

論文 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

大塚秀三^{*1}・中田善久^{*2}・飛坂基夫^{*3}・毛見虎雄^{*4}

要旨：本報は、夏期および標準期における普通(N)，中庸熱(M)および低熱ポルトランドセメント(L)の3種類のセメントを用いたコンクリートを対象に，JIS A 1805の温水養生法による圧縮強度の早期判定の適用性を検討したものであり，Nは，高強度域での適用性，MおよびLは，普通強度から高強度域までを含めた適用性の検討を目的とした。ここでは，W/Cおよび前置き養生時間を変化要因として検討した結果 温水養生強度と標準養生強度の関係は，Nでは90～100N/mm²程度までの高強度域においてもJIS推定式に近似しており，その適用性が予見できた。また，MおよびLでは，高い相関関係が認められた。

キーワード：JIS A 1805，温水養生法，高強度コンクリート，前置き養生時間，圧縮強度

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、温水養生法と称する)では，温水養生(40℃)を行い，材齢7日で早期判定する材齢28日における圧縮強度について，日本国内産の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)を用いたコンクリートの推定式(以下，JIS推定式とする)が参考に示されており，標準養生した材齢28日における圧縮強度が16～55N/mm²の範囲において，NおよびBBを用いたコンクリートの相関性が非常に高く，日本国内産のセメントであれば推定式の適用が可能とされている。また，温水養生法は，材齢7日で標準養生材齢28日強度の0.8～0.9程度の強度発現が見込めるため，比較的精度良く判定が可能であるとともに，現状の標準養生材齢28日での強度判定より早期に判定が可能になることにより，時間差の少ない合理的な強度管理が行えることが特徴である。

近年，コンクリートの高強度化が顕著であるが，温水養生法の特徴を活かしてコンクリート

強度の合理的な品質管理を行うために，高強度コンクリートへも対応した推定式の提示が望まれる。また，高強度マスコンクリートへの中庸熱(M)および低熱ポルトランドセメント(L)の適用事例が増えつつあることから，これらに対する温水養生法の適用性の検討も有用である。しかし，温水養生法の高強度コンクリートへの適用性についての研究は，池田ら¹⁾の研究のみであり，温水養生法の適用範囲について更なる検討は行われていない。さらに，NおよびBB以外のセメントを用いたコンクリートに関する検討も行われていない。

そこで，本研究は，N，MおよびLの3種類のセメントを用いたコンクリートを対象に，温水養生法による圧縮強度の早期判定の適用性を検討するためのものであり，Nは，高強度域における適用性，MおよびLは，普通強度から高強度域までの適用性を明らかにすることを目的とした。

ここでは，W/Cおよび前置き養生時間を変化要因として，室内練りによる普通強度のコンクリートと生コンプラントにおいて製造された普

*1 ものつくり大学技能工芸学部建設技能工芸学科 (正会員)

*2 ものつくり大学技能工芸学部建設技能工芸学科 専任講師 博士(工学) (正会員)

*3 飛坂技術士事務所所長 工博 (正会員)

