

論文

[1093] 成長曲線によるコンクリート強度推定法の研究

正会員○吉田隆行 (佐賀宇部コンクリート工業 中央研究所)
 岡永 健 (佐賀宇部コンクリート工業 中央研究所)
 御厨 祐 (佐賀宇部コンクリート工業 管理部)
 正会員 大坪正典 (東和大学 建設工学科)

1. はじめに

非破壊試験によるコンクリート強度推定法には、シュミットハンマー法、超音波速度法、これらの組み合わせ法等種々あるが、その中の一つに積算温度法(マチュリティ法)がある。この方法は、コンクリート強度の発現が養生温度と養生時間の積の関数で表されるという原理に従っている。実際に、寒中コンクリートの分野では水セメント比の決定、寒中コンクリートの期間の決定、初期養生の打ち切り及び型枠の取りはずし時期の決定、任意の材令の強度推定などに利用されている[1]。しかし、最近、この方法もいくつかの問題点があるとして洪らによって成長曲線の一つであるロジスティック曲線の導入がなされ、これらを解決できるようなコンクリートの強度推定式が提案されている [2~4]。しかし、レデーミクストコンクリート (JIS A 5308) による標準養生 (20±2℃) 及び養生温度が日々変化する養生方法 (構造体コンクリートの強度推定をするための養生法: 現場水中養生) によるコンクリートの強度推定式は、まだ、提案されていない。

そこで、本研究では、既報文献[2~4]の温度条件とは異なる上記の方法により試験を行った。そして、得られた積算温度と圧縮強度の関係に対する成長曲線であるロジスティック曲線 (変曲点を中心に左右対称) 及びゴンペルツ曲線 (変曲点を中心に左右対称ではない) の適用性を検討したものである。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

本実験にて使用する材料と主な性質は、表-1 に示すとおりである。セメントは、普通ポルトランドセメント(以下Nと略す) 及び高炉セメントA・B種(Nに高炉スラグ微粉末を混合したもの。以下BA・BBと略す) を使用した。

表-1 使用材料と主な性質

使用材料	主な性質
セメント 普通ポルトランドセメント	比重=3.15, 比表面積=3190 cm ² /g
細骨材	砕 砂 武雄産, 比重=2.64, F.M=2.90
	海 砂 唐津産, 比重=2.57, F.M=2.50
粗骨材 2005 砕石	嘉穂産, 比重=2.89, F.M=6.47
混和剤 A E 減水剤	標準形, 有機酸系誘導体, 比重=1.29
混和材 高炉スラグ微粉末	比重=2.90, 比表面積=4100 cm ² /g

2. 2 配合及び試験の条件

配合及び試験の条件は、表-2 に示すとおりである。セメントは、N, BA, BBの3種類とし、各セメントに対して水セメント比 (W/C%) を 3, 1, 1 種類の計5種類、更に、各水セメント比に対して練り上がり温度(℃) を 6, 4, 6 種類の計28種類の配合及び条件について試験をした。なお、BA, BBは、表-1 に示すNと高炉スラグ微粉末を質量で各々、84:16, 60:40で混合したものである。細骨材は、砕砂と海砂を50:50に混合使用した。細骨材率(s/a%)は、各々48.8%(W/C 63%時),

49.4%(W/C 71%時), 50.0%(W/C 76,75%時)とした。空気量は、 $4 \pm 1\%$ の範囲に入るように、AE助剤を用いて調整したが、同一配合時の各練り上がり温度差によるスランプ(目標12cm)の差($\pm 3\text{cm}$)は、水セメント比, 単位セメント量, 単位水量を一定にするため補正しなかった。圧縮強度試験の材令は、一部異なるが全配合12材令とした。供試体寸法は $10\phi \times 20\text{cm}$ とした。

2. 3 養生温度と積算温度

練り上がり温度は、表-2, 3のとおりであるが、練り混ぜから脱型まで2日間かかるため、その間は練り上がり温度を保った。2日目以降は、供試体を二つのグループ(標準養生・現場水中養生)に分けて養生した。標準養生とは、JIS A 5308, A 1132と同じく $20 \pm 2^\circ\text{C}$ とし恒温水槽にて養生したものである。現場水中養生とは、表-3に示すとおり各練り上がり温度ごとに養生開始時期を変えて、できるだけ練り上がり温度に近くなるようにしたものであり、水槽としてドラム缶を半分に切ったものを使用し、上から木製の蓋をした。なお、水温は自動温度記録計により測定した。現場水中養生の初期の平均温度を練り上がり温度に大約合わせる計画でスタートさせたが、結果は表-3に示すとおり練り上がり温度 5~15 $^\circ\text{C}$ では、あまり差がない結果となった。

