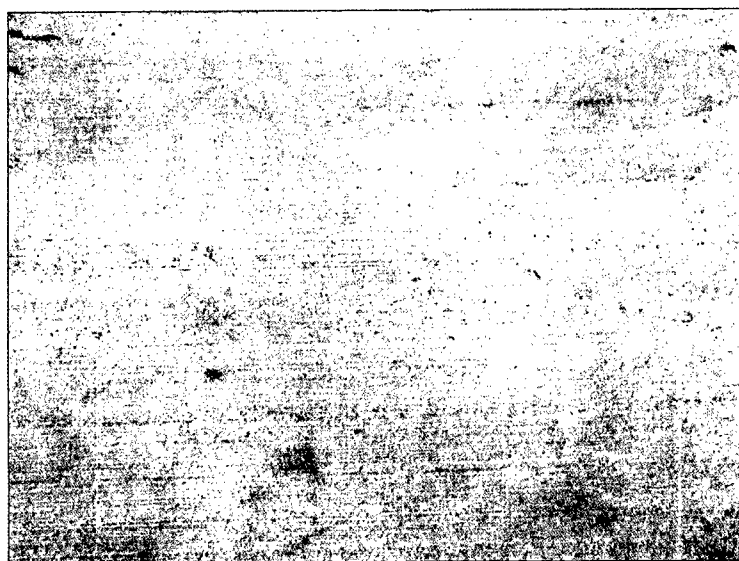


写真 14 舗装表面仕上げ状況（普通形エコセメント）

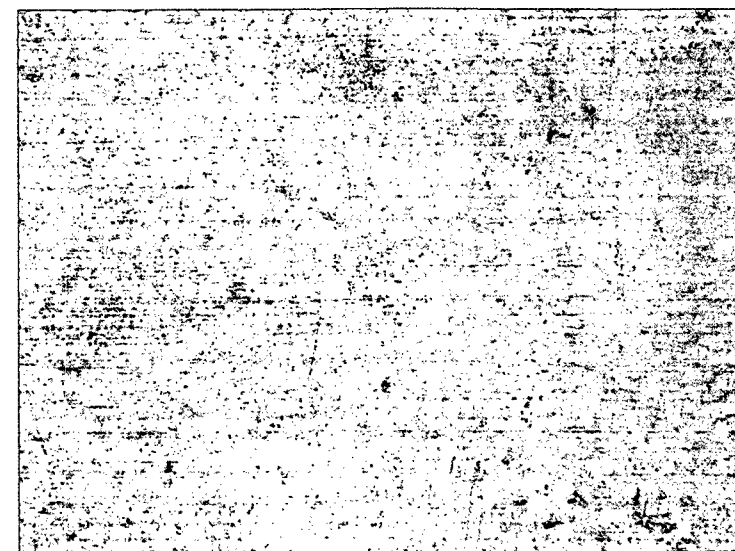


写真 15 舗装表面仕上げ状況（普通ポルトランドセメント）

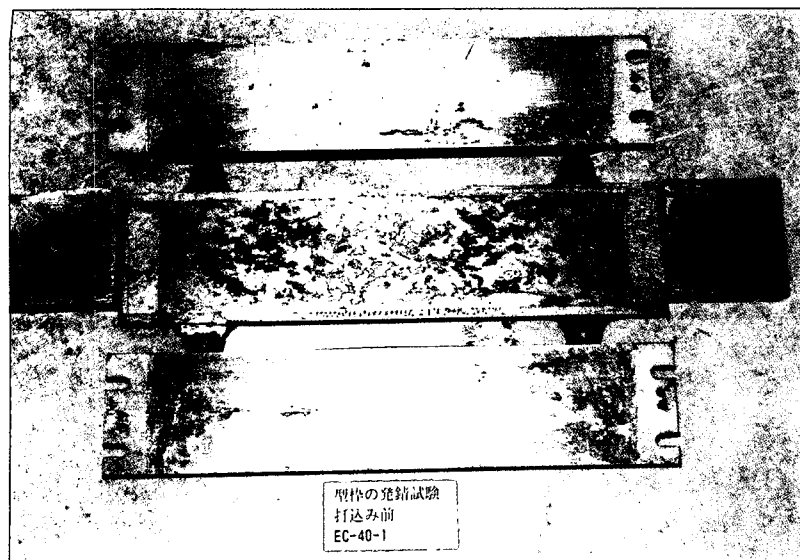


写真 16 打ち込み前の型枠内面 (E-40)

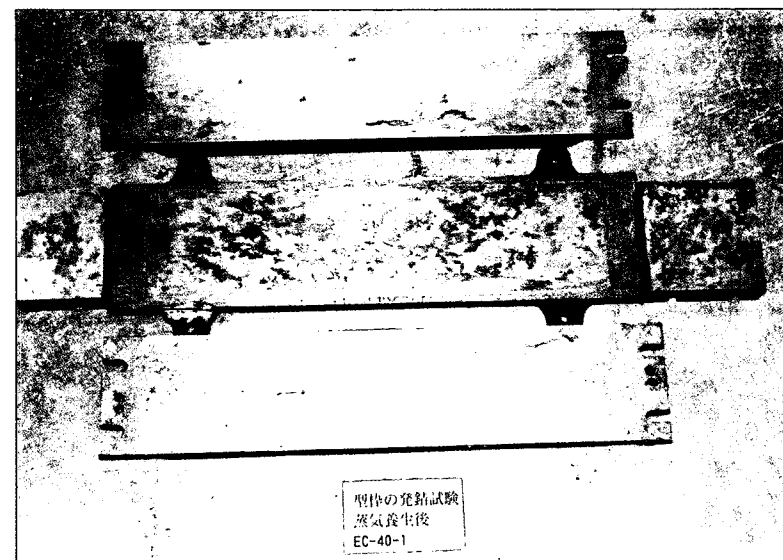


写真 17 蒸気養生後の型枠内面 (E-40)

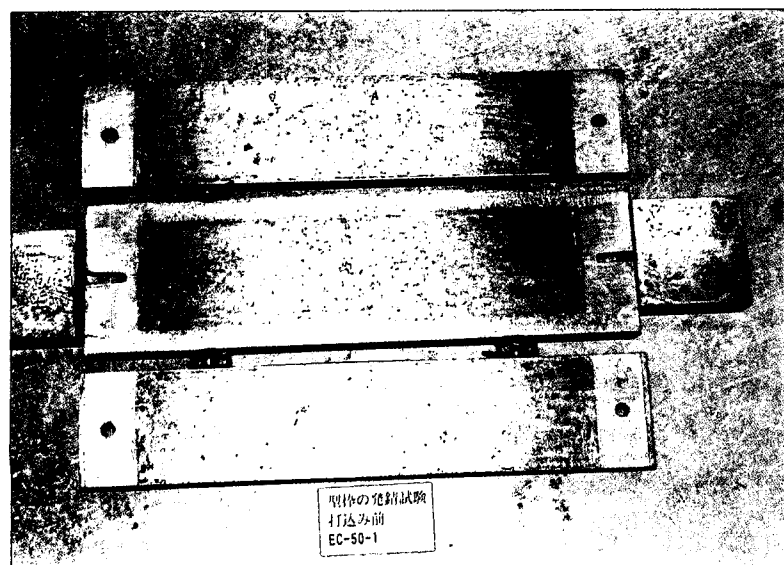


写真 18 打ち込み前の型枠内面 (E-50)

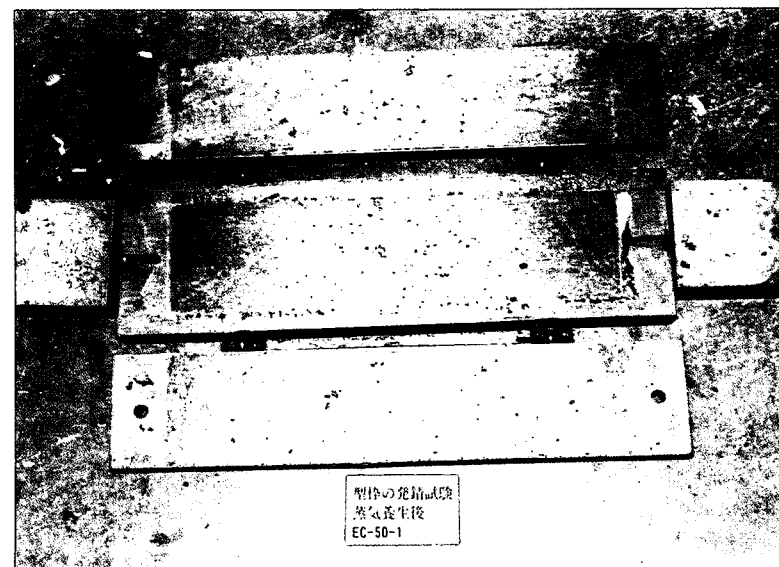


写真 19 蒸気養生後の型枠内面 (E-50)



写真 20 打ち込み前の型枠内面 (N-40)

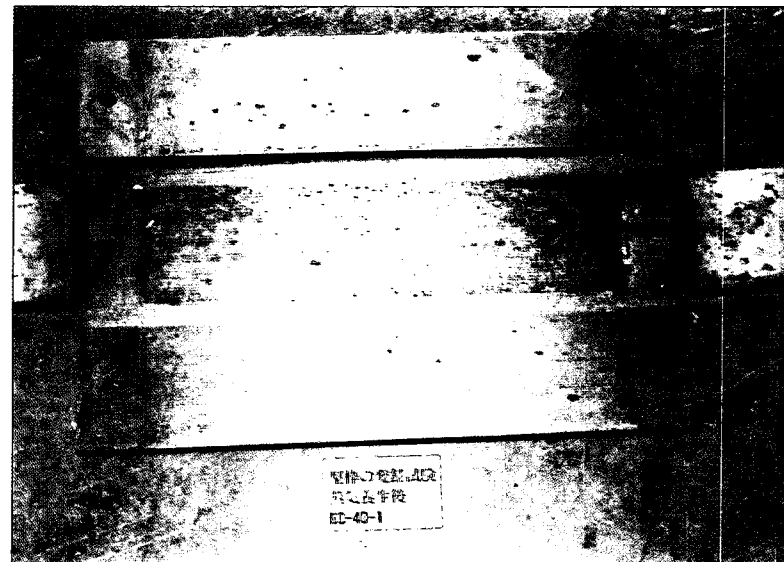


写真 21 蒸気養生後の型枠内面 (N-40)

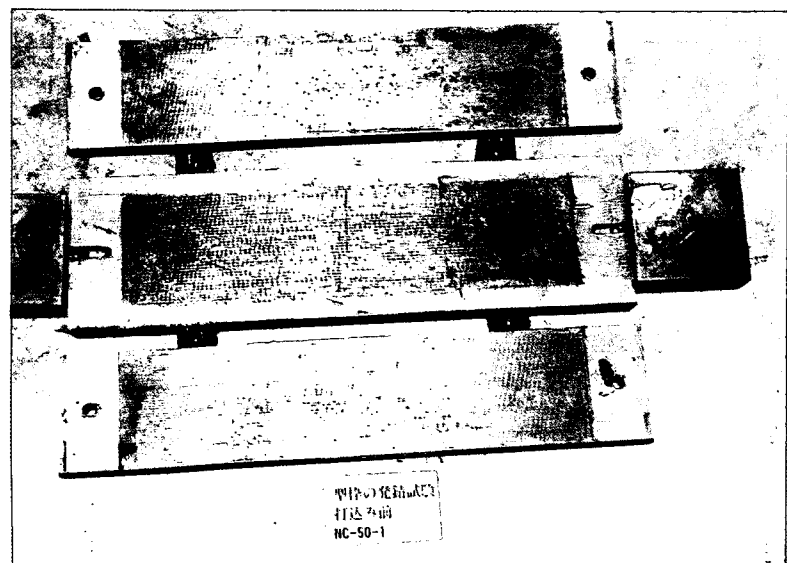


写真 22 打ち込み前の型枠内面 (N-50)



写真 23 蒸気養生後の型枠内面 (N-50)

資料編

<レディーミクストコンクリートへの適用性>

資料① 促進中性化試験結果	71
資料② 試験施工データ一覧（井の頭公園）	75
資料③ 井の頭公園試験施工における乾燥収縮試験結果	76
資料④ 井の頭公園試験施工における凍結融解抵抗性試験結果	77
資料⑤ 井の頭公園試験施工における促進中性化試験結果	78

<コンクリート製品への適用性>

資料⑥ 圧縮強度データ（蒸気養生）	79
資料⑦ 曲げ強度データ（蒸気養生）	81
資料⑧ 乾燥収縮試験結果（蒸気養生）	83
資料⑨ 凍結融解抵抗性試験結果（蒸気養生）	87
資料⑩ 促進中性化試験結果（蒸気養生）	95
資料⑪ ひび割れ発生荷重および終局耐力の計算方法	99

資料①促進中性化試験結果

試験体種別：E-45-8

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.52	0.88
		b	1.75	1.67	1.75	0.00	0.00		
	2	a	1.43	2.11	1.66	1.84	1.90	1.25	
		b	1.50	2.04	0.00	0.00	0.00		
4w	1	a	5.09	2.94	3.15	2.78	3.36	2.77	3.05
		b	3.16	3.73	3.48	0.00	0.00		
	2	a	4.02	5.32	5.54	2.87	0.00	3.34	
		b	2.01	3.89	2.86	2.71	4.14		

試験体種別：E-55-8

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	4.07	2.87	3.07	2.84	2.73	2.65	2.84
		b	1.71	1.54	3.13	2.11	2.46		
	2	a	2.08	2.58	2.29	2.23	2.73	3.03	
		b	3.80	3.58	4.17	2.59	4.24		
4w	1	a	6.13	7.73	7.62	10.82	7.17	7.96	8.08
		b	6.20	8.61	9.53	8.37	7.46		
	2	a	7.34	6.30	9.23	7.12	10.15	8.20	
		b	10.77	9.34	8.14	6.32	7.25		

試験体種別：E-65-8

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	6.36	5.65	6.01	7.15	5.72	6.78	6.60
		b	6.74	8.06	8.19	6.24	7.72		
	2	a	7.15	5.72	5.64	6.27	7.26	6.42	
		b	5.97	6.20	8.31	6.30	5.43		
4w	1	a	11.66	14.87	12.00	11.25	11.90	12.69	12.12
		b	14.48	12.32	12.26	13.36	12.82		
	2	a	10.25	11.12	11.74	11.27	13.65	11.55	
		b	11.52	10.07	10.80	12.09	12.97		

試験体種別：E-45-18

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	1.79	1.96	1.04	0.00	0.00	0.95	1.59
		b	2.05	2.65	0.00	0.00	0.00		
	2	a	3.41	3.29	2.38	2.13	2.09	2.23	
		b	1.77	1.31	1.85	1.85	2.27		
4w	1	a	3.03	3.21	5.65	5.10	4.26	4.54	3.59
		b	5.18	4.03	5.06	5.70	4.20		
	2	a	1.59	2.77	2.71	1.30	2.62	2.63	
		b	3.53	5.66	2.25	3.90	0.00		

試験体種別：E-55-18

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	2.82	3.37	2.36	2.75	2.98	3.31	3.79
		b	2.69	3.71	3.83	4.35	4.27		
	2	a	3.88	3.55	4.29	4.48	4.43	4.27	
		b	4.25	4.49	4.18	4.34	4.81		
4w	1	a	9.47	8.47	8.38	7.93	6.16	9.42	9.04
		b	9.47	10.55	11.86	11.36	10.55		
	2	a	6.58	7.03	8.47	9.36	9.86	8.66	
		b	9.68	9.55	9.45	7.83	8.82		

試験体種別：E-65-18

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	7.70	7.96	4.92	5.57	4.47	7.04	7.23
		b	7.79	8.87	7.39	7.98	7.77		
	2	a	7.09	8.04	6.45	7.89	6.89	7.41	
		b	6.21	7.53	7.38	8.90	7.71		
4w	1	a	11.92	13.57	14.62	12.41	12.52	13.52	14.23
		b	12.07	17.20	12.81	13.43	14.62		
	2	a	14.67	17.66	15.11	15.85	13.71	14.94	
		b	14.46	14.62	14.85	14.24	14.26		

試験体種別：N-45-8

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	1.81	0.91	1.07	0.00	0.00	0.72	0.79
		b	1.62	1.79	0.00	0.00	0.00		
	2	a	1.49	1.84	1.19	2.01	0.00	0.87	
		b	1.23	0.93	0.00	0.00	0.00		
4w	1	a	3.02	4.17	2.78	3.83	3.79	2.26	1.62
		b	1.99	1.60	1.40	0.00	0.00		
	2	a	2.51	1.59	2.08	1.75	1.96	0.99	
		b	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		

試験体種別：N-55-8

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	1.88	2.51	1.98	2.64	2.32	2.45	2.54
		b	3.28	2.67	1.38	3.30	2.53		
	2	a	2.19	2.39	2.60	3.00	2.12	2.64	
		b	2.84	2.48	2.84	3.09	2.83		
4w	1	a	5.39	5.54	4.47	3.86	5.67	5.15	5.03
		b	6.08	5.49	4.52	5.66	4.79		
	2	a	6.62	6.09	3.69	5.20	4.13	4.91	
		b	4.55	4.63	5.12	4.27	4.78		

試験体種別：N-65-8

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	6.19	4.66	4.71	6.60	5.37	5.42	5.53
		b	5.63	6.61	5.21	4.96	4.29		
	2	a	5.62	4.35	5.18	4.14	6.78	5.64	
		b	5.37	6.98	5.99	6.10	5.87		
4w	1	a	10.02	9.11	8.53	9.40	9.91	9.46	9.21
		b	8.82	8.11	10.69	11.42	8.55		
	2	a	10.80	9.42	10.30	8.82	9.61	8.97	
		b	8.34	7.26	8.41	8.76	7.98		

