

論文 蒸気養生を模擬した温度履歴を受けたエコセメントコンクリートの強度発現特性

関 健吾^{*1}・宇治公隆^{*2}・上野 敦^{*3}・小石純平^{*4}

要旨：蒸気養生を模擬した温度履歴を与えたコンクリート供試体により、普通エコセメントの強度発現特性を普通ポルトランドセメントを用いた場合と比較し、水セメント比、および温度履歴を受けた後の養生条件を要因として実験を行った。この結果、エコセメントコンクリートの水セメント比を 5~7%程度低減することで、普通セメントコンクリートと同等の圧縮強度が得られることを明らかにした。

キーワード：エコセメント、温度履歴、強度発現特性、高流動、高強度

1. はじめに

2004 年にエコセメントがプレキャストコンクリート用の材料として JIS A 5364 に規定され、研究が実施されている¹⁾が、未だ十分なデータの蓄積がなされておらず、また、エコセメントの高強度・高流動コンクリートへの適用が JIS に規定されていないなど、課題が残されている。

エコセメントを用いて作製したコンクリート供試体の圧縮強度は、同一水セメント比の普通ポルトランドセメント供試体と比較して低下することが知られている²⁾。しかし、蒸気養生を行った場合の強度発現特性については十分な検討がなされていないのが現状である³⁾。また、蒸気養生を施したプレキャストコンクリートを、蒸気養生後に全て水中養生することは困難である。そのため、蒸気養生後に実施する養生条件が異なる場合の、強度発現特性を明らかにする必要がある。

本研究は、水セメント比、養生条件が異なる場合の、普通エコセメント（以下、エコセメントと称する）を用いたコンクリートの強度発現特性の把握を目的とし、円柱供試体を用いて、普通ポルトランドセメント（以下、普通セメントと称する）を用いたコンクリートとの比較検討を行ったものである。なお、本研究においては、温度可変槽内にて温度履歴を与えることにより、蒸気養生を模擬している。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料を表-1 に示す。細骨材は、密度 2.70 g/cm³ の砕砂と密度 2.61 g/cm³ の山砂を質量比 9:1 で混合し、密度 2.69g/cm³ として使用した。また、コンクリートの練上がり温度が 20℃となるよう、温度を一定に保った室

内でこれら全ての材料を 24 時間以上保管した後に練混ぜを行った。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの示方配合を表-2 に示す。水セメント比による強度発現特性を比較するため、水セメント比は各セメントともに、32%、45%、50%、55%の 4 水準とした。

水セメント比 45~55%の配合では、普通セメントの場合、水セメント比 50%で試し練りを行い、単位水量、s/a、高性能減水剤および AE 助剤の添加率を決定した。他の配合についても、同一の高性能減水剤ならびに AE 助剤の添加率とした。エコセメントの場合は、普通セメントと同一の単位水量および s/a とし、水セメント比 50%での試し練りにより高性能減水剤および AE 助剤の添加率を決定した。その後、他の配合についても、同一の高性能減水剤ならびに AE 助剤の添加率とした。水セメント比 32%の配合では、試し練りを行い、普通セメントの単位水量および s/a を決定した後、エコセメントにおいて目標とするスランプフローおよび空気量を得られるよう、高性能減水剤ならびに AE 助剤の添加率を調整した。

2.3 養生条件

供試体の養生条件を図-1 に示す。各セメントを用いた場合の養生条件による強度発現特性を比較するため、各配合に対して 2 ないしは 3 水準の養生条件を設定した。

表-1 使用材料

項目	品質
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16 g/cm ³
	普通エコセメント, 密度 3.15 g/cm ³
粗骨材	砕石, F.M.=6.81, 表乾密度 2.68 g/cm ³ , 吸水率 1.00%
細骨材粗目	砕砂, F.M.=2.70, 表乾密度 2.70 g/cm ³ , 吸水率 1.58%
細骨材細目	山砂, F.M.=1.55, 表乾密度 2.61 g/cm ³ , 吸水率 3.32%
混和剤	高性能減水剤(WR): ポリカルボン酸エーテル系
	AE助剤(AE): アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤

*1 東京都立大学 工学部土木工学科 (正会員)

*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境工学専攻 教授 工博 (正会員)

*3 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科都市基盤環境工学専攻 准教授 工博 (正会員)

*4 東急建設(株)

