

論文 40℃の温水養生法による静弾性係数の早期判定に関する基礎的研究

澁澤 仁一^{*1}・大塚 秀三^{*2}・中田 善久^{*3}

要旨：本研究は、普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を用いたコンクリートを対象に、JIS A 1805 の温水養生法を拡張して静弾性係数の早期判定への適用可能性を検討するために、静弾性係数に影響すると考えられる、粗骨材の種類および単位粗骨材かさ容積の相違に着目し検討を行った。その結果、温水養生を行った材齢 7 日の静弾性係数と標準養生を行った材齢 28 日の静弾性係数の関係は、一次式で精度よく回帰することができ、骨材の種類および単位粗骨材かさ容積を変化させた場合でも、その影響が少ないことを明らかとした。これにより、温水養生法を拡張して静弾性係数を早期判定できる可能性の一端が予見された。

キーワード：JIS A 1805, 温水養生法, 静弾性係数, 圧縮強度, 粗骨材の種類, 単位粗骨材かさ容積

1. はじめに

JIS A 1805:2001「コンクリート生産工程管理用試験方法—温水養生法によるコンクリート強度の早期判定試験方法」(以下、温水養生法とする)は、40℃の温水養生を行い、材齢 7 日で標準養生を行った材齢 28 日における圧縮強度を早期判定する試験方法¹⁾である。温水養生法には、日本国内産の普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を用いたコンクリート(以下、それぞれ N または BB とする)の推定式(以下、JIS 推定式とする)が参考に示されており、標準養生を行った材齢 28 日における圧縮強度(以下、標準養生強度とする)が 16~55N/mm²の範囲において、適用可能とされている。また、温水養生法は、材齢 7 日で材齢 28 日の 0.8~0.9 倍程度の強度発現が見込める点に加え、現状の標準養生を行った圧縮強度より早期に判定が可能であること、一般的な標準養生槽に加熱装置を取付ければ済むことなど、合理的で安全管理が行えることが特徴である。

これまでに温水養生法を用いた研究において、筆者らの一部²⁾は、中庸熱ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートについて検討を行い、N および BB 以外にも適用できる可能性を示した。さらに、N および中庸熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートを用いて 100~120N/mm² 程度の高強度領域まで推定できる可能性を示唆³⁾した。また、40℃の温水養生のほかにも、梶田および十代田ら^{4),5)}の 55℃の温水養生を用いた検討や上野ら⁶⁾による 70℃の温水養生を用いた検討が挙げられ、いずれも精度よく推定できることを示している。一方で、コンクリートの圧縮強度と静弾性係数には、一定の関係がある^{7),8)}とされているため、温水養生法を静弾性係数の早期判定に適用できる可能性が考えられるが、前述した既往研究では圧縮強度の

みを対象としていることに加え、ほかにも静弾性係数の早期判定について検討した例は見当たらない。

そこで本研究では、温水養生法の解説に参考に示されている N および BB を対象に、温水養生法を拡張して、静弾性係数の早期判定への適用性を検討することを目的とした。ここでは、静弾性係数に影響すると考えられる、粗骨材の種類および単位粗骨材かさ容積の相違に着目し検討した。さらに、粗骨材の種類および単位粗骨材かさ容積の相違が温水養生法による圧縮強度の早期判定結果に及ぼす影響について検討された既往研究が見当たらないことから、これについても併せて検討した結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 温水養生法の概要

温水養生法の実験フローを図-1 に示す。温水養生法は、作製した供試体を一定時間前置き養生した後、材齢 7 日まで 40±1℃の温水中で養生する(以下、温水養生供試体とする)2段階の養生を経て圧縮強度試験を行うものである。ここでは、温水養生法の手順に準じて静弾性係数の推定を試みる。なお、材齢 28 日まで 20±2℃の水中で養生を行った供試体を標準養生供試体と呼称する。

