設計基準強度 360 kg/cm² 以上の高強度コンクリートの 調合設計における気温補正について

—低気温下における調合強度補正—

STUDY ON COMPENSATING STRENGTH IN WINTER WHICH IS APPLIED FOR HIGHER STRENGTH CONCRETE THAN 360 kg/cm² DESIGN STRENGTH

戸 祭 邦 之*, 黒 羽 健 嗣**

Kuniyuki TOMATSURI and Kenji KUROHA

Is compensating strength in winter to high strength concrete needed?
Investigation on strength gain after 28 days and relation between strength and maturity was made carefully to 3 projects 13 different mix design concrete
The result is that design strength is obtained after 28 days without any additional strength in winter on the condition that w/c ratio is below 2.3 %

Keywords : 高強度コンクリート, 気温補正, 積算温度, 調合計画

はじめに

設計基準強度 360 kg/cm² を超える高強度コンクリートの調合計画を行う場合、指針となるような基準類はない。そこでそのような場合は JASS 5 の高強度コンクリートの項を準用してきたが、設計基準強度 360 kg/cm² を超える高強度コンクリートについて、特にその気温補正については新たな調査研究の必要がある。気温補正は気温が低くて 28 日強度が設計基準強度を満足できそうにない場合に、不足すると予想される強度分をあらかじめ考慮して調合設計する考え方である。通常使用される水セメント比の高いコンクリートに対しては、品質維持の観点からしてもこの考え方は確かに必要であると考えられるが、水セメント比が 40 % 以下になるような強度の高いコンクリートにまで必要かどうかは疑問である。

このような観点から、材令 28 日から 91 日に到るまでの強度の伸び調査を中心に高強度コンクリートの気温補正について検討を行った。

1. 高強度コンクリートと気温補正

現在コンクリートの冬季施工に際しては調合設計時に気温補正をすることになっている。その補正の方法は日本建築学会発行の建築工事標準仕様書同解説鉄筋コンクリート工事（以降 JASS 5 という）によっている。

JASS 5 で取扱っているコンクリートの強度は設計基準強度（以降 F_c という）150 から 360 kg/cm² ままで、それ以外のコンクリートについては記述がない。しかし、現在では、360 kg/cm² を超える F_c が用いられることもしばしばある。その場合には気温補正の問題ばかりではなく、コンクリートの品質管理全般について、その工事ごとに JASS 5 を参考にしながら計画書を作成しているのが現状である。その時の気温補正の方法は、おおむね JASS 5 高強度コンクリートの項を外挿して適用している。筆者らもそういう場合には同様に対応してきたが、このように強度の高いコンクリートにも気温補正を行うことについては次のような問題点がある。

- (1) 高強度コンクリートは通常のコンクリートに比べ水セメント比が小さいため施工性が悪くなる。それに気温補正を加えることはさらにワーカビリティを悪くし、施工不良を助長するようなことになりかねない。
- (2) 気温補正を加えることは単位セメント量を多くすることにもつながるので、打設後の硬化発熱が大きく、熱ひび割れの発生やその後の強度発現に支障をきたすおそれが大きくなる。

また、通常のコンクリートに対する気温補正の目的とそれに関しての高強度コンクリートの優位性は次のようにまとめられる。

- (1) 気温補正をする第 1 の理由は、建築物の場合概し

* 大成建設（株）技術研究所

** 大成建設（株）技術研究所・工博

Technical Research Centre, Taisei Corporation

Technical Research Centre, Taisei Corporation, Dr. Eng.

て断面が小さいので、マッシブな断面の構造物に比較してコンクリート中の水分の逸散が早く、28日以降の強度の増進が余り期待できないことが挙げられる。しかし、高強度コンクリートのように水セメント比が小さいコンクリートは、単位水量が小さいので乾燥する割合が小さい上に、組織もち密で水密性が向上し、乾燥しにくい機構が比較的早期に構成されるため、通常のコンクリートとは異なる乾燥性状および強度発現性状を示す。図—6に示した例では、壁 150 mm、スラブ 250 mm のような薄い部材でも少なくとも材令 91 日まで強度は伸びている⁴⁾。また、高強度コンクリートが使用される部位は主として柱・梁であり、一般に高強度コンクリートを使用して設計されている建物の柱・梁は比較的大きな断面をもっているため十分 28 日以降の強度の進展を期待できる。