試験体種別：N-45-18

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	1.75	0.68	1.35	0.00	0.00	0.57	0.51
		b	1.13	0.81	0.00	0.00	0.00		
	2	a	1.60	1.10	0.00	0.00	0.00	0.45	
		b	1.15	0.62	0.00	0.00	0.00		
4w	1	a	2.59	1.94	2.06	1.88	2.94	1.14	1.64
		b	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	2	a	1.69	2.08	0.99	3.05	2.43	2.14	
		b	2.48	2.52	3.02	3.10	0.00		

試験体種別：N-55-18

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	2.71	2.40	2.49	3.40	5.52	3.49	3.26
		b	3.35	3.17	3.68	3.08	5.12		
	2	a	2.72	2.50	2.61	3.00	2.01	3.03	
		b	3.70	4.13	1.83	3.34	4.43		
4w	1	a	4.08	4.63	6.46	6.32	5.82	5.13	5.06
		b	7.48	5.58	5.30	2.75	2.92		
	2	a	6.62	5.73	3.46	6.67	4.51	4.98	
		b	5.70	4.20	4.15	5.29	3.49		

試験体種別：N-65-18

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	2.71	4.24	5.04	4.50	3.30	3.94	4.35
		b	3.80	3.97	5.41	3.68	2.78		
	2	a	4.94	6.67	4.49	5.59	5.20	4.77	
		b	4.48	3.92	4.46	4.34	3.57		
4w	1	a	7.72	7.23	6.23	10.42	8.89	7.91	8.20
		b	9.60	4.73	8.44	8.49	7.31		
	2	a	9.62	8.96	8.95	11.75	7.41	8.48	
		b	5.81	7.98	8.05	8.15	8.16		

資料② 試験施工データ一覧(井の頭公園)

表②-1 試験施工におけるスランブ、空気量等の計測結果
平成12年2月7日(月) エコセメント使用 EC212B

	プラント				荷卸し					筒先		
	採取時刻 (h:m)	スランブ (cm)	空気量 (%)	Co 温度 (℃)	採取時刻 (h:m)	スランブ (cm)	空気量 (%)	Co 温度 (℃)	塩分 含有量 (kg/m ³)	スランブ (cm)	空気量 (%)	Co 温度 (℃)
0台目	9:00	11.5	5.1	11.5	9:50	8.0	4.4	12.5	-	-	-	-
1台目	9:37	13.5	4.8	12.0	10:50	9.0	3.9	13.0	0.034	8.5	3.8	15.0
2台目	10:53	11.5	4.7	13.0	11:45	8.5	4.1	13.5	0.034	8.5	4.2	15.5
3台目	11:13	12.5	4.3	13.0	12:05	9.0	4.5	13.5	0.035	9.5	3.3	15.5
4台目	11:32	13.5	4.7	12.0	12:25	9.0	4.3	14.0	0.035	9.5	4.6	15.5
5台目	12:02	14.0	4.7	12.0	12:48	8.5	4.6	14.0	0.035	9.5	4.8	14.5
6台目	12:30	12.5	5.0	13.0	13:16	9.5	4.8	15.0	0.037	8.5	4.6	15.0
平均		12.9	4.7	12.5		8.9	4.4	13.8	0.035	9.0	4.2	15.2

平成12年2月8日(火) 普通ポルトランドセメント使用 N212B

	プラント				荷降し					筒先		
	採取時刻 (h:m)	スランブ (cm)	空気量 (%)	Co 温度 (℃)	採取時刻 (h:m)	スランブ (cm)	空気量 (%)	Co 温度 (℃)	塩分 含有量 (kg/m ³)	スランブ (cm)	空気量 (%)	Co 温度 (℃)
1台目	9:25	13.0	5.8	13.5	9:55	9.5	4.8	13.5	0.030	11.0	5.4	13.5
2台目	9:45	12.5	6.0	13.0	10:25	8.5	5.0	13.5	0.029	8.5	5.4	14.0
3台目	10:40	12.0	4.5	13.5	11:10	9.0	3.0	13.0	0.025	9.0	3.0	14.0
平均		12.5	5.3	13.3		9.0	4.3	13.3	0.028	9.5	4.6	13.8
E/N(%)		103	88	94		99	102	104	124	95	92	110

表②-2 強度等物性値試験結果

圧縮強度 (N/mm ²)	材齢 (日)	①:プラント				②:現場荷卸し				②/① (%)	材齢28日との比	
		1	2	3	平均	1	2	3	平均		①(%)	②(%)
E 2/7施工	3	8.8	9.7	10.2	9.6	10.5	11	10.8	10.8	113	42.7	45.7
	7	17.7	17.3	17.8	17.6	19.7	18.3	18.5	18.8	107	78.6	79.9
	14	20.4	20.9	20.4	20.6	22.4	22.2	20.6	21.7	106	91.8	92.2
	28	22.3	22.5	22.4	22.4	24.2	22.6	23.9	23.6	105	100.0	100.0
N 2/8施工	2	7.4	7.5	7.9	7.6	6.4	6.8	6.6	6.6	87	28.3	27.2
	7	18.3	17.4	18.2	18.0	15.6	15.9	16.6	16.0	89	66.7	66.1
	14	22.1	22.4	21.1	21.9	18.7	18.1	18.0	18.3	84	81.2	75.3
	28	27.5	26.6	26.7	26.9	24.4	24.9	23.5	24.3	90	100.0	100.0

弾性係数 (kN/mm ²)	材齢 (日)	①:プラント				②:現場荷卸し				②/① (%)	材齢28日との比	
		1	2	3	平均	1	2	3	平均		①(%)	②(%)
E 2/7施工	3	-	-	13.1	13.1	(7.4)	14.4	14.1	14.3	109	67.2	69.9
	7	16.8	14.4	16.8	16.0	16.7	15.1	16.2	16	100	82.1	78.4
	14	18.2	17.7	17.2	17.7	17.0	17.3	16.8	17	96	90.8	83.5
	28	19.8	19.0	19.7	19.5	20.5	20.4	20.3	20.4	105	100.0	100.0
N 2/8施工	2	12.3	12.3	12.0	12.2	(3.1)	11.3	(8.1)	11.3	93	54.3	50.8
	7	16.1	15.6	15.3	15.7	14.3	14.9	14.3	14.5	93	69.7	65.2
	14	16.3	17.5	14.4	16.1	15.2	15.6	14.7	15.2	94	71.5	68.2
	28	22.3	22.6	22.5	22.5	23.1	22.7	20.9	22.2	99	100.0	100.0

ポアソン比	材齢 (日)	①:プラント				②:現場荷卸し				②/① (%)	材齢28日との比	
		1	2	3	平均	1	2	3	平均		①(%)	②(%)
E 2/7施工	3	-	-	0.16	0.16	(0.31)	0.17	0.19	0.18	113	78.7	80.6
	7	0.18	0.16	0.18	0.17	0.18	0.19	0.18	0.18	106	85.2	82.1
	14	(0.24)	0.19	0.20	0.20	0.17	0.20	0.20	0.19	97	95.9	85.1
	28	0.23	0.19	0.19	0.20	0.24	0.21	0.22	0.22	110	100.0	100.0
N 2/8施工	2	(0.46)	0.16	0.18	0.17	(0.56)	0.15	0.19	0.17	100	91.1	87.9
	7	0.17	0.15	0.20	0.17	0.17	0.15	0.20	0.17	100	92.9	89.7
	14	0.20	0.17	0.20	0.19	0.17	0.17	0.17	0.17	89	101.8	87.9
	28	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.19	0.19	104	100.0	100.0

注) ()内数値は異常値につき、集計から除外する。

資料③ 井の頭公園試験施工における乾燥収縮試験結果

試験体種別：E

試験 期間	1			2			3			平均	
	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 変化率 (%)
基長	0.00	9051.0	0.00	0.00	9096.3	0.00	0.00	9116.5	0.00	0.00	0.00
4d	-2.02	8865.0	-2.05	-1.98	8913.0	-2.02	-1.98	8931.0	-2.03	-1.99	-2.03
1w	-2.96	8828.0	-2.46	-2.96	8875.1	-2.43	-3.00	8889.7	-2.49	-2.97	-2.46
2w	-4.14	8788.1	-2.90	-4.17	8833.9	-2.88	-4.26	8846.5	-2.96	-4.19	-2.91
4w	-5.60	8756.9	-3.25	-5.67	8802.0	-3.24	-5.80	8813.5	-3.32	-5.69	-3.27
8w	-6.72	8734.9	-3.49	-6.75	8779.4	-3.48	-7.00	8790.9	-3.57	-6.82	-3.51
13w	-7.14	8725.6	-3.60	-7.21	8769.1	-3.60	-7.46	8780.6	-3.68	-7.27	-3.63

試験体種別：N

試験 期間	1			2			3			平均	
	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 変化率 (%)
基長	0.00	8993.0	0.00	0.00	9003.5	0.00	0.00	8999.6	0.00	0.00	0.00
4d	-1.88	8869.5	-1.37	-1.76	8878.1	-1.39	-1.98	8874.2	-1.39	-1.87	-1.39
1w	-2.86	8842.0	-1.68	-2.74	8851.7	-1.69	-2.96	8847.5	-1.69	-2.85	-1.69
2w	-4.24	8806.9	-2.07	-4.08	8817.8	-2.06	-4.42	8813.2	-2.07	-4.25	-2.07
4w	-6.22	8775.0	-2.42	-5.90	8787.1	-2.40	-6.36	8781.9	-2.42	-6.16	-2.42
8w	-7.64	8748.6	-2.72	-7.47	8761.5	-2.69	-7.86	8755.5	-2.71	-7.66	-2.71
13w	-8.22	8733.8	-2.88	-8.05	8747.1	-2.85	-8.44	8740.3	-2.88	-8.24	-2.87

資料④ 井の頭公園試験施工における凍結融解抵抗性試験結果

試験体種別：E

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	相対 動弾性 (%)	質量 変化率 (%)
0	1872	100.0	9290	0.00	1847	100.0	9291	0.00	2072	100.0	9355	0.00	100.0	0.00
12	1870	99.8	9270	-0.22	1850	100.3	9297	0.06	2082	101.0	9361	0.06	100.4	-0.03
28	1871	99.9	9273	-0.19	1860	101.4	9303	0.13	2084	101.2	9362	0.08	100.8	0.01
68	1880	100.9	9269	-0.23	1866	102.1	9297	0.06	2090	101.7	9339	-0.17	101.6	-0.11
97	1891	102.0	9253	-0.41	1874	102.9	9266	-0.27	2093	102.0	9324	-0.33	102.3	-0.34
120	1872	100.0	9242	-0.53	1842	99.5	9059	-2.50	2091	101.8	9275	-0.85	100.4	-1.29
154	1884	101.3	9218	-0.78	1852	100.5	8943	-3.75	2091	101.8	9261	-1.00	101.2	-1.84
189	1904	103.4	9172	-1.27	1877	103.3	8711	-6.24	2126	105.3	9247	-1.15	104.0	-2.89
217	1900	103.0	9124	-1.80	1866	102.1	8888	-4.34	2090	101.7	9211	-1.54	102.3	-2.56
248	1911	104.2	9049	-2.60	1870	102.5	8858	-4.67	2096	102.3	9210	-1.55	103.0	-2.94
263	1917	104.9	9018	-2.93	1858	101.2	8831	-4.96	2127	105.4	9210	-1.55	103.8	-3.15
304	1917	104.9	8970	-3.44	1858	101.2	8763	-5.69	2096	102.3	8982	-3.98	102.8	-4.37

試験体種別：N

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	相対 動弾性 (%)	質量 変化率 (%)
0	1971	100.0	9192	0.00	1974	100.0	9212	0.00	1982	100.0	9178	0.00	100.0	0.00
12	1961	99.0	9181	-0.13	1970	99.6	9212	0.00	1980	99.8	9178	0.00	99.5	-0.04
28	1958	98.7	9177	-0.17	1963	98.9	9208	-0.05	1980	99.8	9175	-0.03	99.1	-0.08
68	1958	98.7	9177	-0.17	1963	98.9	9197	-0.16	1981	99.9	9169	-0.10	99.2	-0.14
97	1965	99.4	9170	-0.24	1972	99.8	9189	-0.25	1990	100.8	9160	-0.19	100.0	-0.23
120	1952	98.1	9170	-0.24	1966	99.2	9188	-0.26	1980	99.8	9160	-0.19	99.0	-0.23
154	1957	98.6	9156	-0.40	1966	99.2	9155	-0.62	1982	100.0	9150	-0.31	99.3	-0.44
189	1962	99.1	9136	-0.62	1967	99.3	9100	-1.21	1988	100.6	9135	-0.46	99.7	-0.76
217	1954	98.3	9116	-0.83	1962	98.8	9076	-1.48	1981	99.9	9124	-0.59	99.0	-0.97
248	1940	96.9	9108	-0.92	1942	96.8	9071	-1.53	1978	99.6	9116	-0.68	97.8	-1.04
263	1939	96.8	9087	-1.14	1951	97.7	9058	-1.67	1972	99.0	9101	-0.84	97.8	-1.22
304	1934	96.3	9062	-1.41	1943	96.9	9040	-1.86	1972	99.0	9066	-1.21	97.4	-1.50

資料⑤ 井の頭公園試験施工における促進中性化試験結果

試験体種別：E

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	5.86	5.80	6.31	5.49	6.06	5.79	5.64
		b	6.19	4.92	5.60	7.07	4.64		
	2	a	5.47	5.86	4.79	4.75	5.13	5.71	
		b	5.99	5.77	6.05	7.35	5.89		
	3	a	5.67	4.74	4.31	6.61	5.38	5.43	
		b	5.81	4.77	5.44	4.87	6.72		
4w	1	a	11.49	9.54	10.73	9.98	11.80	10.79	10.96
		b	11.82	11.00	9.54	10.86	11.18		
	2	a	12.70	13.47	10.41	11.47	10.87	11.17	
		b	10.73	10.65	9.77	9.82	11.85		
	3	a	11.15	9.78	10.75	10.57	10.60	10.92	
		b	11.22	10.50	11.85	11.70	11.08		
8w	1	a	17.67	17.20	15.73	18.07	17.55	16.86	16.90
		b	18.60	17.56	15.10	15.00	16.24		
	2	a	16.91	19.21	17.00	18.15	15.09	17.15	
		b	15.52	15.73	17.08	19.00	17.79		
	3	a	19.09	16.33	14.93	15.10	14.62	16.69	
		b	15.73	14.75	17.85	18.69	19.76		

試験体種別：N

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	5.21	4.91	5.05	4.74	5.10	5.15	5.32
		b	5.51	5.22	5.71	5.24	4.77		
	2	a	5.51	5.62	5.70	5.79	6.30	5.21	
		b	3.24	4.06	5.57	4.98	5.34		
	3	a	5.53	5.51	5.43	5.57	5.25	5.59	
		b	5.42	5.70	5.12	5.32	7.08		
4w	1	a	11.50	12.30	9.25	9.44	9.70	9.86	10.04
		b	8.97	9.54	9.34	9.85	8.62		
	2	a	8.63	11.34	8.02	11.75	11.17	10.24	
		b	10.25	9.88	10.12	11.16	10.05		
	3	a	10.33	10.41	10.65	11.72	8.61	10.03	
		b	7.81	8.90	12.15	9.10	10.65		
8w	1	a	17.07	16.90	17.31	16.52	15.44	16.16	15.63
		b	13.85	16.45	17.10	14.61	16.39		
	2	a	15.81	16.77	15.65	15.26	16.00	15.85	
		b	14.45	14.10	14.94	17.51	17.94		
	3	a	15.81	15.00	15.93	15.48	12.20	14.88	
		b	13.56	13.10	16.18	15.60	16.00		

資料⑥ 圧縮強度データ (蒸気養生)

材齢 1 日

試料名		質量 (g)	H (mm)	H _{ave} (mm)	P (kN)	f (N/mm ²)	補正 係数	補正強度 (N/mm ²)	f 標準偏差	補正P (kN)	f _{ave} (N/mm ²)	E (kN/mm ²)	E 標準偏差	E _{ave} (kN/mm ²)
E55	1	3565.2	194.25	192.92	135	17.2	0.997	17.1		135		26.0		
	2	3582.4	192.84	192.14	140	17.8	0.996	17.8	1.12	139	18.1	25.7	1.25	25.1
	3	3588.2	194.38	194.83	152	19.4	0.997	19.3		152		23.7		
E50	1	3544.6	194.79	195.17	150	19.1	0.997	19.0		150		20.1		
	2	3524.3	193.98	194.41	155	19.7	0.997	19.7	0.82	155	19.8	21.4	0.70	20.6
	3	3535.3	193.02	193.26	163	20.8	0.996	20.7		162		20.3		
E45	1	3574.3	195.00	195.43	194	24.7	0.998	24.6		194		21.1		
	2	3631.9	198.50	199.15	193	24.6	0.999	24.6	0.80	193	25.1	23.1	1.53	22.8
	3	3504.9	191.50	191.75	205	26.1	0.996	26.0		204		24.1		
E40	1	3563.3	194.40	191.75	238	30.3	0.996	30.2		237		24.1		
	2	3545.7	194.88	194.51	207	26.4	0.997	26.3	2.04	206	28.6	23.0	0.57	23.6
	3	3467.3	189.93	190.07	231	29.4	0.995	29.3		230		23.8		
E35	1	3471.7	185.98	186.40	325	41.4	0.992	41.1		323		27.1		
	2	3585.9	193.22	193.52	323	41.1	0.997	41.0	0.47	322	41.3	25.8	0.66	26.4
	3	3560.3	191.22	191.75	330	42.0	0.995	41.8		329		26.3		
N55	1	3513.4	191.72	192.00	156	19.9	0.996	19.8		155		26.2		
	2	3587.4	194.92	195.30	155	19.7	0.997	19.7	0.20	155	19.8	24.1	3.21	23.4
	3	3599.6	195.33	195.02	158	20.1	0.998	20.1		158		19.9		
N50	1	3582.4	197.50	197.65	158	20.1	0.999	20.1		158		24.1		
	2	3548.9	195.91	195.82	164	20.9	0.998	20.8	0.81	164	20.9	19.5	3.10	23.0
	3	3535.4	194.81	194.60	171	21.8	0.997	21.7		171		25.4		
N45	1	3562.5	194.76	194.90	197	25.1	0.997	25.0		196		27.5		
	2	3562.5	194.76	194.25	194	24.7	0.997	24.6	0.44	193	25.1	27.1	1.29	26.6
	3	3556.1	193.98	194.10	201	25.6	0.997	25.5		200		25.1		
N40	1	3644.9	197.07	197.07	262	33.4	0.999	33.3		262		28.6		
	2	3607.6	195.18	195.14	260	33.1	0.997	33.0	0.98	259	32.6	26.2	2.01	26.5
	3	3581.2	194.74	194.90	248	31.6	0.997	31.5		247		24.6		
N35	1	3644.3	195.56	194.10	333	42.4	0.997	42.3		332		31.1		
	2	3638.1	195.54	195.00	294	37.4	0.998	37.3	2.82	293	39.0	30.6	0.45	31.1
	3	3638	194.80	195.10	295	37.6	0.997	37.5		294		31.5		