温水養生供試体は、JIS A 1132 : 2020「コンクリートの強度試験用供試体の作り方」に準拠して作製し、直ちにポリエチレンフィルムにて上面を封かんし、恒温恒湿室(室温 20℃, R.H.60%)において所定の時間前置き養生した。その後、型枠を脱型してから温水に浸漬させ、材齢 7 日まで温水養生し、JIS A 1149 : 2017 および JIS A 1108 : 2018 に準拠してコンクリートの静弾性係数試験および圧縮強度試験を行った。なお、供試体の上面は研磨したものである。

*1 ものづくり大学大学院 ものづくり学研究所 ものづくり学専攻 (学生会員)

*2 ものづくり大学 技能工芸学部 建設学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 日本大学 理工学部 建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

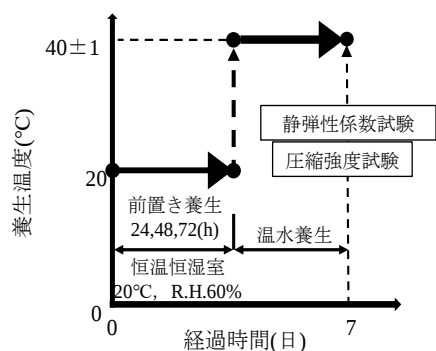


図-1 温水養生法の実験フロー

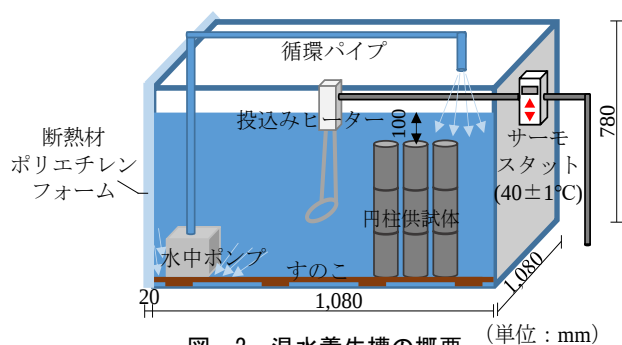


図-2 温水養生槽の概要 (単位: mm)

表-1 実験の要因と水準

要因	水準								
本論の結果および考察に関する節	3.1 温水養生供試体の静弾性係数発現性		3.2 前置き養生時間の影響	3.3 実験式の検討および粗骨材の種類の影響		3.4 単位粗骨材かさ容積の影響		3.5 各種影響を包含した実験式の導出	
セメントの種類	N	BB	N	N	BB	N	BB	N	BB
水セメント比(%)	45, 55, 65	45, 55, 60	27, 40, 50, 60, 65	45, 55, 65	45, 55, 60	45, 55, 65	45, 55, 60	27, 40, 45, 50, 55, 60, 65	45, 55, 60
前置き養生時間(h)	24		24, 48, 72	24		24		24, 48	
細骨材の種類	陸砂		陸砂	陸砂		陸砂		陸砂	
粗骨材の種類	石灰岩碎石 2005		石灰岩碎石 2005	石灰岩碎石 2005, 硬質砂岩碎石 2005		石灰岩碎石 2005, 硬質砂岩碎石 2005		石灰岩碎石 2005, 硬質砂岩碎石 2005	
単位粗骨材かさ容積(m³/m³)	0.600		表-3に示す	0.600		0.560, 0.640		表-3に示す	
配(調)合 No.	1-2, 1-4, 1-6	1-9~1-11	1-1~1-8	1-2, 1-4, 1-6 2-1~2-3	1-9~1-11 2-4~2-6	3-1~3-6 3-13~3-18	3-7~3-12 3-19~3-24	1-1~1-8 2-1~2-3 3-1~3-6 3-13~3-18	1-9~1-11 2-4~2-6 3-7~3-12 3-19~3-24
対応する図番号	図-3, 図-4		図-5	図-6, 図-7		図-8, 図-9, 図-10		図-11	

温水養生槽の概要を図-2 に示す。温水養生槽は、水温を $40 \pm 1^\circ\text{C}$ に保持するように自動温度調節装置および循環装置を備えた内法寸法が幅 1,080×長さ 1,080×高さ 780mm のポリエチレン樹脂製とした。また、温水養生槽の周囲には、厚さ 20mm、熱伝導率 $0.040\text{W/m} \cdot \text{K}$ のポリエチレンフォームを設置した。