(2) 気温補正の第 2 の目的は凍結対策である。水セメント比が 60~70 % 程度の通常のコンクリートは寒中での強度発現も緩慢であるので、このような対策は必要であるが高強度コンクリートは、耐凍結に有効とされる 50 kg/cm² の強度を達成するのが早く、また余剰水が少ないので凍結の可能性も小さい。

(3) 気温補正をする第 3 の理由は、施工プロセスに関するものである。従来工法で鉄筋コンクリート造建築物を施工する場合、上の階の荷重は下の階で支えなければならない。季節の違いによって階ごとの施工工程がくると管理がしにくくなるので、冬季には気温補正をして対処している。こういう場合には、少しの強度低下も大きな構造上の問題につながりやすいが、高強度コンクリートでは、上の階の荷重を支えるのに十分な強度が短期間に発現する。もし、支障をきたすようであればあらかじめ設計画面上考慮することが可能である。

(4) 強度の問題だけではなく、水セメント比の高いコンクリートは耐久性が悪く品質的に劣るという考え方がある。しかし、 F_c 360 kg/cm² を超えるようなコンクリートであれば、水セメント比が多少高くなっても品質が悪くなるということはない。

現在では、昭和 56 年の建設省告示第 1102 号「コンクリートの強度に関する基準を定める件及び当該告示の運用に関する通達」によって、設計基準強度の発現は必ずしも材令 28 日でなくてもよくなっている。28 日以降であっても 91 日以内であれば、強度増進が認められ設計基準強度の発現が得られることが実証できれば、気温補正を撤廃することも可能である。

コンクリートの強度発現は強度のレベルに関係なく、ある条件内であれば材令 28 日以降も増進すると一般には考えられている。これは主として実験室的なデータに裏付けられているものであるが、どの位の材令でどの位の強度が、どの位の確率で発現されるかという実施計画

上の問題となると必ずしも満足のいくデータ群があるわけではない。特に F_c 360 kg/cm² 付近から上の強度を対象としたものとなると頼れるものはない。

材令と強度発現の関係には養生温度が大きく影響をするため、強度の発現を積算温度の関数として取り上げ整理するのが便利である。その関係については以前から多くの研究例があるが、その評価となると「両極の見解が存在」¹⁾し、必ずしも一定の確立した評価があるわけではない。それは「コンクリートの強度発現過程の複雑さを考えると、温度・時間の単一関数として強度を表現できるとは考えられない」¹⁾ので「可成り狭い範囲に限定される制約条件を認識」¹⁾して利用すべきであるというのがごく一般的に考えられている見方であろうからである。したがって、この関係が利用されている分野は現在のところ寒中コンクリートのごく硬化初期の凍結防止養生期間の設定や型枠の脱型、あるいは蒸気養生の際の養生条件の設定など限られたものとなっている。そしてこれは寒中や蒸気養生の硬化初期の多くの研究データに支えられている²⁾。

そこで今気温補正の是非を論ずるためにはまず 350~3500° D・D 位の範囲で積算温度と強度発現の関係がどうなっているかを示す必要があると思われる。

気温補正を考え直す場合には、材令 28 日から 91 日までの強度発現が問題になるから、気温の範囲を最低 2°C から最高 35°C 位とすると平均気温では 5°C から 27~8°C となり、積算温度では (10+5)×28=420° D・D から (10+28)×91=3458° D・D までになる。1 年以上にわたって積算温度と強度発現関係が続くとする論文³⁾もあるが先に²⁾挙げた洪の論文は、2000° D・D までを有効範囲としており、概して過去の論文は 840° D・D 位までのものを扱っているが多い。このような観点から F_c 360 kg/cm² 以上の高強度コンクリートについて材令 28 日以降の強度の伸びについて調査し、積算温度の関数として整理した。積算温度の計算は JASS 5 に基づいて行い°D・D の単位を使用した。

2. 積算温度と強度発現

今回調査の対象とした高強度コンクリートの工事、設計基準強度、呼び強度等は表—1 のとおりである。

工事場所は東京、埼玉、名古屋であり、季節的には夏から冬まですべてを含んでいる。91 日間の平均気温では、5.5°C から 25.5°C の範囲となった。

表—1 調査対象工事およびコンクリート強度

工事名	設計基準強度 F_c kg/cm ²	呼び強度 F_N	工事場所	プラント数	コンクリート 打設時期
A	420.360	420.390.360	埼玉	2社 (a ₁ , a ₂)	60.8~11
B	420.360	465.450.435 405.360	東京	2社 (b ₁ , b ₂)	61.11~62.8
C	360	400	名古屋	1社	61.6~7