*4 (前)足利工業大学工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

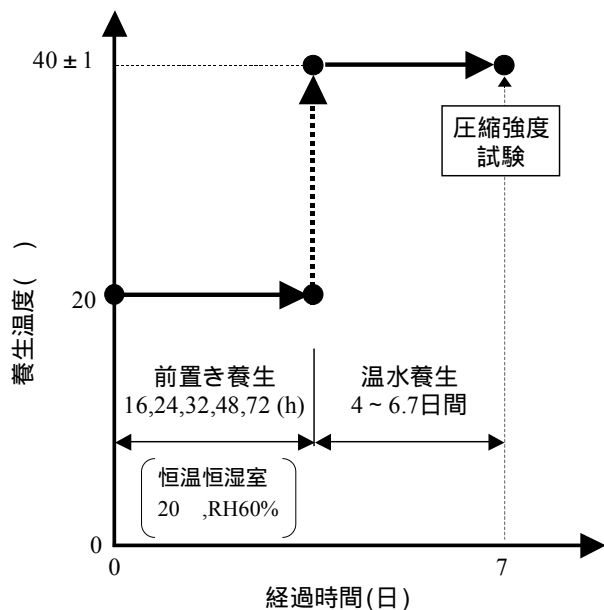


図-1 温水養生法の実験フロー

表-1 実験の要因と水準

要因	水準	
	室内練り	生コンプラント採取
セメント	N, M, L	N, M, L
W/C (%)	50.0, 55.0, 60.0	N: 70.0 ¹ , 58.5 ¹ , 50.0 ¹ , 47.0, 37.0, 27.0 M: 47.0, 37.0, 27.0 L: 45.0, 35.0, 25.0
前置き養生時間(h)	24	16 ² , 24, 32 ² , 48, 72
季節	-	夏期, 標準期
標準養生供試体の圧縮強度試験材齢(d)	28	7, 28 ³ , 56, 91

1: 標準期, Nのみ実施

2: 標準期におけるW/C=27.0%および25.0%のみ

3: W/C=50.0%~70.0%は、材齢28日のみ

表-2 使用材料

材料	種類	品質・性状・主成分		
		室内練り	生コンプラント採取	
			W/C=47.0~25.0	W/C=70.0~50.0
セメント	N	密度: 3.16g/cm ³ 比表面積: 3,270cm ² /g	密度: 3.16g/cm ³ 比表面積: 3,290cm ² /g	密度: 3.16g/cm ³ 比表面積: 3,270cm ² /g
	M	密度: 3.21g/cm ³ 比表面積: 3,150cm ² /g	密度: 3.21g/cm ³ 比表面積: 3,230cm ² /g	-
	L	密度: 3.22g/cm ³ 比表面積: 3,420cm ² /g	密度: 3.22g/cm ³ 比表面積: 3,430cm ² /g	-
水	-	水道水	地下水: 生コンプラント内井戸	
粗骨材	栃木県栃木市 尻内町産: 砕石2005	表乾密度: 2.64g/cm ³ 粗粒率: 6.66, 実積率: 59.0% 吸水率: 1.21%	-	室内練りと同一
	栃木県安蘇郡 葛生町産: 砕石2005	-	表乾密度: 2.70g/cm ³ 粗粒率: 6.65, 実積率: 60.0% 吸水率: 0.59%	-
細骨材	栃木県栃木市 尻内町産: 陸砂	表乾密度: 2.61g/cm ³ 粗粒率: 2.74, 吸水率: 2.28%	表乾密度: 2.61g/cm ³ 粗粒率: 2.75, 吸水率: 2.30%	
化学 混和剤	AE減水剤	リグニンスルホン酸系化合物	-	室内練りと同一
	高性能AE減水剤	-	ポリカルボン酸系化合物	-

コンクリート(以下、生コンプラント採取とする)を用いた検討の2構成とした。室内練りは、W/C=50.0~60.0%のN,MおよびLを対象とし、生コンプラント採取は、W/C=50.0~70.0%について標準期のNのみとし、その他について夏期および標準期におけるN,MおよびLを対象とした。コンクリートの使用材料を表-2に、コンクリートの調合を表-3に示す。

2. 実験概要

温水養生法の実験フローを図-1に、実験の要因と水準を表-1に示す。実験の構成は、室内において練混ぜたコンクリート(以下、室内練りとする)と生コンプラントにおいて製造されたコン

クリート(以下、生コンプラント採取とする)を用いた検討の2構成とした。室内練りは、W/C=50.0~60.0%のN,MおよびLを対象とし、生コンプラント採取は、W/C=50.0~70.0%について標準期のNのみとし、その他について夏期および標準期におけるN,MおよびLを対象とした。

コンクリートの使用材料を表-2に、コンクリートの調合を表-3に示す。

試料の採取時期は、室内練りおよび生コンプラント採取のW/C=50.0~70.0%において練上がり直後とし、その他は、コンクリートを製造し、トラックアジテータにて運搬した後、荷卸し90分に試料の採取するものとした。

