コンクリート強度の推定式に関する研究 (1)

温度、湿度条件の異なるもとでの任意材令強度の推定方法

普通、早強ポルトランドセメントを使用する場合

正会員 寺 田 米 男*

1. 緒言

現在、われわれがコンクリート強度を推定する場合、JASS 5 に従い、材令 7 日強度から材令 28 日強度を推定する方法をとるか、積算温度方式を用いて限定された積算温度内の任意材令の強度を推定する方法をとっている。また、構造体コンクリート強度を推定する場合は、 $10\phi \times 20\text{ cm}$ または、 $15\phi \times 30\text{ cm}$ の供試体をできるだけ構造体に近い温度で水中養生するよう規定している。しかし、一般の構造物の養生は材令初期に散水養生する程度で長期にわたることはなく、JASS 5 T-603「構造体コンクリートの強度推定のための圧縮強度試験方法」と相違している。実際のコンクリートは常時、地下水位下で水に接している部材から、柱、はりの中心部のように密封養生に近い部材、雨水にふれることのない気中養生に近い部材の範囲内にあるとすることができる。以上のような実態に少しでも近づけるため、本研究では養生条件を水中、密封、気中に大別し、温度を 20°C 、 10°C 、 5°C の低温と上記養生条件を組み合わせた場合の初期から長期に及ぶ材令の強度を試験し、それらの結果に基づいた推定式を提案する。また、本推定式を用いて低温長期材令のコンクリートが、 W/C の小さい範囲で同材令の常温養生強度を上回る性質を数式をもって表示することを可能にした。実験には普通ポルトランドセメント (N・P)、早強ポルトランドセメント (H・P) を用いたコンクリート供試体によってそれぞれの推定式を作成した。ただし、本研究では、セメントの水和熱による影響、構造体から切取ったコア強度との比較、養生温度は 20°C 以上、 -10°C 以下のコンクリートについては対象外とする。

2. 既往の推定式の主なもの

コンクリート強度推定に関する研究報告は極めて多い。ここでは本研究に関係するもののうち主なものをあげる。JASS 5 では材令 7 日から材令 28 日強度を推定

する方法として¹⁾、 $F_{28}=A \times F_7 + B$ とし、係数 A 、 B をセメント別、コンクリート温度別に与えている。任意材令の強度を求める方法としては積算温度方式を用いるこ

図-1 W/C と強度の関係

本報告の一部は昭和 57 年 10 月、日本建築学会大会 (東北) で発表した。

* 北海学園大学 教授

(昭和 60 年 5 月 30 日原稿受理)

とができる。JASS 5「寒中コンクリート」で洪氏^{7)~9)}の積算温度 M ($^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$) 方式による $M = \sum_{z=1}^Z (\theta_z + 10)$ ($^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$) から α を求め、これを用いて所要の W/C 、強度を算定する方式が規定され、 $210^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ (20°C で材令 7 日)、($\text{H}\cdot\text{P}$ を用いる場合は $105^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$) 以上 $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ (20°C で材令 28 日) まで適用できるとしている。土木学会「コンクリート示方書 解説」³⁾ でも同様な解説を行っている。また、「コンクリート調合設計・調合管理・品質検査指針案、同解説」²⁾ において笠井氏^{5), 6)} は材令 3 日までの初期材令強度を求める方法として積算養生温度 $^{\circ}\text{T}\cdot\text{T}$ から強度を求める推定式を発表している。一方、J. M. Plowman¹⁰⁾ は片対数紙の横軸に積算温度をとり、縦軸に強度をとるとき、直線関係にあるとしているが、これには異論⁴⁾ があり、筆者の実験でも直線とはならない。