材齡 14 日

試料名		質量 (g)	H (mm)	H _{ave} (mm)	P (kN)	f (N/mm ²)	補正 係数	補正強度 (N/mm ²)	f 標準偏差	補正P (kN)	f _{ave} (N/mm ²)	E (kN/mm ²)	E 標準偏差	E _{ave} (kN/mm ²)
E55	1	3525.8	195.04	194.49	194.77	238	30.3	0.997	30.2	0.40	237	25.7	1.22	27.1
	2	3538.7	195.98	195.51	195.75	244	31.1	0.998	31.0		243	27.7		
	3	3483.0	192.81	193.23	193.02	240	30.6	0.996	30.4		239	27.9		
E50	1	3524.9	197.00	197.35	197.18	242	30.8	0.999	30.8	0.62	242	25.3	0.53	25.1
	2	3549.7	198.01	197.59	197.80	246	31.3	0.999	31.3		246	24.5		
	3	3475.1	195.14	194.63	194.89	252	32.1	0.997	32.0		251	25.5		
E45	1	3543.3	194.56	195.08	194.82	301	38.3	0.997	38.2	1.17	300	26.9	1.77	26.0
	2	3521.6	195.05	195.54	195.30	283	36.0	0.998	35.9		282	24.0		
	3	3561.5	195.98	196.62	196.30	288	36.7	0.998	36.6		287	27.2		
E40	1	3473.7	193.78	193.41	193.60	344	43.8	0.997	43.7	2.05	343	23.6	1.88	25.8
	2	3533.8	197.14	196.80	196.97	318	40.5	0.998	40.4		318	26.8		
	3	3545.6	196.49	196.65	196.57	348	44.3	0.998	44.2		347	26.9		
E35	1	3617.2	195.88	196.03	195.96	432	55.0	0.998	54.9	1.47	431	31.3	2.42	29.6
	2	3599.7	196.01	195.92	195.97	413	52.6	0.998	52.5		412	26.8		
	3	3603.2	195.80	196.15	195.98	434	55.3	0.998	55.1		433	30.6		
N55	1	345.45	191.57	191.61	191.59	252	32.1	0.996	31.9	2.02	251	28.1	0.40	28.1
	2	3499.7	192.92	192.30	192.61	280	35.7	0.996	35.5		279	27.7		
	3	3469.4	191.87	191.81	191.84	253	32.2	0.996	32.1		252	28.5		
N50	1	3432.3	192.29	192.01	192.15	242	30.8	0.996	30.7	2.50	241	26.1	1.05	27.2
	2	3423.5	192.22	191.89	192.06	274	34.9	0.996	34.7		273	28.2		
	3	3434.3	192.25	192.49	192.37	278	35.4	0.996	35.3		277	27.2		
N45	1	3469.4	192.66	192.08	192.37	272	34.6	0.996	34.5	2.66	271	29.4	1.65	27.7
	2	3478.1	193.16	192.64	192.90	292	37.2	0.996	37.0		291	27.6		
	3	3472.1	192.27	192.45	192.36	314	40.0	0.996	39.8		313	26.1		
N40	1	3514.1	192.68	193.00	192.84	354	45.1	0.996	44.9	1.42	353	34.6	1.67	32.8
	2	3566.4	195.11	194.78	194.95	346	44.1	0.997	43.9		345	32.5		
	3	3563.2	195.08	194.93	195.01	368	46.9	0.997	46.7		367	31.3		
N35	1	3654.9	197.95	197.41	197.68	394	50.2	0.999	50.1	0.81	394	30.7	1.08	31.9
	2	3637.8	196.92	196.51	196.72	406	51.7	0.998	51.6		405	32.8		
	3	3651.5	197.19	197.48	197.34	404	51.4	0.999	51.4		403	32.2		

資料⑦ 曲げ強度データ (蒸気養生)

材齢 1 日

試料名		破断面の幅 b(mm)	破断面の高さ d(mm)	最大荷重 P(kN)	曲げ強度 fb (N/mm ²)	曲げ強度 標準偏差	平均 (N/mm ²)
E50	1	99.75	99.74	12.50	3.76	0.12	3.66
		100.58	99.88				
		100.20					
	2	99.86	100.61	12.50	3.70		
		100.03	100.66				
		100.55					
	3	100.52	100.17	11.80	3.52		
		99.93	100.11				
		100.05					
E40	1	101.35	99.78	17.10	5.07	0.45	4.54
		101.93	99.81				
		101.78					
	2	101.14	99.90	14.50	4.30		
		101.39	100.11				
	3	101.10	100.34	14.50	4.26		
		101.20	100.25				
		102.04					
N50	1	99.89	99.52	12.20	3.71	0.18	3.91
		99.50	99.43				
		99.92					
	2	98.97	98.27	12.90	4.06		
		98.82	98.18				
		98.61					
	3	99.68	100.51	13.30	3.97		
		99.35	100.53				
		99.13					
N40	1	100.43	99.87	15.70	4.71	0.09	4.74
		100.33	100.00				
		99.74					
	2	101.33	99.90	15.60	4.66		
		100.50	99.98				
		99.64					
	3	99.06	99.78	16.00	4.84		
		99.55	99.91				
		100.04					

材齢 14 日

試料名		破断面の幅 b(mm)	破断面の高さ d(mm)	最大荷重 P(kN)	曲げ強度 fb (N/mm ²)	曲げ強度 標準偏差	平均 (N/mm ²)
E50	1	101.28	100.42	14.25	4.20	0.18	4.00
		100.94	100.44				
		100.56					
	2	99.55	99.88	12.75	3.86		
		98.69	99.81				
		99.70					
	3	99.98	100.40	13.25	3.94		
		100.35	100.33				
		99.81					
E40	1	101.43	99.80	15.00	4.45	0.33	4.54
		101.02	100.19				
		101.29					
	2	100.81	99.38	14.25	4.28		
		101.58	99.58				
		100.65					
	3	100.85	98.60	16.00	4.91		
		100.79	98.52				
		100.33					
N50	1	100.18	100.31	12.50	3.74	0.28	3.96
		99.85	100.08				
		99.94					
	2	100.29	100.37	13.00	3.88		
		99.98	100.15				
		99.88					
	3	99.90	100.32	14.25	4.27		
		99.98	99.98				
		99.72					
N40	1	100.44	100.01	12.50	3.74	0.19	3.91
		100.56	99.83				
		99.95					
	2	100.42	98.45	13.25	4.12		
		99.36	98.43				
		98.69					
	3	98.76	99.87	12.75	3.86		
		99.38	99.65				
		100.43					

資料⑧ 乾燥収縮試験結果(蒸気養生)

試験体種別：E35

試験 期間	1			2			3			平均	
	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 変化率 (%)
基長	0.00	9536	0.00	0.00	9511	0.00	0.00	9518	0.00	0.00	0.00
2w	-1.44	9473	-0.67	-1.35	9449	-0.66	-1.32	9457	-0.65	-1.37	-0.66
17d	-1.73	9470	-0.70	-1.56	9446	-0.69	-1.50	9454	-0.68	-1.60	-0.69
3w	-1.85	9465	-0.75	-1.71	9441	-0.74	-1.73	9448	-0.74	-1.76	-0.74
4w	-2.32	9457	-0.83	-2.18	9435	-0.80	-2.12	9443	-0.79	-2.21	-0.81
6w	-3.09	9450	-0.91	-2.88	9427	-0.89	-2.82	9434	-0.89	-2.93	-0.90
10w	-3.41	9441	-1.00	-3.26	9418	-0.98	-3.29	9425	-0.98	-3.32	-0.99

試験体種別：E40

試験 期間	1			2			3			平均	
	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 変化率 (%)
基長	0.00	9289	0.00	0.00	9378	0.00	0.00	9453	0.00	0.00	0.00
2w	-1.29	9212	-0.84	-1.85	9298	-0.86	-2.09	9372	-0.86	-1.75	-0.85
17d	-1.47	9206	-0.90	-2.00	9292	-0.92	-2.26	9366	-0.93	-1.91	-0.92
3w	-1.68	9198	-0.99	-2.26	9284	-1.01	-2.41	9359	-1.00	-2.12	-1.00
4w	-2.03	9188	-1.10	-2.74	9275	-1.11	-2.88	9350	-1.10	-2.55	-1.10
6w	-2.82	9175	-1.24	-3.29	9262	-1.25	-3.62	9337	-1.24	-3.24	-1.24
10w	-3.44	9162	-1.38	-4.03	9249	-1.39	-4.26	9324	-1.38	-3.91	-1.38

試験体種別：E45

試験 期間	1			2			3			平均	
	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 変化率 (%)
基長	0.00	9351	0.00	0.00	9229	0.00	0.00	9380	0.00	0.00	0.00
2w	-0.94	9256	-1.03	-1.38	9131	-1.07	-1.35	9284	-1.03	-1.23	-1.04
17d	-1.09	9248	-1.11	-1.50	9123	-1.16	-1.53	9277	-1.11	-1.37	-1.13
3w	-1.24	9239	-1.21	-1.71	9115	-1.25	-1.76	9269	-1.20	-1.57	-1.22
4w	-1.65	9230	-1.31	-2.21	9106	-1.35	-2.09	9260	-1.29	-1.98	-1.32
6w	-2.41	9217	-1.45	-2.71	9094	-1.48	-2.76	9248	-1.42	-2.63	-1.45
10w	-3.06	9205	-1.58	-3.53	9083	-1.60	-3.29	9237	-1.54	-3.29	-1.57

試験体種別：E50

試験 期間	1			2			3			平均	
	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 変化率 (%)
基長	0.00	9343	0.00	0.00	9341	0.00	0.00	9312	0.00	0.00	0.00
2w	-1.74	9230	-1.22	-1.62	9232	-1.18	-1.47	9198	-1.24	-1.61	-1.21
17d	-1.79	9224	-1.29	-1.74	9223	-1.28	-1.71	9190	-1.33	-1.74	-1.30
3w	-1.88	9214	-1.40	-1.94	9215	-1.36	-1.85	9182	-1.41	-1.89	-1.39
4w	-2.41	9205	-1.50	-2.35	9206	-1.46	-2.32	9172	-1.52	-2.36	-1.49
6w	-2.91	9192	-1.64	-3.03	9194	-1.59	-2.85	9160	-1.65	-2.93	-1.63
10w	-3.44	9182	-1.74	-3.73	9185	-1.69	-3.47	9151	-1.75	-3.55	-1.73

試験体種別：E55

試験 期間	1			2			3			平均	
	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 変化率 (%)
基長	0.00	9339	0.00	0.00	9316	0.00	0.00	9320	0.00	0.00	0.00
2w	-1.38	9218	-1.31	-1.47	9198	-1.28	-1.21	9198	-1.33	-1.35	-1.31
17d	-1.59	9209	-1.41	-1.82	9189	-1.38	-1.41	9191	-1.40	-1.61	-1.40
3w	-1.71	9199	-1.52	-1.91	9180	-1.48	-1.50	9182	-1.50	-1.71	-1.50
4w	-2.09	9190	-1.62	-2.09	9170	-1.59	-1.82	9174	-1.59	-2.00	-1.60
6w	-3.00	9177	-1.76	-2.79	9158	-1.72	-2.73	9162	-1.72	-2.84	-1.73
10w	-3.44	9167	-1.87	-3.38	9148	-1.83	-3.20	9153	-1.82	-3.34	-1.84

試験体種別：N35

試験 期間	1			2			3			平均	
	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 変化率 (%)
基長	0.00	9418	0.00	0.00	9445	0.00	0.00	9425	0.00	0.00	0.00
2w	-2.18	9360	-0.62	-1.73	9380	-0.69	-2.24	9370	-0.59	-2.05	-0.63
17d	-2.62	9354	-0.68	-2.15	9373	-0.77	-2.50	9363	-0.66	-2.42	-0.70
3w	-2.82	9348	-0.75	-2.91	9369	-0.81	-2.80	9359	-0.70	-2.84	-0.75
4w	-3.26	9340	-0.83	-3.35	9362	-0.88	-3.15	9352	-0.78	-3.26	-0.83
6w	-3.85	9330	-0.94	-3.91	9353	-0.98	-3.65	9343	-0.88	-3.80	-0.93
10w	-4.47	9320	-1.05	-4.56	9343	-1.09	-4.32	9333	-0.98	-4.45	-1.04

試験体種別：N40

試験 期間	1			2			3			平均	
	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 変化率 (%)
基長	0.00	9445	0.00	0.00	9450	0.00	0.00	9387	0.00	0.00	0.00
2w	-1.88	9375	-0.75	-2.35	9378	-0.77	-2.15	9316	-0.76	-2.13	-0.76
17d	-2.29	9368	-0.82	-2.62	9371	-0.84	-2.62	9308	-0.85	-2.51	-0.84
3w	-2.47	9361	-0.90	-2.88	9364	-0.92	-2.65	9300	-0.93	-2.67	-0.92
4w	-2.88	9353	-0.98	-3.35	9356	-1.00	-3.12	9293	-1.01	-3.12	-1.00
6w	-3.56	9343	-1.09	-4.00	9345	-1.12	-3.97	9282	-1.13	-3.84	-1.11
10w	-4.38	9330	-1.23	-5.00	9334	-1.24	-4.59	9269	-1.27	-4.66	-1.24

試験体種別：N45

試験 期間	1			2			3			平均	
	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 変化率 (%)
基長	0.00	9245	0.00	0.00	9283	0.00	0.00	9248	0.00	0.00	0.00
2w	-2.06	9157	-0.96	-2.06	9193	-0.98	-2.38	9160	-0.96	-2.17	-0.97
17d	-2.12	9148	-1.06	-2.29	9183	-1.09	-2.50	9150	-1.07	-2.30	-1.07
3w	-2.71	9139	-1.16	-2.76	9175	-1.17	-2.82	9142	-1.16	-2.76	-1.16
4w	-3.38	9130	-1.26	-3.35	9166	-1.27	-3.35	9133	-1.26	-3.36	-1.26
6w	-4.09	9118	-1.39	-4.03	9154	-1.40	-3.97	9122	-1.38	-4.03	-1.39
10w	-4.97	9106	-1.52	-4.97	9143	-1.52	-4.88	9110	-1.51	-4.94	-1.52

試験体種別：N50

試験 期間	1			2			3			平均	
	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 変化率 (%)
基長	0.00	9182	0.00	0.00	9195	0.00	0.00	9234	0.00	0.00	0.00
2w	-2.06	9074	-1.19	-2.00	9093	-1.12	-2.09	9128	-1.16	-2.05	-1.16
17d	-2.24	9063	-1.31	-2.47	9084	-1.22	-2.24	9118	-1.27	-2.31	-1.27
3w	-3.03	9055	-1.40	-2.88	9076	-1.31	-2.85	9109	-1.37	-2.92	-1.36
4w	-3.50	9044	-1.52	-3.35	9066	-1.42	-3.35	9099	-1.48	-3.40	-1.47
6w	-4.21	9032	-1.65	-3.94	9055	-1.54	-4.26	9086	-1.62	-4.14	-1.60
10w	-5.32	9020	-1.79	-5.06	9044	-1.66	-5.26	9073	-1.76	-5.22	-1.74

試験体種別：N55

試験 期間	1			2			3			平均	
	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	長さ 変化率 ($\times 10^{-4}$)	質量 変化率 (%)
基長	0.00	9267	0.00	0.00	9314	0.00	0.00	9261	0.00	0.00	0.00
2w	-2.12	9147	-1.31	-1.97	9198	-1.26	-2.12	9146	-1.26	-2.07	-1.28
17d	-2.12	9136	-1.43	-2.21	9187	-1.38	-2.41	9135	-1.38	-2.25	-1.40
3w	-2.79	9127	-1.53	-2.80	9178	-1.48	-2.74	9126	-1.48	-2.78	-1.50
4w	-3.29	9116	-1.65	-3.24	9167	-1.60	-3.38	9115	-1.60	-3.30	-1.62
6w	-4.03	9103	-1.79	-4.03	9154	-1.74	-4.27	9102	-1.74	-4.11	-1.76
10w	-5.12	9091	-1.92	-5.06	9142	-1.87	-5.35	9091	-1.86	-5.18	-1.88

