高強度コンクリートの初期温度上昇と設計基準強度の関係 及びその調合強度への影響について

RELATION BETWEEN EARLY STAGE HYDRATION HEAT OF CEMENT AND LATER AGE STRUCTURAL STRENGTH AND ITS INFLUENCE ON TARGET STRENGTH

戸 祭 邦 之*

Kuniyuki TOMATSURI

The relatively long term structural strength of high strength concrete may depend on the magnitude of temperature inside the structure during the early stage of hydration of cement. The effect of early heat of hydration and the size of the structural member on the structural strength is discussed here. The target strength for designing concrete mixture under high hydration heat which hurts the strength gain of the structure is also discussed.

Keywords : *hydration heat, high strength concrete, structural strength, designing of concrete mixture*
水和発熱, 高強度コンクリート, 構造体強度, 調合計画

はじめに

日本建築学会建築工事標準仕様書 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 (以降 JASS 5 という) に述べられている構造体コンクリート圧縮強度 (以降構造体コンクリート圧縮強度を単に構造体強度という) に関する品質管理と調合強度決定法とを比較の対象としながら, 筆者は, 設計基準強度 360 kgf/cm^2 を超える高強度コンクリートの調合強度決定法について, 本誌にこれまで何回か記述した。本誌 419 号「設計基準強度 360 kgf/cm^2 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」¹⁾ には, 構造体強度の管理材令を積算温度 $1365^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ を満足するような中長期材令にとれば, 気温補正は必要ではないことを述べ, 本誌 429 号「中長期の強度伸展を考慮した高強度コンクリートの調合計画に関する一考察」²⁾ には, 積算温度と強度発現の関係をベースにした設計基準強度 360 kgf/cm^2 を超える高強度コンクリートの調合計画の方法を示した。本誌 445 号「水和発熱による高温履歴を初期に受けた高強度コンクリートの強度発現とその管理についての一考察」³⁾ には, 構造体内での初期の水和発熱による温度の上昇が大きい場合には, 中長期域の構造体強度発現は影響を受け, 温度上昇の大きさに応じて, 構造体強度発現の停滞が起こることを示した。また, 本誌 449 号「高強度コンクリートにおける各種養生

供試体強度とコア供試体強度の関係について」⁴⁾ では, 同一コンクリートの強度評価に標準養生供試体強度, 現場封蔵養生供試体強度, 構造体強度 (コア供試体強度) の 3 種類の強度を適用すると, 同一積算温度でそれら 3 種類の強度を比較した場合でも, それぞれに, 1 割前後のそごを生じることを述べ, そのため構造体強度の管理としてはストレートにコア供試体強度で評価した方がよいが, 簡単にはその方法を決めるににくいことから, とりあえずは標準養生供試体強度での評価に統一するのがよいのではないか, ということをも提案した。

今回は, そのあとをうけて, 構造体内初期温度上昇と設計基準強度の関係, 及びその関係もふまえて標準養生供試体強度を構造体強度管理に用いる場合の調合強度と設計基準強度の関係について述べるものである。

1. 構造体内初期温度上昇と設計基準強度

初期の水和発熱による温度の上昇によって, 中長期域の構造体強度 (コア供試体強度) 発現は影響を受ける。調合計画を行う場合には, あらかじめ温度上昇の予測をする必要がある。初期の水和発熱による構造体内部の温度上昇は, 構造体内で最も温度上昇が大きいと考えられる中心部で経験した最も高い温度を最高到達温度, その最高到達温度と打設直前のコンクリート温度との差を温

* 大成建設 (株) 技術研究所・工博

Taisei Corporation Technology Research Center, Dr. Eng.