つぎに、材令と強度の関係を飽和式を用いて説明しているものがある。Goral¹²⁾ の式。 $f = \frac{t}{b + m \cdot t}$ (ここに、 b , m は定数)。Klieger, Gonnerman の式¹³⁾, $D/q = mD + C$ (ここに、 C : 材令, または積算温度, q : D に応ずる強度, m , C : 定数)。上記, Goral の式を用いて中山氏は実験値と比較しており¹⁴⁾, セメント協会の最近の報告¹⁶⁾ でも上式に似た式を用いて試験結果の解析を行っている。

3. 実験内容

a) 使用材料

- i) セメント: 普通ポルトランドセメント (N・P), 早強ポルトランドセメント (H・P)
- ii) 細骨材: 苫小牧海砂 (除塩前平均 0.11 %, 除塩後 0.00 ~ 0.02 %), 粗粒率: 2.48, 表乾比重: 2.74
- iii) 粗骨材: 石狩当別川砂利, 表乾比重: 2.63
- iv) 水: 水道水 (品質は表—1 に示す)。

b) 調合条件

粗骨材の最大寸法: 25 mm, 目標スランプ: 18 cm, nonAE コンクリート。 W/C : 45, 55, 65, 75 %。ミキサは強制練ミキサ, 最大容量 0.25 m^3

c) 養生温度

20, 10, 5°C

d) 養生環境 (恒温室内)

水中, 密封 (塩ビ管, 内径 10 ϕ , 高さ 20 cm, 底板は

ビニル板, 頂部はビニルシートで試験時まで密封), 気中 (20°C で $R\cdot H$ 60 ~ 65 %, 10°C , 5°C で 65 ~ 70 %)

e) 試験材令

3, 7, 14, 28, 56, 91 日 (気中養生供試体は 183 日, 365 日分を追加)

4. 実験結果と推定式の作成および他のデータとの比較

実験結果のうち, $W/C=45$ %, 65 %, 温度 $=20^{\circ}\text{C}$, 5°C の供試体強度と材令の関係図を示す (各曲線は実験結果から作成された推定式によって画いた)。

4.1. 20°C 養生圧縮強度

a) 水中養生 (記号を W とする)

実験結果に基づく任意材令コンクリート強度の基本式はつぎのとおり。

$$F = f_t \cdot F_{28} \dots \dots \dots (1)$$

ここに, F : 任意材令コンクリート強度 (kg/cm^2), F_{28} : 材令 28 日強度の C/W 一式 (kg/cm^2), f_t : 材令 28 日強度を 1.00 とする任意材令強度比。

まず, 材令 28 日の強度式 F_{28} について, N・P で $F_{28} = -80 + 200 X$, H・P で $F_{28} = -80 + 215 X$ の近似式が得られた。これは昭和 32 年度版 JASS 5 の標準式 $x = \frac{61}{F/K + 0.34}$ ($^{\circ}/\text{wt}$) を用い, K (セメントの材令 28 日圧縮強さ) を N・P で $370 \text{ kg}/\text{cm}^2$, H・P で $400 \text{ kg}/\text{cm}^2$ とした場合に比較的良好に合致する。 X : c/w

つぎに, 強度比式 f_t について説明する。

$$f_t = \frac{t}{t + \lambda \cdot x (28 - t)} \dots \dots \dots (2)$$

ここに, t : 材令 (日), λ : 係数。 x : W/C

上式は Goral の式を変形したものであり, 材令 28 日の強度比が W/C の大小にかかわらず 1.00 とし, 分母の $\lambda \cdot x$ の小さいものほど初期強度強度比が大きいが, 材令 28 日以降の長期材令強度比の伸びは小さい。逆に $\lambda \cdot x$ の大きいときは上記の強度比は反対となる。また, x が同一で λ が小さいときは早強性のセメントを用いた場合であり, 逆の場合は遅硬性のセメントを用いた場合である。本式は既往の多数の試験結果, および信頼できる諸資料と参照し^{15)~17), 37)}, 任意の W/C , 材令の強度値と比較した結果, その適合性が高いことから採用したものである。本実験における λ 値は N・P で 0.40, H・P で 0.20 に近似した (本実験値において N・P で $\lambda=0.40 \pm 0.05$, H・P で $\lambda=0.20 \pm 0.03$ 以外の数値発生率が 10 % 以下なので試験誤差として除外した。これは材令 7 日強度比で ± 3 % 以内の値である)。また, 適用範囲は $W/C=40 \sim 75$ % とする。 λ 値は基本的には材令 7 日と材令 28 日強度から算定できるが, セメントの種類, 銘柄によって左右される。セメント協会が報告した 11 年間の平均値¹⁵⁾ は N・P で 0.35, H・P で 0.17 であり, 最近の同協会の報告¹⁶⁾ から計算すると, N・P で 0.34,