積算温度は、一般的な次式(1)により求めた[5]。

$$M = \sum_0^t (\theta + 10) \Delta t \quad (1)$$

ここに M : 積算温度 ($^\circ\text{C} \cdot \text{H}$)

t : 材令(時間)

θ : Δt 時間中のコンクリート温度($^\circ\text{C}$)

Δt : 時間(H)

3. 結果及び考察

3. 1 実験結果

圧縮強度試験の結果は、各練り上がり温度別に図-1~8に示す。なお、図中の“○S”は標準養生, “●W”は現場水中養生を示す。図-1~8を見てわかるように、練り上がり温度が低いほど強度の伸びは大きい。また、N及びBAは、標準・現場水中養生ともに同一曲線を描いて推移するが、BBは、標準養生と現場水中養生では別の曲線を描くように強度が推移する。BBにおいて、練り上がり温度 5~15 $^\circ\text{C}$ の範囲では標準養生よりも現場水中養生の方が材令1年まで低い強度を示した。20 $^\circ\text{C}$ 以上になると最初は、現場水中養生の方が高い強度を示しているが、 $5 \times 10^4 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{H}$ あたりで逆転して標準養生の方が高い値を示している。

3. 2 成長曲線の適用

成長曲線の一つであるロジスティック曲線は、一般に(2)式で表され $t = \infty$ のとき $e^{-\beta t} =$

表-2 配合及び試験の条件

セメント	W/C (%)	練り上がり温度 ($^\circ\text{C}$)	試験材令 (日)													
			1	2	3	4	5	7	14	21	28	60	91	184	365	
N	6.3	5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	7.1	15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		25	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		30	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
BA	6.3	5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	7.1	20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		30	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
BB	7.5	5	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	7.1	15	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		25	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		30	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	

表-3 練り上がり温度と現場水中養生の関係

練り上がり温度 ($^\circ\text{C}$)	養生開始時期 (月)	養生開始より材令28日までの平均水温 ($^\circ\text{C}$)
5	1 ~ 3	10.3
10	11 ~ 1	8.3
15	11	11.1
20	5, 9	22.9
25	6, 9	27.0
30	7, 9	29.2

0であるから $y = \gamma$ となり、また、 $t = -\infty$ のとき $y = 0$ となる。

$$y = \frac{\gamma}{1 + \alpha e^{-\beta t}}$$

ロジスティック曲線は、 $t = 1 \log \alpha / \beta$ の変曲点に達するまでは加速的に成長し、変曲点で水準 $\gamma/2$ に達し変曲点を超えると成長の伸びはゆるやかになって行き、やがて飽和水準 γ に近づいて行くという成長パターンを描く〔6〕。