度上昇量とすると、最高到達温度で70℃以上、または温度上昇量で40℃以上の場合には中長期域の構造体強度発現は大きく影響を受ける。それ以下の温度では影響が比較的小さい³⁾から、スラブや壁のような薄い部材はほぼ影響を受けないとみなせる。構造体強度発現に大きく影響があると予想されるのは柱や梁である。そのうち梁については、初期水和発熱による温度上昇が大きいのは特に断面の大きい地中梁のような場合である。しかし、地中梁は高層鉄筋コンクリート造の場合でも、それほど高強度を必要とするわけではない。高強度コンクリートの適用ということを考えると、ほとんど垂直部材としての柱が主体になると考えられる。そこで、本論文では柱を想定した初期水和発熱による温度上昇の予測計算を行い、平均気温や水セメント比との関連で、構造体がどのような上昇温度になるかについて検討を行う。

1.1 計算に使用するプログラム

構造体内部の初期の温度上昇を予測する計算を行うプログラムはいくつかあるが、パソコンで簡単に行えるものが便利である。ここでは、マスコンクリートの温度ひび割れ検討用に開発され、一般に市販されているプログラム名 MASP A を使用する。使用する電算の機種は NEC/PC-9800 シリーズである。この MASP A を使用するに際して、実測値との比較を行った。表-1 および

表-1 MASP A による予測計算 (測定値との比較)

実験	水セメント比 (%)	単位セメント量 (kg/m ³)	気温 (℃)	コンクリート温度 (℃)	最高到達温度 (℃)			試験体の大きさ (m)
					測定値	計算値	差	
イ	28	589	28	35	81	75	6	0.8 × 0.8 × 1.8
				27	70	64	6	
				17	54	47	7	
ロ	28.5	561	34	34	78	77	1	0.8 × 0.8 × 0.95
ハ	27.0	574	33	38	90	87	3	1.1 × 1.1 × 3.0
	28.5	544	33	39.5	88	86	2	
ニ	26	577	33	38	84	80	4	0.85 × 0.85 × 1.00
	28	536	34	35	77	75	2

図-1 計算値と実測値比較 (MASP A による)

図-1 である。実験 (イ) の実測値と計算値の差は6~7℃と大きく、その他の実験の差は1~4℃と比較的低く納まっている。それは、MASP A のプログラムには、セメントの断熱温度上昇式の実験定数として、経験上の平均的な値が入力されていると考えられるが、現在販売されているセメントの中には、この実験定数が経験的平均値と少し違う値を持つものがあるから、その差が実測値と計算値の差となって表われたと考えられる。したがって、この程度の実測値と計算値の差はやむを得ず、一般的な予測計算をする上において差し支えない精度であると判断する。

1.2 柱の大きさ、外気温と初期構造体温度の関係

構造体内部の初期水和発熱による温度上昇は柱の大きさや外気温などの影響を受ける。柱の大きさとしては、大体経験的な大きさから断面寸法が800~1100 mm 程度と考え、900×900 mm と1100×1100 mm の2種類の断面寸法を選ぶ。外気温は5℃きざみに、15、20、25及び30℃の4水準とする。コンクリートの調合については、水セメント水比で25%~50%、セメント水比で2.0~4.0の範囲を想定し、その間で3 (一部7または4) 水準を選ぶ。その際、単位水量 (スランプ18~24 cm) を経験的に155~175 l と考え、155 l と175 l の2種類を選んで単位セメント量を計算する。また、外気温とコンクリート温度の差については、これも経験上水セメント比が小さいほど大きいので、水セメント比25%前後のときの外気温とコンクリート温度の差が10℃程度になり、水セメント比50%程度では5℃になることを考慮し、その2つの値をもとに水セメント比に応じた値を設定する。

表-2 は、計算の条件とその条件を与えたときの MASP A による構造体内部の温度上昇予測計算結果で

図-2 外気温25℃のときの初期の温度上昇予測比較 (柱モデル)

ある。その予測計算結果をグラフに表したのが図-2、図-3である。いずれの場合も下半分のグラフが最高到達温度を表し左の目盛を使用する。上半分のグラフは、温度上昇量であり右の目盛で表している。図-2は外気温を25℃の一定にしたときの構造体温度と柱断面寸法及び単位水量との関係を表した図で、図-3は柱断面寸法900×900mm、1100×1100mmそれぞれについて単位セメント量と構造体内温度との関係を示すグラフである。