表—1 水道水の水質

試験項目	測定値	回数
色 度 (度)	1	12
濁 度 (度)	0.1	12
水素イオン濃度 (mg/l)	6.7	48
蒸発残留物 (mg/l)	66	4
塩素イオン (mg/l)	17.1	12
塩素消費量 (mg/l)	1.5	12

札幌市水道局 昭和 56 年度

図—2 養生条件と強度の関係

H・Pで0.16となっており、筆者の最近の他の実験例³⁶⁾でもN・Pで0.35, H・Pで0.17を示しており、通常N・Pで0.30~0.40, H・Pで0.15~0.20を示していることから、標準値としてN・Pで0.35, H・Pで0.175とすることとした(AEコンクリートでは強度上のW/Cに置換して λ を求める)。しかし、AE減水剤促進形などを用いると λ は著しく減少し、粗骨材として碎石を用いる場合も若干の低下傾向をみせる。 f_t の材令との関係は図—4, 5のようになる(図中の λ はN・Pで0.40, H・Pで0.20)。

b) 密封養生(記号をSとする)

任意材令のS養生コンクリート強度式の基本型は(1)式と同型であるが式中の各係数は異なる。材令28日強度式はN・Pで $F_{28} = -35 + 130 X$, H・Pで $F_{28} = -25 + 165 X$ となり、いずれもW養生強度より劣る。つぎに、材令28日強度を1.00とする強度比式の基本型はつぎのとおり。

$$f_t = \frac{t}{t + \lambda \cdot x^m (28 - t)} \dots \dots \dots (3)$$

上式をみると、W養生時の(2)式の λx が λx^m に変化し、本実験において、 m 値はN・P, H・Pとも2.0に近似し、 λ 値はW養生時と同じく、N・Pで0.40, H・Pで0.20となった(本実験で $m = 2.0 \pm 0.2$ 以外の値は発生率が5%以下なので試験誤差として除外した。これは7日強度比で $\pm 30\%$ 以内の値である)。適用範囲はW/C=40%~75%とする。ここで m 値を1.00より大きくすると f_t の分母がW養生時より小さくなり f_t は大きくなる。S養生時は水の補給がないため、初期材令の f_t は比較的大きいが長期材令となるに従い強度の伸びは小さくなり、 $f_t \cdot F_{28}$ はW養生時より小さい。S養生時の強度で本実験の値と比較できる適当な参考例はなかった。したがって、(3)式の m 値はN・P, H・Pとも2.0とする。

(a)

(b)

(c)

(d)

図—3 養生条件と強度の関係

図—4 材令と強度比の関係

図—5 材令と強度比の関係

c) 気中養生 (記号をAとする)

