

## コンクリートの強度増進標準曲線の適用性に関する研究

正会員○ 小林 和寛\*1  
同 深瀬 孝之\*2  
同 濱 幸雄\*3  
会員外 相澤由美子\*4

1. 材料施工-2. モルタル・コンクリートの物性  
寒中コンクリート, 強度増進, 標準曲線, 積算温度

## 1. はじめに

寒中コンクリート工事では調合計画や型枠の除去, 支保工の解体などの施工計画において, 構造体コンクリートの強度発現の状況を把握する事は極めて重要である. 現行の日本建築学会「寒中コンクリート施工指針・同解説」(以下寒中指針)では, 「資料6 圧縮強度の推定方法」の中でロジスティック曲線を用いた標準曲線を示している.

しかしながら, 近年の設計基準強度の高強度化の中で, 実務者により初期材齢時の強度発現が標準曲線より大幅に上回っているという指摘もある.

本研究では, 寒中指針・資料6の標準曲線とレディミクストコンクリート工場から得られた寒中コンクリートの実績データを用いて現行の標準曲線との対応を検証するとともに, 実験によりAEコンクリートの積算温度と強度増進の関係についての検討を行った.

## 2. 標準曲線について

標準曲線は積算温度と圧縮強度の関係を成長曲線の1つであるロジスティック曲線に近似した実験式である. これをコンクリートの強度増進過程の標準とすることにより, これらのコンクリートの強度の推定を行う. 標準曲線の算定に用いたデータは混和剤を使用せず, 封緘養生した水セメント比45%, 55%および65%のコンクリート供試体のデータであり, 強度増進傾向はAEコンクリートにおいても差がないものと仮定されている. 強度の推定にあたり, 材齢28日のコンクリート強度を呼び強度とした場合には安全側の推定(不良率4%)となり, 調合強度とした場合は平均的な値を推定(不良率50%)することになる. 式(1)に普通ポルトランドセメントを使用した場合の標準曲線式を示す.

$$F = F_{\infty} / \{1 + \exp(-2.4235 \log_{10}(M_c) + 5.6271)\} \dots (1)$$
  
ここに,

$F_{\infty}$ : 構造体コンクリートの温度補正した推定最終強度(N/mm<sup>2</sup>)

$F_{\infty} = {}_{20}F_{\infty} \{1 - 0.003726(T_{24} - 20)\}$

${}_{20}F_{\infty}$ : 標準養生したコンクリートの最終強度(N/mm<sup>2</sup>)

${}_{20}F_{\infty} = {}_{20}F_{28} \{1 + \exp(-2.4235 \log_{10}({}_{20}M_{28}) + 5.6271)\}$

$M_c$ : 構造体コンクリートの温度補正した積算温度(°D・D)

$M_c = M + 1.0394(T_{24} - 20)$

${}_{20}F_{28}$ : 標準水中養生した材齢28日における圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

${}_{20}M_{28}$ : 標準水中養生した材齢28日における積算温度(°D・D)

$T_{24}$ : 打込み24時間のコンクリートの平均温度(°C)

$M$ : コンクリートの積算温度(°D・D)

## 3. 実績データと現行の標準曲線との対応

実施工で使用されたコンクリートの強度増進傾向を確認するために, 2001年~2005年の5年間の12月から3月に札幌圏で出荷された756件のコンクリートの圧縮強度データ, のべ2,929本(標準養生1,393本, 現場封緘養生1,536本)を用いて検証を行った. データはレディミクストコンクリート会社T社より提供していただいた. 呼び強度に対する調合強度はT社の調合設計基準によるものである.

表1 呼び強度ごとの標準偏差, 配合強度  
および水セメント比

呼び強度(N/mm <sup>2</sup> )	18	21	24	27	30	33	36	40	
標準偏差(N/mm <sup>2</sup> )	2.35	2.35	2.90	2.90	3.10	3.10	3.55	3.55	
配合強度(N/mm <sup>2</sup> )	22.7	25.7	29.8	32.8	36.2	39.2	43.1	47.1	
水セメント比(%)	25mm ※	63.0	58.5	53.0	49.5	46.0	43.5	40.5	38.0
	20mm ※	65.0	60.5	55	51.5	48	43.5	42.5	39.5
	40mm ※	65.0	60	54.5	51	47.5	-	-	-

※ 骨材の最大粒径

Inspection of Standard Curve of Strength Development  
on Cold Weather Concreting

Kobayashi Kazuhiro et al.