図-2と図-3とを比較すると、構造体内の上昇温度は外気温の影響が大きく、それに比べると柱断面寸法と単位水量の影響は小さい。図-2によると、柱断面寸法200mmの差による構造体内温度への影響と単位水量20lの調合差が構造体温度へ与える影響はほぼ同じである。いま、中長期域の構造体強度発現が影響を受けない

初期の温度条件として、最高到達温度70℃以下、または温度上昇量40℃以下を考える。その場合、図-3より、外気温が高く20～25℃のときは最高到達温度70℃以下の条件の方が温度上昇量40℃以下の条件より優先し、外気温が低く15℃以下の場合には温度上昇量40℃以下の条件の方が優先適用されることが分かる。しかし、外気温が15℃以下の場合でも、最高到達温度70℃以下の条件と温度上昇量40℃以下の条件に、それほど大きな違いがあるわけではなく、最高到達温度70℃以下の条件で、温度上昇量40℃以下の条件を代表しても、大体の傾向を論ずる場合には差し支えないと考えられる。

水と初期の構造体温度の上昇に外気温が影響を与えるのはコンクリートを打設してから3、4日長くても7日間である。丸善発行の理科年表に気温の半旬別平均値が

表-2 MASPAによる予測計算(柱モデル)

与条件項目			最高到達温度(℃)								温度上昇量(℃)							
外気温とコンクリート温度の差(℃)			+10	+10	+ 9	+ 8	+ 7	+ 6	+ 5	+10	+10	+ 9	+ 8	+ 7	+ 6	+ 5		
セメント水比			4.00	3.70	3.33	3.00	2.70	2.30	2.00	4.00	3.70	3.33	3.00	2.70	2.30	2.00		
水セメント比(%)			25.0	27.0	30.0	33.3	37.0	43.5	50.0	25.0	27.0	30.0	33.3	37.0	43.5	50.0		
単位水量 175t	単位セメント量(kg)		700	648	583	526	473	402	350	700	648	583	526	473	402	350		
	900×900mm	外気温 30℃	94	89	83	77	71.5	65	60.5	54	49	44	39	34.5	29	25.5		
		25℃	88	83	77	71	66	59	54	53	48	43	38	33	28	24		
		20℃	81	77	70	64	59	52	47.5	51	47	41	36	32	26	22.5		
		15℃	74	70	63	57	52	45	40	49	45	39	34	30	24	20		
	1100mm	外気温 30℃	100	95		82			65	60	55		44			30		
		25℃	94.5	90		77			58	59.5	55		44			28		
		20℃	88	83.5		70			52	58	53.5		42			27		
		15℃	81	77		63			45	56	52		40			25		
	単位水量 155t	単位セメント量(kg)		620	574	517	465	419	356	310	620	574	517	465	419	356	310	
900×900mm		外気温 30℃		83		72			57.5		43		34			22.5		
		25℃		77		66			51.5		42		33			21.5		
		20℃		70		60			45		40		32			20		
		15℃		63		52			37.5		38		29			17.5		
1100mm		外気温 30℃		89		77			62		49		39			27		
		25℃		83		71			55		48		38			25		
		20℃		77		65			49		47		37			24		
		15℃		70		57.5			42		45		34.5			22

(a) 柱寸法 900×900mm

(b) 柱寸法 1100×1100mm

図-3 単位セメント量と初期の温度上昇予測(柱モデル)