2.2 実験の要因と水準

実験の要因と水準を表-1、コンクリートの使用材料を表-2、コンクリートの配(調)合を表-3 に示す。実験の構成は、温水養生供試体の静弾性係数発現性、前置き養生時間の影響、実験式の検討および粗骨材の種類の影響、単位粗骨材かさ容積の影響および各種影響を包含した実験式の導出の 5 項目とした。ここでは、温水養生供試体の静弾性係数発現性の確認を行い、前置き養生時間の影響を検討した後、限定した条件において便宜的に作成した実験式において粗骨材の種類および単位粗骨材かさ容積を変化させた場合における両者の差異の検討を行った。以上の結果を踏まえて本研究で得たすべての実験データを用いて実験式の導出を行った。いずれの検討項目とも細骨材に陸砂を用いた。一方、圧縮強度については、JIS 推定式への適合性について検討した。なお、各項目における温水養生供試体および標準供試体の試験値は、3 本の平均値とした。

温水養生供試体の静弾性係数発現性では、N および BB

表-2 コンクリートの使用材料

材料	種類	品質・性質
セメント	普通ポルトランドセメント (N)	密度 : 3.16g/cm^3 比表面積 : $3.330\text{cm}^2/\text{g}$
	高炉セメントB種 (BB)	密度 : 3.04g/cm^3 比表面積 : $3.850\text{cm}^2/\text{g}$
水	上水道水	-
細骨材	栃木県栃木市尻内町産陸砂	表乾密度 : 2.61g/cm^3 吸水率 : 2.22%
粗骨材	栃木県佐野市会沢町石灰岩碎石 2005	表乾密度 : 2.70g/cm^3 吸水率 : 0.65%
	栃木県佐野市会沢町硬質砂岩碎石 2005	表乾密度 : 2.70g/cm^3 吸水率 : 0.67%
化学混和剤	AE減水剤	リグニンスルホン酸系
	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸

を対象に、温水養生供試体および標準養生供試体の静弾性係数の発現性について検討を行った。水セメント比は、N では 45, 55 および 65% の 3 水準とし、BB では 45, 55 および 60% の 3 水準とした。

前置き養生時間の影響は、温水養生法において供試体を研磨または硫黄キャンピングの場合に、前置き養生時間を 20~52 時間行うことと定められている。ここでは、水セメント比 27, 40, 50, 60 および 65% の N において、前置き養生時間を、24, 48 および 72 時間の 3 水準とした。前置き養生時間の相違による静弾性係数の影響を明らかにするため温水養生法で定められている前置き養生時間以外の 72 時間でも検討を行った。