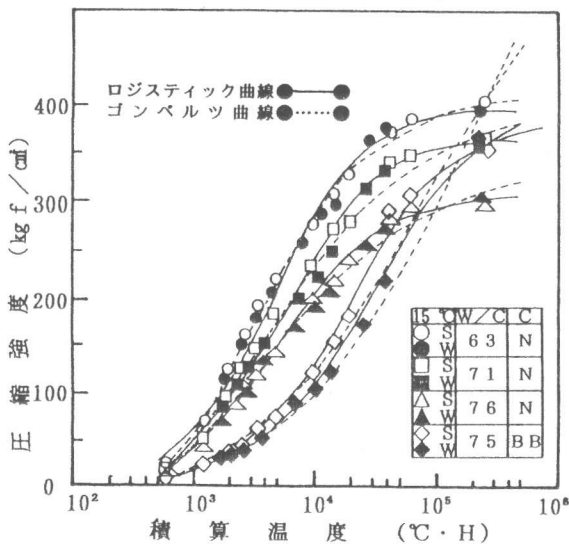
(2)式の変数 t を任意の変数 X に変え α を e^α で置き換えると

$$Y = \frac{\gamma}{1 + e^{\alpha - \beta X}}$$

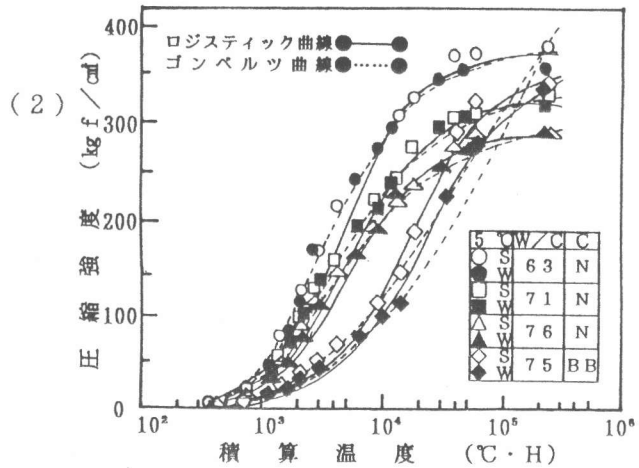
と書くことができる。これも、また、 $X = \infty$ のとき $Y = \gamma$ となる。(3)式の X を積算温度 M の対数で表し、 Y を積算温度 M の時の圧縮強度、極限值 γ を最終到達強度とすると、強度増進曲線は(4)式となる〔4〕。

$$F_\ell = \frac{F_1}{1 + \exp(\alpha - \beta \log M)}$$

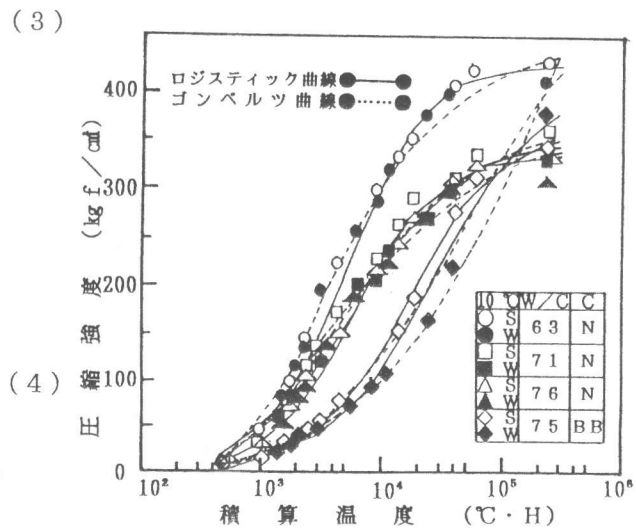
ここに F_ℓ : ロジスティック曲線による
圧縮強度 (kgf/cm²)



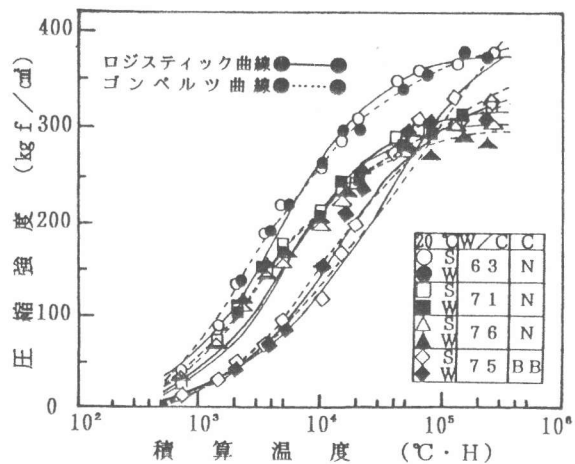
図一三 積算温度と圧縮強度の関係(15℃)



図一 積算温度と圧縮強度の関係(5℃)



図一 二 積算温度と圧縮強度の関係(10℃)



図一 四 積算温度と圧縮強度の関係(20℃)

F_1 : ロジスティック曲線による最終到達強度(kgf/cm²)
 α : 定数 β : 定数
 M : 積算温度(°C · H)