記載されているが、この値がほぼその外気温に相当する。昭和64年版でみると気温の半旬別平均値が28°Cを超えるのは、大阪、福岡、鹿児島及び那覇の一部の期間であり、その場合でも29°Cは超えていない。他はすべて28°C未満である。したがって、日本国内では1日だけの平均気温が30°Cになることはあるが、沖縄を含めて5日間を平均した場合には、一部の例外を除きほぼ外気温28°Cが最高であるとみなせる。そこで、図-3から外気温28°Cのとき構造体内温度が最高到達温度で70°C以下、または温度上昇量で40°C以下の条件を満足するときのセメント水比を求める。単位水量が155 lの場合、柱断面寸法900×900 mmでは、セメント水比3.0以下、柱断面寸法1100×1100 mmではセメント水比2.7以下である。水セメント比では33.3%以上、37.0%以上となる。単位水量が175 lの場合では柱断面寸法900×900 mmの場合がセメント水比2.7以下（水セメント比37.0%以上）、柱断面寸法1100×1100 mmの場合はセメント水比2.4以下（水セメント比41.7%以上）となる。同様に単位セメント量との関係でみると、外気温28°C以下で構造体内温度が最高到達温度で70°C以下、または温度上昇量で40°C以下の条件を満足するのは、柱断面寸法900×900 mmの場合で単位セメント量480 kg以下、柱断面寸法1100×1100 mmの場合では単位セメント量430 kg以下である。

1.3 セメント水比と設計基準強度の一般的な関係

一般に調合計画は材令28日標準養生供試体強度で行うことが多い。そこでこの材令28日標準養生供試体強度を標準強度と呼ぶことにする。セメント水比と標準強度の関係は、骨材の品質や混練方式などコンクリートを製造するときの条件によって変わる。その関係は、正式にはコンクリートを製造する工場と骨材が決まり、空気量などの調合計画条件が示されてから決まるものである。しかし、実用的な範囲での骨材の品質や空気量の変動、または製造条件が標準強度とセメント水比の関係に与える影響に比べ、標準強度はセメント水比とより密接な関係をもっているから、標準強度とセメント水比のおおよその一般的な関係は分かる。図-4は昭和61年から平成4年までに大成建設技術研究所内で行った室内実験の結果と、その間に行われた実際の工事を対象として、その工事にコンクリートを供給することが決まったコンクリート製造工場での小型ミキサーによる室内試し練りの試験結果をグラフにしたものである。データは大成建設技術研究所内で行ったものが最も多く58%を占め、次いで東京都内の19%、香川県での8%となっている。埼玉県、神奈川県でのデータを含めると83%が東京周辺でのデータである。強度発現に比較的大きい影響をもつと考えられる空気量は、1.0%から6.0%まであり、2~5%の間が多い。平均値は3.21%である。強度は

図-4 セメント水比と標準強度の関係実績

図-5 空気量と標準強度（セメント水比3.13）

400~800 kgf/cm²が多く平均値は580 kgf/cm²、セメント水比では2.0~3.5が多く平均値は2.66、水セメント比では30~45%、平均値は39%である。また、単位水量では165~180 kg/cm³が多くを占め平均値は172 kg/m³である。グラフ中の直線は回帰式を示している。

標準強度と空気量の関係については、図-4のなかで最もデータ数の多いセメント水比3.13（水セメント比32%）の場合についてグラフにすると、図-5のようになる。空気量1%に付き標準強度は約15 kgf/cm²の減少となる。15/730=0.02つまり空気量1%について約2%の強度減少である。したがって、図-4は、空気量補正を行うと多少は変わるが、おおよその傾向をみる上においては有用であると考ええる。

図-3および図-4から、外気温28°C以下つまり日本国内であればほぼいずれの地方いずれの季節であって

表—3 設計基準強度とセメント水比

設計基準強度 (kgf/cm ²)	420	480	540	600
調合強度 (kgf/cm ²)	488	558	628	698
セメント水比	2.31	2.59	2.87	3.16
水セメント比 (%)	43.3	38.6	34.8	31.6
単位水量 165 l のときの単位セメント量 (kg)	381	422	474	521