表 - 3 コンクリートの調合

セメントの種類	記号	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				Ad (C×%)
				W	C	S	G	
N	N-70	70.0	50.9	182	260	919	895	1.20
	N-60	60.0	48.7	181	302	861	919	1.20
	N-58.5	58.5	48.5	181	310	856	919	1.20
	N-55	55.0	48.0	181	329	840	919	1.20
	N-50	50.0	46.0	183	366	788	935	1.20
	N-50	50.0	46.0	183	366	788	935	1.20
	N-47	47.0	50.6	175	373	874	883	1.15
	N-37	37.0	50.7	170	460	846	851	1.375
	N-27	27.0	46.2	170	630	707	851	1.40
M	M-60	60.0	48.7	179	299	861	919	1.20
	M-55	55.0	48.0	179	326	838	919	1.20
	M-50	50.0	46.0	181	362	786	935	1.20
	M-47	47.0	50.8	175	373	880	883	1.05
	M-37	37.0	50.9	170	460	853	851	1.30
	M-27	27.0	45.9	170	630	715	851	1.40
L	L-60	60.0	49.0	179	299	874	919	1.20
	L-55	55.0	48.4	179	326	851	919	1.20
	L-50	50.0	46.4	181	362	801	935	1.20
	L-45	45.0	51.0	170	378	890	883	1.05
	L-35	35.0	51.0	165	472	856	851	1.15
	L-25	25.0	46.1	165	660	705	851	1.20

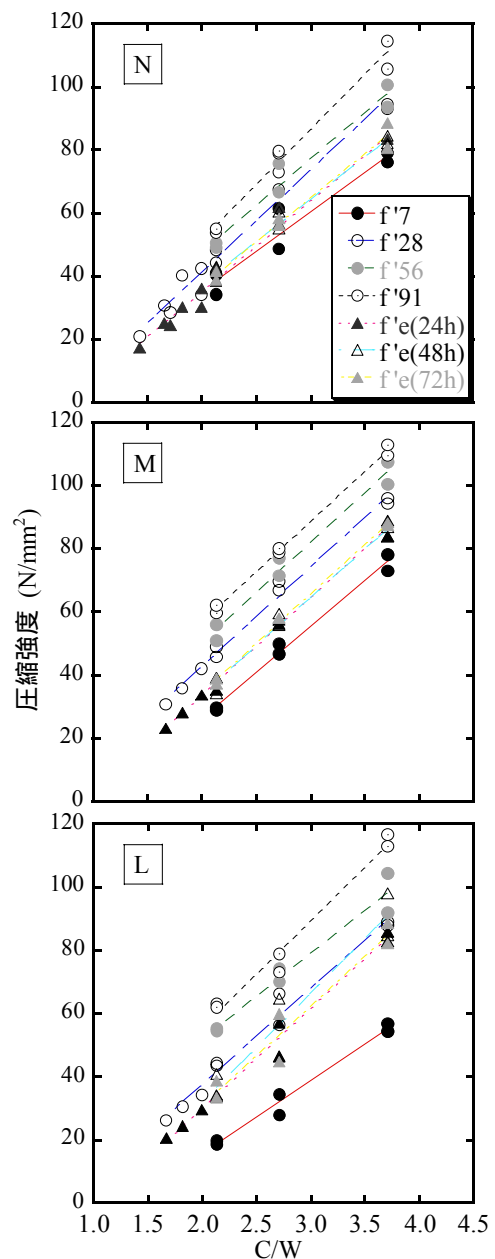
網掛け部分は室内練りを示す

温水養生供試体は、コンクリート強度試験用供試体の作り方(JIS A 1132)に準拠して作製し、作製後直ちにポリエチレンフィルムによって上面を封かんし、図-1に示す実験フローにより恒温恒湿室(室温20℃, RH60%)において、所定の時間前置き養生した後、型枠を脱型し、温水養生槽に浸せきさせ、試料採取後7日間まで温水養生した。その後、コンクリートの圧縮強度試験(JIS A 1108)を行った。本実験で用いた温水養生槽の外観を写真-1に示す。温水養生槽は、水温を40±1℃に保持するための自動温度調節装置および循環装置を備えたポリエチレン樹脂製(内法寸法: W650×L1,000×h520mm)であり、10×20cmの供試体が90本程度入る容量のものである。