表1に呼び強度ごとの標準偏差，配合強度および水セメント比を示す。

図1に圧縮強度データの呼び強度別データ数，図2に月別のデータ数を示す。呼び強度27 N/mm<sup>2</sup>のデータが最も多く，次いで33N/mm<sup>2</sup>のデータが多い。また，月別では12月と比較し，厳寒期である1月，2月および3月のデータは少ない。

図3に標準養生されたコンクリートの実績データと標準曲線の対応を示す。なお，ここで用いる強度発現比は各供試体における調合強度で任意材齢の圧縮強度を除した値とする。積算温度 840° D・D (28日養生)では平均的な標準曲線がデータのほぼ中央になっており，良い対応を示した。しかし，積算温度 210° D・D(7日養生)では平均的な標準曲線よりやや大きな強度に偏っている傾向がある。

図4に現場封緘養生されたコンクリートの実績データと標準曲線の対応を示す。特に若材齢において標準曲線との著しい乖離がみられる。ただし，現場封緘養生されたコンクリートの養生温度のデータは存在せず，寒中指針・資料7の旬平均気温を使用することで対応したため，実際より積算温度が小さく算定されていることが乖離の原因の1つと考えられる。しかし，それを考慮してもこの傾向に大きな差はないと思われる。

図5に呼び強度ごとの実績データと標準曲線による推定強度の対応を示す。18 N/mm<sup>2</sup> および 21N/mm<sup>2</sup> では実測値と推定値の対応が良く，相関係数も高くなっている。しかし，それ以上の呼び強度では，呼び強度が大きくなるに従い実績値と推定値の差が大きくなる傾向がある。

図6に呼び強度ごとの推定値と実測値の相関係数を示す。呼び強度が高くなるに従い，実測値と標準曲線による推定値の相関係数が低下しており，特に現場封緘養生の相関係数が著しく低下している。なお，標準曲線は水セメント比45~65%に対応したものであり，今回のデータのうち呼び強度33N/mm<sup>2</sup>以上は標準曲線の適用範囲外と考えるべきである。

図7に呼び強度ごとの標準偏差を示す。標準偏差は呼び強度が高くなるに従い大きくなっており，データのばらつきが大きくなる傾向が示された。

4. 実験計画および方法

実績データを用いた検証により，標準曲線より実際の強度増進が上回る傾向があり，特に初期材齢時の強度の乖離があることが確認された。また，呼び強度が高くなるに従い，実測値と推定値の相関係数が低下することも確認できた。寒中コンクリートで

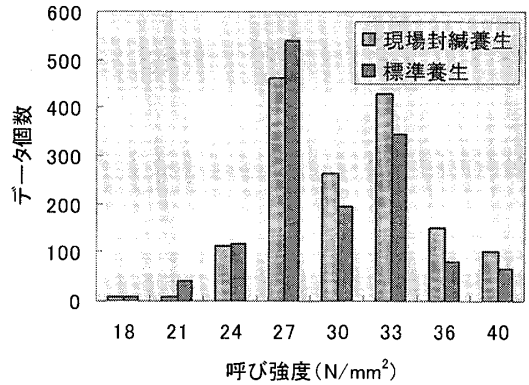


図1 呼び強度別データ数

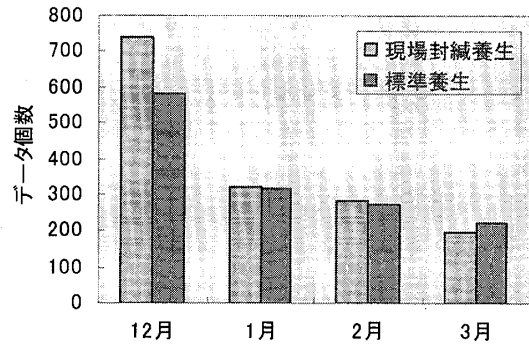


図2 月別データ数

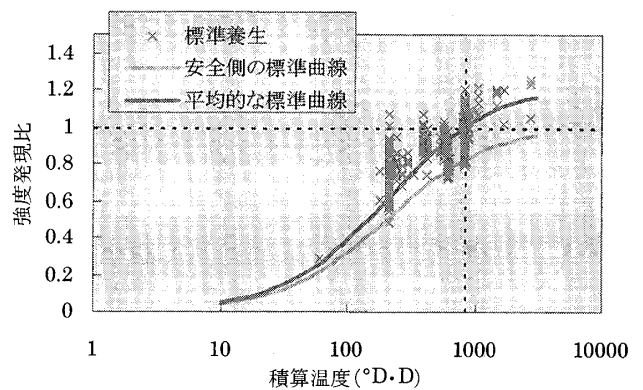


図3 実績データと標準曲線の対応(標準養生)