表-2 示方配合

セメント種類	記号	W/C (%)	s/a (%)	粗骨材 の最大 寸法 (mm)	スランプ (cm)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)						
							水 W	セメン C	細骨材 S		粗骨材 G	AE剤 AE	高性能 減水剤 WR
									粗目	細目			
普通セメント (N)	N55	55	44	20	8.0	4.5	165	300	737	82	1038	1.5A	C×0.9%
	N50	50	44				165	330	726	81	1023	1.5A	C×0.9%
	N45	45	44				165	367	713	79	1005	1.5A	C×0.9%
	N32	32	45				160	500	687	76	929	0.0A	C×1.2%
エコセメント (E)	E55	55	44	20	8.0	4.5	165	300	737	82	1038	4.0A	C×0.9%
	E50	50	44				165	330	726	81	1023	4.0A	C×0.9%
	E45	45	44				165	367	713	79	1005	4.0A	C×0.9%
	E32	32	45				160	500	687	76	929	0.0A	C×1.8%

全配合に対して、(1) 温度可変槽内にて温度履歴を与えた後、恒温恒湿室にて気中養生した場合、について試験を行った。また、普通セメントおよびエコセメントの水セメント比 50%の供試体においては、(2) 温度可変槽内にて温度履歴を与えた後に水中養生を実施した場合、についても検討を行った。さらに、全配合に対して、(3) 通常の脱型を行った後に標準養生を実施した場合、についても試験を行った。

(1) 温度履歴条件

温度履歴条件を図-2 に示す。コンクリートの練上がり温度は 20℃、前置き時間は 2 時間で一定とした。型枠に詰め終わった供試体を密封し、20℃、100%R.H. に保った温度可変槽内にて前置きした後、温度履歴を与えた。温度履歴条件は、蒸気養生を行う工場製品の一般的な条件を参考として、昇温速度は、20℃/時とし、最高温度 65℃で 3 時間保持した後、15℃/時の割合で 20℃となるまで降下させた。温度管理中の温度可変槽内は 100%R.H. で一定とした。温度可変槽内の温度が再び 20℃まで降下した時点（材齢 10.25 時間）で脱型を行い、その後、気中養生もしくは水中養生を実施した。

(2) 気中養生

気中養生条件は、20℃、60%R.H. で一定とした。温度履歴を与えた後に脱型した供試体を、そのままの状態で恒温恒湿室にて所定の材齢まで保存した。

2.4 実験項目

結合材、水セメント比、養生条件および材齢を水準とした強度発現特性を評価するため、次の試験を実施した。

(1) コンクリートのフレッシュ性状

JIS A 1101, JIS A 1128 および JIS A 1156 に従ってスランプ試験、空気量測定試験、練上がり温度測定を行った。

(2) 強度特性

JIS A 1108 に従い、φ100×200mm の供試体を用いて、圧縮強度試験を実施した。試験材齢は表-3 のとおりとした。すなわち、温度履歴を与えた後に気中養生をした供試体は、二次製品の品質規定を参考として²⁾、脱型時、材

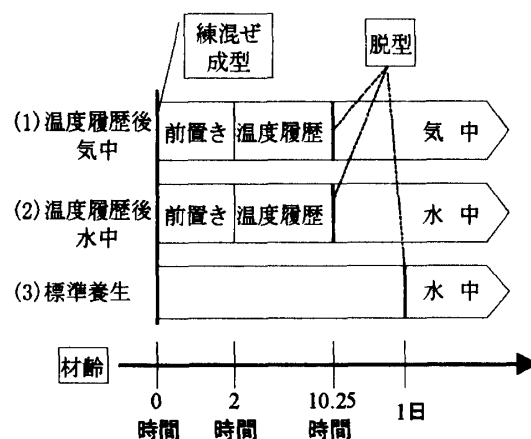


図-1 養生条件

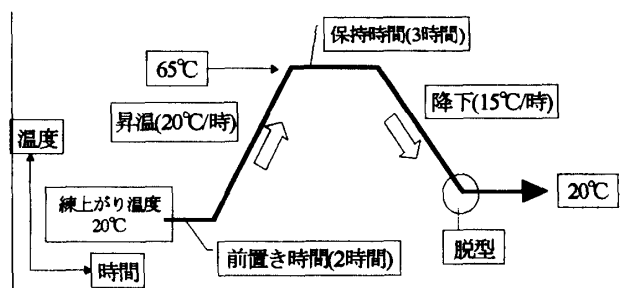


図-2 温度履歴条件

表-3 圧縮試験材齢

種類	試験材齢
(1) 温度履歴後気中養生	脱型時, 材齢1日, 材齢14日, 材齢28日
(2) 温度履歴後水中養生	材齢14日, 材齢28日
(3) 標準養生	材齢7日, 材齢28日

