

論文

[1001] 現場打設による高強度PCa梁部材の製造に関する実験的研究

正会員 ○中嶋健治（不動建設 技術開発室）

葉賀忠昭（サンフロー企画技術部）

岡部善憲（香建築事務所）

正会員 末永保美（横浜国立大学 工学部）

1. まえがき

超高層RC造は、居住性・工期短縮・経済性の面で優れており、20階から32階規模の都市型集合住宅のなかでは7割近くを占めている¹⁾。このような情勢下において、鉄筋・型枠熟練工の不足と技能低下が深刻化しており、工事の省力化・生産性向上を図るために、プレキャスト化率を高めることが大きな課題となっている。

従来、現場打設によるプレキャストコンクリート（以下PCaと略記）部材の製作は、プレキャスト化率を高めるためシート養生および保温養生を行っていた。しかしながら、これらの養生方法では特に冬場において、製造工程・架設工程・ストックヤードの面で工事全体の進捗と品質に大きな支障をきたす恐れがある。この問題を解決するために、蒸気養生を用いた現場打設による高強度PCa梁部材の製造実験を行ったので、ここに報告し、今後のPCa製造技術向上の一助とするものである。

そこで、本実験は、スランプロス低減型の高減水性混和剤を用いた普通骨材コンクリートを使用し、室内および実機による調合試験でコンクリートの基礎的性状を確認したうえで、レーミクストコンクリート製造による高強度コンクリート（ $F_c=360\text{kgf/cm}^2$ ）でPCa梁部材を現場打設にて蒸気養生し、冬季から夏季にわたり製造した。その使用した高強度コンクリートの調合、フレッシュコンクリートと硬化したコンクリートの性状、および凍結融解による耐候性などを検証し、PCa梁部材の実大施工におけるコンクリートの温度解析、コンクリートの前養生の定量化、コンクリートの非破壊試験および破壊試験結果について述べる。

2. 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント、混和剤はナフタレンスルホン酸縮合物とリグニンスルホン酸誘導体を主成分とした高減水性混和剤を使用した。骨材は、表-1に示すように、粗骨材に栃木県葛生産石灰石（最大寸法20mm）、細骨材に栃木県思川産川砂と栃木県葛生産石灰砂とを容積比で50%：50%に混合したものを使用した。

表-1 使用骨材の物性試験結果

骨材の種類	比重		吸水率	単位体積重量	粘土量	洗い	実積率	塩分	ふるい分け（通過重量百分率）（%）											
	絶乾	表乾	(%)	(kg/m^3)	(%)	(%)	(%)	(%)	25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15		
細骨材	①川砂	2.51	2.57	2.24	1620	0.4	1.80	64.5	0.000	100	100	100	100	97	86	68	43	23	7	
	②砕砂	2.65	2.67	0.72	1680	0.0	3.45	63.4	0.000	100	100	100	100	98	87	63	40	25	7	
	③混合砂(50:50)	2.58	2.62	1.48	1650	0.2	2.78	62.8	0.000	100	100	100	100	98	87	65	42	24	7	
	規格値	≥ 2.5	—	≤ 3.0	—	≤ 1.0	≤ 2.0 (川砂)	—	≤ 0.001	100	—	—	100	$\frac{90}{100}$	$\frac{80}{100}$	$\frac{55}{80}$	$\frac{30}{55}$	$\frac{15}{30}$	$\frac{2}{10}$	
粗骨材	砕石2005	2.71	2.73	0.72	1660	0.0	0.88	61.3	—	100	98	77	40	7	1	—	—	—	—	
	規格値	≥ 2.5	—	≤ 2.0	—	≤ 0.25	≤ 1.0	—	—	100	$\frac{90}{100}$	$\frac{55}{80}$	$\frac{25}{50}$	$\frac{0}{10}$	$\frac{0}{5}$	—	—	—	—	

* JASS 5 高耐久性コンクリートの規格値

3. 実験計画

3-1. 実験内容

室内調合では、スランブを15cm、18cmの2水準、水セメント比を35%、45%、60%の3水準、空気量を4%に設定し、所要のフレッシュコンクリートの性状、蒸気養生における強度特性および凍結融解による耐候性などの基本的物性を調査した。スランブ15cmおよびスランブ18cmの単位水量、混和剤の使用量および所定のワーカビリティは、予め試し練りを行い定めた。