も、構造体内部の初期の上昇温度が最高到達温度で 70℃ 以下または温度上昇量が 40℃ 以下の条件を満足する設計基準強度の大きさについて考える。今仮りに変動係数を 7%, 不良率 2.3% 以下の条件で標準強度での調合強度を計算すると、表—3 の 1 行目のような設計基準強度に対して、それぞれの調合強度は表—3 の 2 行目の欄に示すようになる。さらに図—3 の回帰式を使ってセメント水比、水セメント比を計算すると表—3 の 3 行目、4 行目に示す値になる。このセメント水比の値から単位水量がそれぞれ 175, 155 kg の場合について単位セメント量を計算し、構造体内の温度上昇が最高到達温度で 70℃ 以下または温度上昇量が 40℃ 以下の条件を満足する設計基準強度を求めると、柱断面寸法 900×900 mm の場合で設計基準強度 480 kgf/cm² (単位水量 175 kg) または 540 kgf/cm² (単位水量 155 kg) 以下になり、柱断面寸法 100×1100 mm の場合では、設計基準強度 420 kgf/cm² (単位水量 175 kg), 480 kgf/cm² (単位水量 155 kg) 以下となる。高強度コンクリートの場合、単位水量は実際 165 l 程度の頻度が最も高いとみられるので、その場合の単位セメント量を計算すると表—3 の

5 行目に示す値になる。その値と図—3 と併せて考えると、柱断面寸法 900×900 mm では、設計基準強度 540 kgf/cm² 以下、柱断面寸法 1100×1100 mm では設計基準強度 480 kgf/cm² 以下である。したがって、高層の鉄筋コンクリート造による集合住宅を想定し、柱断面寸法は 1000×1000 mm 程度の頻度が高いとすれば、単位セメント量は 460 kg 以下程度になるから、ごく平均的には設計基準強度 540 kgf/cm² 以下、安全を考えれば同 480 kgf/cm² 以下となる。つまり、設計基準強度 480 kgf/m² 以下であれば、構造体の硬化初期の急激な温度上昇を考慮せずに調合計画が可能という言い方がおおよそできるであろう。

2. 硬化初期の温度上昇と強度発現

2.1 積算温度と各種養生供試体強度発現の関係

筆者は高強度コンクリートについての調合計画は、積算温度と構造体強度発現の関係をベースに考えるのが適当であると考えている。設計基準強度と調合強度の関係を考える前に、まず積算温度と各種供試体強度発現の関係について検討する。

初期の構造体内温度上昇の大きさと、そのときの構造体強度 (コア供試体強度)、標準強度及び現場封減養生供試体強度間の関係に関する実験については、本誌 445 号及び 449 号に報告した。この実験は、いろいろな温度履歴条件下でのコア供試体強度を調査することを目的として、施工場所、施工時期を種々に変えて行われたものである。強度レベルとしては設計基準強度 360 kgf/cm² 程度から、通常材料、製造条件下で得られる最高クラ

表—4 各実験における各種養生供試体強度と積算温度 (普通ポルトランドセメント)