(いずれも普通ポルトランドセメント使用)

2.1 積算温度と強度

調査結果の集計表の例を表一2に示す。標準養生供試体強度はこれから基礎になるデータとして使うために3本の平均の値を採用しているが、それ以外の現場水中養生と現場封緘養生の供試体強度は3本の平均値ではなく、1本ごとのデータを使用する。また横の欄に一行になっているのは同一レーデミクストコンクリート車、同一試料からの採取を意味し、養生や材令による強度の違いが分かるようになっている。

養生に関係なく積算温度と強度の関係を示したのが図一1である。横軸の積算温度は常用対数目盛となっている。同一材令で100 kg/cm²の幅はあるが、養生による違いに関係なく、積算温度と強度の間には一定の関係があり、しかもその関係は初期だけでなくかなりの長い期間成り立つ。これは表一1に示した中のA工事、F_N420、a₁工場の例であるが、その他のデータについても同様のグラフをかいてみると同じような傾向を示し、少なくとも3300° D・D位まではその関係は続くと考えられる。また図一1から分かるように210° D・D（標準養生7日相当）から840° D・D（標準養生28日相当）までの間と840° D・Dから2730° D・D（標準養生91日相当）までの間では強度の伸び方に多少違いがある。これは表一1に示した他のデータによるグラフにも共通した傾向である。

2.2 強度指数（強度の伸び）

図一1は強度の伸びを積算温度の関数として表したものである。図一1をみれば、840° D・Dや2730° D・D時

表一2 調査集計表（A工事 F_N420の例）

(単位は積算温度：° D・D、強度：kg/cm ²)											
標準養生強度			現場水中養生			現場封緘養生					
7日	28日	91日	7日	28日	91日	7日	28日	91日	7日	28日	91日
412	509	544	247	404	904	511	913	485	2316	518	
			429	514	514	497		546			
			437	523	523	525		555			
408	481	564	231	409	879	494	891	481	2222	549	
			413	495	495	490		561			
			414	502	502	522		567			
401	495	551	221	367	826	465	834	467	2045	508	
			368	477	477	472					
			388	485	485

図一1 積算温度と強度発現（A工事 a₁工場 F_N420の例）

点でどの程度の強度が得られそうか一目して分かる。しかし、このような表現法は、特定の工場の特定の調合のコンクリートに対しては分かりやすく便利ではあるが、工場や調合の異なるコンクリートをお互いに比較して論ずるには不便である。そのためここでは次のような指標を導入する。

調査設計を行う場合、通常標準養生材令28日の強度（以後標準強度と称する）が指標とされる。28日より長期の強度管理が許されるようになった現在でもこれは変わらない。そこで標準強度に対して、どの程度の強度発現が期待できるかを表す意味で、現場養生供試体強度を標準強度に対する比で表し、これを強度指数と定義し、2種類の強度指数を使用する。一つは群強度指数で、測定した各データをそのグループの標準強度の平均値との比で表し、次の式で定義する。

$${}_1v_{Ai} = F_{Ai} / M_o \quad (1)$$

$$M_o = \sum_{i=1}^n F_{si} / n \quad (2)$$

F_{Si} : i 番目の28日標準養生供試体強度 (kg/cm²)

F_{Ai} : i 番目の現場封緘養生供試体強度 (kg/cm²)

${}_1v_{Ai}$: i 番目の群強度指数

n : 同一工事、同一工場、同一呼び強度における標準供試体試料数

群強度指数は特定工場の特定調合について標準強度の平均値に対する強度発現の割合の状況を表す値である。

この指数は同一工事、同一工場、同一呼び強度の中のデータ群に対して全体としてどのような分布をするかというのを表すのに適している。しかし、個々のデータがどの位の確率で強度の伸びが期待できるかという指標には向いていない。そこでこれとは別に次式で定義される個別強度指数を設ける。