実機による調合では、室内におけるコンクリートの基礎的性状の再現性と、P C a 梁部材に使用する高強度コンクリート ($F_c=360\text{kgf/cm}^2$) の基礎的性状・施工使用体制をシリーズ I (冬季)、シリーズ II (標準季・夏季) の2時期について確認した。

P C a 梁部材の実大施工は、室内および実機による調合試験結果より得られた水セメント比35.0%、38.2%の2水準をレデーミクストコンクリート工場 (2軸型強制練りミキサー、 $1.5\text{m}^3/\text{h}$) で製造し、施工実験場まで運搬した後、打込み・締固め・蒸気養生を行った。その P C a 梁部材の本数は、表-2 に示す水セメント比を用いてシリーズ I で4体、シリーズ II で4体、計8体を製作した。図-1 に P C a 梁部材の寸法・形状を示す。それぞれの使用した高強度コンクリートの品質、蒸気養生に伴う養生技術および P C a 梁部材コンクリートの品質などについて検討した。

表-2 コンクリートの調合

F _c (kgf/cm ²)	気 象 条 件	W/C (%)	b/b ₀ (m ³ /m ³)	単 位 重 量 (kg/m ³) *				
				水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	高減水性混和剤 (C×1.8%)
360	シリーズ I (冬季)	35.0	0.625	165 (165.0)	471 (149.1)	689 (263.1)	1045 (382.8)	8.48
	シリーズ II (標準季・夏季)	38.2	0.625	155 (155.0)	406 (128.5)	769 (293.7)	1045 (382.8)	7.31

*括弧内の数値は、コンクリート1m³当りの容積 (ℓ) を表す。

3-2. 実験方法

(1) フレッシュコンクリート

実機による練り混ぜには、強制2軸ミキサー ($1.5\text{m}^3/\text{h}$) を使用し、練り混ぜ直後とトラックアジテータ車 (容量 4.5m^3) の低速攪拌2~4回転/分で30分、60分、90分経過したフレッシュコンクリートの性状を判定した。

(2) 養生条件

P C a 梁部材の製作は、前養生3~4時間、最高温度60℃、最高温度保持時間3hrおよび上昇温度20℃/hr以下で蒸気養生を行った。特に、シリーズ I (冬季) では前置き時間におけるプレヒーティング (25℃, 1hr) の有無をパラメータとして実施した。

(3) 主な試験項目

圧縮強度、引張強度、曲げ強度、静弾性係数、乾燥収縮および凍結融解試験は、P C a 梁部材と同一な養生条件でそれぞれの供試体を製作し、JIS A 1108, JIS A 1113, JIS A 1106, JIS 原案, JIS A 1129および ASTM C 290に準じて行った。また一部の圧縮強度については、標準養生条件をも実施した。

(4) P C a 梁部材コンクリートの主な品質管理項目

品質管理項目は、T型熱電対によるコンクリートの温度解析、簡易式貫入抵抗器によるコンクリートの凝結硬化度の判定、2m直定規による平坦さおよびコンクリートテストハンマーの反発

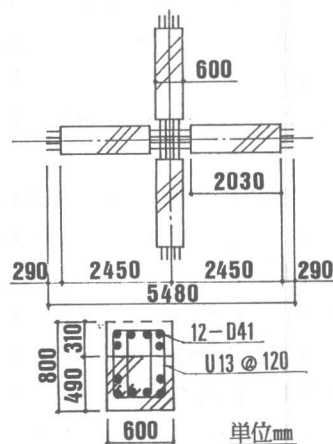


図-1 P C a 梁部材の形状・寸法 (十字梁)

係数による強度推定などを行った。

4. 室内・実機による調査試験結果および考察

4-1. フレッシュコンクリートの品質

(1) スランプ

図-2に示すように、練り混ぜ後60分経過したスランプは、若干スランプロスが大きくなる傾向にあった。室内調査と同様に、気象条件の最も厳しい夏季のスランプロスが大きくなる傾向にあった。練り混ぜ後90分経過したスランプロスは、最大値で6.0cmを示し、ワーカブルなコンクリートで十分な施工使用の確保を実証した²⁾。

(2) 空気量

図-3に示すように、練り混ぜ後90分経過した空気量ロスは、0.3~0.8%の範囲を示し、気象条件の相違による変化が認められなかった。室内調査試験も同様に良好な結果を示した。