齢 1 日、材齢 14 日および材齢 28 日に、また、温度履歴を与えた後に水中養生した供試体は、材齢 14 日および材齢 28 日に、さらに、標準養生を行った供試体は材齢 7 日および材齢 28 日で圧縮強度試験を実施した。

また、温度履歴後に気中養生を行った材齢 14 日および材齢 28 日の供試体と、標準養生を実施した材齢 28 日の供試体に対しては、圧縮強度試験と同時に JIS A 1149 に従って静弾性係数試験を行った。

表-4 フレッシュ試験結果

種類	水セメント比											
	55%			50%			45%			32%		
	Sl (cm)	Air (%)	T (℃)	Sl (cm)	Air (%)	T (℃)	Sl (cm)	Air (%)	T (℃)	Sl (cm)	Air (%)	T (℃)
普通セメント	7.0	3.4	20	10.0	4.3	21	10.0	4.1	19	56.5	2.9	21
エコセメント	8.0	5.3	20	9.5	5.3	19	10.0	5.4	20	64.5	3.2	19

表-5 圧縮強度試験結果

セメント種類	記号	W/C (%)	温度履歴後気中養生				温度履歴後水中養生			標準養生	
			脱型時	1日	14日	28日	脱型時	14日	28日	7日	28日
普通セメント (N)	N55	55	7.6	10.2	22.4	23.1	—	—	—	31.7	43.2
	N50	50	10.9	14.0	24.5	26.6	10.9	30.7	34.6	36.5	48.3
	N45	45	11.1	15.4	29.5	31.5	—	—	—	39.3	54.8
	N32	32	38.7	43.0	59.1	61.6	—	—	—	77.1	89.5
エコセメント (E)	E55	55	6.3	9.2	18.0	17.9	—	—	—	23.1	31.9
	E50	50	7.2	10.4	18.2	17.5	7.2	24.1	24.6	29.4	37.7
	E45	45	10.5	13.0	21.4	22.6	—	—	—	32.9	43.0
	E32	32	19.3	35.9	63.2	64.9	—	—	—	75.3	88.5

単位はすべてN/mm²

3. 結果および考察

3.1 フレッシュ性状

フレッシュコンクリートの試験結果を表-4に示す。両セメント共に、目標とする空気量が得られるよう試し練りによって AE 助剤量を決定したが、結果として普通セメントは目標空気量よりも低く、また、エコセメントでは目標空気量よりも高くなり、エコセメントの空気量は普通セメントに比べて、概ね1%程度大きい値となった。

3.2 圧縮強度

圧縮強度試験結果の一覧を表-5に示す。

(1) セメントの種類の影響

温度履歴後に気中養生した場合の、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圧縮強度を図-3に示す。水セメント比が45～55%の範囲では、セメント種類に関わらず、材齢初期において強度増加が顕著であるが、材齢14日から材齢28日にかけての強度増加はゆるやかとなる。これは、気中養生を行ったために、供試体に水分が十分供給されず、材齢14日以降でセメントの水和反応が停滞したものと考えられる。また、全体として、圧縮強度は普通セメントを用いたもののほうがやや高い値となった。材齢初期の供試体に、温度履歴を与えると水和反応が活性化し、早期に強度発現する⁴⁾が、エコセメントについては、間隙質相を多く含むことや珪酸カルシウム鉱物の含有量が少ないことなどにより長期的な強度成長は停滞する⁵⁾と思われる。本研究においても、水セメント比45～55%においては、これらの影響により、エコセメントよりも普通セメントを用いたものの方が高い圧縮強度となったと考えられる。