実験式の検討および粗骨材の種類の影響では、N および BB を対象に、粗骨材に石灰岩碎石および硬質砂岩碎石を用いて検討を行った。静弾性係数では、骨材の種類

表-3 コンクリートの配(調)合

配 (調) 合 No.	W/C (%)	粗骨材	セメント	単位粗骨材 かさ容積 (m³/m³)	単位量(kg/m³)				Ad (C×%)	
					W	C	S	G		
1-1	65.0	石灰	N	0.557	184	284	885	903	1.2 ¹	
1-2	65.0			0.600	180	277	859	972	1.2 ¹	
1-3	60.0			0.567	184	307	851	919	1.2 ¹	
1-4	55.0			0.600	180	327	817	972	1.2 ¹	
1-5	50.0			0.577	186	372	775	935	1.2 ¹	
1-6	45.0			0.600	180	400	757	972	1.0 ²	
1-7	40.0			0.547	175	438	796	887	1.2 ²	
1-8	27.0			0.525	175	649	679	851	1.2 ²	
1-9	60.0			BB	0.600	180	300	825	972	1.0 ¹
1-10	55.0					180	327	801	972	1.0 ¹
1-11	45.0	180	400			739	972	1.0 ²		
2-1	65.0	硬質	N	0.600	180	227	859	972	1.2 ¹	
2-2	55.0					327	817	972	1.0 ¹	
2-3	45.0		BB				400	757	972	1.0 ²
2-4	60.0						300	825	972	1.0 ¹
2-5	55.0	石灰	N	0.560	180	327	801	972	1.0 ¹	
2-6	45.0						400	739	972	1.3 ¹
3-1	65.0	硬質	N	0.560	180	277	921	907	1.2 ¹	
3-2	55.0						327	880	907	1.2 ¹
3-3	45.0	石灰	BB	0.640	180	400	820	907	1.0 ²	
3-4	65.0						277	921	907	1.2 ¹
3-5	55.0	硬質	N	0.560	180	327	880	907	1.0 ¹	
3-6	45.0						400	820	907	1.0 ²
3-7	60.0	石灰	BB	0.640	180	300	887	907	1.0 ¹	
3-8	55.0						327	864	907	1.0 ¹
3-9	45.0	硬質	N	0.640	180	400	801	907	1.0 ²	
3-10	65.0						300	887	907	1.0 ¹
3-11	55.0	石灰	BB	0.640	180	327	864	907	1.0 ¹	
3-12	45.0						400	801	907	1.3 ¹
3-13	65.0	硬質	N	0.640	180	277	796	1037	1.2 ¹	
3-14	55.0						327	754	1037	1.2 ¹
3-15	45.0	石灰	BB	0.640	180	400	694	1037	1.0 ²	
3-16	65.0						277	796	1037	1.2 ¹
3-17	55.0	硬質	N	0.640	180	327	754	1037	1.0 ¹	
3-18	45.0						400	694	1037	1.0 ²
3-19	60.0	石灰	BB	0.640	180	300	762	1037	1.0 ¹	
3-20	55.0						327	739	1037	1.0 ¹
3-21	45.0	硬質	N	0.640	180	400	676	1037	1.0 ²	
3-22	60.0						300	762	1037	1.0 ¹
3-23	55.0	石灰	BB	0.640	180	327	739	1037	1.0 ¹	
3-24	45.0						400	676	1037	1.3 ¹

*1: AE減水剤, *2: 高性能AE減水剤

石灰: 石灰岩砕石2005, 硬質: 硬質砂岩砕石2005

ごとに単位粗骨材かさ容積を $0.600\text{m}^3/\text{m}^3$ 一定とし、前置き養生時間を 24 時間一定とした限定条件で実験式の導出を行い、両者の合致性の検討を行った。圧縮強度では、骨材の種類が温水養生法に及ぼす影響について JIS 推定式を用いて検討を行った。水セメント比は、N では 45, 55, および 65%とし、BB では 45, 55 および 60%とした。

単位粗骨材かさ容積の影響では、N および BB を対象に、石灰岩砕石および硬質砂岩砕石における単位粗骨材かさ容積を 0.560 および $0.640\text{m}^3/\text{m}^3$ の 2 水準として検討を行った。

各種影響を包含した実験式の導出では、静弾性係数における骨材の種類および単位粗骨材かさ容積の影響に関して検討した全ての実験データをプロットして検討を行った。なお、表-1 に示す配(調)合 No.は、表-2 に示す配(調)合 No.に対応している。

3. 結果および考察

3.1 温水養生供試体の静弾性係数発現性

養生方法の相違における圧縮強度と静弾性係数の関係を図-3 に示す。圧縮強度と静弾性係数の関係は、養生方法の相違によらず概ね日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」による式⁹⁾(以下、構造計算規準式とする)に沿う傾向を示した。また、全試験データは、実測値の 95%信頼区間内に存在しており、養生方法