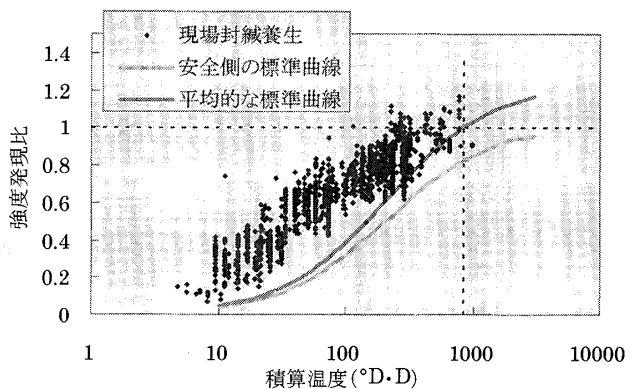


図4 実績データと標準曲線の対応(現場封緘養生)

は混和剤の使用は必須条件であるが、標準曲線の算定に用いられたコンクリートはプレーンコンクリートであり、実測値と標準曲線の乖離にはAE減水剤などの混和剤の影響が考えられる。そこで実際にAEコンクリートを作製し積算温度と強度増進の関係について検討を行った。

表2に実験計画を示す。水セメント比が45%, 55%および65%の3水準と、目標空気量が1%および4%の2水準の、合計で6種類のコンクリートを作製した。セメントは普通ポルトランドセメント( $\rho = 3.16$ )、細骨材は登別産陸砂(表乾密度 $= 2.69\text{g/cm}^3$ )、粗骨材は敷生川水系安山岩砕石(表乾密度 $= 2.67\text{g/cm}^3$ )、化学混和剤としてAE減水剤標準形(I種)を使用した。コンクリートの調合は目標スランプ18cm、目標空気量1%とした試し練りにより決定した。表3にコンクリートの調合を示す。混練は二軸強制ミキサを用いて行った。表4に練り上がり性状および圧縮強度試験結果を示す。養生は全て封緘養生とし、養生温度はAEコンクリートが5°C, 10°Cおよび20°C、プレーンコンクリートは20°Cのみとした。型枠として $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱供試体を用いた。銅-コンスタン熱電対を用いて温度測定を行い、所定の材齢(積算温度 30,90,210,420,840,1680,2730° D·D)で圧縮強度試験を行った。

5. 実験結果および考察

5.1 水セメント比の影響

図8に水セメント比別の積算温度と強度発現比との対応を示す。ここでの強度発現比は水セメント比ごとに20°C封緘養生の840° D·D相当の圧縮強度によって任意材齢の圧縮強度を除した値とする。