資料⑨凍結融解抵抗性試験結果（蒸気養生）

試験体種別：E35-A-4.5

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	相対動弾性 (%)	質量変化率 (%)
0	2241	100.0	9641	0.0	2226	100.0	9518	0.0	2242	100.0	9613	0.0	100.0	0.0
22	2236	99.6	9640	0.0	2210	98.6	9521	0.0	2236	99.5	9614	0.0	99.2	0.0
50	2234	99.4	9641	0.0	2210	98.6	9521	0.0	2238	99.6	9616	0.0	99.2	0.0
71	2244	100.3	9641	0.0	2214	98.9	9521	0.0	2236	99.5	9613	0.0	99.6	0.0
99	2246	100.4	9632	-0.1	2213	98.8	9519	0.0	2238	99.6	9614	0.0	99.6	0.0
121	2251	100.9	9623	-0.2	2219	99.4	9518	0.0	2242	100.0	9614	0.0	100.1	-0.1
149	2262	101.9	9605	-0.4	2216	99.1	9511	-0.1	2244	100.2	9612	0.0	100.4	-0.2
169	2254	101.2	9587	-0.6	2210	98.6	9505	-0.1	2241	99.9	9608	-0.1	99.9	-0.2
197	2260	101.7	9576	-0.7	2210	98.6	9499	-0.2	2244	100.2	9606	-0.1	100.1	-0.3
216	2258	101.5	9571	-0.7	2209	98.5	9493	-0.3	2246	100.4	9603	-0.1	100.1	-0.4
244	2264	102.1	9590	-0.5	2214	98.9	9488	-0.3	2246	100.4	9603	-0.1	100.4	-0.3
272	2270	102.6	9560	-0.8	2214	98.9	9479	-0.4	2247	100.4	9595	-0.2	100.7	-0.5
302	2270	102.6	9550	-0.9	2204	98.0	9463	-0.6	2242	100.0	9587	-0.3	100.2	-0.6
317	2267	102.3	9546	-1.0	2205	98.1	9452	-0.7	2248	100.5	9582	-0.3	100.3	-0.7

試験体種別：E40-A-4.5

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	相対動弾性 (%)	質量変化率 (%)
0	2150	100.0	9394	0.0	2176	100.0	9421	0.0	2138	100.0	9303	0.0	100.0	0.0
22	2124	97.6	9347	-0.5	2164	98.9	9425	0.0	2124	98.7	9304	0.0	98.4	-0.1
50	2114	96.7	9278	-1.2	2168	99.3	9425	0.0	2124	98.7	9303	0.0	98.2	-0.4
71	2120	97.2	9258	-1.4	2173	99.7	9422	0.0	2123	98.6	9296	-0.1	98.5	-0.5
99	2109	96.2	9205	-2.0	2168	99.3	9420	0.0	2121	98.4	9296	-0.1	98.0	-0.7
121	2117	97.0	9187	-2.2	2175	99.9	9422	0.0	2128	99.1	9295	-0.1	98.6	-0.8
149	2124	97.6	9176	-2.3	2184	100.7	9421	0.0	2131	99.3	9293	-0.1	99.2	-0.8
169	2120	97.2	9162	-2.5	2180	100.4	9421	0.0	2130	99.3	9283	-0.2	98.9	-0.9
197	2122	97.4	9149	-2.6	2188	101.1	9417	0.0	2128	99.1	9277	-0.3	99.2	-1.0
216	2123	97.5	9137	-2.7	2184	100.7	9412	-0.1	2129	99.2	9266	-0.4	99.1	-1.1
244	2122	97.4	9132	-2.8	2189	101.2	9409	-0.1	2120	98.3	9262	-0.4	99.0	-1.1
272	2120	97.2	9116	-3.0	2191	101.4	9390	-0.3	2116	98.0	9231	-0.8	98.9	-1.4
302	2116	96.9	9103	-3.1	2180	100.4	9378	-0.5	2112	97.6	9212	-1.0	98.3	-1.5
317	2116	96.9	9093	-3.2	2185	100.8	9370	-0.5	2111	97.5	9204	-1.1	98.4	-1.6

試験体種別：E45-NonAE

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	相対動弾性 (%)	質量変化率 (%)
0	2183	100.0	9651	0.0	2138	100.0	9812	0.0	2161	100.0	9735	0.0	100.0	0.0
20	1375	39.7	9746	1.0	1342	39.4	9770	-0.4	1395	41.7	9824	0.9	40.2	0.5
42	668	9.4	9691	0.4	587	7.5	9839	0.3	648	9.0	9771	0.4	8.6	0.4

試験体種別：E45-A-4.5

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	相対動弾性 (%)	質量変化率 (%)
0	2160	100.0	9457	0.0	2145	100.0	9441	0.0	2182	100.0	9542	0.0	100.0	0.0
22	2128	97.1	9436	-0.2	2104	96.2	9445	0.0	2140	96.2	9534	-0.1	96.5	-0.1
50	2106	95.1	9420	-0.4	2087	94.7	9443	0.0	2124	94.8	9525	-0.2	94.8	-0.2
71	2095	94.1	9405	-0.6	2075	93.6	9437	0.0	2131	95.4	9426	-1.2	94.3	-0.6
99	1970	83.2	9129	-3.5	2034	89.9	9417	-0.3	2117	94.1	9345	-2.1	89.1	-1.9
121	1864	74.5	8993	-4.9	2014	88.2	9398	-0.5	2122	94.6	9308	-2.5	85.7	-2.6
149	1640	57.6	8892	-6.0	1956	83.2	9363	-0.8	2080	90.9	9258	-3.0	77.2	-3.3
169	1465	46.0	8815	-6.8	1895	78.0	9319	-1.3	2030	86.6	9210	-3.5	70.2	-3.9
197	1090	25.5	8593	-9.2	1729	65.0	9243	-2.1	1900	75.8	9134	-4.3	55.4	-5.2
216					1647	59.0	9198	-2.6	1777	66.3	9081	-4.8	41.8	-36.0
244									1621	55.2	8995	-5.7	18.4	-68.8

試験体種別：E45-B-6.0

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	相対動弾性 (%)	質量変化率 (%)
0	2058	100.0	9436	0.0	2090	100.0	9270	0.0	2060	100.0	9536	0.0	100.0	0.0
20	2040	98.3	9448	0.1	2083	99.3	9284	0.2	2045	98.5	9545	0.1	98.7	0.1
42	2042	98.5	9447	0.1	2076	98.7	9282	0.1	2054	99.4	9545	0.1	98.8	0.1
70	2044	98.6	9440	0.0	2078	98.9	9272	0.0	2044	98.5	9531	-0.1	98.7	0.0
99	2044	98.6	9431	-0.1	2084	99.4	9258	-0.1	2044	98.5	9518	-0.2	98.8	-0.1
130	2042	98.5	9403	-0.3	2081	99.1	9245	-0.3	2042	98.3	9449	-0.9	98.6	-0.5
159	2046	98.8	9387	-0.5	2069	98.0	9229	-0.4	2042	98.3	9492	-0.5	98.4	-0.5
194	2050	99.2	9355	-0.9	2076	98.7	9199	-0.8	2039	98.0	9411	-1.3	98.6	-1.0
224	2044	98.6	9337	-1.0	2082	99.2	9190	-0.9	2032	97.3	9395	-1.5	98.4	-1.1
259	2046	98.8	9303	-1.4	2071	98.2	9153	-1.3	2034	97.5	9363	-1.8	98.2	-1.5
276	2034	97.7	9289	-1.6	2070	98.1	9148	-1.3	2033	97.4	9355	-1.9	97.7	-1.6
305	2035	97.8	9261	-1.9	2060	97.1	9115	-1.7	2027	96.8	9332	-2.1	97.2	-1.9

試験体種別：E50-A-4.5

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	相対 動弾性 (%)	質量 変化率 (%)
0	2084	100.0	9525	0.0	2133	100.0	9404	0.0	2095	100.0	9419	0.0	100.0	0.0
22	1895	82.7	9503	-0.2	1975	85.7	9326	-0.8	1910	83.1	9243	-1.9	83.8	-1.0
50	1380	43.8	9484	-0.4	1571	54.2	9274	-1.4	1306	38.9	9168	-2.7	45.7	-1.5

試験体種別：E50-A-6.0

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	相対 動弾性 (%)	質量 変化率 (%)
0	2050	100.0	9582	0.0	2077	100.0	9472	0.0	2073	100.0	9318	0.0	100.0	0.0
20	2043	99.3	9590	0.1	2062	98.6	9481	0.1	2060	98.7	9324	0.1	98.9	0.1
42	2044	99.4	9584	0.0	2070	99.3	9475	0.0	2068	99.5	9317	0.0	99.4	0.0
70	2046	99.6	9569	-0.1	2059	98.3	9461	-0.1	2067	99.4	9304	-0.2	99.1	-0.1
99	2048	99.8	9442	-1.5	2064	98.8	9441	-0.3	2066	99.3	9285	-0.4	99.3	-0.7
130	2039	98.9	9381	-2.1	2062	98.6	9415	-0.6	2042	97.0	9024	-3.2	98.2	-2.0
159	2040	99.0	9363	-2.3	2070	99.3	9396	-0.8	2048	97.6	8940	-4.1	98.7	-2.4
194	2052	100.2	9329	-2.6	2075	99.8	9369	-1.1	2060	98.7	8889	-4.6	99.6	-2.8
224	2038	98.8	9306	-2.9	2076	99.9	9341	-1.4	2056	98.4	8869	-4.8	99.0	-3.0
259	2042	99.2	9264	-3.3	2080	100.3	9293	-1.9	2070	99.7	8836	-5.2	99.7	-3.5
276	2032	98.3	9230	-3.7	2073	99.6	9281	-2.1	2067	99.4	8810	-5.5	99.1	-3.7
305	2019	97.0	9193	-4.1	2066	98.9	9245	-2.4	2055	98.3	8766	-5.9	98.1	-4.1

試験体種別：E50-B-6.0

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	相対 動弾性 (%)	質量 変化率 (%)
0	2028	100.0	9324	0.0	2048	100.0	9483	0.0	2027	100.0	9451	0.0	100.0	0.0
20	2022	99.4	9328	0.0	2045	99.7	9491	0.1	2027	100.0	9458	0.1	99.7	0.1
42	2026	99.8	9324	0.0	2048	100.0	9484	0.0	2038	101.1	9431	-0.2	100.3	-0.1
70	2037	100.9	9311	-0.1	2050	100.2	9476	-0.1	2042	101.5	9409	-0.4	100.9	-0.2
99	2036	100.8	9300	-0.3	2048	100.0	9451	-0.3	2038	101.1	9397	-0.6	100.6	-0.4
130	2032	100.4	9270	-0.6	2046	99.8	9429	-0.6	2028	100.1	9381	-0.7	100.1	-0.6
159	2031	100.3	9247	-0.8	2044	99.6	9409	-0.8	2030	100.3	9360	-1.0	100.1	-0.9
194	2028	100.0	9209	-1.2	2052	100.4	9368	-1.2	2054	102.7	9331	-1.3	101.0	-1.2
224	2032	100.4	9187	-1.5	2049	100.1	9340	-1.5	2044	101.7	9305	-1.5	100.7	-1.5
259	2020	99.2	9141	-2.0	2038	99.0	9300	-1.9	2054	102.7	9255	-2.1	100.3	-2.0
276	2010	98.2	9123	-2.2	2038	99.0	9285	-2.1	2057	103.0	9124	-3.5	100.1	-2.6
305	2020	99.2	9012	-3.3	2036	98.8	9089	-4.2	2046	101.9	9241	-2.2	100.0	-3.2

試験体種別：E55-A-4.5

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	相対動弾性 (%)	質量変化率 (%)
0	2111	100.0	9485	0.0	2117	100.0	9465	0.0	2120	100.0	9575	0.0	100.0	0.0
22	1783	71.3	9529	0.5	1898	80.4	9508	0.5	1865	77.4	9620	0.5	76.4	0.5
50	1093	26.8	9415	-0.7	828	15.3	9295	-1.8	607	8.2	9303	-2.8	16.8	-1.8

試験体種別：E55-A-6.0

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	相対動弾性 (%)	質量変化率 (%)
0	2128	100.0	9154	0.0	2042	100.0	9236	0.0	2054	100.0	9291	0.0	10.0	0.0
20	2090	98.5	9161	0.1	2033	99.1	9243	0.1	2046	99.2	9300	0.1	98.9	0.1
42	2094	99.3	9124	-0.3	2043	100.1	9243	0.1	2062	100.8	9302	0.1	100.1	0.0
70	2096	99.8	9080	-0.8	2045	100.3	9136	-1.1	2071	101.7	9274	-0.2	100.6	-0.7
99	2092	101.2	9051	-1.1	2058	101.6	9110	-1.4	2068	101.4	9268	-0.2	101.4	-0.9
130	2090	101.7	9022	-1.4	2058	101.6	9092	-1.6	2070	101.6	9257	-0.4	101.6	-1.1
159	2100	101.9	9008	-1.6	2059	101.7	9087	-1.6	2066	101.2	9245	-0.5	101.6	-1.2
194	2102	101.6	8964	-2.1	2060	101.8	9054	-2.0	2070	101.6	9227	-0.7	101.6	-1.6
224	2096	101.8	8934	-2.4	2042	100.0	8833	-4.4	2071	101.7	9214	-0.8	101.1	-2.5
259	2100	101.1	8895	-2.8	2057	101.5	8737	-5.4	2068	101.4	9188	-1.1	101.3	-3.1
276	2096	100.2	8869	-3.1	2056	101.4	8725	-5.5	2060	100.6	9116	-1.9	100.7	-3.5
305	2060	99.6	8795	-3.9	2056	101.4	8677	-6.1	2061	100.7	9134	-1.7	100.6	-3.9

試験体種別：E55-B-6.0

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対動弾性 (%)	質量 (g)	質量変化率 (%)	相対動弾性 (%)	質量変化率 (%)
0	2013	100.0	9235	0.0	2050	100.0	9220	0.0	2095	100.0	9096	0.0	100.0	0.0
20	2000	98.7	9247	0.1	2050	100.0	9232	0.1	2093	99.8	9104	0.1	99.5	0.1
42	2017	100.4	9243	0.1	2055	100.5	9228	0.1	2097	100.2	9106	0.1	100.4	0.1
70	2022	100.9	9237	0.0	2063	101.3	9209	-0.1	2102	100.7	9097	0.0	100.9	0.0
99	2021	100.8	9214	-0.2	2055	100.5	9195	-0.3	2098	100.3	9091	-0.1	100.5	-0.2
130	2025	101.2	9191	-0.5	2071	102.1	9180	-0.4	2104	100.9	9078	-0.2	101.4	-0.4
159	2026	101.3	9171	-0.7	2058	100.8	9169	-0.6	2106	101.1	9064	-0.4	101.0	-0.5
194	2013	100.0	9124	-1.2	2056	100.6	9126	-1.0	2100	100.5	9035	-0.7	100.4	-0.9
224	2018	100.5	9071	-1.7	2063	101.3	9103	-1.3	2103	100.8	9010	-0.9	100.8	-1.3
259	2010	99.7	9014	-2.3	2060	101.0	9069	-1.6	2111	101.5	8975	-1.3	100.7	-1.8
276	2007	99.4	8986	-2.7	2060	101.0	8987	-2.5	2103	100.8	8949	-1.6	100.4	-2.3
305	1952	94.0	8886	-3.8	2066	101.6	8931	-3.1	2095	100.0	8905	-2.1	98.5	-3.0

試験体種別：N35-A-4.5

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	相対 動弾性 (%)	質量 変化率 (%)
0	2257	100.0	9667	0.0	2218	100.0	9590	0.0	2254	100.0	9592	0.0	100.0	0.0
15	2224	97.1	9664	0.0	2180	96.6	9588	0.0	2220	97.0	9592	0.0	96.9	0.0
43	2221	96.8	9664	0.0	2182	96.8	9584	-0.1	2221	97.1	9593	0.0	96.9	0.0
64	2238	98.3	9663	0.0	2195	97.9	9580	-0.1	2225	97.4	9589	0.0	97.9	-0.1
92	2230	97.6	9657	-0.1	2178	96.4	9578	-0.1	2221	97.1	9587	-0.1	97.0	-0.1
114	2226	97.3	9657	-0.1	2192	97.7	9576	-0.1	2237	98.5	9591	0.0	97.8	-0.1
141	2246	99.0	9657	-0.1	2204	98.7	9574	-0.2	2242	98.9	9588	0.0	98.9	-0.1
162	2236	98.1	9652	-0.2	2194	97.8	9568	-0.2	2236	98.4	9583	-0.1	98.1	-0.2
190	2240	98.5	9649	-0.2	2204	98.7	9567	-0.2	2244	99.1	9583	-0.1	98.8	-0.2
209	2247	99.1	9647	-0.2	2206	98.9	9560	-0.3	2236	98.4	9578	-0.1	98.8	-0.2
237	2252	99.6	9644	-0.2	2210	99.3	9556	-0.4	2250	99.6	9578	-0.1	99.5	-0.2
265	2247	99.1	9638	-0.3	2205	98.8	9551	-0.4	2249	99.6	9574	-0.2	99.2	-0.3
295	2254	99.7	9634	-0.3	2214	99.6	9542	-0.5	2252	99.8	9570	-0.2	99.7	-0.4
310	2235	98.1	9632	-0.4	2217	99.9	9536	-0.6	2258	100.4	9567	-0.3	99.4	-0.4