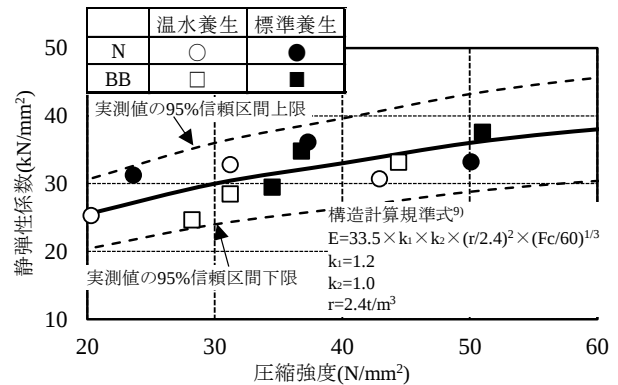


図-3 養生方法の相違における圧縮強度と静弾性係数の関係

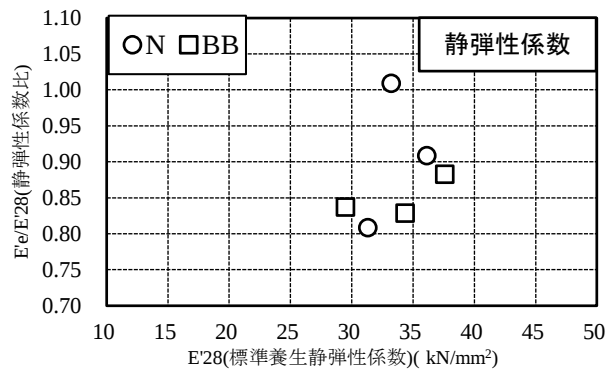


図-4 E'28 と静弾性係数比の関係

の相違による差異は小さいと考えられる。なお、以降の検討において標準養生を行った材齢 28 日における圧縮強度を f_{28} 、温水養生を行った材齢 7 日における圧縮強度を f_e とそれぞれ呼称する。

E'28 と静弾性係数比の関係を図-4 に示す。ここで、静弾性係数比とは、標準養生を行った材齢 28 日における静弾性係数(以下、 E'_{28} とする)に対する温水養生を行った材齢 7 日における静弾性係数(以下、 E'_e とする)の比である。静弾性係数比は、1.00 を超える特異データがあるものの、概ね 0.80~0.90 の範囲に分布する傾向を示した。また、N および BB とも静弾性係数の増大に伴って、正の相関が認められた。これは、大塚ら³⁾の温水養生法による高強度コンクリートの圧縮強度の早期判定に関する研究において、圧縮強度の増大に伴って f_e と f_{28} との差異が少なくなる知見に加え、図-3 に示すように、 f_e および f_{28} の増大に伴って E'_e および E'_{28} が大きくなることから、静弾性係数比においても静弾性係数の増大に伴って E'_e と E'_{28} との差異が少なくなったと考えられる。

3.2 前置き養生時間の影響

前置き養生時間と E'_e の関係を図-5 に示す。前置き養生時間および E'_e の関係は、72 時間では若干の低下が認められた。しかしながら、24 および 48 時間の範囲においては、前置き養生時間による E'_e の差異は少ない傾

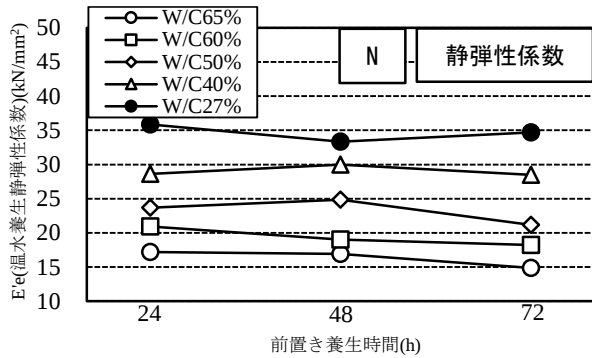


図-5 前置き養生時間と $E'e$ の関係

向であった。このことから、前置き養生時間が $E'e$ に及ぼす影響は、48 時間までの範囲において小さいと考えられる。ここでは、以降の検討において前置き養生時間を 24 時間とした。