コンクリートが乾燥し、水和に必要な水まで失われる気中養生時の強度式も基本的には (1) 式に準ずる。本実験の N・P の場合、材令 28 日以前の見掛け養生強度は S 養生時を上回るが W 養生時に劣り、材令 28 日では W 養生、S 養生、A 養生の順となる。材令 28 日の強度式は N・P で $F_{28} = -90 + 170 X$ 、H・P で $F_{28} = -15 + 145 X$ に近似した。材令 28 日の見掛け強度を 1.00 とする場合の強度比は、材令 7 日で N・P で 0.85、H・P で 0.90 位と大きい、材令 91 日頃から強度が低下し始め (図—8、図—9、(5)、(7) 式参照)、材令 1 年位で落着きそうである。式で表せば

$$\text{N} \cdot \text{P} \quad t \leq 91 \text{ 日} \quad f_t = \frac{t}{t + 0.06(28 - t)} \dots\dots\dots (4)$$

$$t \geq 91 \text{ 日} \quad f_t = \frac{t}{t + 0.06(28 - t)} - \frac{0.1 t_{m1}}{t_{m1} + 0.18(147 - t_{m1})} \dots\dots\dots (5)$$

図—6 材令と強度比の関係

図—7 材令と強度比の関係

$$\text{H} \cdot \text{P} \quad t \leq 91 \text{ 日} \quad f_t = \frac{t}{t + 0.0375(28 - t)} \dots\dots\dots (6)$$

$$t \geq 91 \text{ 日} \quad f_t = \frac{t}{t + 0.0375(28 - t)} - \frac{0.1 t_{m1}}{t_{m1} + 2.5 \times 0.075(639 - t_{m1})} \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $t_{m1} = (t - 91)$ 日、A 養生の場合、図—8、図—9 にみられるごとく W/C による差を曲線で限定することができず (4)~(7) 式の分母に x のない式となった。強度の減少は最終的に N・P、H・P とともに 10 % 内外とみられる。

ここで、他の実験報告と比較する。山根氏ら¹⁸⁾は A 養生の場合、W 養生に対し、N・P の材令 28 日強度の 25 %、材令 91 日では 33 % の強度低下があったとしているが、筆者の結果でも N・P で W/C=65 % の場合、材令 28 日で 25 %、材令 91 日で 34 % の低下を示しており略一致する。ただし、同氏らは H・P について N・P より強度低下が著しく、W/C の小さいものほどその傾向が大きいとしているが、筆者の結果では N・P より強度低下が少なく、材令 28 日で 17 % 減、材令 91 日で 27 % 減となり相異している。また、筆者が併わせて行った重量

図—8 材令と強度比の関係

図—9 材令と強度比の関係

測定でも H・P の方が N・P より重量減少が少なくなっている。長期材令の強度低下について柴田氏²¹⁾, その他^{22), 23)}からも材令 91 日頃より強度が低下すると報告している。一方, 初期養生した場合は強度低下がなかったとする報告がある。セメント協会の報告²⁴⁾で $W/C=65\%$ のコンクリートを脱型後 6 日間標準養生した後, 材令 3 年まで室内養生した場合, その強度は材令 28 日強度と差がなかったとしており, 椎名氏ら²⁸⁾は標準養生 28 日後, 60 ヶ月まで室内養生した場合, その強度は材令 28 日強度の 1.10 倍であったとしている。これらの結果をみても初期養生の重要性を認めることができる。

4.2 20°C 以下養生圧縮強度

20°C 以下の低温時の強度を求める場合, (1) 式に温度補正式を乗じて求める。この場合の基本式はつぎのとおりである。

$$F = f_0 \cdot f_t \cdot F_{28} \dots \dots \dots (8)$$

ここに, f_0 : 温度補正式。式を作成するにあたり, 低温で長期養生したコンクリート強度が同一調合, 常温養生したコンクリート強度を上回ることがあり, その傾向は W/C の小さいときほど, 早強性のセメントを用いたときほど, その傾向が大きい。この性質は積算温度方式だけでは説明できない。また, この性質を数式を用いて示した報告にもまだ接したことがない。本研究ではまづこの性質を数式で示すことができるようにする。つづいて

- a) 現行の水準のセメントで強度発現が停止する温度はどれ位か?
- b) 低温初期材令ほど低強度であるが, 材令とともに長期間にわたり上昇するが, ある限度に達すると停止する。
- c) b) のような長期材令での強度の伸びが最大となるのは 0°C より少し高い温度であること。