$${}_2v_{Ai} = F_{Ai} / F_{Si} \quad (3)$$

${}_2v_{Ai}$: i 番目の個別強度指数

個別強度指数は個々の供試体について標準強度に対してどの程度の強度発現があるかを示す指数で、室内実験等でもよく用いられている相対強度に相当する。

図二 群強度指数と積算温度（A工事 F_N420の例）

図一2はA工事呼び強度420をこの群強度指数を用いて表したものである。中央の実線が回帰式、点線がその5%棄却域を示している。この回帰式と棄却域は次の(4)~(7)式を使って計算した。強度と積算温度の関係を表す回帰式は直線のはかに3次元式⁴⁾やロジスティック曲線式⁵⁾など、曲線で回帰する方法も提唱されているが、これ等曲線で回帰したものでも840°D・D付近から2730°D・D付近という限られた範囲ではほぼ直線とみてもよいような曲線となっているので、ここでは直線で回帰することにした。

$$\text{回帰式: } v'_A - \bar{v}_A = B(x - \bar{x}) \cdots \cdots (4)$$

$$B = \frac{\sum x_i v_{Ai} - n \bar{x} \bar{v}_A}{\sum (x_i)^2 - N \bar{x}^2} \cdots \cdots (5)$$

$$5\% \text{ の棄却域を示す式: } v''_A - \bar{v}_A = B(x - \bar{x})$$

$$-t_{0.05} \sqrt{\left[1 + \frac{1}{N} + \frac{(x - \bar{x})^2}{S_x}\right]} S_e \cdots \cdots (6)$$

$$S_e = \sqrt{\frac{\sum (v_{Ai} - v'_{Ai})^2}{N - 2}} \cdots \cdots (7)$$

x_i : 各データの積算温度 (°D・D) の常用対数

v_A : 強度指数 S_x : x_i の分散

N : 試料数 $t_{0.05}$: t 表からの読み値

(N の値によって異なる値)

比較のために個別強度指数で表現したグラフを図一3に

図一3 個別強度指数と積算温度 (A工事 $F_N 420$ の例)

図一4 群強度指数と積算温度 (C工事 $F_N 400$ の例)

図一5 群強度指数と積算温度 (B工事 C 工事 $F_N 450$ の例)

示す。そう大きな違いはないが、図一2に比べ図一3の方がバラツキがわずかに大きくなっている。個別強度指数はそのときの標準強度の出方に大きく左右され、群強度準指数は群全体の平均との比のため特に平均からはずれた測定値があると大きくずれた値が得られる。両者を比較してみると意味は違うが、似たような分散を示す。A工事呼び強度420の場合は標準強度の出方によるバラツキの方が大きくでている例である。群強度指数で表した他のグラフ例を図一4および図一5に示す。

積算温度を計算するもととなる温度の測定は、A工事の場合は供試体を1本余計にとり、その中に熱電対を埋め込んで行ったが、その他の工事の封緘養生供試体については、最高最低気温からの平均値または平均気温を使用した。これらの3種類のデータに基づく積算温度の比較例を現場水中養生の積算温度を含めて表一3に示す。常用対数で比較した場合、その誤差はいずれも1%以下になるので、3種類とも同じ扱いとした。

表一4に今回調査した標準強度、群強度指数の一覧表を示す。群強度指数の平均と不良率5%以下を保障する値は、それぞれの積算温度における(4)式、(6)式の値として計算した。標準偏差と不良率2.3%以下を保障する値は次の式による。

$$\text{標準偏差} = \frac{(\text{平均}) - (\text{不良率 } 5\% \text{ 以下})}{1.64} \cdots \cdots (8)$$

$$\text{不良率 } 2.3\% \text{ 以下} = (\text{平均}) - 2 \times (\text{標準偏差}) \cdots \cdots (9)$$