試験体種別：N40-A-4.5

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	相対 動弾性 (%)	質量 変化率 (%)
0	2184	100.0	9484	0.0	2217	100.0	9516	0.0	2214	100.0	9434	0.0	100.0	0.0
15	2156	97.5	9482	0.0	2193	97.8	9512	0.0	2180	97.0	9433	0.0	97.4	0.0
43	2152	97.1	9483	0.0	2182	96.9	9510	-0.1	2177	96.7	9431	0.0	96.9	0.0
64	2160	97.8	9477	-0.1	2194	97.9	9504	-0.1	2180	97.0	9421	-0.1	97.6	-0.1
92	2145	96.5	9456	-0.3	2176	96.3	9501	-0.2	2170	96.1	9424	-0.1	96.3	-0.2
114	2150	96.9	9429	-0.6	2180	96.7	9490	-0.3	2172	96.2	9420	-0.1	96.6	-0.3
141	2161	97.9	9400	-0.9	2188	97.4	9473	-0.5	2177	96.7	9403	-0.3	97.3	-0.6
162	2146	96.6	9377	-1.1	2177	96.4	9440	-0.8	2160	95.2	9391	-0.5	96.1	-0.8
190	2150	96.9	9360	-1.3	2188	97.4	9409	-1.1	2166	95.7	9372	-0.7	96.7	-1.0
209	2160	97.8	9339	-1.5	2174	96.2	9394	-1.3	2172	96.2	9355	-0.8	96.7	-1.2
237	2154	97.3	9305	-1.9	2185	97.1	9376	-1.5	2174	96.4	9340	-1.0	96.9	-1.5
265	2156	97.5	9280	-2.2	2110	90.6	9353	-1.7	2159	95.1	9323	-1.2	94.4	-1.7
295	2160	97.8	9259	-2.4	2096	89.4	9326	-2.0	2150	94.3	9293	-1.5	93.8	-2.0
310	2165	98.3	9248	-2.5	2100	89.7	9313	-2.1	2153	94.6	9275	-1.7	94.2	-2.1

試験体種別：N45-NonAE

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	相対 動弾性 (%)	質量 変化率 (%)
0	2253	100.0	9771	0.0	2248	100.0	9754	0.0	2224	100.0	9820	0.0	100.0	0.0
20	1734	59.2	9746	-0.3	1946	74.9	9770	0.2	1880	71.5	9824	0.0	68.5	0.0
42	851	14.3	9717	-0.6	1136	25.5	9776	0.2	981	19.5	9822	0.0	19.8	-0.1

試験体種別：N45-A-4.5

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	相対 動弾性 (%)	質量 変化率 (%)
0	2161	100.0	9255	0.0	2152	100.0	9395	0.0	2154	100.0	9292	0.0	100.0	0.0
15	2142	98.2	9249	-0.1	2129	97.9	9387	-0.1	2133	98.1	9287	-0.1	98.1	-0.1
43	2139	98.0	9245	-0.1	2126	97.6	9381	-0.1	2137	98.4	9284	-0.1	98.0	-0.1
64	2148	98.8	9232	-0.2	2142	99.1	9370	-0.3	2146	99.3	9280	-0.1	99.0	-0.2
92	2146	98.6	9222	-0.3	2124	97.4	9357	-0.4	2130	97.8	9253	-0.4	97.9	-0.4
114	2146	98.6	9216	-0.4	2132	98.1	9346	-0.5	2141	98.8	9428	1.5	98.5	0.2
141	2155	99.4	9198	-0.6	2140	98.9	9329	-0.7	2145	99.2	9238	-0.6	99.2	-0.6
162	2152	99.2	9184	-0.7	2140	98.9	9310	-0.9	2152	99.8	9226	-0.7	99.3	-0.8
190	2150	99.0	9164	-1.0	2136	98.5	9289	-1.1	2150	99.6	9213	-0.9	99.0	-1.0
209	2156	99.5	9139	-1.2	2140	98.9	9272	-1.3	2152	99.8	9120	-1.9	99.4	-1.5
237	2160	99.9	9123	-1.4	2146	99.4	9249	-1.6	2158	100.4	9190	-1.1	99.9	-1.3
265	2156	99.5	9234	-0.2	2145	99.4	9110	-3.0	2162	100.7	9179	-1.2	99.9	-1.5
295	2149	98.9	9089	-1.8	2144	99.3	9514	1.3	2164	100.9	9160	-1.4	99.7	-0.6
310	2146	98.6	9077	-1.9	2138	98.7	9203	-2.0	2161	100.7	9152	-1.5	99.3	-1.8

試験体種別：N50-A-4.5

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	相対 動弾性 (%)	質量 変化率 (%)
0	2068	100.0	9341	0.0	2066	100.0	9364	0.0	2064	100.0	9355	0.0	100.0	0.0
15	2042	97.5	9333	-0.1	2036	97.1	9357	-0.1	2035	97.2	9353	0.0	97.3	-0.1
43	2048	98.1	9316	-0.3	2042	97.7	9344	-0.2	2035	97.2	9332	-0.2	97.7	-0.2
64	2054	98.7	9305	-0.4	2055	98.9	9327	-0.4	2040	97.7	9312	-0.5	98.4	-0.4
92	2044	97.7	9287	-0.6	2039	97.4	9311	-0.6	2035	97.2	9302	-0.6	97.4	-0.6
114	2052	98.5	9281	-0.6	2044	97.9	9302	-0.7	2038	97.5	9290	-0.7	97.9	-0.7
141	2050	98.3	9263	-0.8	2058	99.2	9282	-0.9	2038	97.5	9266	-1.0	98.3	-0.9
162	2044	97.7	9245	-1.0	2052	98.6	9261	-1.1	2035	97.2	9246	-1.2	97.9	-1.1
190	2050	98.3	9214	-1.4	2045	98.0	9232	-1.4	2025	96.3	9214	-1.5	97.5	-1.4
209	2050	98.3	9180	-1.7	2050	98.5	9209	-1.7	2038	97.5	9192	-1.7	98.1	-1.7
237	2042	97.5	9156	-2.0	2032	96.7	9182	-1.9	2030	96.7	9167	-2.0	97.0	-2.0
265	2050	98.3	9140	-2.2	2028	96.4	9159	-2.2	2023	96.1	9130	-2.4	96.9	-2.2
295	2055	98.7	9101	-2.6	2026	96.2	9128	-2.5	2017	95.5	9099	-2.7	96.8	-2.6
310	2048	98.1	9082	-2.8	2013	94.9	9106	-2.8	2007	94.6	9068	-3.1	95.9	-2.9

試験体種別：N50-B-6.0

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	相対 動弾性 (%)	質量 変化率 (%)
0	2128	100.0	9348	0.0	2133	100.0	9510	0.0	2123	100.0	9355	0.0	100.0	0.0
20	2090	96.5	9352	0.0	2098	96.7	9513	0.0	2092	97.1	9356	0.0	96.8	0.0
42	2094	96.8	9338	-0.1	2098	96.7	9510	0.0	2086	96.5	9349	-0.1	96.7	-0.1
70	2096	97.0	9300	-0.5	2094	96.4	9499	-0.1	2098	97.7	9335	-0.2	97.0	-0.3
99	2092	96.6	9292	-0.6	2094	96.4	9491	-0.2	2089	96.8	9317	-0.4	96.6	-0.4
130	2090	96.5	9248	-1.1	2087	95.7	9482	-0.3	2085	96.5	9299	-0.6	96.2	-0.7
159	2100	97.4	9271	-0.8	2110	97.9	9473	-0.4	2080	96.0	9208	-1.6	97.1	-0.9
194	2102	97.6	9255	-1.0	2102	97.1	9449	-0.6	2096	97.5	9154	-2.1	97.4	-1.3
224	2096	97.0	9241	-1.1	2096	96.6	9439	-0.7	2098	97.7	9143	-2.3	97.1	-1.4
259	2100	97.4	9219	-1.4	2106	97.5	9419	-1.0	2098	97.7	9130	-2.4	97.5	-1.6
276	2096	97.0	9214	-1.4	2102	97.1	9412	-1.0	2084	96.4	9129	-2.4	96.8	-1.6
305	2096	97.0	9192	-1.7	2099	96.8	9386	-1.3	2095	97.4	9111	-2.6	97.1	-1.9

試験体種別：N55-A-4.5

サイクル数	1				2				3				平均	
	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	振動数 (Hz)	相対 動弾性 (%)	質量 (g)	質量 変化率 (%)	相対 動弾性 (%)	質量 変化率 (%)
0	2133	100.0	9310	0.0	2082	100.0	9284	0.0	2093	100.0	9321	0.0	100.0	0.0
15	2108	97.7	9308	0.0	2064	98.3	9278	-0.1	2078	98.6	9317	0.0	98.2	0.0
43	2105	97.4	9280	-0.3	2061	98.0	9250	-0.4	2073	98.1	9292	-0.3	97.8	-0.3
64	2110	97.9	9252	-0.6	2080	99.8	9226	-0.6	2088	99.5	9264	-0.6	99.1	-0.6
92	2100	96.9	9230	-0.9	2064	98.3	9183	-1.1	2072	98.0	9247	-0.8	97.7	-0.9
114	2103	97.2	9202	-1.2	2070	98.9	9156	-1.4	2069	97.7	9229	-1.0	97.9	-1.2
141	2091	96.1	9156	-1.7	2063	98.2	9118	-1.8	2079	98.7	9199	-1.3	97.7	-1.6
162	2084	95.5	9106	-2.2	2061	98.0	9082	-2.2	2075	98.3	9169	-1.6	97.2	-2.0
190	2070	94.2	9052	-2.8	2046	96.6	9027	-2.8	2068	97.6	9121	-2.1	96.1	-2.6
209	2055	92.8	9016	-3.2	2052	97.1	8988	-3.2	2070	97.8	9087	-2.5	95.9	-3.0
237	2048	92.2	8966	-3.7	2051	97.0	8904	-4.1	2067	97.5	9041	-3.0	95.6	-3.6
265	2024	90.0	8920	-4.2	2034	95.4	8846	-4.7	2065	97.3	8993	-3.5	94.3	-4.1
295	1971	85.4	8834	-5.1	1990	91.4	8785	-5.4	2045	95.5	8930	-4.2	90.7	-4.9
310	1928	81.7	8801	-5.5	1960	88.6	8745	-5.8	2031	94.2	8906	-4.5	88.2	-5.2

資料⑩ 促進中性化試験結果（蒸気養生）

試験体種別：E35

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値 (mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		b	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	2	a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		b	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
4w	1	a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		b	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	2	a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		b	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		

試験体種別：E40

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	0.00	0.20	0.20	0.00	0.00	0.06	0.24
		b	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00		
	2	a	0.00	2.50	0.00	0.00	0.00	0.42	
		b	0.00	1.00	0.00	0.70	0.00		
4w	1	a	2.40	0.00	0.00	0.50	0.00	0.68	0.74
		b	0.00	2.45	1.40	0.00	0.00		
	2	a	0.00	1.30	2.50	0.80	0.00	0.79	
		b	0.00	0.00	1.50	0.00	1.80		

試験体種別：E45

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	2.50	3.20	5.10	4.30	4.80	3.18	2.32
		b	2.30	2.50	2.80	2.20	2.10		
	2	a	0.00	1.20	3.50	2.80	1.80	1.46	
		b	0.00	3.20	2.00	0.10	0.00		
4w	1	a	4.15	3.90	6.65	5.05	4.35	4.99	4.40
		b	4.20	6.80	5.95	4.05	4.80		
	2	a	4.25	7.05	3.30	0.65	0.00	3.81	
		b	4.25	3.85	3.20	5.30	6.25		

試験体種別：E50

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	5.20	2.00	1.00	2.10	0.00	1.35	1.60
		b	1.50	0.70	0.90	0.10	0.00		
	2	a	3.00	2.50	2.00	1.60	0.50	1.85	
		b	0.00	0.20	2.50	3.20	3.00		
4w	1	a	5.90	7.75	5.05	3.80	1.15	4.77	5.23
		b	6.30	5.35	4.30	3.20	4.90		
	2	a	3.75	5.55	6.00	3.65	4.45	5.68	
		b	4.80	4.95	8.45	8.10	7.05		

試験体種別：E55

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	1.50	1.20	0.20	2.80	3.00	0.98	1.28
		b	0.00	0.30	0.10	0.50	0.20		
	2	a	0.10	0.20	0.80	1.20	3.50	1.57	
		b	1.60	2.80	0.80	1.80	2.90		
4w	1	a	5.75	7.60	6.70	9.05	7.80	6.37	6.66
		b	3.75	5.30	5.80	5.15	6.80		
	2	a	7.60	7.10	5.00	7.80	7.70	6.94	
		b	6.75	5.60	5.90	7.20	8.70		

試験体種別：N35

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		b	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	2	a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		b	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
4w	1	a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		b	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	2	a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		b	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		

試験体種別：N40

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		b	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	2	a	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
		b	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
4w	1	a	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.10	0.15
		b	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00		
	2	a	0.70	0.00	0.50	0.00	0.00	0.20	
		b	0.00	0.50	0.30	0.00	0.00		

試験体種別：N45

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	0.00	0.20	0.00	0.50	0.00	0.10	0.18
		b	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00		
	2	a	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00	0.25	
		b	0.00	0.00	1.20	0.80	0.00		
4w	1	a	0.00	0.00	1.00	1.50	2.50	0.67	0.67
		b	0.00	0.00	0.00	0.50	1.20		
	2	a	1.80	1.60	0.20	0.00	0.00	0.66	
		b	2.55	0.20	0.20	0.00	0.00		

試験体種別：N50

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	1.00	0.40	0.50	0.20	0.10	0.23	0.12
		b	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00		
	2	a	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.01	
		b	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
4w	1	a	3.65	1.90	0.75	0.70	1.05	1.83	1.42
		b	2.85	2.55	1.20	1.70	1.95		
	2	a	0.00	0.45	0.55	0.35	0.75	1.00	
		b	1.20	1.65	2.25	1.30	1.45		

試験体種別：N55

促進材齡	供試体No.	面	測定値 (mm)					平均値(mm)	
			1	2	3	4	5		
1w	1	a	0.20	0.10	0.30	0.30	0.10	0.20	0.11
		b	0.30	0.20	0.50	0.00	0.00		
	2	a	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	
		b	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
4w	1	a	5.10	4.05	3.20	3.70	0.95	2.70	2.61
		b	3.00	3.45	1.80	1.30	0.40		
	2	a	1.05	1.05	2.30	1.95	5.10	2.52	
		b	0.00	1.55	5.15	3.90	3.15		

資料⑩ ひび割れ発生荷重および終局耐力の計算方法

はりのひび割れ荷重と曲げ断面耐力、鉄筋およびコンクリートの応力の算出は以下の様に行った。まず、ひび割れ荷重については、式(1)に示す様にコンクリートの全断面を有効として、コンクリートの引張側の応力が引張り強度に達した時点でひび割れるとして算出した。

次に、ひび割れ後のコンクリートの圧縮縁および鉄筋応力は、式(2)に示す様に、コンクリートの引張応力を無視した弾性解析により中立軸比と共に算出した。この場合、鉄筋が降伏応力に達するか、コンクリートが圧縮強度に達するかいずれの場合までの範囲で算出した。

更に、終局耐力については、応力ブロックの仮定を用いて式(3)により算出した。また、終局時の釣り合い鉄筋比は式(4)により求めた。

尚、計算においては、前章で示したコンクリート強度や鉄筋降伏強度等の実測データや実験に供した梁の実寸法を用いた。表⑩-1には、これら計算に使用したデータを整理して示している。

$$M = \frac{1}{6} b h^2 \sigma_{ct}, \quad P = \frac{2M}{L} \quad \dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma'_c &= \frac{\frac{M}{b d^2}}{\frac{1}{2} k \left[1 - \frac{k}{3} \right]}, & \sigma_s &= \frac{1-k}{k} n \sigma'_c \\ k &= -np + \sqrt{(np)^2 + 2np} \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} M_u &= b d^2 p f_y \left(1 - \frac{k_2 p f_y}{\beta_1 k_3 f'_c} \right) \\ k_2 &= \frac{\beta_1}{2}, \quad k = \frac{p f_y}{\beta_1 k_3 f'_c} \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} p_b &= \frac{A_s}{b d} = \beta_1 k_3 \frac{\varepsilon'_{cu}}{\varepsilon'_{cu} + \varepsilon_y} \cdot \frac{f'_c}{f_y} \\ \varepsilon_y &= \frac{f_y}{E_s}, \quad \varepsilon'_{cu} = 0.0035, \quad \beta_1 = 0.8, \quad k_3 = 0.85 \end{aligned} \right\} \dots (4)$$

表⑩-1 計算に用いた梁のデータ

	b (mm)	d (mm)	p	f_y (N/mm ²)	f'_c (N/mm ²)	ϵ_y	ϵ_{cu}	E_s (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)
E-25-40	250	243	0.0250	376	52.7	0.00207	0.00350	181.3	33.63
E-32-40	250	242	0.0394	382	52.7	0.00207	0.00350	184.9	33.63
E-38-40	250	243	0.0563	365	52.7	0.00209	0.00350	174.5	33.63
N-25-40	250	244	0.0249	376	48.9	0.00207	0.00350	181.3	32.70
N-32-40	250	244	0.0391	382	48.9	0.00207	0.00350	184.9	32.70
N-38-40	250	243	0.0563	365	48.9	0.00209	0.00350	174.5	32.70

表⑩-2 略記号とその意味

記号	意味	記号	意味	記号	意味
M	はり中央モーメント	k	中立軸比	f_y	鉄筋降伏強度
P	載荷荷重	σ'_c	コンクリートの 圧縮応力	F'_c	コンクリート強度
L	載荷点と支点間距離 (=0.7m)	σ'_s	鉄筋の引張応力	E_s	鉄筋のヤング係数
h	梁せい	p	鉄筋比	E_c	コンクリートの 静弾性係数
b	梁幅	p_b	釣り合い鉄筋比	ϵ_y	鉄筋降伏ひずみ
d	有効梁せい	n	弾性係数比(E_s/E_c)	ϵ'_{cu}	コンクリートの 終局ひずみ
σ_α	コンクリートの 引張強度	M_u	終局モーメント		