(3) プリージング

0.060~0.080cm³/cm²という小さな値を示し、高粘性・高流動性を併せ持ったワーカブルなコンクリートであった。

(4) 塩化物量

0.038~0.051kg/m³と非常に小さい良好な値を示した。

3-2. 硬化したコンクリートの性状

室内および実機による調査の水セメント比35~60%の範囲において得られた圧縮強度、引張強度、曲げ強度、乾燥収縮および凍結融解などの硬化したコンクリートの性状を図-4~図-6に示す。

(1) 材令別による圧縮強度(f_c)と水セメント比(W/C)との相関関係は、 $\gamma = 0.998 \sim 1.000$ であった。

(2) 蒸気養生の材令28日における曲げ強度(f_b)と圧縮強度(f_c)との比は、 $1/6.7 \sim 1/9.9$ であった。

(3) 蒸気養生下のコンクリートの弾性係数(E_{28})は、建築学会式 $E_c = 2.1 \times 10^5 \times \left(\frac{\gamma}{2.3}\right)^{1.5} \sqrt{\frac{F_c}{200}}$ を10%程度上回った値を示したことが確認された。

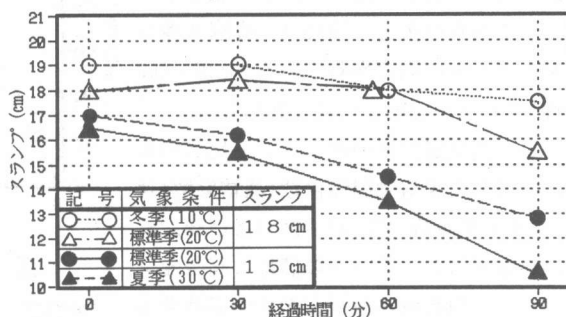


図-2 スランプの経時変化

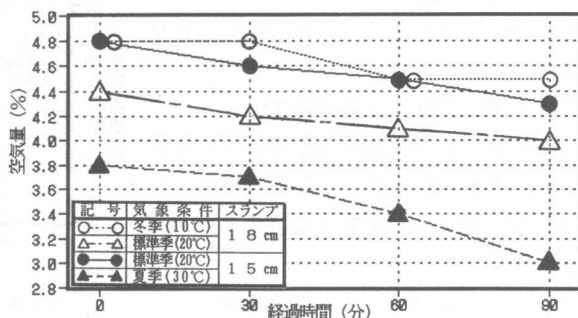
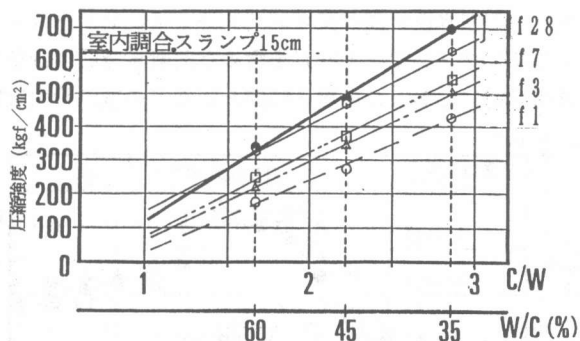


図-3 空気量の経時変化



養生条件		記号	f1, f3, f28とC/Wとの関係
蒸気	○	○	f1=194.7+218.1C/W ($\gamma=0.999$)
	△	△	f3=170.9+234.2C/W ($\gamma=1.000$)
	□	□	f7=180.5+252.8C/W ($\gamma=0.999$)
	○	○	f28=111.5+257.8C/W ($\gamma=0.998$)
標準	●	●	f28=188.2+306.6C/W ($\gamma=0.998$)

図-4 圧縮強度と水セメント比との関係

(4) 蒸気養生下の水セメント比40%および45%の乾燥収縮量は、6ヶ月時点で 501×10^{-6} および 528×10^{-6} という値を示した。これらの値は、JASS 5 高耐久性コンクリートに規定されている $\varepsilon_{c6M} = 600 \times 10^{-6}$ 以下を満足した結果を示した。