実験 番号	試 験 体		コンクリート 打設時期 (昭和又は 平成年月)	試験体施工 場 所 (都道府県)	コンクリート の水セメント 比 (%)	最高到達 温 (℃)	温 度 上昇量 (℃)	供試体強度 (kgf/cm ²)								積 算 温 度 (° D・D)				
	寸法 (mm)	数						標準養生			現場封蔵養生		構造体(77)			現場封蔵養生		構造体(77)		
								7 日	28 日	91 日	28 日	91 日	28 日	91 日	28 日	91 日	28 日	91 日		
※ Ⅰ	850× 900×2800 (柱)	1	60年10月	埼 玉	39.0	59	36	432	519	578	516	569	520	577	610	1477	718	1585		
	850× 900×2800 (柱)	1	60年11月		40.0	67	43	342	420	501	444	505	407	469	553	1328	667	1442		
Ⅱ	850× 850× 900	5	63年2月	神奈川	33.0	53	38	467	587	685	505	647	564	618	411	1746	566	1901		
						53	38						529	653			575	1910		
						50	35						492	617			562	1897		
						49	34						519	573			547	1882		
Ⅲ	850× 850×1000	1	1 年8月	北海道	35.0	76	48	495	583	647	601	613	593	612	723	2304	722	2304		
	850× 850×1000	1			45.0	64	37	359	456	512	465	487	473	477			805	2386		
	850× 950×2150	1			1 年11月	36.6	45	22	484	550	610	447	539	476	547	433	847	554	968	
Ⅳ	400× 400× 650	2	1 年12月	20℃80%の 室内	29.1	64	38	725	833	985	861	892	880	920	840	2730	963	2853		
	250× 350× 650	1				46	20						897	905			910	2800		
Ⅴ	800× 800×1800	1	2 年8月	神奈川	28.0	79	45	658	828	873	815	837	784	796	1064	3060	1152	3148		
	800× 800×1800	1	2 年10月			70	44	654	804	856	820	853	747	809	791	2083	879	2171		
	800× 800×1800	1	2 年12月			48	31	621	756	857	706	816	664	756	473	1539	543	1609		
Ⅵ	800× 800× 950	2	2 年8月	神奈川	28.5	87	50	622	781	871	779	869	775	772	1010	2802	1175	2987		
	400× 600× 950	1				71	34						791	842			1113	2905		
		1100×1100×3000				1	77						40	759			782	1002	2894	
Ⅶ	1100×1100×3000	1	3 年7月	三 重	27.0	96	58	715	836	902	806	894	703	740	1048	3108	1198	3238		
	1100×1100×3000	2			28.5	95	56	663	753	853	749	857	672	707			1126	3186		
					86	48	674	767	862		866	674	1181	3241						
Ⅷ	850× 850×1000	4	3 年8月	東 京	28.0	91	53	534	665	757	651	748	590	634	984	2949	1110	3075		
						88	50										834	863	1105	3070
						79	44										692	754	1089	3054
						82	47						589	766			877	713	783	665
	850× 850×1000	1	26.0	87	49	582	707	765	684	780	671	719			1089	3054				
850× 850× 900	1	2 年9月	28.0	86	52	585	693	813	674	726	617	611	937	2553	1042	2658				

(※実験 I は現場封減養生ではなく現場水中養生による強度)

(a) 最高到達温度 ≤ 70℃

(b) 温度上昇量 ≤ 40℃

図—6 標準養生強度・現場封緘養生強度及びコア強度の個別強度指数と積算温度

スの強度までを含んでいる。試験体の大きさは、断面寸法 800×1100 mm 角、高さは 1000 mm, 2000 mm 前後、3000 mm の 3 種である。その他の実験の詳細については、本誌 445 号及び 449 号と重複するので割愛し、その強度試験結果についてのみ再度表—4 に示す。

まず最初に、積算温度と各種養生供試体強度及びコア供試体強度発現の関係からみていきたい。図—6 は、表—4 の材令 28, 91 日の結果について積算温度と各種養生供試体強度、及びコア供試体強度の関係を図示したものである。横軸には積算温度の常用対数目盛、縦軸には個別強度指数を用いている。個別強度指数とは、発現された強度を標準強度との関係で評価するもので、発現強度/同一採取供試体の標準強度で計算される値である¹⁾。コア供試体強度については、図—6(a) は最高到達温度 70℃ を超えるデータは除いており、図—6(b) では温度上昇量が 40℃ を超えるデータは除いてある。供試体の養生別に回帰直線を計算した結果もグラフに示してある。

図—6 をみると、各養生別に計算した回帰線は、(a)、(b) とともにそれぞれほぼ同じ位置にあり、養生による違いは見られない。回帰線から上下 1 割程度のばらつき

図—7 コア強度の個別強度指数と積算温度 (最高到達温度 ≤ 70℃)

図—8 コア強度の個別強度指数と積算温度 (最高到達温度 > 70℃)