また、いずれも温水養生供試体の採取時に標準養生供試体の試料の採取も行い、同様に試料採取直後に上面を封かんした。標準養生供試体の圧縮強度試験の材齢は、7, 28, 56, 91日とした。なお、圧縮強度試験結果は、全て供試体3本の平均値を用いた。



写真 - 1 温水養生槽の外観



凡例: f'xは、表記の材齢における標準養生強度を示し、f'e(h)は、()内に示す前置き養生時間における温水養生強度を示す。

図 - 2 C/Wと圧縮強度の関係

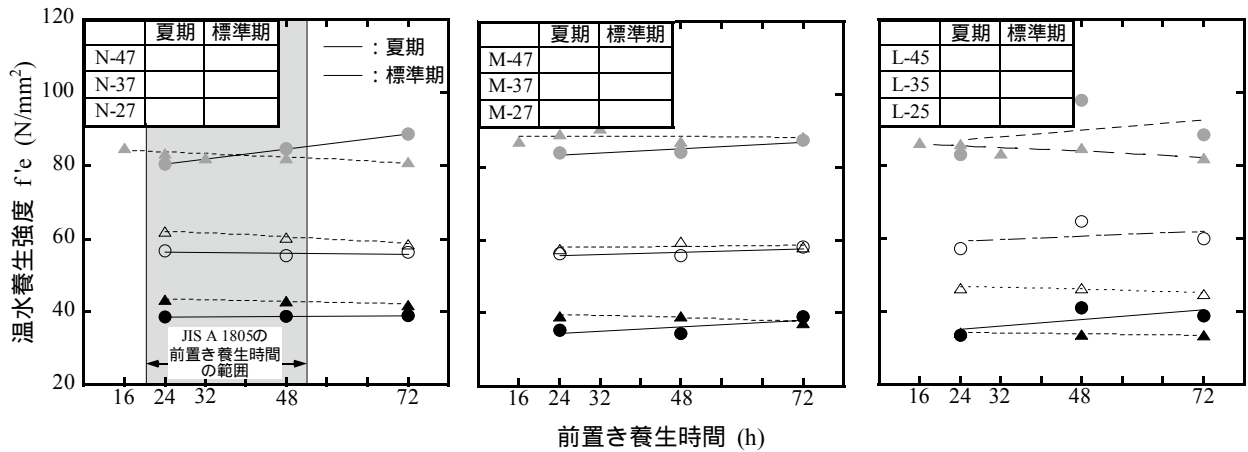


図-3 前置き養生時間と温水養生強度 $f'e$ の関係

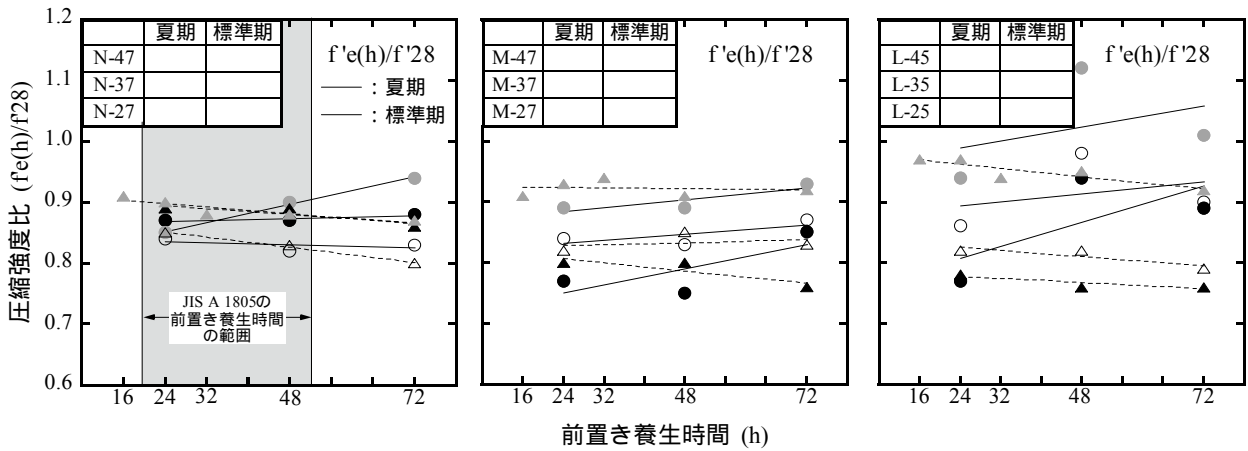


図-4 N, M および L における前置き養生時間と圧縮強度比 ($f'e(h)/f'28$) の関係

3. 実験結果および考察

3.1 各種コンクリートの強度発現性

C/Wと圧縮強度の関係を図-2に示す。図中には、セメント種類ごとに前置き養生時間16および32hを除く全ての試験結果をプロットした。