一方、ゴンペルツ曲線は、死亡法則(年齢と死亡率の関係)を数学的に定式化したもので(5)式で表される。

$$y = \gamma \exp(-\lambda e^{-\epsilon t}) \quad (5)$$

(5)式も $t = \infty$ のとき $y = \gamma$ となる。ゴンペルツ曲線は、 y が γ/e に達するまで速度は加速的に増大し、変曲点 ($\log \alpha/\beta$) で最大の速度に達し、 y が γ/e を超えると増加速度は減速し始め y は γ へ向かって収束していく。 y の動きはロジスティック曲線と似ているが、ロジスティック曲線のように変曲点を中心に左右対称ではない〔6〕。(5)式の t を積算温度 M の対数で表し y を積算温度 M のときの圧縮強度、極限值 γ を最終到達強度とすると強度増進曲線は(6)式となる。

$$F_g = F_2 \exp(-\lambda e^{-\epsilon \log M}) \quad (6)$$

ここに F_g : ゴンペルツ曲線による圧縮強度(kgf/cm²)

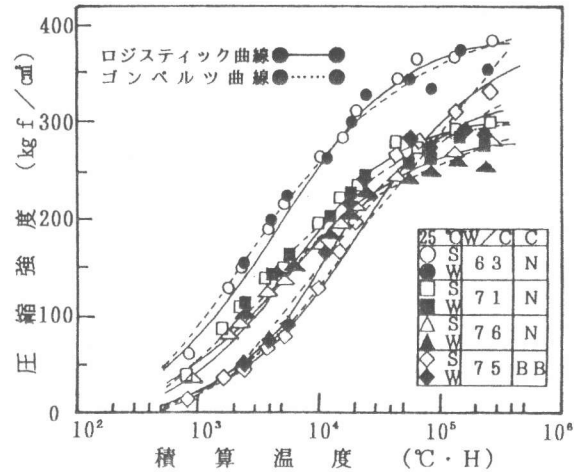


図-5 積算温度と圧縮強度の関係(25°C)

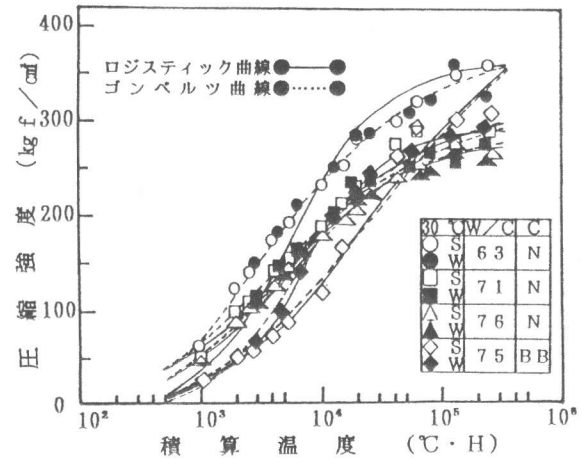


図-6 積算温度と圧縮強度の関係(30°C)

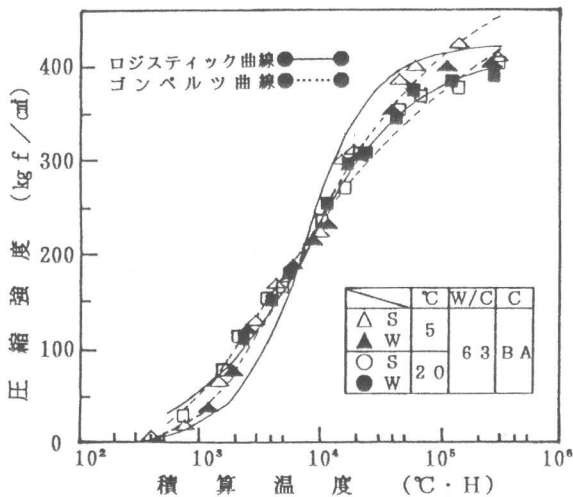


図-7 積算温度と圧縮強度の関係(BA ①)