840°D・Dにおける「A~C, 360~465」とは次のようにして計算した値である。

(イ) 各工場各呼び強度ごとに、材令28日の封緘強度の測定値を(4)式の回帰式と平行に強度の増進があると考え840°D・D時の値に換算する。

(ロ) その換算値を同時に採取した試料の標準強度で除す。

(ハ) その除した値(群強度指数)全部を集計して平均と標準偏差を求める。

(ニ) 平均と標準偏差より不良率5%以下と2.3%以

表—3 4種類の積算温度比較例

工事	打設日 月/日	材令 日	積算温度								比		
			熱電対		気温(最高最低の平均)		気温(平均)		現場水中		(b)/(a)	(d)/(a)	(c)/(b)
			実数 °D·D	常用対数(a)	実数 °D·D	常用対数(b)	実数 °D·D	常用対数(c)	実数 °D·D	常用対数(d)			
A	8/21	28	1091	3.038	1025	3.011			1077	3.032	0.991	0.998	
		91	2752	3.440	2653	3.424			2723	3.435	0.995	0.999	
	9/21	28	834	2.921	806	2.906			826	2.917	0.995	0.999	
		91	2045	3.311	2034	3.308			2029	3.307	0.999	0.999	
	10/22	28	634	2.802	636	2.803			629	2.799	1.000	0.999	
		91	1523	3.183	1536	3.186			1546	3.189	1.001	1.002	
	11/15	28	482	2.683	499	2.698			472	2.674	1.006	0.997	
		91	1210	3.083	1227	3.089			1271	3.104	1.002	1.007	
C	6/27	28			958	2.981	947	2.976					0.998
		91			3289	3.517	3223	3.508					0.997
	7/30	28			1071	3.030	1044	3.019					0.669
		91			3058	3.485	2995	3.476					0.997

表—4 標準強度および群強度指数一覧

工事	工場	呼び強度 F _N	標準強度 kg/cm ²			比		全 試料数 (1本毎)	群 強 度 指 数											
			試料数 (3本 平均)	強度 F	標準 偏差 σ	F/F _N	σ/F		840° D・D				2730° D・D				1365° D・D			
									平均	不良率 5 %	不良率 2.3 %	標準 偏差	平均	不良率 5 %	不良率 2.3 %	標準 偏差	平均	不良率 5 %	不良率 2.3 %	
A	a ₁	420	31	516	26	1.23	0.050	123	1.02	0.91	0.89	0.063	1.11	1.00	0.98	1.05	0.95	0.93		
		390	14	493	24	1.26	0.049	60	1.03	0.95	0.92	0.050	1.24	1.16	1.14	1.12	1.04	1.02		
		420	27	542	41	1.29	0.076	111	0.95	0.81	0.78	0.085	1.09	0.95	0.93	1.01	0.87	0.84		
	a ₂	390	7	543	47	1.39	0.050	27	1.00	0.91	0.89	0.057	1.12	1.02	1.00	1.05	0.96	0.94		
		360	9	531	32	1.48	0.061	36	0.95	0.84	0.81	0.068	1.09	0.98	0.95	1.01	0.90	0.87		
B	b ₁	465	10	591	19	1.13	0.033	54	1.02	0.95	0.93	0.045	1.10	1.02	1.01	1.05	0.98	0.96		
		450	12	572	33	1.27	0.058	72	0.96	0.82	0.79	0.086	1.10	0.96	0.92	1.02	0.88	0.85		
		435	15	542	33	1.24	0.061	129	0.94	0.82	0.80	0.071	1.08	0.96	0.94	1.00	0.88	0.86		
		405	14	542	29	1.34	0.054	54	0.96	0.92	0.91	0.026	1.12	1.08	1.09	1.03	0.99	0.98		
	b ₂	360	42	473	33	1.31	0.070	249	1.03	0.90	0.88	0.075	1.12	1.00	0.97	1.07	0.94	0.91		
		450	49	575	26	1.28	0.045	98	0.96	0.88	0.86	0.050	1.09	1.01	0.99	1.02	0.94	0.92		
		360	49	471	19	1.13	0.041	98	0.94	0.87	0.85	0.046	1.06	0.98	0.96	0.99	0.91	0.90		
C		400	9	452	17	1.13	0.037	36	1.00	0.88	0.85	0.073	1.08	0.97	0.94	1.03	0.92	0.89		
A~C, 360~465									0.97	0.88	0.87	0.052								

表—5 コア供試体強度と現場水中養生供試体強度の比

文 献		6)		7)				8)		9)		10)
強度	コア	515	566	485	535	500	520	485	550	476	446	463
	現場水中	516	569	510	510	540	540	488	595	455	455	487
比 (コア/現場)		1.00	0.99	0.95	1.05	0.93	0.98	1.00	0.92	1.05	0.98	0.95

(※ 材令9日、他は全て材令28日)

(* 材令91日、他は全て材令28日)

下を保障する値を求める。

2.3 コア強度との関係

材令28日の強度管理の場合は現場水中養生、28日を
超える場合には現場封緘養生の供試体によることになっ
ている。 F_c 360 kg/cm² 以下のものについてはコアの採
取位置、採取方法などの違いによって多少違いが出るこ
とはあるが、それらはおおむね一致を示すとされて
いる。 F_c 360 kg/cm² を超えるものについての検討例は
そう多くはないが、既往の文献に基づきコア強度をほぼ
同じ積算温度履歴をもつと考えられる現場水中養生の供
試体強度との比で示すと表—5 のようになる。両者は比
較的よい一致をみせていると言える。