付録

- ①寺田剛、明嵐政司：都市ごみ焼却灰を主原料としたセメントの低塩素化とコンクリートの特性、コンクリート工学、Vol.37、No.8、pp.26-30、1999
- ②吉本稔、河野広隆、明嵐政司、江里口玲、早川隆之：普通形エコセメントの蒸気養生特性に関する研究、第55回土木学会年次学術講演会講演概要集、V-132、2000.9
- ③中村俊彦、寺田剛、明嵐政司：低塩素型省エネセメントを用いたコンクリートの長期耐久性状、第55回土木学会年次学術講演会講演概要集、V-136、2000.9
- ④穴戸薫、鈴木勲、田中敏嗣、中村俊彦：普通形エコセメントを用いた園路舗装コンクリートの性状、第55回土木学会年次学術講演会講演概要集、V-137、2000.9

都市ごみ焼却灰を主原料としたセメントの 低塩素化とコンクリートの特性

寺田 剛*¹・明嵐 政司*²

概 要 都市ゴミ焼却灰等を原料に使用することで、省資源・省エネルギーおよび CO₂ 削減に有効なセメント（以下、省エネセメント）があり、さらにその低塩素化技術が開発されている。本報告は、低塩素形省エネセメントの特徴とこのセメントを用いたコンクリートのフレッシュ性状、強度性状および耐久性の試験結果を示したものである。低塩素形省エネセメントを用いたコンクリートの性状は、普通ポルトランドセメントを用いた場合と比較して大きな相違はなく、同様に使用できる可能性が認められた。

キーワード：都市ゴミ焼却灰、省エネセメント、低塩素化、コンクリート、フレッシュコンクリート、強度、耐久性

1. はじめに

建設省総合技術開発プロジェクト「省資源・省エネルギー型国土建設技術の開発」の一環として行われた「省エネルギー型土木工法の利用技術の開発」において、省資源・省エネルギー型土木資材として有効である省エネセメントについて、土木構造物への適用を中心とした利用技術を開発した。その成果は「省エネセメントの利用技術の開発に関する報告書－研究成果及び利用技術マニュアル（案）－」に取りまとめられている¹⁾。ここで検討したセメントは、都市ゴミ焼却灰等を主原料とした A 型省エネセメント、製鋼スラグおよび廃珪砂を使用した B 型省エネセメント、石灰石微粉末および高炉スラグ微粉末を利用した C 型省エネセメントの 3 種である。この中で A 型省エネセメントは、原料に由来して塩化物イオンを 0.5～1% 程度含有しているために、その利用は無筋コンクリートおよび地盤改良固化材に限定されている。しかしその後、A 型省エネセメントの製造技術が進展し、このセメント中の塩化物イオン量の低減が可能になりつつあり、低塩素化技術が進めば、鉄筋コンクリート構造物への適用が可能になる。

本報告は、塩化物イオン量が 0.1% 以下に低減された

A 型省エネセメント（以下、低塩素形省エネセメント）の特徴と、このセメントを用いたコンクリートの基本性状について述べたものである。

2. A 型省エネセメントの低塩素化

従来の A 型省エネセメントは、都市ごみ焼却灰から持ち込まれる塩素 (Cl) を積極的に利用し、速硬性の高いカルシウムクロロアルミネート (C₁₁A₇・CaCl₂) として、Cl を固定させたものである^{1),2)}。これに対して、低塩素形省エネセメントは、クリンカーの焼成過程において含有されるアルカリなどの成分は塩化物として揮散するが、調合原料中のアルカリ量を比較的多くし、塩化物を揮散させることで、Al₂O₃ を C₃A として生成させ、クリンカー中の Cl⁻ 量を、ENV 197/ISO のセメント規格で規定されている 0.1% 以下に低減することが可能となっている^{3),4)}。

3. 低塩素形省エネセメントの性質

3.1 物理化学的特性

表-1 に低塩素形省エネセメント（記号：EC）の化学組成を、表-2 に鉱物組成を、表-3 に物理的性質を普通ポルトランドセメント（記号：NPC）および高炉セメ

表-1 セメントの化学成分

セメント 種 類	化 学 組 成 (%)									
	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	P ₂ O ₅	Cl ⁻
NPC	0.6	22.2	5.1	3.2	65.1	1.4	2.0	0.7	0.1	0.00
BB	0.5	25.4	8.2	1.9	55.3	3.4	1.7	0.52	-	0.00
EC	0.3	17.7	8.3	4.0	61.5	1.9	3.7	0.3	1.2	0.04

NPC：普通ポルトランドセメント、BB：高炉セメント B 種、EC：低塩素形省エネセメント

表-2 セメントの鉱物組成

セメント種類	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
NPC	52	23	8	10
EC	45	16	15	12

*1 てらだ・まさる／建設省土木研究所 材料施工部 化学研究室 研究員

*2 むいあらし・せいし／建設省土木研究所 材料施工部 化学研究室 室長

表-3 セメントの物理試験結果

試料	密 度 (g/cm ³)	粉 末 度	安 定 性	凝 結		
		比表面積 (cm ² /g)		水 量 (%)	始 発	終 結
					(h-m)	(h-m)
NPC	3.16	3 370	良	27.4	2-10	3-25
BB	3.04	4 120	良	28.9	2-40	4-15
EC	3.19	4 480	良	30.2	2-55	4-20

試料	圧 縮 強 さ (N/mm ²)					曲 げ 強 さ (N/mm ²)				
	1 d	3 d	7 d	14 d	28 d	1 d	3 d	7 d	14 d	28 d
NPC	11.8	26.4	43.6	52.9	61.6	3.4	6.9	7.4	8.2	9.2
BB	7.8	20.8	34.4	47.3	59.8	2.4	6.3	5.9	7.8	9.0
EC	12.2	25.9	36.7	45.8	50.4	3.6	5.2	7.1	7.8	8.1

ント B 種 (記号: BB) と比較して示す。EC は、Cl 量が 0.04% であり、従来の A 型省エネセメントの場合の 0.50%¹⁾ と比較して大幅に低減されている。構成鉱物は NPC と同じ C₃S、C₂S、C₃A および C₄AF であるが、C₃A が市販されている NPC に比較して多いため、SO₃ を 4% 程度とすることにより、凝結始発時間が 180 分程度に制御されている。

3.2 水和性状⁵⁾

図-1 にコンダクションカロリメータによる水和熱の測定結果を示す。EC は、NPC に比べて含有する C₃A が多いため、接水直後の発熱量は NPC より大きい、まもなく半水石膏と反応してエトリンガイトを生成し、NPC と同様に反応停滞期に入り、異常な水和反応は生じない。凝結始発時間とほぼ対応する約 2 時間

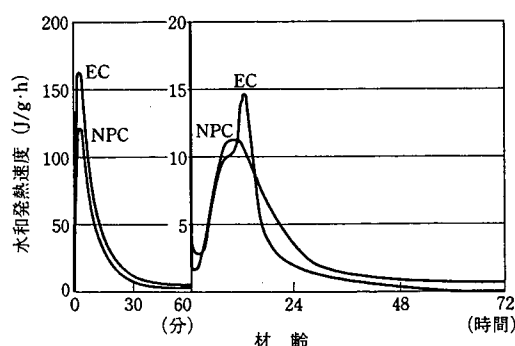


図-1 水和熱測定結果

後には、NPC の場合と同様にエーライトの活発な水和反応が開始される。その後、C₃A が多いためエトリンガイトからモノサルフェートへの転化に対応する発熱量は NPC より大きくなるが、エーライトの水和開始後であるために凝結時間などへの影響はない。長期的には NPC と同様に、エーライト、ビーライトの水和により生成するケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H)、水酸化カルシウムとモノサルフェート水和物な

どの水和物で構成され、安定化される。

4. 低塩素形省エネセメントを用いたコンクリートの基本性状

4.1 実験概要

(1) 使用材料

- 1) セメント：普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種、低塩素形省エネセメント
- 2) 細骨材：静岡県小笠産陸砂（最大寸法 5 mm、表乾比重 2.59）
- 3) 粗骨材：埼玉県秩父産碎石（最大寸法 20 mm、表乾比重 2.72）
- 4) 混和剤：AE 減水剤（リグニンスルホン酸系）および空気量調整剤

(2) 試験項目およびその方法

表-4 にコンクリートの試験項目およびその方法を示す。

4.2 コンクリートの配合

表-5 にコンクリートの配合を示す。水セメント比は 45、55 および 65% の 3 水準とし、目標スランプを 8±2.5 cm および 18±2.5 cm、目標空気量を 4.5±1.5% とし配合を選定した。EC は、表-3 に示すように粉末度が 4 480 cm²/g と高いため、単位水量および空気量調整剤を若干増加させることで、NPC および BB を用いた場合と同等のスランプおよび空気量性状を示した。

Cement Made with Urban Refuse Incinerator Ash : Reduction of Chloride Content and Properties of Concrete

By M. Terada and S. Meiarashi

Concrete Journal, Vol. 37, No. 8, pp. 26~30, Aug. 1999

Synopsis Cement made with urban refuse incinerator ash as raw materials is effective to save energy and resources and to reduce the discharge of CO₂ gas. However, such type of cement may contain a relatively high chloride content. Recently a manufacturing technology to reduce chloride content in this type of cement has been developed. In this paper, the feature of this type of cement is discussed. On the other hand, fresh and hardened properties as well as durability of concrete made with this type of cement are reported. Test results show that properties of concrete made with this type of cement are similar to those of concrete made with ordinary portland cement.

Keywords : cement, urban refuse incinerator ash, chloride, concrete, fresh concrete, strength, durability

表-4 コンクリートの試験項目

分 類	試験項目	試験方法	水セメント比 (%)			備 考
			45	55	65	
フレッシュコンクリート試験	ス ラ ン プ	JIS A 1101	○	○	○	経時変化 ¹⁾ は、排出直後、15, 30, 60, 90 分後に測定
	空 気 量	JIS A 1128	○	○	○	
	ブリーディング	JIS A 1123	○	○	○	
	凝 結	JIS A 6204	○	○	○	
硬化コンクリートの強度試験	圧縮強度および静弾性係数	JIS A 1108 JSCE-G 502	○	○	○	3, 7, 14, 28, 91 日 コンプレッソメータ使用
	曲 げ 強 度	JIS A 1106	○	○	○	28 日
	引 張 強 度	JIS A 1113	○	○	○	28 日
	乾 燥 収 縮	JIS A 1129	-	○	-	3, 7, 14, 28, 91 日
硬化コンクリートの耐久性試験	凍結融解抵抗性	JIS A 6204	-	○	-	200 サイクルまで
	促 進 中 性 化	日本建築学会 ²⁾	-	○	-	28 日養生後試験開始 1, 4, 8, 13 週
断熱温度上昇量試験		空気循環式断熱温度上昇量装置	-	○	-	14 日まで

1) 静置法による 2) 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針 (案) 付録

表-5 コンクリートの配合

目 標 スランプ	セメント 種 類	W/C (%)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					空気量 調整剤 (C×%)
				W	C	S	G	AE 減水剤	
8 cm	NPC	45.0	44.0	156	347	786	1 050	0.87	0.0050
		55.0	46.0	156	284	845	1 042	0.71	0.0030
		65.0	48.0	156	240	899	1 023	0.60	0.0030
	BB	45.0	43.0	154	342	767	1 067	0.86	0.0065
		55.0	45.0	154	280	826	1 061	0.70	0.0065
		65.0	47.0	154	237	880	1 042	0.59	0.0070
	EC	45.0	42.0	158	351	747	1 084	0.88	0.0055
		55.0	44.0	158	287	806	1 077	0.72	0.0050
		65.0	46.0	158	243	859	1 059	0.61	0.0050
18 cm	NPC	45.0	46.0	176	391	781	962	0.98	0.0025
		55.0	48.0	176	320	843	959	0.80	0.0025
		65.0	50.0	176	271	898	943	0.68	0.0025
	BB	45.0	45.0	178	396	754	968	0.99	0.0050
		55.0	47.0	174	316	824	976	0.79	0.0050
		65.0	49.0	174	268	879	961	0.67	0.0050
	EC	45.0	44.0	178	396	744	995	0.99	0.0050
		55.0	46.0	178	324	805	993	0.81	0.0050
		65.0	48.0	178	274	859	978	0.68	0.0050

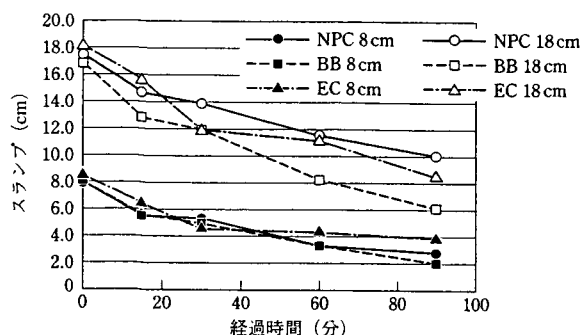


図-2 スランプ経時変化 (W/C=55%)

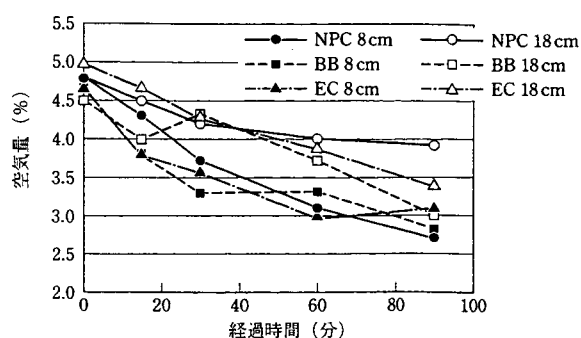


図-3 空気量の経時変化 (W/C=55%)

なお、断熱温度上昇試験については、単位セメント量 320 kg/m³ と固定し、水セメント比 55%、スランプ 18 cm の条件にて実施した。

4.3 試験結果および考察

(1) フレッシュコンクリートの性状

1) スランプおよび空気量

図-2 および図-3 にスランプおよび空気量の経時変化を示す。EC を用いた場合のスランプおよび空気量の経時変化は、NPC および BB の場合とほぼ同等であることが認められた。

2) ブリーディング

図-4 に最終ブリーディング率の測定結果を配合条件別に示す。いずれの配合条件においても、EC を用いた場合の最終ブリーディング率は、NPC を用いた場合とほぼ同等であった。

3) 凝 結

表-6 に凝結試験結果を示す。いずれの配合条件においても、EC を用いた場合の始発時間および終結時間は、他のセメントと比較して 2~3 時間程度長くなる傾向を示した。これは、EC の SO₃ 量が、NPC と比較して多いことが影響していると考えられる⁵⁾。

4) 断熱温度上昇

図-5 に断熱温度上昇試験結果を示す。EC を用いた場合の断熱温度上昇は、材齢 3 日程度までは NPC と比較して高くなった。これは、EC の C₃A 量が NPC より多いことが影響していると考えられる。しかし、発熱がほぼ収束する材齢 14 日ではほぼ同等の温度上昇量を示した。

(2) 硬化コンクリートの性状

1) 圧縮強度

図-6 にセメント水比と圧縮強度の関係を示す。EC を用いた場合のセメント水比と圧縮強度の関係は、NPC の場合と同様に一次式で近似でき、セメント水比則が成立することが認められた。また、同一のセメント水比に

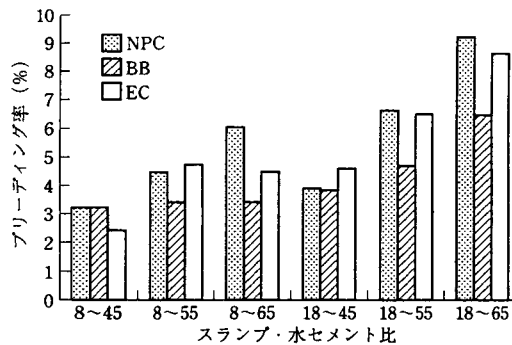


図-4 ブリーディング試験結果

表-6 凝結試験結果

目 標 スランブ	セメント 種 類	W/C (%)	凝 結 時 間 (h-min)	
			始 発	終 結
8 cm	NPC	45	5-25	7-15
		55	5-35	7-30
		65	5-50	8-15
	BB	45	6-25	9-00
		55	6-30	9-35
		65	6-35	10-05
	EC	45	7-30	9-55
		55	8-20	10-55
		65	7-50	10-40
18 cm	NPC	45	5-45	7-25
		55	6-05	8-05
		65	6-20	8-30
	BB	45	7-00	9-25
		55	7-00	9-25
		65	7-05	10-35
	EC	45	9-05	11-30
		55	9-25	11-55
		65	9-00	12-05

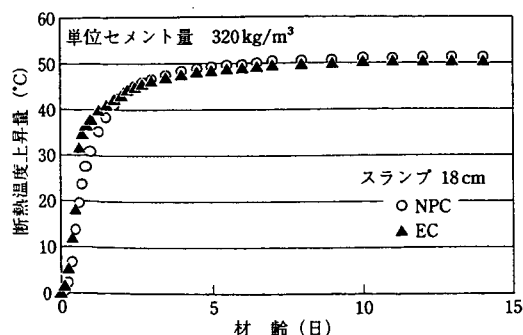


図-5 断熱温度上昇試験結果

おいて、EC を用いた場合の強度は、初期材齢では BB の場合より高くなったが、NPC の場合と比較すると全材齢で若干低い傾向となった。EC を用いた場合の強度発現が NPC の場合よりやや小さい理由として、EC のエーライト量が NPC より少ないこと、EC の P_2O_5 量が NPC より多いことが考えられる⁶⁾。

2) 弾性係数

図-7 に、圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。EC を用いた場合の圧縮強度と静弾性係数の関係は、NPC および BB を用いた場合と同様であることが認められた。