(5) 蒸気養生下の水セメント比40%および45%の相対動弾性係数(凍結融解)は、300サイクル時点で85.7%および88.2%の値を示した。これらの値は、高強度コンクリート用高減水性混和剤の性能基準案で評価している耐久性指数80% (凍結融解 300サイクル) 以上²⁾を満足した結果を示した。

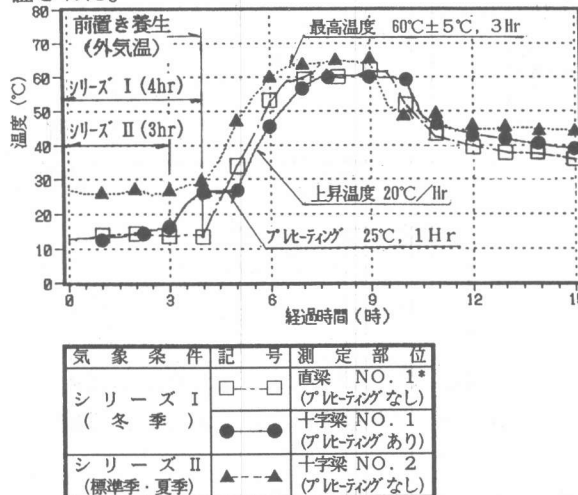
5. PCa 梁部材の実大施工

超高層RC建造物の3階梁のPCa 梁部材 ($F_c = 360 \text{ kgf/cm}^2$) を製作し、その製造技術および品質を実証するために行った。

5-1. コンクリートの温度解析

PCa 梁部材の温度管理を図-7に示す。

通常の硬練りプレキャストコンクリートの前置き時間は、2時間程度である。しかしながら軟練りの高減水性・高強度コンクリートは、シリーズI (冬季) では、最高温度 60°C およびプレヒートリング (25°C , 1 hr) を含めた前置き時間4 hrを設定し、シリーズII (標準季・夏季) では、最高温度 60°C および前置き時間3 hrなどの蒸気養生設定が満足した状況で管理され得ることが実証された。



* 直梁の断面および寸法は、 $490 \times 600 \times 2030 \text{ mm}$ である。

図-7 蒸気養生温度管理図

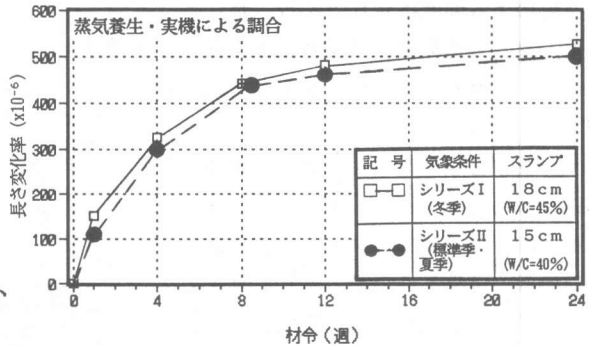


図-5 材令と長さ変化率との関係

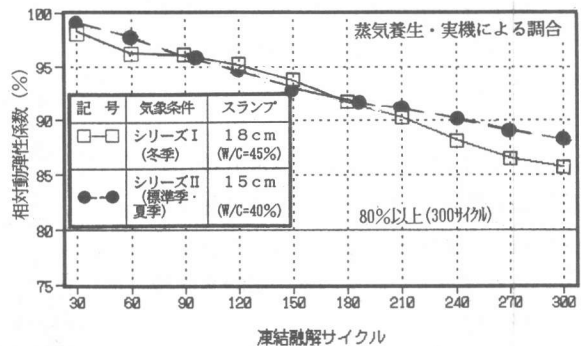
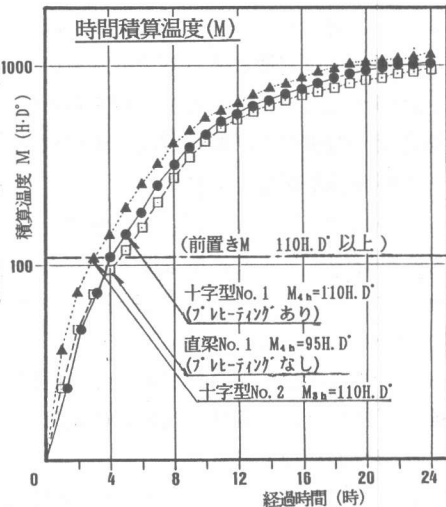