以上のような条件を満たすような実験式を原型とし, 各種のデータを参考にしながら修正し, 適当な標準式を作成した。まづ, a) について, 標準砂モルタルで W/C を 45, 55, 65 % の供試体を製作し (JIS R 5201

によるモルタル配合で, セメント:1, 標準砂:2, $W/C=65\%$ を基準とし, W/C が 55 %, 45 % のモルタルについてはセメントのみ増量した。したがってフロー値は一定でなく W/C が小さくなるにしたがい小さくなる), 温度を 20°C, -10°C, -15°C, 材令 1, 3, 7, 14, 28 日で強度実験した (材令 1 日脱型時まで 10°C 養生し, 各材令強度から脱型時強度を差引く)。20°C 養生は水中, 他は封かん養生とし, 各試験時材令で約 2 時間で解氷した。試験結果を図-10 に示す。これを見ると -10°C でも或程度の強度増進がみられ, -15°C で略停止している⁹⁾。しかし, 安全をみて -10°C で 0 となる $\theta = \frac{\theta_z + 10}{30}$ (θ_z は養生温度) を温度単位とした。なお, W/C が 65 %, 5°C を基準としても, N・P と H・P に差があるので, N・P で $\theta^{0.75}$, H・P で $\theta^{1.5}$ とした。b) については初期材令では小さいが, 長期材令では大きくなるような飽和曲線とし, $W/C=65\%$, 5°C 養生を基準とした場合, 材令 1 年で N・P で 20°C 養生強度と同値以上²⁶⁾, H・P で 20°C 養生強度の 1.15 倍位²⁶⁾になるような材令項を設けた。

c) については 2°C で長期養生したものが最も強度の伸びが大きくなるものと仮定した温度調整項である。

以上の 3 条件を組み合わせたものが温度補正式 f_0 であり, 実験結果を参考にしながら標準式として次式を与えた。

$$\text{N・P } 20^\circ\text{C} \geq \theta_z \geq 2^\circ\text{C}$$

$$f_0 = \theta^{0.75} \cdot \exp \left\{ \left(\frac{0.7t}{t+0.05(365-t)} - \frac{1}{t} \right) \left(\frac{1}{\theta} - 1 \right) \right\} \dots \dots \dots (9)$$

$$2^\circ\text{C} \geq \theta_z \geq -10^\circ\text{C}$$

$$f_0 = \theta^{0.75} \cdot \exp \left\{ \left(\frac{0.7t}{t+0.05(365-t)} - \frac{1}{t} \right) (3.75\theta) \right\} \dots \dots \dots (10)$$

$$\text{H・P } 20^\circ\text{C} \geq \theta_z \geq 2^\circ\text{C}$$

$$f_0 = \theta^{1.5} \cdot \exp \left\{ \left(\frac{0.7t}{t+0.05(365-t)} - \frac{1}{t} \right) \left(\frac{1}{\theta} - 1 \right) \right\} \dots \dots \dots (11)$$

$$2^\circ\text{C} \geq \theta_z \geq -10^\circ\text{C}$$

$$f_0 = \theta^{1.5} \cdot \exp \left\{ \left(\frac{0.7t}{t+0.05(365-t)} - \frac{1}{t} \right) (3.75\theta) \right\} \dots \dots \dots (12)$$

図示すると, 図-11, 12 となる。これら上記の f_0 式を 20°C の W 養生, S 養生, A 養生時の $f_t \cdot F_{28}$ に乗すると各種養生時の強度が得られる (図-11, 12 参照)。

4.3 低温時の強度式の検証

ここで, 筆者の作成した推定式 (8) 式と他の報告のデータを比較する。それらのデータの実験条件と筆者の実験条件は同一でなく, 低温の要因も加わるので厳密な比較とはならないが, 近似した値となる筈である。