図—6 はA工場での例である。このデータは工事現場
に実物と同じように配筋もした実物大の建物の一部の模
型をつくり、そこからコアを切り出して強度を調べたも
のである。標準養生、現場水中養生、コア各供試体強度
のすべてを表現したもので、特にコア供試体強度につい
ては同一部位から採取したものを線で結んである。コア
供試体強度も、各種養生供試体強度と同列で論ずること
が可能であることが分かる。

図—6 積算温度と強度発現(各種養生、コア)

本論文では28日以降の強度を問題にしているため現
場封緘養生が対象である。先にコア強度と現場水中養生
の供試体強度との関係を示したが、封緘養生と水中養生
の間には図—1、表—8 に示すように密接な関係がある
ので、コア強度と現場封緘養生の供試体強度との関係も
同様と考えられる。

3. 気温補正について

表—4 の 840° D·D と 2730° D·D の値を比較してみ
ると後者は前者に対して10~15 % の伸びがある。今回の
調査は3300° D·D までであるが少なくともその範囲ま
では、すなわち91日間の平均気温が5°C~25.5°Cの間

では強度と積算温度の関係は図—2～6、表—4 に示すような関係を示すと考えられる。このような関係を前提に気温補正を無くした場合について検討してみる。

今回測定した値が $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時点でのどのような分布を示すかを標準強度の分布と比較し、 F_c との関係で示したのが図—7 である。普通呼び強度 F_N と F_c とは違うものであるが、今回はすべて JASS 5 高強度コンクリートの項にならって不良率を 2.3 % 以下としてコンクリートを特別注文しているので $F_N = F_c$ と考えて差支えない。標準強度に比べて $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時強度は概して平均値が低くなっている。これは表—8 にみるようにその平均が標準強度の平均に比べて 2～3 % 低いと符号する。また、標準偏差が表—4 の σ/F の項と比べて小さくなっていることが分かる。これは標準強度分布から計算した統計値に比べると、材令を 28 日～91 日にまで広げた系で考えた統計値は、概して大きくなる表れと思われる。これは図—4 をみるとよく分かる。材令 28 日のみでは小さな分散を示すが、91 日にまで広げた系では分散が大きくなっている。

図—7 は発注した呼び強度との関係でみたものであるが、発注した時の呼び強度との関係では標準強度の平均

図—7 積算温度 $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時強度分布

表—6 $\sigma=0.08 F_c$ の場合の強度分布

(× F _c kg/cm ²)								
工事	工場	呼び強度 F _N	840° D・D			1365° D・D		
			平均	不良率 5 %	不良率 2.3 %	平均	不良率 5 %	不良率 2.3 %
A	a ₁	420	1.18	1.06	1.03	1.22	1.10	1.08
		390	1.20	1.10	1.08	1.30	1.20	1.18
	a ₂	420	1.10	0.94	0.90	1.17	1.01	0.97
		390	1.16	1.05	1.03	1.22	1.11	1.08
		360	1.10	0.97	0.94	1.17	1.04	1.01
B	b ₁	465	1.18	1.10	1.08	1.22	1.13	1.12
		450	1.11	0.95	0.91	1.18	1.02	0.98
		435	1.09	0.95	0.92	1.15	1.02	0.99
		405	1.12	1.07	1.06	1.19	1.15	1.14
		360	1.19	1.05	1.02	1.24	1.09	1.06
	b ₂	450	1.12	1.02	1.00	1.18	1.08	1.06
		360	1.09	1.00	0.98	1.15	1.06	1.04
C		400	1.16	1.02	0.99	1.20	1.06	1.03
A～C		360～465	1.13	1.02	1.01			

値が計画した調合強度とは異なるので、必ずしも調合設計的にみた場合の検証にはなりにくい。そこで次に表—4 の群強度指数を用いて、仮に積算温度 $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ で調合設計を行った場合どのような強度分布が得られるかについて、個々の調合別に検証してみる。