水セメント比が低くなるに伴い、強度発現が標準曲線を大きく上回る傾向が見られる。これは実績データと標準曲線の関係と同様の傾向といえる。

5.2 養生温度による影響

5°Cおよび10°C養生したものは20°C養生と比較

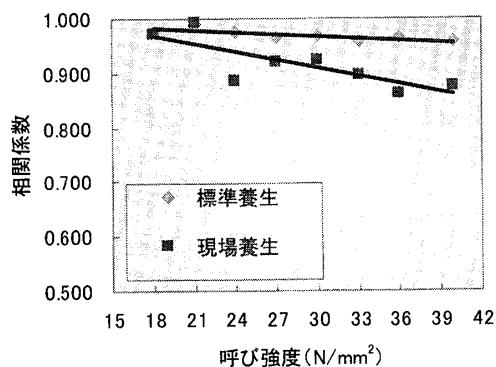


図6 呼び強度ごとの相関係数

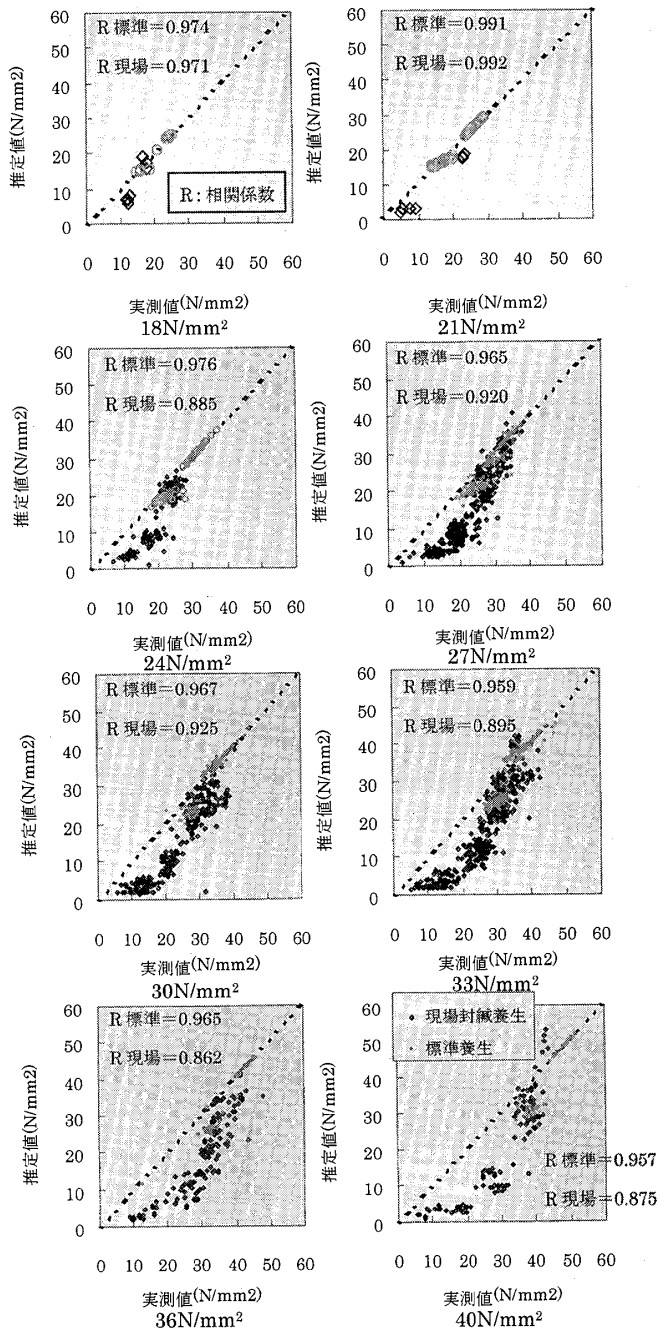


図5 実測値と推定値の対応

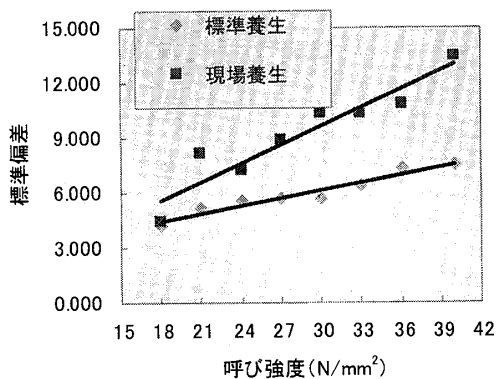


図7 呼び強度ごとの標準偏差

し、若材齢での強度増進の遅延が見られる。また 5°C、10°Cの低温養生は、20°C養生と比較し若材齢時の強度発現は小さいが、積算温度の増加に伴い 20°C養生と同等またはそれ以上の強度が得られている。

5.3 混和剤による影響

若材齢時の強度発現は nonAE コンクリート、AE コンクリートともに大差はなく、混和剤の有無による強度増進傾向の違いはほとんど見られなかった。しかし、積算温度 840° D・D を超えたあたりから、nonAE コンクリートの強度増進は緩慢になり、水セメント比が大きくなるほど顕著となった。現行の標準曲線は水セメント比 45%~65%のプレーンコンクリートのデータから算出されたものであるが、近年の実施工で用いられるコンクリートは高強度化に伴って低水セメント比となっているため、今後は高強度コンクリートを中心にさらにデータを蓄積し、標準曲線を見直す必要である。

6. まとめ

本研究では寒中コンクリートの実績データを用いて標準曲線との対応を検証するとともに、実験により AE コンクリートの積算温度と強度増進の関係についても検討を行った。その結果を以下に要約する。