次に、水セメント比32%の場合を比較すると、脱型時

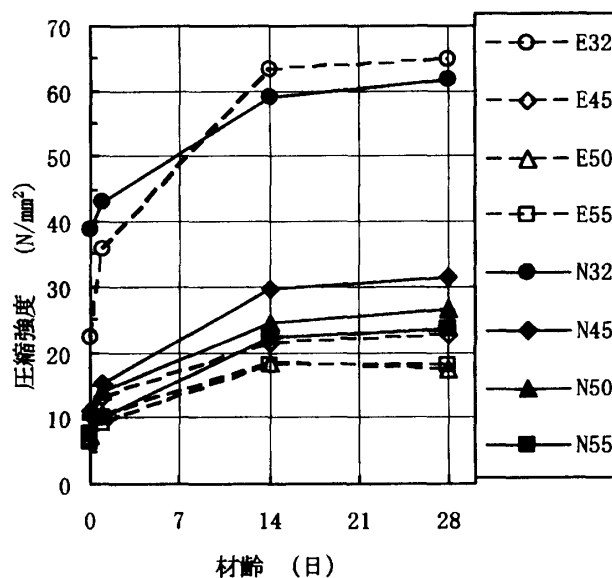


図-3 圧縮強度の比較 (温度履歴後気中養生)

(図中材齢0日)において、圧縮強度にセメントの種類による差が認められたものの、その後、エコセメントを用いたコンクリートの強度が増加し、材齢14日では、両者の圧縮強度は同等となった。本研究の範囲では、この要因を明らかにすることは出来ないが、水セメント比32%の場合では、水セメント比が45～55%の場合と比較して、セメント量が相対的に多く、緻密化しやすいことから、エコセメントにおいても、水和進行の過程で、圧縮強度に悪影響を及ぼすような空隙が形成しにくかったと考えられる。

標準養生を行った場合の、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圧縮強度を比較したものを図-4に示す。温度履歴後に気中養生を実施した場合

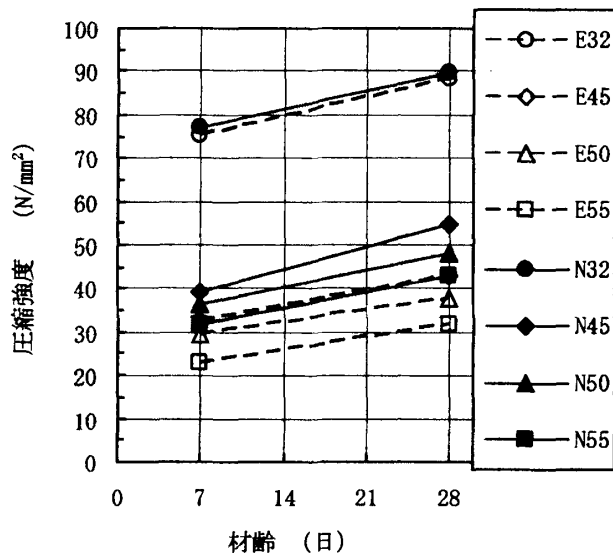


図-4 圧縮強度の比較 (標準養生)

とほぼ同様であった。すなわち、水セメント比が45～55%の範囲では、材齢の増加にともなって、エコセメントを用いたコンクリートは普通セメントを用いたコンクリートとほぼ同等の強度増加を示すが、圧縮強度の値としては、エコセメントを用いたもののほうがやや低い値であった。また、水セメント比32%の場合では、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圧縮強度は同等となった。

(2) 養生条件によるエコセメントの強度発現性

養生条件が異なる場合の、エコセメントの圧縮強度を図-5に示す。温度履歴後に気中養生を実施した場合の圧縮強度を、エコセメントを用い標準養生した場合の圧縮強度と比較すると、水セメント比45～55%の範囲では約1/2、水セメント比32%では約2/3であった。また、温度履歴後に水中養生を行った場合は、同一水セメント比で温度履歴後に気中養生した場合と比較して、圧縮強度が1.5倍程度高い値となった。

(3) 静弾性係数

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-6に示す。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様の傾向であり、セメント種類、養生条件に関わらず、静弾性係数と圧縮強度は土木学会によって定められている値でほぼ近似できた。

エコセメントを用いて、温度履歴後に気中養生を実施した場合では、標準養生を実施した場合と比較して、約10 kN/mm²程度、静弾性係数が小さくなる。この、養生条件による静弾性係数の低下量は、普通セメントを用いた場合と同等であった。