設計基準強度を F_c 、調合強度を F 、標準偏差を σ として、JASS 5 高強度コンクリートの項を適用すると

$$F \geq F_c + 2\sigma \quad \cdots (10)$$

$$F \geq 0.9 F_c + 3\sigma \quad \cdots (11)$$

$\sigma \leq 0.1 F_c$ であれば (10) 式により、 $\sigma > 0.1 F_c$ であれば (11) 式によることになる。

今仮に $\sigma = 0.08 F_c$ とすると (10) 式を使うことになり $F = 1.16 F_c$ となる。この場合 F_c を基準とした強度は $1.16 \times V_{A1}$ ((1) 式) で計算することができる。結果を表—6 に示す。不良率を 2.3 % 以下に設定すると $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ では F_c を下回るものがあるが $1365^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ ではほとんどなくなり、5 % 以下の場合すべて F_c 以上となる。 $1365^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ とは 91 日間の平均気温が 5°C の場合に相当する。ちなみに表—7 に東京での 91 日の積算温度の計算を示す。最低が 12 月中旬の $1430^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ である。表—6 の「A～C, 360～465」をみると $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ でも不良率 2.3 % 以下の条件で F_c 以上となる。これは、表—6 の個々の例にみるように試料数が少ないとデータが偏在して F_c を下回る場合もあるが、試料数が多くなれば $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ でも F_c は満足できることを示している。現場水中養生他との関係についても同様に計算してみた結果では表—8 のようになる。つまり、現場封緘養生は標準養生に比べて 2～3 % 低い値を示すと考えられる。このことを考慮して調合強度を 2～3 % 増とすると表—6 の $1365^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ の不良率 2.3 % の項はすべて F_c 以上となる。

以上は標準偏差が F_c の 8 % の場合であるが、これを 10 % とすると 2～3 % の封緘養生の強度発現低下を考えないでも $1365^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ のときには不良率 2.3 % 以下でもすべて F_c 以上となる (分散は大きくなるが、それ以

表—7 東京 91 日間の積算温度

(単位 $^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$)												
月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
上旬	1481	1763	2151	2544	2879	3136	3173	2931	2487	2008	1638	1445
中旬	1557	1887	2287	2659	2981	3196	3121	2796	2321	1873	1548	1431
下旬	1651	2018	2418	2768	3070	3173	3042	2640	2151	1748	1483	1442

(理科年表より計算)

表—8 養生条件と強度発現

	試料数	平均	標準偏差
現場封緘養生供試体 / 標準養生			
$840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時強度 / 材令 28 日強度	284	0.97	0.052
現場封緘養生供試体 / 標準養生			
$2730^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時強度 / 材令 91 日強度	206	0.98	0.063
現場水中養生供試体 / 標準養生			
$840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時強度 / 材令 28 日強度	582	1.00	0.056
標準養生材令 91 日 / 標準養生			
強度 / 材令 28 日強度	66	1.12	0.040

上に調合強度が大きくなるので8%のときより有利になる)。すなわち840° D・D時(東京の場合冬季56日で最低の積算温度が1月上旬の840° D・D)に F_c を満足するような計画をした場合、840° D・D時 F_c を満足しないことがあっても材令91日には満足できるということになる。

以上のことから管理材令を28日以降に設定し、少なくとも3300° D・Dまでの適宜の積算温度を選択しての強度管理を行えば、気温補正は行わないで済ませることが可能である。

4. 恒温養生強度試験

表—4に示されているデータは前述したように特に冬と夏を区別していない。両方にまたがるものもあれば、夏～秋のもの、冬～夏のものなどが混在している。これは、5° から30° 位の範囲の平均気温であれば気温に余り関係なく、長期材令下における積算温度と強度発現の関係が存在することを示すため、このような表現をしたものである。しかし、冬季の気温補正を省略しようという観点で論ずる際に、冬季のデータだけでなく夏季のデータが混在していれば、夏季の強度増進によって強度分布が高い方に傾き、95%信頼区間の値も大きな方に傾くのではという懸念がある。しかし、これは実際は逆であって同じ積算温度であれば初期に温度の低い方が840° D・D位を超えたあたりから強度は大きくなっている¹¹⁾。したがって夏冬混在していてもおおむね同じ傾向と考えてよいと考えられる。念のため、低温を含む恒温養生による室内実験を行った。

表—9にその試験の概要を、表—10に結果を示す。実験は2回行い、いずれも50lのパン型強制練りミキサーを使用した。第1回の練り上温度は12°C、第2回は14°Cである。φ10×20cmの供試体につめたのちそれぞれの温度の下に運んで2日間養生し、材令3日で脱型した。

表—9 恒温養生強度試験の条件

	第一回		第二回		共 通	
	W/C	養生温度	W/C	養生温度	養生条件	強度試験材令
水準	40%	4°C	40%	4°C	封 緘	7日
	36	12	36	12		28
	32	20	32	20	標 準	91
			28	30		28