いずれのコンクリートともC/Wと圧縮強度は直線的な関係が認められた。C/Wに対する強度発現性は、 $f'28$ を基準として考えるとNおよびMにおいて $f'7$ 、 $f'56$ および $f'91$ は、ほぼ同様の傾きであった。しかし、LにおいてC/Wに対する強度発現性は、各材齢において若干異なる

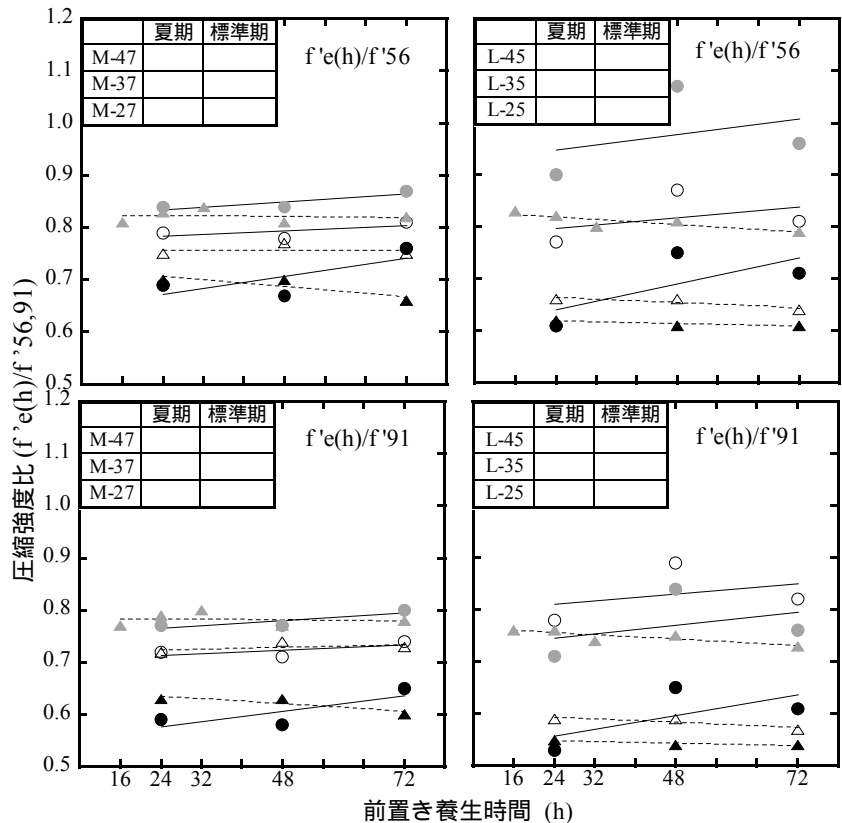


図-5 MおよびLにおける前置き養生時間と圧縮強度比 ($f'e(h)/f'56,91$) の関係

傾きであった。これは、セメント中に含有される C_3S および C_2S などの量により生じる強度発現性と考えられる。また、 $f'e(24h)$ 、 $f'e(48h)$ および $f'e(72h)$ の C/W に対する強度発現性は、いずれのセメントの場合も $f'28$ とほぼ同様の傾きとなっていた。これは、温水養生によりコンクリートの強度発現性が $f'28$ と同様になることを示唆していると思われる。