3.3 実験式の検討および粗骨材の種類の影響

粗骨材の種類の違いによる $E'e$ と $E'28$ の関係を図-6 に示す。図中には、N および BB とそれぞれ単位粗骨材かさ容積 $0.600\text{m}^3/\text{m}^3$ を一定とした前置き養生時間 24 時間における石灰岩および硬質砂岩のデータをプロットした。最小二乗法により求めた N および BB における骨材の種類ごとの回帰式を式(1)、式(2)、式(3)および式(4)に示す。

$$\text{N-石灰岩} : E'28 = 0.59E'e + 16.0 \quad (1)$$

$$\text{N-硬質砂岩} : E'28 = 0.51E'e + 17.0 \quad (2)$$

$$\text{BB-石灰岩} : E'28 = 0.94E'e + 6.6 \quad (3)$$

$$\text{BB-硬質砂岩} : E'28 = 0.85E'e + 6.9 \quad (4)$$

石灰岩および硬質砂岩における回帰式は、N および BB において硬質砂岩の傾きが若干緩くなる傾向を示したものの、両者はほぼ近似していた。

粗骨材の種類の違いによる $f'e$ と $f'28$ の関係を図-7 に示す。 $f'e$ および $f'28$ の関係では、石灰岩および硬質砂岩のいずれの実験データにおいても JIS 推定式の $\pm 5\%$ の範囲内に分布し、粗骨材の種類の違いによる影響は少ない傾向を示した。これは、十代田ら⁵⁾の 55°C の温水養生における種別の異なる骨材を用いた検討において、骨材の種類の違いが $f'e$ と $f'28$ の関係に及ぼす影響は考慮する必要はないとした知見と同様であった。

以上から、 $E'e$ および $E'28$ の関係は、粗骨材に石灰岩碎石および硬質砂岩碎石を用いる場合であれば、無視できる範囲の差異である可能性がある。これは、圧縮強度に及ぼす影響についても同様であった。

次節における単位粗骨材かさ容積が異なる場合の静弾性係数の推定について、式(1)、式(2)、式(3)および式(4)との適合性の検討を行い、単位粗骨材かさ容積を変化させた $f'e$ と $f'28$ の関係においては、JIS 推定式との適合性の検討を行うこととした。

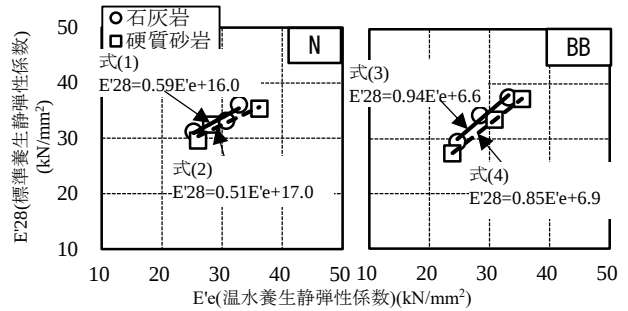


図-6 粗骨材の種類の違いによる $E'e$ と $E'28$ の関係

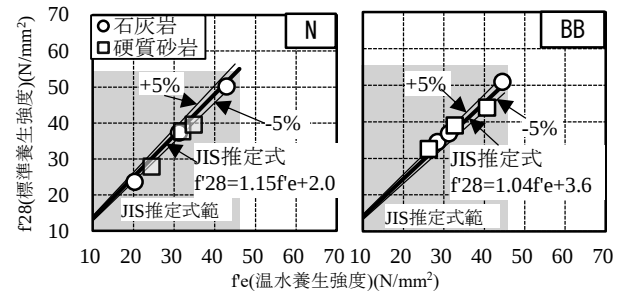


図-7 粗骨材の種類の違いによる $f'e$ と $f'28$ の関係

3.4 単位粗骨材かさ容積の影響

N における単位粗骨材かさ容積の違いによる $E'e$ と $E'28$ の関係を図-8、BB における単位粗骨材かさ容積の違いによる $E'e$ と $E'28$ の関係を図-9 に示す。ここでは、前項で導出した実験式に単位粗骨材かさ容積を 0.560 および $0.640\text{m}^3/\text{m}^3$ としたデータをプロットして検討を行った。 $E'e$ および $E'28$ の関係は、実験式との比較において一部に突出した値は見られるものの式(1)、式(2)、式(3)および式(4)の $\pm 5\%$ の範囲に概ね分布する傾向を示した。