3) 引張強度

図-8 に、圧縮強度と引張強度の関係を示す。EC を用いた場合の圧縮強度と引張強度の関係は、NPC およ

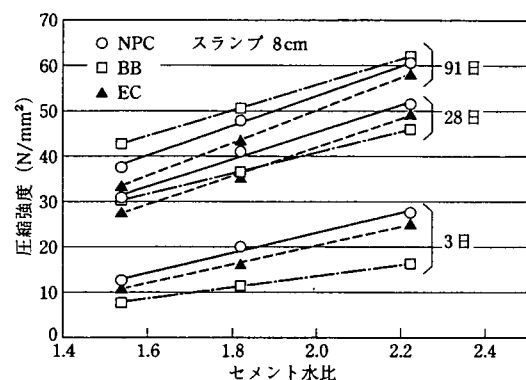


図-6 セメント水比と圧縮強度の関係

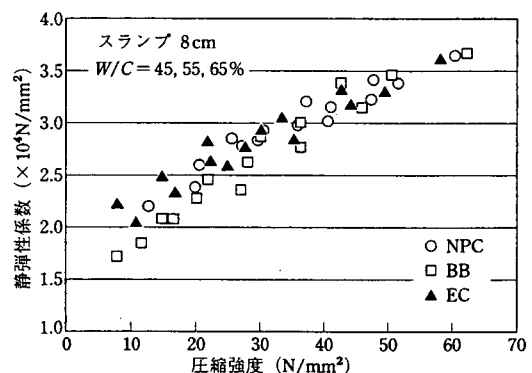


図-7 圧縮強度と弾性係数の関係

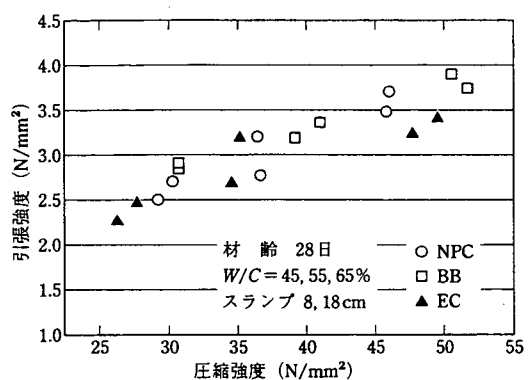


図-8 圧縮強度と引張強度の関係

び BB を用いた場合と同様であることが認められた。

4) 乾燥収縮

図-9 に、乾燥収縮試験結果を示す。EC を用いた場合の長さ変化率は、NPC および BB を用いた場合とほぼ同等であることが認められた。

5) 凍結融解抵抗性

図-10 に、凍結融解抵抗性試験結果を示す。相対動弾性係数は、セメントの種類によらずほぼ同等であり、EC を用いた場合も所定の空気量を導入することで、十分な

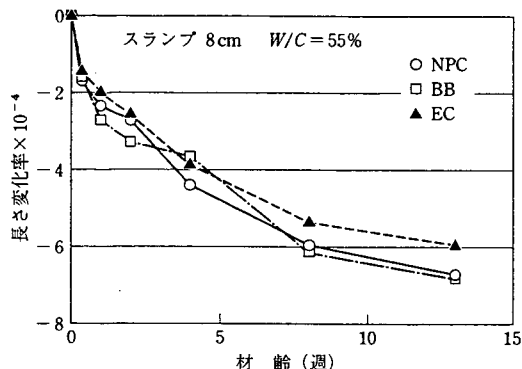


図-9 乾燥収縮試験結果

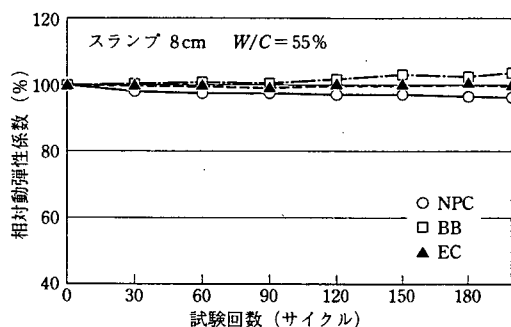


図-10 凍結融解抵抗性試験結果

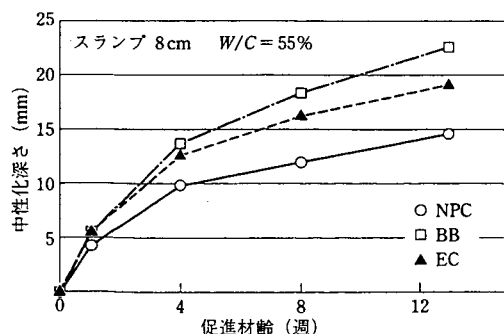


図-11 促進中性化試験結果

凍結融解抵抗性が得られることが認められた。

6) 促進中性化

図-11 に促進中性化試験結果を示す。水セメント比が同一の条件では、EC を用いた場合の中性化深さは、NPC より大きい、BB より小さくなる傾向を示した。中性化は、一般に圧縮強度や緻密度と比例的関係にあるので⁷⁾、水セメント比を低減し圧縮強度を高めることで EC の中性化深さは NPC の場合と同等になると思われる。

5. おわりに

低塩素形省エネセメントを用いたコンクリートの基本性状は、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を用いた場合と比較して大きな相違はなく、同様に使用できる可能性が認められた。鉄筋コンクリートへ適用する際の重要な特性のひとつとして鉄筋腐食が挙げられるが、低塩素形省エネセメントを用いた場合の腐食に関しては、液相中の塩化物イオン濃度測定試験や電食による腐食促進試験を行った結果、特に問題ないとの報告もある⁸⁾。しかし、実際にこのコンクリートを鉄筋コンクリート構造物に適用するためには、長期的な鉄筋腐食等の耐久性を明らかにしていく必要がある。

最後に、本実験に御協力いただいた太平洋セメント㈱の関係各位に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 建設省土木研究所材料施工部化学研究室、省エネセメントの利用技術の開発に関する研究、土木研究所資料第 3496 号、1997.3
- 2) 小野義徳・大森啓至・田熊靖久：都市ゴミ焼却灰から製造されるエコセメント、セメント・コンクリート、No.586, pp. 1~8, 1995.12
- 3) T. Shimoda and S. Yokoyama : A New Portland Cement to Solve Municipal and Industrial Waste Problems, International Congress "Creating with Concrete", Dundee, 1999.9 (投稿中)
- 4) 横山 滋・中野 卓・土田良明・牧 巖：都市ゴミ焼却灰を主原料としたセメントクリンカーに及ぼす Cl の影響、第 53 回セメント技術大会講演要旨, pp. 48~49, 1999
- 5) 横山 滋・平尾 宙・土田良明・長野健一：都市ゴミ焼却灰を主原料としたセメントの石膏量および粉末度、セメントコンクリート論文集, Vol. 53, 1999 (投稿中)
- 6) R.W. Nurse, The Effect of Phosphate on the Constitution and Hardening of Portland Cement, J. Appl. Chem., Vol. 2, Part 12, pp. 708~716, 1952
- 7) 土木学会、フライアッシュを混合したコンクリートの中性化と鉄筋腐食に関する長期的研究、コンクリートライブラリー, No. 64, 1988.3
- 8) 田澤栄一・河合研至・川崎 渉・横山 滋：都市型廃棄物を利用したセメントの塩素含有量と硬化体の腐食抵抗性、第 53 回セメント技術大会講演要旨, pp.58~59, 1999

普通形エコセメントの蒸気養生特性に関する研究

太平洋セメント（株） 中央研究所	正会員 吉本 稔
建設省土木研究所 コンクリート研究室	正会員 河野広隆
建設省土木研究所 化学研究室	正会員 明嵐政司
太平洋セメント（株） 中央研究所	正会員 江里口玲
太平洋セメント（株） 中央研究所	正会員 早川隆之

1. はじめに

都市ゴミ焼却灰や下水汚泥などの廃棄物を主原料としたセメント（普通形エコセメント：以下 E と略す）が開発され、その用途として生コン、コンクリート二次製品が考えられている。E の標準養生下における各種物性に関する報告があるが¹⁾、蒸気養生下におけるコンクリート物性を評価したものはない。本研究では E を用いたコンクリートのフレッシュ性状ならびに蒸気養生を行った強度特性について水セメント比を水準として取り上げ、コンクリート二次製品への適用性について普通ポルトランドセメント（以下 N と略す）と比較し検討を行った。

2. 実験概要

表-1 実験の要因と水準

2.1 実験の要因と水準

実験の要因と水準を表-1に示す。水セメント比はコンクリート二次製品の分野で使用される 35%~50%の間とし、比較のために 55%の配合も取り上げた。圧縮強度、ならびに曲げ強度の材齢はコンクリート二次製品の出荷材齢である 14 日を基準とし、強度発現性を確認するために材齢 1 日強度も測定した。

要因	水準
セメントの種類	E、N
水セメント比 (%)	35、40、45、50、55
材齢 (蒸気養生後)	1 日、14 日
強度	圧縮強度、曲げ強度

2.2 使用材料ならびに配合

使用材料はセメントとして E、N、細骨材は静岡県小笠産陸砂（比重：2.61、粗粒率：2.73）、粗骨材は茨城県岩瀬産碎石（比重：2.65、最大寸法 20mm）を用いた。配合はいずれの水セメント比においても単位水量を一定とした。スランプ、空気量はポリカルボン酸系の高性能減水剤、AE 助剤を用いそれぞれ 16cm、4.5%になるように調整した。コンクリートの配合とフレッシュ性状の試験結果を表-2 に、E ならびに N の鉱物組成ならびに化学組成を表-3 に示す。E は N の J I S 規格に対し塩素が 540ppm、SO₃が 3.9%と外れている。

表-2 配合ならびにフレッシュ性状試験結果一覧

セメントの種類	配合条件		単位量(kg/m ³)					添加率(%)		フレッシュ性状						
	W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G5号	G6号	SP C×(%)	AE剤 C×(%)	スランプ(cm)		空気量(%)		エンクリート温度(°C)		塩化物イオン量 (kg/m ³)
										0分	30分	0分	30分	0分	30分	
E	35	43	168	480	712	575	381	1.00	0.0160	15.8	11.7	4.0	2.2	25.0	22.0	—
	40	44	168	420	750	582	385	0.80	0.0090	17.5	6.2	5.5	3.2	22.0	22.0	0.07
	45	45	168	373	784	584	386	0.75	0.0070	14.7	5.2	5.1	2.2	23.0	22.0	0.07
	50	46	168	336	816	583	386	0.80	0.0060	18.5	7.6	4.5	2.8	22.0	21.5	0.06
	55	47	168	305	845	581	384	0.80	0.0040	15.6	8.2	3.8	2.8	22.0	21.0	0.05
N	35	44	168	480	727	563	373	0.45	0.0035	12.5	8.5	3.7	2.4	21.5	21.0	0.04
	40	45	168	420	765	570	377	0.45	0.0030	17.2	10.2	4.8	3.3	21.0	20.5	0.03
	45	46	168	373	800	572	379	0.35	0.0020	18.0	10.5	5.3	3.6	21.0	20.0	0.03
	50	47	168	336	832	571	378	0.30	0.0020	16.0	9.5	5.1	4.1	21.0	20.0	0.03
	55	48	168	305	862	569	376	0.30	0.0010	14.5	11.0	4.1	3.9	21.0	20.0	0.03

表-3 セメントの化学成分と鉱物組成

セメントの種類	化 学 成 分 (%)										鉱 物 組 成 (%)			
	Ig loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	Cl ⁻		C ₂ S	C ₃ S	C ₄ A	C ₄ AF
E	1.1	17.8	7.2	4.1	61.1	1.8	3.9	0.3	0.054		49	12	14	13
N	1.5	22.2	5.1	3.2	65.1	1.4	2.0	0.7	0.004		52	23	8	10

2.3 試験体の作成

試験体の作成は湿度 80%、温度 20°C の恒温室において、100 リットルパン型ミキサーを用いてコンクリートを 120 秒で混練し、φ10×20cm（圧縮試験用）、10×10×40cm（曲げ試験用）の型枠内に詰めた後、蒸気養生を行った。蒸気養生は前置 3 時間、昇温 20°C/時、最高温度 65°C—3 時間保持、以後自然降温のパターンとした。フレッシュ性状は混練直後、並びに 30 分経過後にスランプ試験、空気量試験を実施し、それぞれの経時変化を確認した。

キーワード：普通形エコセメント、コンクリート二次製品、蒸気養生、圧縮強度、静弾性係数、曲げ強度

連絡先：〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 太平洋セメント（株）中央研究所 TEL：043-498-3853 FAX：043-498-3821

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状の試験結果

スランプ、ならびに空気量の打設直後の測定値を 100 とし、30 分後のそれぞれの比率を求めた結果を図-1、2 に示す。E は N に比べスランプ、空気量の調整には高性能減水剤、AE 剤の必要添加量が N に比べ約 2 倍必要となった。スランプ、空気量共に、E を用いたコンクリートは N を用いたコンクリートに比べ経時変

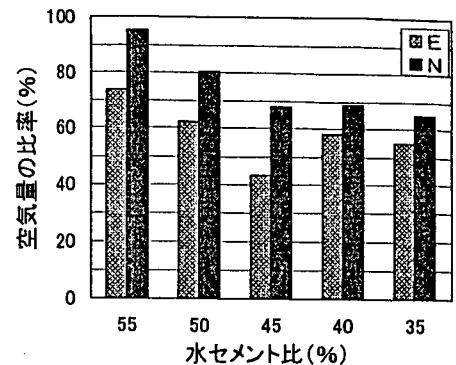
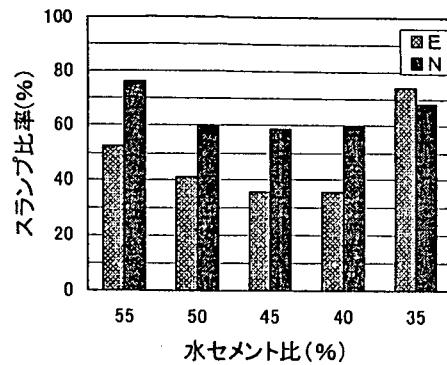


図-1 水セメント比とスランプの比率

図-2 水セメント比と空気量の比率

化が大きい。スランプの経時に伴う比率は水セメント比が 35% の場合、E が N に比べ大きくなるが、これはポリカルボン酸系の高性能減水剤の遅延効果であると考えられる。

3.2 強度試験結果

強度試験は圧縮強度試験、曲げ試験を JIS に準じ実施した。圧縮試験時にはコンクリートの圧縮ひずみを測定し、静弾性係数も求めた。曲げ試験は水セメント比が 40%、50% の配合についてのみ実施した。

(1) セメント水比と圧縮強度の関係を図-3 に示す。材齢 1 日、14 日共にセメント水比の関係は E および N を用いたコンクリートで差が見られなかった。E は N と同様に一次式で近似でき、セメントの違いによるセメント水比の関係に有意差はみられなかった。

(2) 圧縮強度と静弾性係数の関係を図-4 に示す。これは材齢に関わらず圧縮強度と静弾性係数の関係を示したものである。E は N と同様の傾向を示すとともに土木学会式でほぼ近似できた。

(3) 曲げ強度と圧縮強度の関係を図-5 に示す。曲げ強度についてはサンプル数が少ないものの材齢に関わらず E と N は同様の傾向を示した。

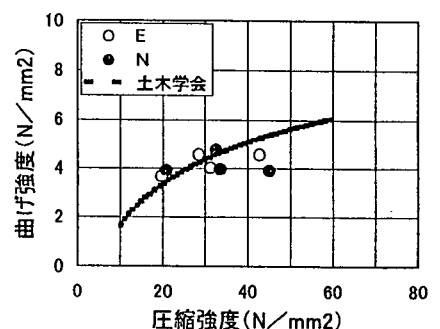
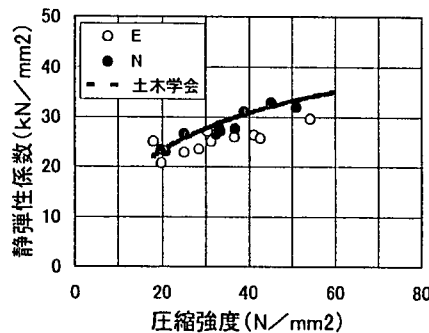
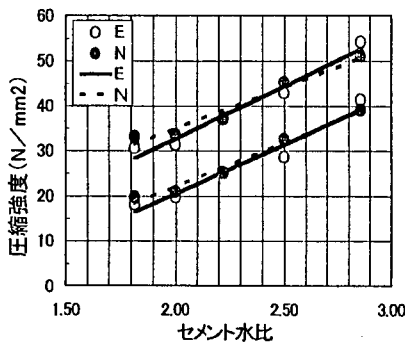


図-3 セメント水比と圧縮強度の関係

図-4 圧縮強度と静弾性係数の関係

図-5 曲げ強度と圧縮強度の関係

4. まとめ

コンクリート二次製品を対象としたコンクリートに E を用いた場合のフレッシュ性状は N を用いたコンクリートに比べ、スランプ、空気量の経時変化が大きく、コンクリート二次製品に適用する場合、製造時にこれらを配慮する必要があると思われる。蒸気養生を施した E 使用コンクリートの圧縮強度、静弾性係数、曲げ強度の関係については N と差異がないことが確認された。また E を用いたコンクリートの圧縮強度は N と同様にセメント水比の関係が成立すること、土木学会式を用い圧縮強度から曲げ強度ならびに静弾性係数を推定できるものと思われる。

5. 追記

本実験は、建設省共同研究「都市ごみ焼却灰を用いた鉄筋コンクリート材料の開発に関する研究」(メンバー: 建設省土木研究所、東京都、麻生セメント、住友大阪セメント、太平洋セメント、日立セメント) の一環として行ったものである。本報告はフレッシュ性状、強度特性についてのみであるが、その他、耐久性試験についても検討を進めている。