3.2 温水養生における前置き養生時間の検討

前置き養生時間と温水養生時間の関係を図-3に示す。温水養生における前置き養生時間ごとの温水養生強度は、 $W/C=47 \sim 25\%$ 程度の範囲において L のばらつきが大きくなり N および M は小さかった。また、 N の温水養生強度は、JIS A 1805の前置き養生時間の範囲 $20 \sim 52h$ であれば、ばらつきが小さかった。特に、 $N-27$ のような高強度においても同様にばらつきが小さかったことから JIS A 1805 の高強度コンクリートの適用への可能性が高いことがいえる。

N 、 M および L における前置き養生時間と圧縮強度比 ($f'e(h)/f'28$) の関係を図-4に示す。この圧縮強度比は、標準養生強度の材齢 28 日 ($f'28$) に対する前置き養生時間ごとの温水養生強度 ($f'e(h)$) の比とした。 $f'e(h)/f'28$ は、 N では $0.8 \sim 0.9$ 、 M では $0.75 \sim 0.95$ 、 L ではばらつきが大きく $0.75 \sim 1.10$ 程度であり、セメントの種類の違いによりばらつきの程度が異なった。特に N は、いずれの W/C および前置き養生時間においても概ね $0.8 \sim 0.9$ の範囲内となっており、「JIS A 1805 解説」に示される傾向と同様の結果が得られた。

M および L における前置き養生時間と圧縮強度比 ($f'e(h)/f'56,91$) の関係を図-5に示す。この圧縮強度比は、標準養生強度材齢 56 日および 91 日に対する前置き養生時間ごとの温水養生強度 $f'e(h)$ の比とした。材齢 28 日による圧縮強度比と同様に M より L の方がばらつきが大きかった。これらのセメントは、管理材齢を比較的長期に設定する場合があるので、前項の強度発現性を考慮すると温水養生時間を検討すれば N のよ

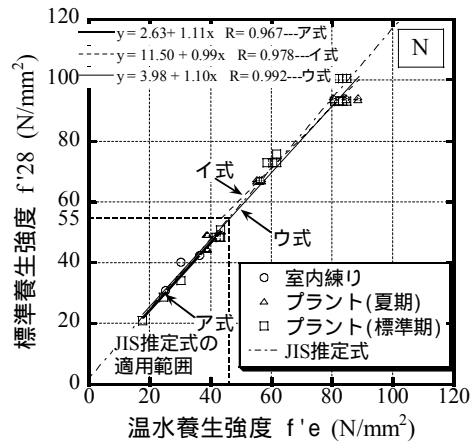


図-6 Nの温水養生強度と標準養生強度の関係

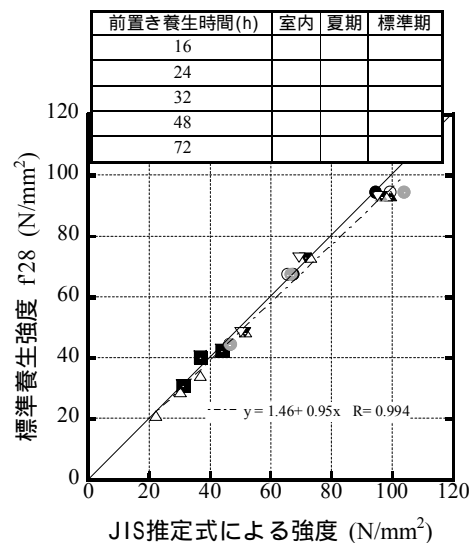


図-7 NのJIS推定式による強度と標準養生強度の関係

うにあるばらつきの範囲に納まる可能性がある。

3.3 温水養生法適用の可能性の検討

(1) Nの高強度域について

N の温水養生強度と標準養生強度の関係を図-6に示す。温水養生強度と標準養生強度の関係は、高強度域において若干のばらつきが見られるものの、室内練り、夏期および標準期の生コンプラント採取のいずれにおいても、図中に示したJIS推定式にほぼ近似していた。標準養生強度 $55N/mm^2$ のJIS推定式の適用範囲内、高強度域および全体に3分割し、最小二乗法により求めた回帰式をそれぞれア式、イ式およびウ式に示す。これにより、温水養生強度を $100N/mm^2$ とすると、3式の差は、約 $3.5N/mm^2$ 以内に収まり、一般的に生じる強度試験における誤差範囲内であるといえる。さらに、 N のJIS推定式による強度と標準養生強度の関係を図-7に示す。t-検定により