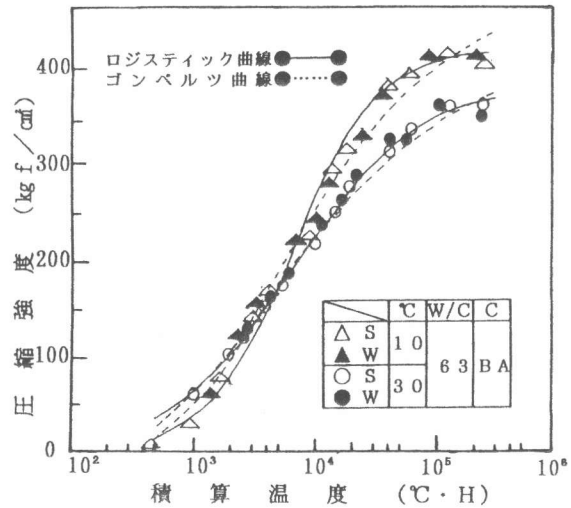


図-8 積算温度と圧縮強度の関係(BA ②)

F_2 : ゴンペルツ曲線による
最終到達強度(kgf/cm²)

λ : 定数 ϵ : 定数

そこで、両曲線とも三点推定法により最終到達強度 F_1 , F_2 を推定した後、ロジスティック曲線は、 $X = \log M$, $Y = \ln \{ F_g / (F_1 - F_g) \}$ と変数変換して最小二乗法により係数 α , β を求めた。ゴンペルツ曲線でも $X = \log M$, $Y = \ln (F_2 / F_g)$ と変数変換して最小二乗法により係数 λ , ϵ を求めた。

なお、三点推定法には当間隔の値が必要なことから練り上がり温度 5, 10, 15℃では、600, 1250, 2550, 5300, 11000, 23000, 48000, 100000, 205000℃・H時の強度、20, 25, 30℃では、1000, 1950, 3750, 7300, 14000, 27000, 52000, 100000, 193000℃・H時の強度を補間法により求めて使用した。また、両曲線に対する相関係数も求めた。

3. 3 強度推定式の決定

前述の方法により、各W/C, 温度, セメント別に F_g , F_g の式を作成し圧縮強度と積算温度の関係の図に曲線を記入すると図-1~8のようになる。また、求めた係数を表-4~5に、相関係数を表-6に示す。

図-1~8及び表-6からわかるように、ロジスティック曲線, ゴンペルツ曲線ともに高い相関を示している(単純平均でロジスティック曲線~0.978, ゴンペルツ曲線~0.987)が、短期的(積算温度 10^4 ℃・H以下)にはゴンペルツ曲線の相関が高く、長期的(積算温度 10^4 ℃・H以上)にはロジスティック曲線の相関が高いと考えられる。

さらに、材令28日までの相関を見ると表-7に示すとおりであり、両曲線の相関係数(単純平均でロジス

表-4 ロジスティック曲線の係数(全材令)

C	W/C (%)	養生方法	練り上がり温度(℃)						
			5	10	15	20	25	30	
N	63	標準	F_1	373.8	430.7	400.2	384.7	398.4	358.3
			α	3.2798	2.8960	2.6533	2.3624	1.9728	2.7337
			β	12.040	10.772	9.7080	8.6489	7.2559	10.294
		及び	F_1	322.9	344.2	366.9	324.1	308.0	307.7
			α	3.0656	2.5000	2.8145	2.5000	2.3441	1.7724
			β	11.406	9.4898	10.555	9.3465	8.8303	6.6641
	76	現場水中	F_1	290.3	329.8	308.6	307.8	294.3	282.6
			α	3.1857	2.9603	2.6069	2.7122	1.9810	2.0288
			β	11.834	11.137	9.7716	10.076	7.4828	7.5707
		標準及び	F_1	429.9	427.5		420.5		391.9
			α	3.0239	2.7330		2.1004		1.8389
			β	11.751	10.468		8.1170		7.0590
BB	63	標準	F_1	362.9	363.3	387.4	426.4	394.0	406.2
			α	2.7624	2.5927	2.4004	1.8815	1.9216	1.7120
			β	11.611	10.932	10.274	8.3498	8.3753	7.5891
		現場水中	F_1	359.8	406.1	407.1	347.8	327.8	293.4
			α	2.5828	2.3759	2.1706	2.2732	2.3089	3.0979
			β	11.154	10.482	9.5693	9.3951	9.4168	11.949
	75	標準	F_1	371.9	372.0	421.9	365.4	356.3	326.7
			α	2.5336	2.8918	2.1204	2.1891	2.1450	2.2036
			β	10.893	12.241	10.4483	9.2016	9.0129	8.9726
		現場水中	F_1	362.9	363.3	387.4	426.4	394.0	406.2
			α	2.7624	2.5927	2.4004	1.8815	1.9216	1.7120
			β	11.611	10.932	10.274	8.3498	8.3753	7.5891