N および BB における単位粗骨材かさ容積の違いによる $f'e$ と $f'28$ の関係を図-10 に示す。単粗骨材かさ容積を変化させた $f'e$ および $f'28$ の関係は、JIS 推定式と比較して、単粗骨材かさ容積を変化させた場合でも、若干突出した値が見られるものの JIS 推定式の $\pm 5\%$ の範囲に分布し、単位粗骨材かさ容積による影響は小さい傾向を示した。以上から、単位粗骨材かさ容積の相違が温水養生法における静弾性係数に及ぼす影響は小さいといえる。また、圧縮強度に及ぼす影響についても同様であった。

3.5 各種影響を包含した実験式の導出

各種影響における $E'e$ と $E'28$ の関係を図-11 に示す。ここでは、前述した骨材の種類および単位粗骨材かさ容積の影響に関して検討した静弾性係数の全ての実験データをプロットし、実験式の導出を行った。最小二乗法により求めた N および BB の回帰式を式(5)および式(6)に示す。

$$\text{N} : E'28 = 0.62E'e + 15.04 \quad R^2 = 0.710 \quad (5)$$

$$\text{BB} : E'28 = 0.78E'e + 11.0 \quad R^2 = 0.842 \quad (6)$$

$E'e$ と $E'28$ の関係は、一次式で回帰でき若干突出した値が見られるが導出した実験式の $\pm 5\%$ の範囲に分布す

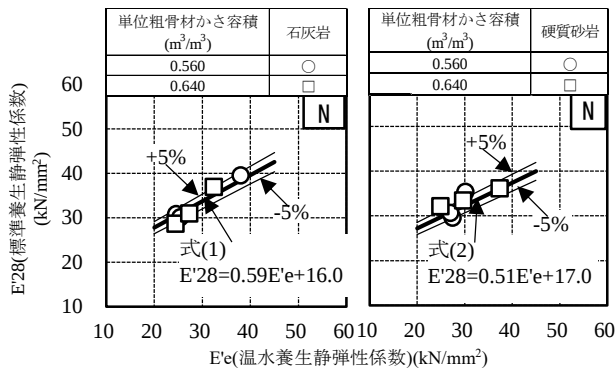


図-8 Nにおける単位粗骨材かさ容積の違いによる $E'e$ と E'_{28} の関係

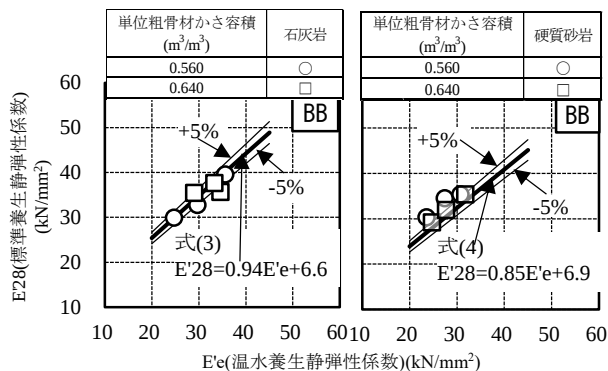


図-9 BBにおける単位粗骨材かさ容積の違いによる $E'e$ と E'_{28} の関係

る傾向を示した。

以上から、 $E'e$ と E'_{28} の関係は、本研究の水準内における骨材の種類および単位粗骨材かさ容積の違いによる影響が小さいものと考えられた。

4. まとめ

本研究は、NおよびBBを対象に温水養生法を拡張し、静弾性係数の早期判定への適用性に関する検討を行った。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 標準養生を行った材齢 28 日における静弾性係数に対する温水養生を行った材齢 7 日における静弾性係数の比は、本研究の範囲内において 0.80~0.90 程度であった。
- (2) 温水養生を行った材齢 7 日における静弾性係数および標準養生を行った材齢 28 日における静弾性係数の関係は、一次式で精度よく回帰できる。
- (3) 温水養生法を準用した静弾性係数の推定に及ぼす粗骨材の種類および単位粗骨材かさ容積の相違による影響は小さい。
- (4) 温水養生法による圧縮強度の推定に及ぼす粗骨材の種類および単位粗骨材かさ容積の相違による影響は、静弾性係数の推定と同様に小さい。
- (5) 各種影響を包含した $E'e$ と E'_{28} の関係は、一次式で精度よく回帰できる。