初期材令について, 笠井氏の °T・T 方式の場合の材令

図-10 低温時の強度の発現状況

図-11 材令と温度補正値の関係

図-12 材令と温度補正値の関係

3日までの強度を比較する。同氏は材令3日、20°Cの強度比を1.00としているが、筆者の $W/C=65\%$ 、材令3日の発現率の場合、N・Pで35%、H・Pで51%となるので、置換して比較したものが表-2である。その強度比は材令1日では凝結時間などの影響でその差は大きい、材令2~3日と進むに従い両者は接近する。つぎに、洪氏の方法による標準値²⁵⁾と筆者の5°C、材令7、14日の値を比較したものが表-3である。筆者の方法では $^{\circ}D \cdot D$ が同一であっても養生温度が異なると強度比も異なる。N・Pの $210^{\circ}D \cdot D$ の各値とH・Pの $105^{\circ}D \cdot D$ の各値で両者は近似するが、H・Pで5°Cの $210^{\circ}D \cdot D$ の場合、 W/C の小さい部分で筆者の方が大きい値を与えている。ついで、材令28日における温度と W/C の関係による強度比を洪氏²⁵⁾と筆者の値で比較したものが表-4である。一般的には W/C が小さく、高温になるに従い強度比の値が大きくなるのは当然であるが、筆者の方法では W/C 間、温度間の値の差が大きい。さらに、

表-2 低温初期材令の強度比の比較

品 種	℃	圧 縮 強 度 比					
		笠 井 氏			筆 者		
		1 日	2 日	3 日	1 日	2 日	3 日
N・P	20	0.09	0.23	0.35	0.14	0.25	0.35
	10	0.04	0.15	0.24	0.06	0.14	0.20
	5	0.01	0.07	0.12	0.03	0.08	0.14
H・P	20	0.13	0.33	0.51	0.25	0.40	0.51
	10	0.03	0.22	0.36	0.11	0.23	0.33
	5	0.01	0.07	0.20	0.05	0.15	0.23

表-3 積算温度方式との比較

W/C (%)	840 $^{\circ}D \cdot D$ 時を100とした強度比			
	210 $^{\circ}D \cdot D$ 時		105 $^{\circ}D \cdot D$ 時	
	N・P		H・P	
	洪 氏	筆 者	洪 氏	筆 者
45	64	68	60 (76)*	62 (85)
55	59	59	53 (72)	53 (75)
65	54	50	47 (68)	45 (65)
75	48	45	40 (64)	36 (56)

* () 内は210 $^{\circ}D \cdot D$ 時

表-4 養生温度による強度比

養生 温度 (℃)	洪 氏							
	普 通 ボ ル ト				早 強 ボ ル ト			
	水セメント比 (%)				水セメント比 (%)			
	45	55	65	75	45	55	65	75
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
15	0.96	0.96	0.95	0.94	0.97	0.97	0.96	0.95
10	0.91	0.90	0.88	0.87	0.93	0.92	0.91	0.90
5	0.84	0.81	0.80	0.77	0.89	0.86	0.85	0.82
0	0.73	0.70	0.66	0.62	0.81	0.78	0.75	0.72
-5	0.48	0.43	0.39	0.32	0.67	0.61	0.57	0.51
筆 者								
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
15	0.95	0.93	0.90	0.88	1.00	0.97	0.94	0.90
10	0.92	0.87	0.82	0.77	1.01	0.95	0.88	0.82
5	0.92	0.83	0.75	0.67	1.09	0.97	0.86	0.75
0	0.77	0.65	0.55	0.46	0.99	0.83	0.68	0.55
-5	0.37	0.28	0.22	0.16	0.56	0.42	0.30	0.22