差の検定を行ったところ，有意水準 0.05 で有意差なしとなった。これらのことから，標準養生強度で 90 ~ 100N/mm² 程度までの領域では，いずれも相関性が高いといえ，JIS 式の適用が可能であると思われる。

(2) M および L への温水養生法の適用について

M の温水養生強度と標準養生強度の関係を図-8，L の温水養生強度と標準養生強度の関係を図-9 に示す。図中には N および L とそれぞれ全てのデータをプロットした。最小二乗法により求めた M および L の回帰式を(1)式および(2)式に示す。

$$M: f'_{28} = 0.98f'_{e} + 10.57 \quad R = 0.997 \quad (1)$$

$$L: f'_{28} = 0.88f'_{e} + 12.32 \quad R = 0.985 \quad (2)$$

これにより，M および L とも高い相関関係が認められた。また，M の回帰式は，N の JIS 推定式に比べ傾きが緩く，L ではさらに緩くなる。図中に材齢 56 および 91 日の試験結果(ア式 ~ エ式)を示したが，いずれも材齢 28 日の傾きにほぼ並行に推移するため，回帰式の係数と切片を変えることによって比較的精度良く，材齢 56 や 91 日の標準養生強度を推定することが可能であると考えられる。

4. まとめ

本研究の検討範囲内では以下の知見が得られた。

- (1) N の温水養生強度の標準養生 28 日強度に対する比は，いずれの W/C および前置き養生時間においても 0.8 ~ 0.9 程度であった。
- (2) 前置き養生時間ごとの温水養生強度は，W/C=47 ~ 25% 程度の範囲において L のばらつきが大きくなり N および M は小さかった。
- (3) N は，標準養生強度で 90 ~ 100N/mm² 程度までの高強度域においても現状の JIS 推定式の適用が可能であると考えられる。
- (4) 温水養生強度に対する標準養生強度の関係は，M では，N に比べて緩やかな傾きとなり，L ではさらに緩やかになるが，いずれも相関性は高いものであった。

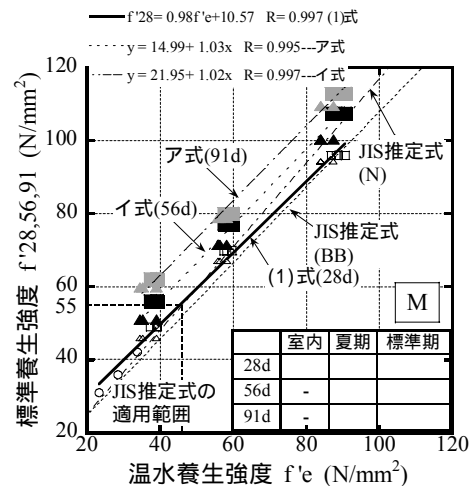


図-8 M の温水養生強度と標準養生強度の関係

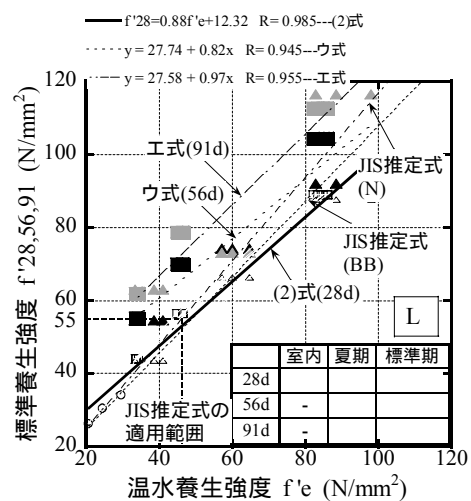


図-9 L の温水養生強度と標準養生強度の関係

今後，N については高強度域の強度水準を増やし，M および L は，さらに使用材料(骨材種類など)および強度水準を増やして検討していく予定である。

謝辞

本研究の実施にあたり，小山レミコン(株)，(株)内山アドバンスならびにもつくり大学建設技能工芸学科中田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) 池田尚治ほか：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