- (1) 実績データと標準曲線の関係は、初期材齢での乖離が大きく、特に呼び強度が大きいほどその差は大きくなる。
- (2) 実験室実験の結果でも、実績データの場合と同様に、初期材齢時および低水セメント比での標準曲線との乖離が認められた。このことから近年のコンクリート強度の高強度化に対応した標準曲線の見直しが必要である。

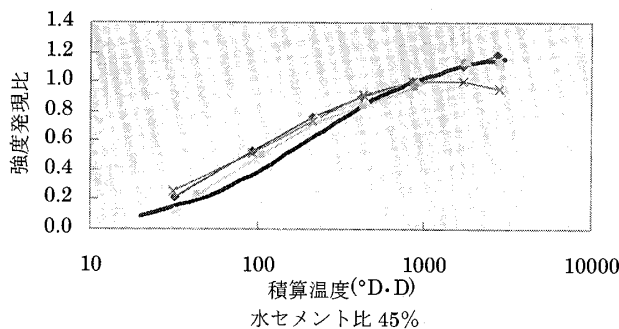


表 2 実験計画

記号	W/C (%)	スランプ (cm)	Air (%)	混和剤	養生温度 (°C)
45A	45	18	4.0	AE 減水剤 標準形	20
55A	55				10
65A	65				5
45N	45	1.0	-	-	20
55N	55				
65N	65				

表 3 調査表

記号	W/C (%)	スランプ (cm)	Air (%)	s/a (%)	W (kg/m³)	絶対容積 (ℓ/m³)			単位粗骨材かさ容積 (m³/m³)	AE 減水剤標準形	
						C	S	G			
45A	45	18	4.0	-	44.5	172	121	297	370	0.64	250mℓ /100kg
55A	55				47.0	166	96	328	370	0.64	
65A	65				48.4	163	80	347	370	0.64	
45N	45	1.0	-	-	43.8	195	138	287	370	0.64	—
55N	55				46.8	187	108	325	370	0.64	—
65N	65				48.3	185	90	345	370	0.64	—

表 4 練り上がり性状および 28 日圧縮強度

記号	スランプ (cm)	Air (%)	単位容積質量 (kg/ℓ)	練温 (°C)	室温 (°C)	20°C 水中 28日強度 (N/mm²)
45A	18.9	5.2	2.37	20.2	21.5	41.8
55A	17.4	5.4	2.36	20.0	22.0	31.2
65A	17.0	5.9	2.34	20.2	19.2	20.2
45N	20.8	2.1	2.43	20.2	19.2	49.1
55N	21.8	2.4	2.40	20.0	19.2	37.2
65N	18.4	2.5	2.39	20.0	19.2	26.2

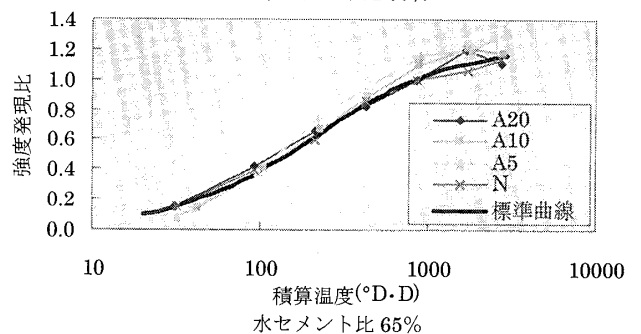
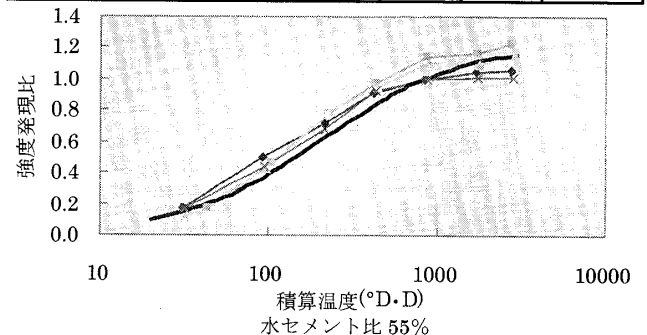


図 8 積算温度と強度発現の関係

\*1 室蘭工業大学大学院  
 \*2 伊藤組土建株式会社・工修  
 \*3 室蘭工業大学工学部 助教授・博士 (工学)  
 \*4 日本郵政公社

Graduate school Muroran Institute of Technology  
 ITOGUMI CONSTRUCTION Co.,Ltd.,M.Eng  
 Assoc.Prof.,Muroran Institute of Technology.Dr.Eng  
 Japan Post