表-5 ゴンペルツ曲線の係数(全材令)

C	W/C (%)	養生方法	練り上がり温度(℃)						
			5	10	15	20	25	30	
N	63	標準	F_2	389.2	461.5	419.9	406.9	426.6	388.8
			λ	4.3056	1.6960	2.7133	9.8429	4.5351	5.8111
			ϵ	1.7952	1.4785	1.6388	1.3541	1.3351	1.920
		及び	F_2	343.9	379.6	408.7	347.7	335.0	339.7
			λ	3.1432	1.3974	8.7257	8.4564	5.7487	3.0956
			ϵ	1.6564	1.3871	1.2870	1.2871	1.1741	0.9913
	76	現場水中	F_2	310.5	360.5	341.9	325.3	327.1	309.2
			λ	2.4716	1.3173	1.0630	1.1239	4.2558	4.9868
			ϵ	1.5894	1.3761	1.3140	1.3914	1.0659	1.1311
		標準及び	F_2	516.9	492.9		471.8		438.8
			λ	75.0758	7.187		61.293		43.204
			ϵ	1.1445	1.2191		1.1300		1.0446
BB	63	標準	F_2	668.7	681.6	848.6	745.6	582.8	611.7
			λ	4.2828	3.7875	29.413	2.4624	3.2453	2.3981
			ϵ	0.8128	0.7786	0.6826	0.6662	0.7769	0.6922
		現場水中	F_2	1067.1	1905.7	1708.7	424.7	382.9	315.5
			λ	2.7211	1.9494	18.575	7.2455	8.046	3.0832
			ϵ	0.6116	0.4719	0.4720	1.0694	1.1486	1.5701
	75	標準	F_2	909.0	905.8	1545.2	478.7	466.0	389.6
			λ	29.3912	7.435	18.155	5.3278	4.9018	6.9514
			ϵ	0.6615	0.6466	0.4965	0.9533	0.9345	1.0804
		現場水中	F_2	668.7	681.6	848.6	745.6	582.8	611.7
			λ	4.2828	3.7875	29.413	2.4624	3.2453	2.3981
			ϵ	0.8128	0.7786	0.6826	0.6662	0.7769	0.6922

表-6 配合及び養生方法と相関係数の関係(全材令)

C	W/C (%)	養生方法	練り上がり温度(℃)					
			5	10	15	20	25	30
N	63	標準	0.941	0.972	0.994	0.989	0.970	0.920
			0.974	0.980	0.993	0.994	0.979	0.975
			0.983	0.971	0.979	0.966	0.956	0.964
		及び	0.994	0.983	0.988	0.995	0.983	0.968
			0.981	0.963	0.992	0.945	0.979	0.976
			0.989	0.977	0.988	0.978	0.987	0.988
	76	現場水中	0.954	0.984		0.992		0.992
			0.985	0.986		0.992		0.991
			0.989	0.993	0.995	0.989	0.996	0.985
		標準及び	0.987	0.990	0.990	0.987	0.993	0.983
			0.993	0.988	0.993	0.990	0.983	0.985
			0.992	0.993	0.995	0.985	0.980	0.996
75	標準	0.986	0.965	0.990	0.986	0.984	0.984	
		0.985	0.989	0.987	0.983	0.982	0.979	
		0.989	0.990	0.987	0.983	0.982	0.979	
	現場水中	0.989	0.990	0.987	0.983	0.982	0.979	
		0.989	0.990	0.987	0.983	0.982	0.979	
		0.989	0.990	0.987	0.983	0.982	0.979	

表-7 配合及び養生方法と相関係数の関係(材令28日)