H・Pについて筆者の式は W/C の小さい範囲で、低温、材令28日強度比が20°Cの標準養生強度比を上回る特徴をもつ。N・Pの $W/C=65\%$ 、5°Cについて比較すると、洪氏の80%、筆者の75%、西氏ら²⁹⁾の値が79%となっており、また、H・Pの $W/C=65\%$ 、5°Cについて比較すると、洪氏の85%、筆者の86%に対し、嵩氏ら³⁰⁾の値では92%を示している。材令28日以降の低温、長期材令における強度発現に関する実験例で比較できるものは少ないが、N・Pに対し、前記、西氏らの同一実験の材令91日の値と比較すると、5°C養生で同一材令標準養生強度比の88%であり、かつ、標準養生28日強度と略同一の値を示している。

これを筆者の方法で比較すると、上記の88%に対し92%を示し、かつ、20°C、28日強度比と5°C、材令

91日強度とが、両者とも略一致し、同一傾向を示している。H・Pの低温、長期材令での強度で比較できる適当な例はなかった。

5. まとめ

本研究は各種の養生条件下における任意材令のコンクリート強度の発現状況をできるだけ数式を用いて表現することを目的としたもので、N・P、H・Pセメントを用いたコンクリートをW養生、S養生、A養生し、温度を20、10、5°Cに選び、主として材令91日までの強度を測定し、それらの得られた結果と各種のデータを参考にしながら、つぎの基本式を与えた。

$$F = f_0 \cdot f_t \cdot F_{28}$$

$F_{28} \cdot f_t$ には、各セメント別、養生環境別の算定式が与えられ、任意材令の20°Cの時の強度が得られる。 f_0 は温度補正式でN・P、H・Pセメント別に式が与えられ、本式を乗じて20°C以下の強度が得られる。本式は20°C〜10°C間に適用される。

他の報告者のデータと比較した場合、W養生時のデータは多いが、S養生、A養生のデータは少なく、対比できるものが少なかった。初期材令の場合、A養生で見掛けの強度が高く表示されるものもあるが、通説どおりほぼ、W養生、S養生、A養生の順となる。W養生、低温長期材令でW/Cの小さい範囲内で常温の同一条件のコンクリート強度を上回るものがある。S養生では自己保有水のみで養生されるので強度はW養生時のそれを下回るが、長期材令まで徐々に強度は増進する。A養生では、N・P、H・Pとも材令91日頃より強度低下の傾向を示すがその値は10%以内である。

以上、本報告では各種条件下のコンクリート強度を数式をもって表示できるようにした。なお、高炉セメントB種、フライアッシュセメントB種を用いたコンクリートについても同様な実験を行い、推定式を作成した。これについては引続き発表する。

6. 謝 辞

本報告をまとめるにあたり、コンクリート、とくに、寒中コンクリートの施工の実務、研究を通じて長年にわたり御指導、御教示をいただいた恩師の北大 洪教授に厚く御礼申し上げます。また、筆者が勤務する大学で卒業論文の実験で本研究に関係された多くの卒業生、および実験に協力された職員の菊地 守君に厚く感謝します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：JASS 5鉄筋コンクリート工事，昭和56年度版
- 2) 日本建築学会：コンクリート調査設計・調査管理・品質検査指針案・同解説，昭和54年
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 解説
- 4) P. Klieger：Discussion of Maturity of Strength of Concrete by J.M. Plowman Mag. of Concrete Research, Nov. 1960