図-6 相対動弾性係数(凍結融解)の経時変化



5-2. コンクリートの非破壊試験

(1) コンクリートの気泡数、前養生時の積算温度(M)および貫入抵抗値(N)と強度発現との関係

表-3 および図-8に示すように、シリーズIにおいて直梁NO.1・NO.2部材は、微細気泡および水分の膨張が生じ、気泡数、気泡径が増大し、コンクリートの緻密性が損われたため、約30%もの強度低下を生じた^{3) 4)}。そこで、前養生時にプレヒーティングを実施し、その結果、順調な強度発現とコンクリート表面気泡・光沢が良好な結果を示した。また、シリーズIIにおいて、全てのP C a梁部材は、コンクリート表面の気泡・光沢および強度発現に良好な結果を示した。

前養生の定量化の一手段として、前置き時間の積算温度管理および簡易式貫入抵抗器による貫入抵抗値(本実験では $M=110H \cdot D'$ 以上、 $N=50\text{psi}$ 以上)を用いることが有効であると判明した。

表-3 コンクリートの非破壊試験結果

気象条件	試験体名	気泡(個)				積算温度 M(H・D')		貫入抵抗値 N (psi)	平坦さ(mm) 最大との差	エンゲルテストハンマー (R)		
		1~2mm	2~5mm	5mm超	判定	前養生時	M24			R1	R7	R28
シリーズI (冬季)	直梁NO.1	251	103	57	×	M4H=95	971	12	0.6	-	-	-
	直梁NO.2	241	54	20	×	M4H=78	958	18	0.7	-	-	-
	十字梁NO.1	36	17	2	◎	M4H=110 (プレヒーティング)	1072	50	0.7	-	-	-
	T字梁NO.1	50	25	4	○	M4H=117 (プレヒーティング)	1107	62	0.9	-	-	-
シリーズII (標準季・夏季)	直梁NO.1	41	25	5	○	M3H=137	1290	125	1.2	31.5	33.9	38.1
	T字梁NO.2	29	11	4	◎	M3H=124	1140	85	0.7	29.8	31.7	35.4
	T字梁NO.3	30	16	5	○	M3H=133	1228	200	1.0	30.5	33.5	37.9
	十字梁NO.2	45	9	6	○	M3H=110	1252	83	1.1	29.5	32.7	36.2

(2) コンクリート表面の平坦さ

2m直定規を用いて測定したP C a梁部材コンクリート表面の平坦さは、JASS 5に規定する $\pm 7\text{mm}$ を満足した $0.6 \sim 1.2\text{mm}$ を示した。

4-3. コンクリートの圧縮強度と反発係数(R)との関係

図-9に示すように、蒸気養生下・標準養生下のコンクリート圧縮強度($\phi 10 \times 20\text{cm}$)とP C a梁部材コンクリート表面の反発係数(R)との関係は、 $\gamma = 0.928 \sim 0.975$ と高い相関性を示した。同一なコンクリートで同一な養生条件においては、P C a梁部材コンクリート表面の反発係数(R)から、コンクリートの圧縮強度を推定できるものと考えられる。

4-3 コンクリートの破壊試験

(1) 各材令時のコンクリートの圧縮強度

図-10および図-11に示すようにシリーズIの直梁NO.1および直梁NO.2(プレヒーティングなし)を除いて、各材令時の圧縮強度(f_c)は、材令1日で脱型時強度 200kgf/cm^2 、材令7日で架設時強度 360kgf/cm^2 と判定基準強度($F_c + 1.27\sigma$)

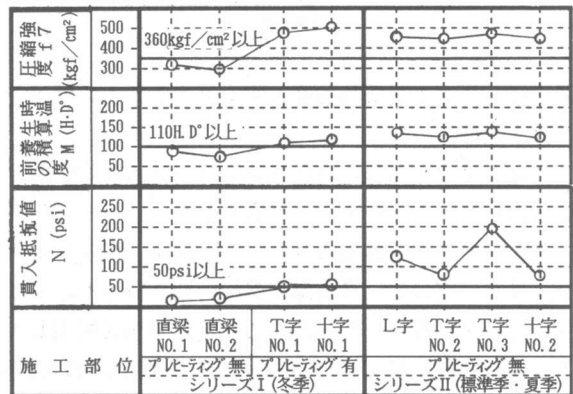


図-8 前養生時の積算温度(M)および貫入抵抗値(N)と強度発現との関係



図-9 圧縮強度と反発係数(R)*との関係

* N型シュミットハンマーによる水平打撃の値である。

405kgf/cm²を満足した値を示した。

(2) 日常管理における蒸気養生と標準養生との関係 (圧縮強度)