C	W/C (%)	養生方法	練り上がり温度(℃)					
			5	10	15	20	25	30
N	63	標準	0.978	0.981	0.985	0.988	0.992	0.994
			0.998	0.999	0.998	0.997	0.996	0.997
			0.983	0.984	0.985	0.985	0.994	0.996
		及び	0.997	0.994	0.995	0.996	0.998	0.997
			0.984	0.989	0.989	0.991	0.992	0.995
			0.996	0.997	0.997	0.994	0.996	0.997
	76	現場水中	0.982	0.978		0.994		0.998
			0.994	0.991		0.998		0.997
			0.985	0.984	0.988	0.996	0.996	0.990
		標準	0.998	0.980	0.998	0.995	0.994	0.984
			0.978	0.970	0.979	0.997	0.994	0.988
			0.994	0.987	0.991	0.986	0.982	0.990
75	標準	0.976	0.978	0.983	0.992	0.989	0.977	
		0.989	0.990	0.991	0.982	0.980	0.967	
		0.989	0.990	0.991	0.982	0.980	0.967	
	現場水中	0.989	0.990	0.991	0.982	0.980	0.967	
		0.989	0.990	0.991	0.982	0.980	0.967	
		0.989	0.990	0.991	0.982	0.980	0.967	

表-8 配合及び養生方法と相関係数の関係(材令28日)

ティック曲線 ~ 0.987 , ゴンペルツ曲線 ~ 0.993)は表-6(全材令)の平均よりも一層高くなっている。よって、短期材令時の強度推定には、特に威力を発揮するものと考えられる。また、前にも述べたとおり、N及びBAと比較してBBは温度の影響を受けやすく、養生温度が異なれば別の曲線を描くと考えられる。このことは、表-6~7において標準養生、現場水中養生各々の相関係数が、標準及び現場水中養生の値より大きいことから判断できる。

4. まとめ

本研究は、積算温度方式による強度推定法として、成長曲線であるロジスティック曲線・ゴンペルツ曲線を応用して、その適用性を確かめることを目的として実験を行った。本研究の範囲内で得られた結果は、おおよそ次のようになる。

(1) ロジスティック曲線の相関係数は、全材令で0.978, 材令28日までは0.987、また、ゴンペルツ曲線は、全材令で0.987, 材令28日までは0.993と両方とも高い相関が得られた。

この数字から判断すると、ゴンペルツ曲線はロジスティック曲線以上の相関を持つことがわかる。セメント別に見ると、 10^4 ℃・H(材令 約28日)以下では種類に関係なくゴンペルツ曲線の相関が特に良く、 10^4 ℃・H以上になるとN及びBAはゴンペルツ曲線の相関が高く、BBではロジスティック曲線の相関がやや高い。

(2) N及びBAは、標準・現場水中養生の区別なく、一つの成長曲線で表すことができるが、BBは温度の影響を受けやすく、標準養生と現場水中養生の温度に差が出ると一つの成長曲線で表すことはできず、別の曲線が必要である。

(3) 上記(1),(2)のことから、各セメント、W/C, 練り上がり温度(打設温度)別に積算温度と圧縮強度の関係を把握し、さらに、両曲線を使い分けていけば、十分、積算温度から圧縮強度を推定できるものと考えられる。

今回の実験では、現場水中養生の平均水温(特に低温域)を日々の外気温度に依存した為、当初目標とした平均水温が得られなかった。今後は、目標とした平均水温が得られるように工夫したい。なお、今実験では超音波速度及び動弾性係数の測定も併せて行ったので、積算温度法に、これらを組み合わせた強度推定法についても検討を重ねていきたいと考えている。

(参考文献)

- [1] 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説(JASS5, 鉄筋コンクリート工事)、1986
- [2] 洪悦郎・鎌田英治・田畑雅幸・浜幸雄：ロジスティック曲線を応用したコンクリート強度推定式の提案—普通ポルトランドセメントの場合—、日本建築学会構造系論文報告集、No. 367、pp. 1-7、1986. 9
- [3] 西田朗・洪悦郎・鎌田英治・田畑雅幸：ロジスティック曲線を応用した任意材令のコンクリート強度推定法(普通ポルトランドセメント・混合セメントの場合)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 133-134、1987. 10
- [4] 鎌田英治・洪悦郎・林直樹：各種セメントを用いたコンクリートの強度増進性状、セメントコンクリート論文集、No. 44、pp. 360-365、1990
- [5] 岡田清・六車熙：コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、pp. 363-365、1209-1210、1981. 11
- [6] 養谷千風彦：回帰分析のはなし、東京図書、pp. 181-217、1991