表—10 恒温養生強度試験結果(91日)

	W/C	標準強度	封緘養生強度				個別強度指数			
			4	12	20	30	4	12	20	30
養生温度			1274	2002	2730	3640	1274	2002	2730	3640
積算温度										
第1回	40	422	451	387	473		1.07	0.92	1.12	
	36	491	532	568	489		1.08	1.16	1.00	
	32	592	580	617	617		0.98	1.04	1.04	
第2回	40	489	531	591	526	604	1.09	1.21	1.08	1.24
	36	570	597	647	626	650	1.05	1.14	1.10	1.14
	32	649	715	681	679	690	1.10	1.05	1.05	1.06
	28	726	708	701	753	808	0.98	0.97	1.04	1.11

(単位は W/C: %, 温度: °C, 積算温度: ° D・D, 強度: kg/cm²)

4°Cの恒温養生で積算温度は1274° D・Dであるが91日では標準強度をほぼ満足している。

5. 結 論

3工事13例での調査結果では、

- (1) 冬季であっても積算温度1365° D・Dになれば設計基準強度は不良率2.3%以下の確率でほぼ確保される。
- (2) 少なくとも3300° D・Dまでは強度の伸びは続き積算温度との関連で論ずることが可能である。
- (3) 室内における低温養生試験でも91日経過すれば十分標準強度の発現は期待することができる。

高強度コンクリートについては水セメント比も小さく余剰水も少ないので凍結に対する対応もしやすく、設計上型枠の解体工程も強度発現状況を勘案しながら対応することが可能であること、また、高強度コンクリートは強度の発現も早く、乾燥も少ないので図—6にみるように150mmといった薄い壁厚の部材でも比較的長期の強度の伸展が期待できること、を考えると、東京では56日の積算温度の最低は840° D・Dであり、91日では1431° D・Dであるから、材令56～91日までの長期材令を考えるならば、 F_c 360 kg/cm²以上の高強度コンクリートにおいては冬季の気温補正は不要とすることができる。

現在では91日以内という制限があるが、これにこだわらなければ、少なくとも1365° D・Dの積算温度が得られた時点で設計基準強度は満足されるので、どこでも気温補正を不要とすることができる。

参考文献

- 1) 岡田 清, 六車 照: コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, p. 365, 昭和62年3月発行
- 2) 例えば, 洪 悦郎: コンクリート強度推定実用法の提案とその応用, 日本建築学会大会梗概集, p. 244, 昭和34年
- 3) Chin Fung Kee: Relation Between Strength and Maturity of Concrete, ACI journal, Vol. 68, No. 3, pp. 196~203, march, 1971
- 4) 金 武 漢, 洪 悦郎, 鎌田英治: 寒中コンクリートを対象とする最近のセメントによる積算温度方式の検討, セメント技術年報 38 pp. 285~288, 昭和59年
- 5) 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, 日本建築学会構造系論文報告集, 第367号, pp. 1~7, 昭和61年9月
- 6) 黒羽健嗣, 小寺正孝, 戸祭邦之, 並木 哲ら: 高強度コンクリートを使用した構造体のコンクリート強度の検討, 日本建築学会大会梗概集, p. 127, 昭和61年
- 7) 高畑顕信, 角 彰, 小島政章, 浅野満男ら: 高強度コンクリートを用いた高層鉄筋コンクリート構造物の設計と施工, 日本建築学会大会梗概集, p. 733, 昭和62年

- 8) 星野博彦, 芝池達司, 渡辺康則, 梶山 毅ら: 高強度コンクリートの品質と施工性に関する実験研究, 日本建築学会大会梗概集, p. 743, 昭和 62 年
 - 9) 上岡 寛, 中田博之, 小野洋一郎, 笹原 厚ら: 高強度コンクリートの実大打設実験による品質の検討, 日本建築学会大会梗概集, p. 747, 昭和 62 年
 - 10) 近藤晴貞, 有坂七郎: 高強度コンクリートを用いた構造物を用いた構造物のコンクリート強度に関する実験, 日本建築学会大会梗概集, p. 749, 昭和 62 年
 - 11) A. M. Neville: コンクリートの特性, 技報堂, p. 243, 昭和 54 年 11 月発行
- (1990 年 1 月 10 日原稿受理, 1990 年 10 月 25 日採用決定)
-