(参考文献) 1) 寺田 剛、明嵐政司: 都市ごみ焼却灰を主原料としたセメントの低塩素化とコンクリートの特性、コンクリート工学 Vol.37, No.8, 1999

低塩素型省エネセメントを用いたコンクリートの長期耐久性状

建設省土木研究所 正会員 中村俊彦

建設省土木研究所 正会員 寺田 剛

建設省土木研究所 正会員 明嵐政司

1. はじめに

都市ゴミ焼却灰等を主原料とした省エネセメントは塩化物イオンを1%程度含むため、その用途は無筋コンクリートや地盤改良用固化材に限られていた。その後の製造技術の進歩により、塩化物イオン量が0.1%以下に低減された低塩素型省エネセメントの製造が可能となっている。本報告は、低塩素型省エネセメントを用いたコンクリートの基本特性¹⁾のうち長期試験結果についてまとめたものである。

2. 実験概要

2. 1 使用材料およびコンクリートの配合¹⁾

セメントには、低塩素型省エネセメント（EC）、普通ポルトランドセメント（N）および高炉セメントB種（BB）の3種類を用いた。それらの物理化学特性を表1に示す。ECは、Nと比較してCaOおよびSiO₂が少なくAl₂O₃およびFe₂O₃が多いことから、カルシウムシリケート（エーライトおよびビーライト）が少なく間隙相（C₃AおよびC₄AF）が多いという特徴がある。

細骨材には静岡県小笠産陸砂（表乾比重2.59、粗粒率2.73）を、粗骨材には埼玉県秩父産碎石（最大寸法20mm、表乾比重2.72）を使用した。混和剤としてリグニン系のAE減水剤および空気量調整剤を用いた。

コンクリートの目標スランプを8±2.5cm、空気量を4.5±1.5%とし、W/C=45、55、65%の3配合について検討した。単位水量はNの場合156kg/m³、ECでは158kg/m³、BBでは154kg/m³で一定とした。ECはNと比較して、s/aが若干下がり単位水量が若干多くなった。また、混和剤量はほぼ同等であった。

表1 セメントの物理化学特性

セメント 種類	化学組成(%)										密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)
	Ig. loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	P ₂ O ₅	Cl-		
EC	0.3	17.7	8.3	4.0	61.5	1.9	3.7	0.3	1.2	0.04	3.19	4480
N	0.6	22.2	5.1	3.2	65.1	1.4	2.0	0.7	0.1	0.00	3.16	3370
BB	0.5	25.4	8.2	1.9	55.3	3.4	1.7	0.5	—	0.00	3.04	4120

2. 2 試験項目および試験方法

耐久性に関わる長期試験項目として圧縮強度（JIS A 1108）、長さ変化（JIS A 1129）、促進中性化試験（日本建築学会）を、また、内在する塩化物イオンによる鉄筋の腐食性を把握するため促進腐食試験（JCI-SC2；オートクレーブ法）を行った。圧縮強度試験の供試体は、1日脱型後所定材齢まで20℃水中養生とした。長さ変化、促進中性化および促進腐食試験はW/C=55%の配合で行った。ただし、促進腐食試験に用いたコンクリートは、15mmふるい通過分を使用した。

3. 実験結果

3. 1 圧縮強度

圧縮強度の経時変化を図1に示す。ECを使用したコンクリートは、同一W/CではNより強度が若干低く

キーワード：低塩素型省エネセメント、コンクリート、耐久性、圧縮強度、長さ変化、中性化、鉄筋腐食
連絡先：茨城県つくば市大字旭1番地 TEL0298-64-4892 FAX0298-64-4464

推移しており、1年にわたってその傾向は変わらなかった。BBは初期強度が低い、1ヶ月ではECと同等となり、3ヶ月以降はNを上回った。

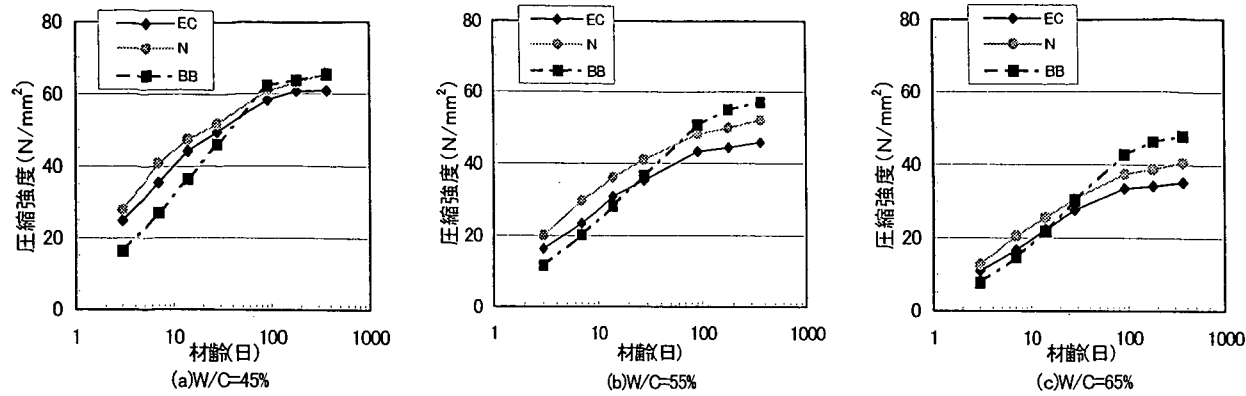


図1 圧縮強度の経時変化

3. 2 長さ変化

図2に長さ変化率の経時変化を示す。EC、NおよびBBとも大きな差はなかった。

3. 3 促進中性化

図3に中性化深さの測定結果を示す。6ヶ月間の促進試験によるECの中性化深さは26mmであった。Nの19mmとBBの29mmの間であり、耐中性化に関しては特に問題はないと考えられる。これらの結果を $C = A t^b$ (C:中性化深さ;mm、t:保存期間;週)に近似した場合の定数Aおよびbを表2に示す。中性化深さCは、ほぼ $\sqrt{t}$ に比例する結果であった。

3. 4 鉄筋の腐食性

オートクレーブ法による鉄筋腐食促進試験の結果、表3に示すようにEC、NおよびBBともに鉄筋の腐食は認められなかった。EC中の塩化物イオン量は0.04%と少なく、単位セメント量を300kgとした場合の塩化物イオン総量は、コンクリート1m³中120gであり総量規制を十分クリアするものである。したがって、EC中に内在する塩化物イオンによる鉄筋の腐食の心配はないと考えられる。

4. まとめ

低塩素型省エネセメントを用いたコンクリートの長期耐久性に関して検討した結果、普通ポルトランドセメントとはほぼ同等の性状を有することが明らかとなった。また、セメント中に含まれる塩化物イオン量は鉄筋の腐食を引き起こすほどではなく、鉄筋コンクリート構造物への適用も十分可能であると考えられた。

<参考文献>寺田、明嵐：都市ゴミ焼却灰を主原料としたセメントの低塩素化とコンクリートの特性、コンクリート工学 Vol.37、No.8、pp.26-30 (1999.8)

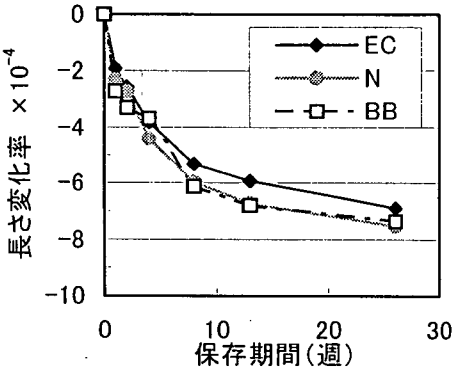


図2 長さ変化率の経時変化

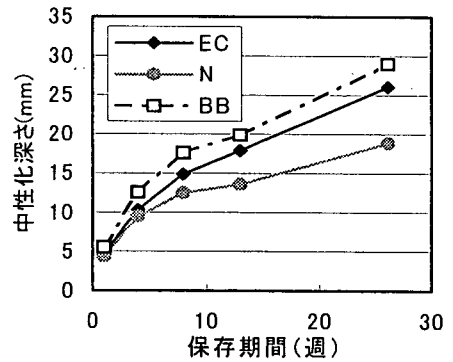


図3 中性化深さの経時変化

表2 中性化深さの近似式 $C = A t^b$ における定数

セメント種類	A	b
EC	4.88	0.52
N	4.66	0.44
BB	5.89	0.50

表3 鉄筋の腐食促進試験結果

セメントの種類	鉄筋の発錆率 (%)
EC	0.0
N	0.0
BB	0.0

普通形エコセメントを用いた園路舗装コンクリートの性状

東京都土木技術研究所 正会員 宍戸 薫
 東京都土木技術研究所 鈴木 勲
 太平洋セメント中央研究所 正会員 田中敏嗣
 建設省土木研究所 正会員 中村俊彦

1. まえがき

都市ゴミ焼却灰を原料に使用したセメントの塩化物イオン量を 0.1%以下に低減する製造技術が確立され、このセメントの基本性状は普通ポルトランドセメントと同等であることが報告されているが¹⁾、実施工でのコンクリート性状に関する知見は少ないと思われる。本報告は、低塩素化されたこのセメント(以下普通形エコセメント)を用いたコンクリートを園路舗装(東京都恩賜井の頭公園内)に施工し、フレッシュ性状および強度性状を普通ポルトランドセメントと比較した結果について述べたものである。

2. 試験施工概要

(1)使用材料： 実験に使用したセメントは、普通形エコセメント(記号：E)および普通ポルトランドセメント(記号：N)であり、表1にセメントの物理化学的性質を示す。普通形エコセメントは、普通ポルトランドセメントより塩化物イオン量や間隙相(C₃A+C₄AF)が多いのが特徴で、その物理性状は普通ポルトランドセメントと類似している。細骨材には青梅産砕砂と佐原産山砂の混合品を、粗骨材には奥多摩産碎石(最大寸法 20mm)を、混和剤にはリグニン系の AE 減水剤を用いた。

表1 セメントの物理化学的性質

種類	化学分析値 (%)								粉末度 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	圧縮強度 (N/mm ²)		
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	Cl			3 日	7 日	28 日
E	17.8	7.2	4.1	61.1	1.8	3.9	0.3	0.054	4130	3.19	28.8	36.3	51.2
N	22.2	5.1	3.2	65.1	1.4	2.0	0.7	0.004	3370	3.16	26.4	43.6	61.6

表2 コンクリートの配合

(2)コンクリートの配合：

表2にコンクリートの配合を示す。設計基準強度 21N/mm²に対して配合強度を 26N/mm²・

呼び名	スランプ [*] (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad(C×%)
21-8-20-E	13	4.5	60	45.4	170	283	829	1011	0.375
21-8-20-N	13	4.5	64	47.7	162	254	891	992	0.375

として配合設計を行ったが、普通形エコセメントの強度発現性が普通ポルトランドセメントより若干低いため(表1参照)、普通形エコセメントを用いた場合の水セメント比は普通ポルトランドセメントを用いた場合より4%小さく設定した。また、運搬によるスランプロスを考慮して、練上がり時のスランブを13cmとして単位水量を決定した。

(3)試験方法： 園路は幅 3.0 m×厚さ 0.1 m×長さ約 120 mで、普通形エコセメントを用いたコンクリートはその内 80m 区間についてポンプ圧送し、施工した。スランプ、空気量およびコンクリート温度は、プラント出荷時、荷卸し時およびポンプ圧送後に、塩化物イオン量は簡易法により荷卸し時に測定した。圧縮強度および弾性係数は、プラント出荷時および荷卸し時に供試体を作成し、材齢 3、7、14 および 28 日において測定した。施工性の評価に関しては、目視および作業員からの聞き取り調査に基づいて行った。

3. 結果及び考察

(1)フレッシュコンクリートの性状： 表3にフレッシュコンクリートの試験結果を、図1に運搬時間とスランプロスの関係を示す。普通形エコセメントの方がスランプロスが若干大きかったが、これは運搬時間が長かったことが影響したためであり、運搬時間を考慮すると普通ポルトランドセメントの場合と同等のスランプロス性状を示すと考えられる。ポンプ圧送によるスランプの変化は、セメントの種類による大きな相違は認められなかった。また、空気量の変化については特定の傾向は認められなかった。塩化物イオン量は、普

キーワード：普通形エコセメント、コンクリート、塩化物イオン量、スランプ、圧縮強度

連絡先：〒136-0075 東京都江東区新砂 1-9-15 Tel 03-5683-1520, Fax 03-5683-1515 (東京都土木技術研究所)

通形エコセメントの方が普通ポルトランドセメントの場合より若干多かったが、いずれも 0.30kg/m^3 の規格を十分に下回った。本実験に用いた普通形エコセメントには 0.054% の塩化物イオンが含まれているが、コンクリート中の塩化物イオン量との比較より、セメント鉱物中に固定されている塩化物イオンの一部しか溶出しないことが推察された。

施工性に関しては、普通形エコセメントを用いた場合、主に粉末度の高いことに起因して、普通ポルトランドセメントの場合よりコンクリートの粘性がやや高くブリーディングが少なかったため、表面均しに必要なレーキの回数が増加する傾向があった。表面状態は、普通形エコセメントを用いた場合は普通ポルトランドセメントと比較して同等か、ややきめ細かく仕上がった。

(2)強度および弾性係数：図2に圧縮強度の経時変化を、図3に圧縮強度と弾性係数の関係を示す。普通形エコセメントの強度発現性は、普通ポルトランドセメントの場合と同等であり、設計強度を満足した。普通形エコセメントの圧縮強度と弾性係数の関係は、本研究においても普通ポルトランドセメントの場合と同様であることが認められたり。

表3 フレッシュコンクリートの試験結果

セメント	台数	プラント			運搬時間 (h:m)	荷卸				筒先		
		スランブ (cm)	空気量 (%)	Co 温度 (℃)		スランブ (cm)	空気量 (%)	Co 温度 (℃)	塩化物イオン量 (kg/m^3)	スランブ (cm)	空気量 (%)	Co 温度 (℃)
E	1	13.5	4.8	12.0	1:13	9.0	3.9	13.0	0.034	8.5	3.8	15.0
	2	11.5	4.7	13.0	0:52	8.5	4.1	13.5	0.034	8.5	4.2	15.5
	3	12.5	4.3	13.0	0:52	9.0	4.5	13.5	0.035	9.5	3.3	15.5
	4	13.5	4.7	12.0	0:53	9.0	4.3	14.0	0.035	9.5	4.6	15.5
	5	14.0	4.7	12.0	0:46	8.5	4.6	14.0	0.035	9.5	4.8	14.5
	6	12.5	5.0	13.0	0:46	9.5	4.8	15.0	0.037	8.5	4.6	15.0
	平均	12.9	4.7	12.5	0:53	8.9	4.4	13.8	0.035	9.0	4.2	15.2
N	1	13.0	5.5	13.5	0:30	9.5	4.8	13.5	0.030	11.0	5.4	13.5
	2	12.5	6.0	13.0	0:40	8.5	5.0	13.5	0.029	8.5	5.4	14.0
	3	12.0	4.5	13.5	0:30	9.0	3.0	13.0	0.025	9.0	3.0	14.0
	平均	12.5	5.3	13.3	0:33	9.0	4.3	13.3	0.028	9.5	4.6	13.8

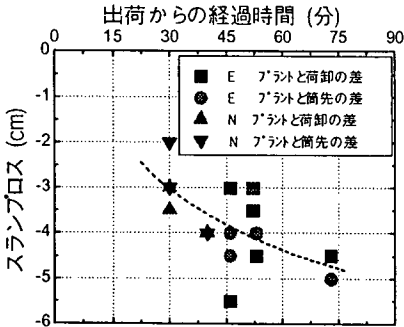


図1 スランブロス性状

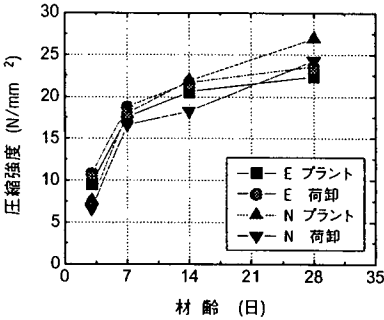


図2 圧縮強度の経時変化

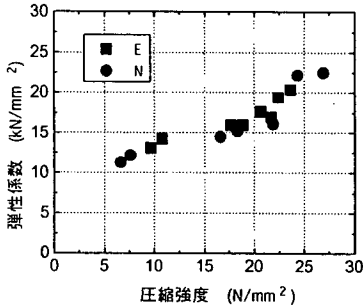


図3 圧縮強度と弾性係数

4.まとめ

- (1)普通形エコセメントを用いたコンクリートは、運搬およびポンプ圧送によるスランブおよび空気量の変化、強度および弾性特性は普通ポルトランドセメントを用いた場合と同等の性状を示した。また、塩化物イオン量は 0.035kg/m^3 程度と少なく、セメント鉱物中に固定されている塩化物イオンの一部しか溶出しない。
- (2)普通形エコセメントを用いた場合、粘性がやや高く、ブリーディングが少ないため表面均しの作業効率が若干低下したが、仕上げ面の状態は良好であった。

なお、本実験は建設省共同研究「都市ごみ焼却灰を用いた鉄筋コンクリート材料の開発に関する研究」(建設省土木研究所、東京都、麻生セメント、住友大阪セメント、太平洋セメント、日立セメント)の一環として行ったものである。最後に本試験施工に協力いただいた東京都西部公園緑地事務所、鹿島レミコン(株)調布工場および(株)緑峰に対して厚く御礼申し上げる。

[参考文献] 1)寺田剛、明嵐政司：都市ごみ焼却灰を主原料としたセメントの低塩素化とコンクリートの特性、コンクリート工学 Vol.37, No.8, 1999