- 5) 笠井芳夫：先に提案したコンクリート初期圧縮強度推定方法の適用性について，日本建築学会論文報告集，第163号
- 6) 笠井芳夫：極く早期脱型するコンクリートの強度に関する実験的研究（その1，その2），日本建築学会論文報告集，第179号，第180号
- 7) 洪 悦郎：寒中に施工したコンクリート強度推定について，日本建築学会論文報告集，第141号
- 8) 洪 悦郎：RILEMの寒中コンクリート施工指針，セメントコンクリート，No.214
- 9) RILEM：寒中コンクリート委員会：Recommendation for Winter Concreting, 1962
- 10) J.M. Plowman：Maturity and Strength of concrete, Mag. of Concrete Research, Mar. 1956
- 11) 佐藤純夫ほか：ポルトランドセメントの水和熱およびモルタル強度などを計算する新しい公式の提案，セメント・コンクリート，No.166
- 12) M.L. Goral：Empirical Time-Strength Relation of Concrete, A.C.I., Aug. 1956
- 13) C.F. Kee：Relation Between Strength and Maturity of Concrete, A.C.I., Mar. 1971
- 14) 土木学会：コンクリートの品質管理試験方法，コンクリートライブラリー，第38号
- 15) 松橋均次郎：最近11年間のわが国セメント品質の推移，セメント・コンクリート，No.379
- 16) セメント協会：最近のセメントによるコンクリートの初期強度に関する共同試験報告（その1，その2），F-34，F-36
- 17) 運輸省港湾技術研究所，セメント協会：コンクリートの耐海水性に関する研究—材令10年試験結果—56年3月
- 18) 山根 昭ほか：コンクリート強度に及ぼす供試体，養生および試験方法の影響，セメント・コンクリート，No.313
- 19) 山根 昭ほか：RC構造体のコンクリート強度に関する研究，竹中技術研究報告，No.22，1979
- 20) 高橋久雄ほか：構造体の強度管理に関する研究（その1〜その11）日本建築学会大会学術講演梗概集，52〜53年
- 21) 構造標準委員会：コンクリートの品質変動，建築雑誌，Vol.94，No.1153，昭和54年
- 22) 長谷川寿夫，杉山 雅：構造体コンクリートの乾燥と力学的性状に関する研究，日本建築学会論文報告集，第295号
- 23) 杉山 雅：構造体コンクリートの力学的性状に及ぼす乾燥の影響に関する研究，学位論文
- 24) セメント協会：各種セメントを用いたコンクリートの長期強度に関する共同試験報告，F-17
- 25) Paul Klieger：Effect of mixing and Curing Temperature on Concrete Strength A.C.I., June, 1958
- 26) 土岐高史ほか：超早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートの基本的性状に関する共同研究，セ技年報ⅩⅦ，昭和47年
- 27) 椎名国雄ほか：屋内，屋外乾燥の相違が長期材令コンクリートの強度およびヤング係数に及ぼす影響，セ技年報33，昭和54年
- 28) 西 晴哉ほか：各種セメントを用いたコンクリートの性状，セ技年報33，昭和54年

- 30) 嵩 英雄ほか：コンクリート強度に及ぶ養生温度の影響，セメント・コンクリート，No. 362
- 31) 寺田米男：低温養生したモルタル・コンクリートの強度推定の一方法，セ技年報 30，昭和 51 年
- 32) 寺田米男：密封養生したコンクリートの強度，セ技年報 33，昭和 54 年
- 33) 寺田米男：セメント・コンクリート強度に及ぶ温度，湿度の影響について，セ技年報 35，昭和 56 年
- 34) 寺田米男：セメント・コンクリート強度に及ぶ温度，湿度の影響について（混合セメントを用いた場合）セ技年報 36，昭和 57 年
- 35) 寺田米男：各種養生条件下におけるコンクリート強度の推定方法に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和 57 年
- 36) 寺田米男：異った養生条件下におけるコンクリートの強度とスランプの関係，日本建築学会大会学術講演梗概集，昭和 58 年
- 37) 寺田米男：コンクリート強度を推定する新手法，セメント・コンクリート，No. 446

SYNOPSIS

UDC : 691.32

STUDY ON THE ESTIMATING FORMULAS OF CONCRETE STRENGTH (Part-1)

by YONEO TERADA, Professor of Hokkai gakuen
University, Member of A. I. J.

In this paper, author proposes the estimated formulas. They show the concrete strength of arbitrary ages in the different curing conditions : water, seal and air at 20°C and below 20°C. They cover from early age to late. Natural portland cement and higher strength portland cement are used in the experiment.