(4) エコセメントの水セメント比の選定

本項では、温度履歴後に気中養生を実施した場合の普通セメントコンクリートと同等の圧縮強度を得るため

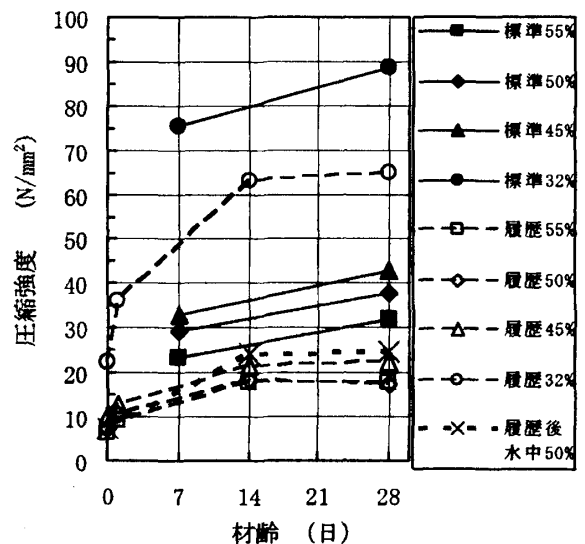


図-5 養生条件による圧縮強度の比較 (エコセメント)

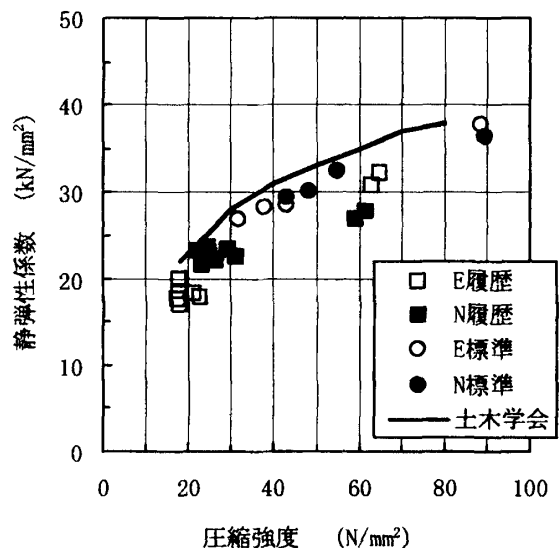


図-6 静弾性係数試験結果

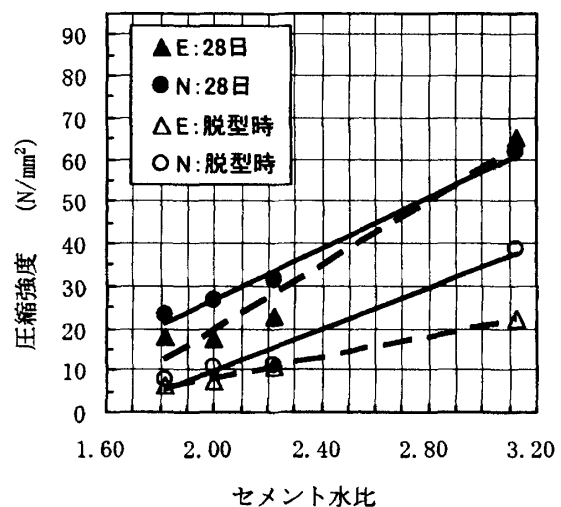


図-7 圧縮強度とセメント水比の関係 (温度履歴後気中養生)

の、エコセメントコンクリートの水セメント比、養生条件について検討する。

温度履歴を与えた後に気中養生を実施した場合の、各コンクリートの圧縮強度とセメント水比の関係を図-7に示す。エコセメントおよび普通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、一次式で近似でき、各セメントを用いたコンクリートの圧縮強度はセメント水比によって検討することが可能である²⁾。

図-7より、エコセメントコンクリートの水セメント比を5~7%低減させることで、普通セメントコンクリートと同等の圧縮強度が得られることがわかる。既往の研究結果では、エコセメントコンクリートの水セメント比を3~5%低減させることで、普通セメントコンクリートと同等の圧縮強度を得られるとされており¹⁾、本研究での結果は、やや大きい低減率となった。

この結果について検討するため、標準養生を実施した場合の、各セメントを用いたコンクリートの圧縮強度とセメント水比の関係を図-8に示す。図-8より、標準養生を実施した場合でも、普通セメントコンクリートと同等の圧縮強度を得るためには、エコセメントコンクリートの水セメント比を5~7%程度低減させる必要があることがわかる。すなわち、温度履歴を施した後に気中養生を実施した場合の、水セメント比の低減率がやや大きい値となったのは、セメント種類に起因するということがわかる。