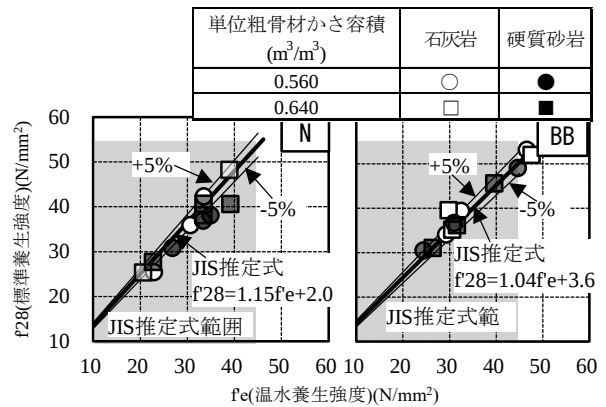


図-10 NおよびBBにおける単位粗骨材かさ容積の違いによる $f'e$ と f'_{28} の関係

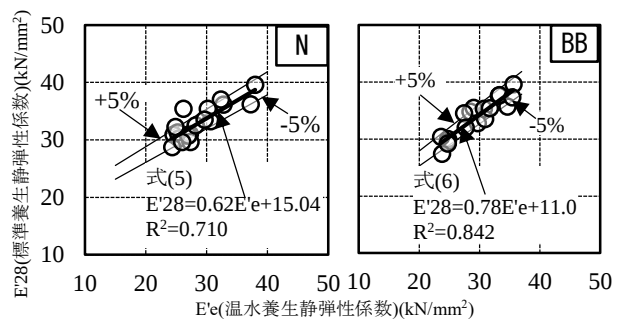


図-11 各種影響における $E'e$ と E'_{28} の関係

今後は、セメントの種類、コンクリートの練上がり温度および供試体間でのばらつきに着目し、温水養生法を準用した静弾性係数の早期判定への適用可能性を検討する予定である。

謝辞

本研究の実施にあたり、ものづくり大学技能工学部建設学科大塚研究室の学生より多大なご協力を頂きました。ここに記して深謝致します。

参考文献

- 1) 池田尚治, 山口隆裕, 武山信: 早期判定試験によるコンクリート強度の合理的品質管理方法について, セメント・コンクリート論文集, No.49, pp.522-527, 1995
- 2) 大塚秀三, 中田善久, 飛坂基夫, 毛見虎雄: 温水養生法による高強度コンクリートの圧縮強度の早期判定に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1219-1224, 2005
- 3) 大塚秀三, 中田善久, 飛坂基夫, 毛見虎雄: 温水養生法による 100N/mm² を超える高強度コンクリートの圧縮強度の早期判定に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1241-1246, 2006
- 4) 梶田佳寛, 高田義勝, 星崎博昭, 十代田知三: 温水養生を利用したコンクリート強度の促進試験に関する

- る実験 その1.促進試験におよぼす供試体形状，セメント種別の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)，pp.101-102，1977.10
- 5) 十代田知三，木村聡明，榊田佳寛，星崎博昭：温水養生を利用したコンクリート強度の促進試験に関する実験 その2.骨材種別・空気量・後時間の延長などの影響，日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)，pp.103-104，1977.10
- 6) 上野裕康，柳田力：コンクリート品質の早期判定方法，セメント・コンクリート，341号，pp.2-10，1975.7
- 7) 野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度とヤング係数との関係，日本建築学会構造系論文集，第474号，pp.1-10，1995
- 8) 川上英男，松田勝彦，熊井雄大：セメント硬化体の弾性係数について，コンクリート工学年次論文集，Vol.16，No.1，1994
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，pp.50-52，2010