図-12に示すようにP C a梁部材と同一養生条件下の圧縮強度 (fc蒸気) は、標準養生下の圧縮強度 (fc標準) と高い相関性にあった。

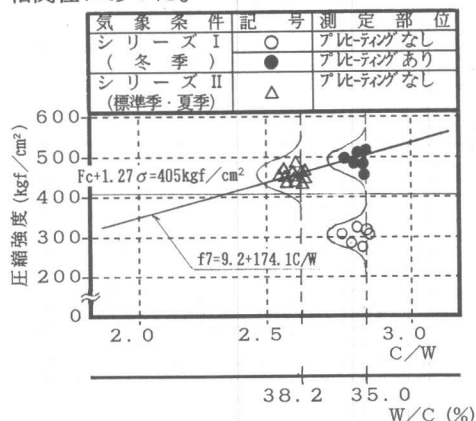


図-11 材令7日圧縮強度と水セメント比との関係

6. 結 論

高減水性混和剤を用いたコンクリートの基本物性は、JASS 5およびJASS 10に規定する高強度・高耐久性コンクリートおよび高強度コンクリート用高減水性混和剤の判定基準²⁾を満足した。

P C a梁の実大施工より、シリーズ I (冬季)では、プレヒティングを含めた前置き時間4 hr, 最高温度60℃, 最高温度保持時間3 hrとし、シリーズ IIでは、プレヒティングなしの前養生3 hrの蒸気養生を行った。この蒸気養生を採用した現場打設P C a梁部材の製作は、前養生終了時の時間積算温度 (110H・D°以上), 簡易式貫入抵抗器による貫入抵抗値 (50psi以上)の組合せで十分にP C a梁部材の製造・品質管理ができるものと考えられる。このことは、コンクリート表面の気泡状態・平坦さ・反発係数の非破壊試験結果と硬化したコンクリートの性状との試験結果より、妥当であったことが実証されたものと考えられる。

以上のことから、本実験で知見されたP C a梁部材の製造技術および品質管理方法が、今後の超高層R C造におけるプレキャスト化率の向上の一助となれば幸いである。

[参考文献]

- 1) 阿久津・中田他14名: 超高層住宅と都市居住 (住宅団地環境設計ノート その7): (社)日本住宅協会: 1989年4月
- 2) 福士・榊田他2名: 高強度コンクリート用高性能減水剤の品質基準および使用基準に関する研究 (その4): 日本建築学会梗概集: 1989年10月
- 3) 吉田・飯坂・杉山: 高温を受けるコンクリートの強度に及ぼす要因に関する研究: セメント技術年報NO. 39: 1985年
- 4) 吉田・飯坂・杉山: 高温養生の変化がコンクリートの特性に及ぼす影響について: 第8回コンクリート工学年次講演会論文集: 1986年

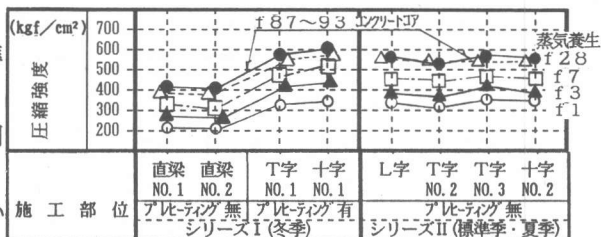


図-10 材令別によるコンクリートの圧縮強度

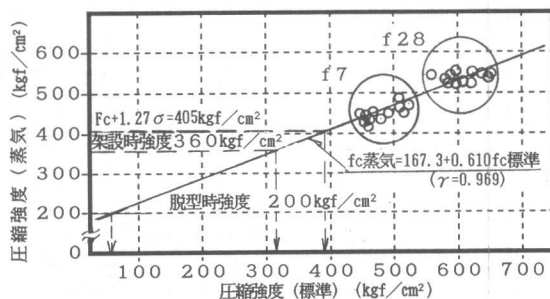


図-12 蒸気養生と標準養生との関係