圧縮強度に対するその他の影響を検討するため、フレッシュ時の空気量について着目した。本研究においては、コンクリートのフレッシュ試験時の空気量に、ややばらつきが見られ、エコセメントコンクリートの空気量が普通セメントコンクリートと比較して1.0%程度大きい結果であった。コンクリートの圧縮強度は、空気量にも影響される⁶⁾。ここで、空気量が目標値の4.5%の場合の強度補正を行った。補正量は、空気量が1.0%増すごとに、圧縮強度が5%低下するものとした。圧縮強度を補正した場合の、圧縮強度とセメント水比の関係を、図-9、図-10に示す。空気量によって圧縮強度を補正した場合では、温度履歴後に気中養生を実施した場合と、標準養生を実施した場合ともに、エコセメントコンクリートの水セメント比を5%程度低減させることで、普通セメントコンクリートと同等の圧縮強度を得られるという結果となった。これは、標準養生を対象とした既往の研究⁷⁾とほぼ等しい結果である。

温度履歴後に気中養生を実施した場合のエコセメントコンクリートは、同じ養生条件の普通セメントコンクリートと比較して、材齢14日から材齢28日にかけての強度増加に停滞が見られた。そこで、温度履歴を与えた後に、水中養生を実施した場合について検討を行った。

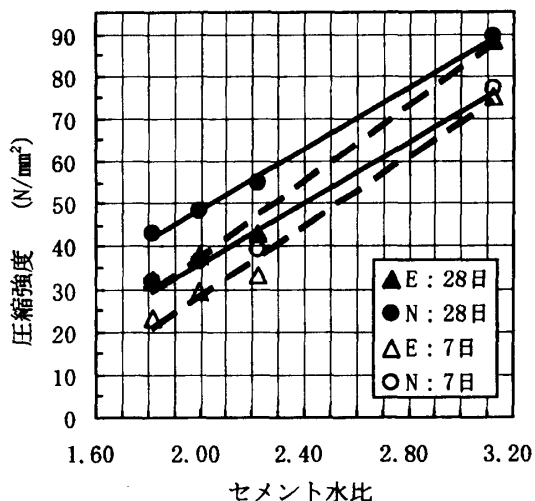


図-8 圧縮強度とセメント水比の関係
(標準養生)

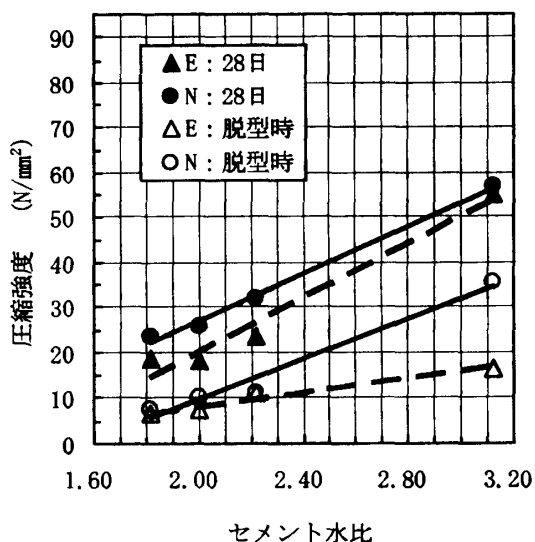


図-9 空気量補正した圧縮強度 (温度履歴後気中養生)

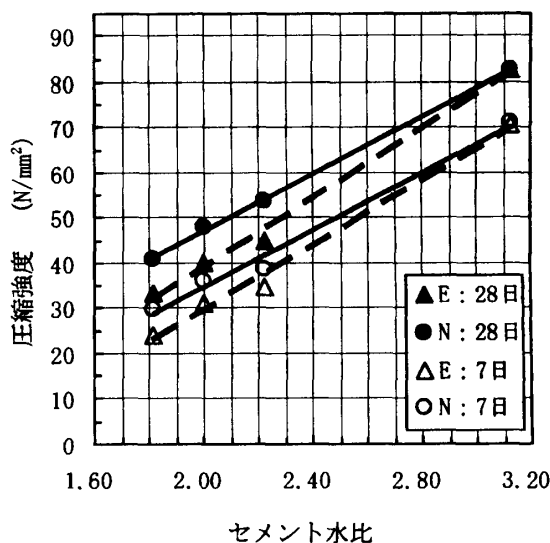


図-10 空気量補正した圧縮強度 (標準養生)

温度履歴後に水中養生を実施した場合の圧縮強度を図-11に示す。図-11より、温度履歴後に水中養生を実施すると、温度履歴後に気中養生を実施した場合と比較して、圧縮強度は高くなり、材齢14日から材齢28日にかけても強度は微増する傾向であった。また、温度履歴後に水中養生を実施したエコセメントコンクリートの圧縮強度は、温度履歴後に気中養生を実施した普通セメントコンクリートとほぼ等しい値となった。

これらの結果を総合すると、圧縮強度において、エコセメントを普通セメントと同等として扱うためには、水セメント比を5%程度減少させること、または、温度履歴を与えた後に水中養生することが有効と言える。

4. まとめ

養生条件の違いによる、エコセメントコンクリートの強度発現特性の把握を目的とし、普通セメントコンクリートと比較検討を行った。本研究においては、温度可変槽内にて温度履歴を与えた後に、恒温恒湿室または水中にて保存した供試体と、通常の脱型の後に標準養生を行った供試体とで、結合材および水セメント比を水準として、圧縮強度試験を実施し、エコセメントを有効利用するための各種条件について検討を行った。

本研究の範囲内で、以下のことが明らかとなった。

(1) 温度履歴を与えた後に気中養生を行う場合、エコセメントを用いて、普通セメントと同等のコンクリート圧縮強度を得るためには、エコセメントコンクリートの水セメント比を5~7%程度低減させる必要がある。

(2) 圧縮強度は、温度履歴後に気中養生を実施すると、標準養生を実施した場合と比較して、約1/2~1/3程度となる。

(3) 温度履歴を与えた後に水中養生を実施したエコセメントコンクリートと、温度履歴後に気中養生を実施した普通セメントコンクリートでは、ほぼ等しい圧縮強度となる。

(4) 養生条件によらず、水セメント比32%のコンクリートでは、エコセメントと普通セメントの圧縮強度はほぼ同等となった。

(5) セメント種類、養生条件によらず、静弾性係数と圧縮強度は土木学会によって定められている値で近似することができた。

(6) 静弾性係数は、温度履歴後に気中養生を実施すると、標準養生を実施した場合と比較して、約10 kN/mm²程度低下する。

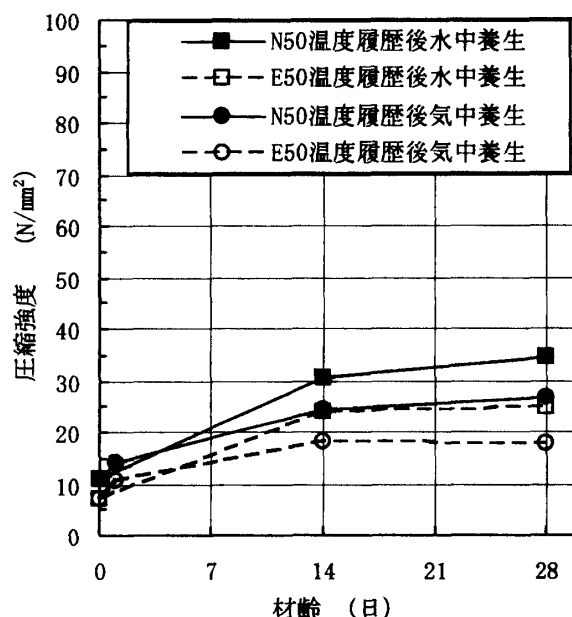


図-11 圧縮強度 (温度履歴後水中養生)

参考文献

- 1) 日本建築学会：エコセメントを使用するコンクリートの調合設計・施工指針(案)・同解説, pp. 79-83, pp. 107, 2007. 10
- 2) 独立行政法人土木研究所：エコセメントコンクリート利用技術マニュアル, pp. 17, pp. 54, 2003. 3
- 3) 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, 土木学会第55回年次学術講演会, pp. 264-265, 2000
- 4) 坂部大, 名和豊春, 田中洋一, 大久保正弘：初期高温養生したセメント硬化体の強度発現と微細構造に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No. 1, 1996
- 5) 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, 建設省土木研究所テクニカルレポート
- 6) Mehta, P. K and Monteiro, P. J. M. : CONCRETE STRUCTURE, PROPERTIES, AND MATERIALS, Second Edition, pp. 43-76, 1993
- 7) 濱崎仁, 鹿毛忠継, 長塩靖祐, 大久保敏彦：環境負荷低減型セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮と中性化に関する実験的検討, 第54回セメント技術大会講演要旨 2000, pp. 226-227