を含んではいるが、養生の種類に関係なく積算温度に伴う強度増進が見られる。したがって、硬化初期における構造体内の温度上昇が、最高到達温度で 70℃ 以下または温度上昇量が 40℃ 以下の場合には、標準養生供試体強度、現場封緘養生供試体強度及びコア供試体強度の強度増進は、積算温度との関係において、それぞれが同程度とみなせる。また、図—6(a)、(b) は同じような傾向をみせており、前述したようにおよその傾向を見る上においては、最高到達温度 70℃ 以下の条件のみを取りあげても差し支えないと考えられる。以降は最高到達温度 70℃ 以下の条件のみを使用する。

2.2 積算温度とコア供試体強度発現の関係

図—7 は、表—4 から最高到達温度 70℃ 以下の条件に合うものを選んで積算温度とコア供試体強度との関係を表示したものである。中央の直線は回帰直線、上下の破線は上下 5% の棄却域を示している。材令 28 日と 91 日のデータをつないでいる点線は同一採取試料によるデータであることを示す。図—8 は逆に、最高到達温度が 70℃ を超える場合についての積算温度とコア供試体強度の関係を示したものである。図—7 と図—8 を比較すると、図—7 においては材令 28 日から材令 91 日への強度の伸びが、概して大きくなっているのに対して、図

(a) 840° D・D時

(b) 2730° D・D時

図—9 最高到達温度とコア供試体個別強度指数

—8では、その値が逆に小さくなっている。図—7において材令28日から材令91日へのコア供試体強度の伸びが小さいものは、現場封緘養生供試体強度でも同様に小さく、前者が大きい場合は後者も大きい傾向がある。また、図—8では2例を除き、材令28日、91日の個別強度指数の値は1.00以下、つまり材令28日、91日ともコア供試体強度は標準強度以下である。

2.3 840°D・D、2730°D・D時コア供試体強度と最高到達温度

さらに、標準強度と比較した積算温度840°D・D時及び2730°D・D時コア供試体強度発現を、最高到達温度との関係で検討する。表—4の材令28日、91日の積算温度はちょうど840、2730°D・Dとはなっていないので、840°D・D時及び2730°D・D時コア供試体強度に換算する必要がある。その方法は、強度・積算温度（常温対数目盛）のグラフ上において、同一試料の材令28日と材令91日のコア供試体強度を結んだ線を延長し、その延長した直線上における840°D・D及び2730°D・D時の読み値を、それぞれのコア供試体強度とするものである。材令28日と91日強度から比例配分によって求める。

図—9(a)、(b)は、このようにして求めた840°D・D時及び2730°D・D時コア供試体の個別強度指数を最高到達温度との関係で図示したものである。図—9(a)において、最高到達温度70°C以下の横軸に平行な0.99の線は、同70°C以下の点の平均値である。同70°Cを超える部分について引いた斜めの線は、70°Cを超えるデータのみを対象としたときの最小2乗法による回帰線である。この回帰線によると、840°D・D時コア供試体強度は最高到達温度が10°C上るごとに個別強度指数は0.06の割合で小さくなる。また図—9(b)の横軸に平行な1.11の線は、図—9(a)と同様に、同70°C以下の点の平均値を示す線で、同70°Cを超える線分は同70°Cを超えるデータを対象とする回帰線である。図—9(b)の場合はコア供試体強度発現への最高到達温度の影響は同70°C以前から始まり、最高到達温度10°Cごとに個別強度指数が0.08減少しており、840°D・D時のときより強度減少の仕方が急激である。つまり、最高到達温度が70°Cを超えると70°Cから離れるにしたがって2730°D・Dコア供試体強度は、840°D・D時と同様の比率では期待できなくなり、840°D・D時から2730°D・D時への強度増進が急激に小さくなる。

また、図—9(a)では、最高到達温度50°C以下の部分に強度比が1.00より小さいデータがいくぶん多い目にあり、1.00より大きなデータとのバランスが多少悪くなっている。今までの経験から考えて最高到達温度が低い場合に、この強度比が1.00より小さくなる傾向があるとは考えられない。事実これらの低い目の値も2730°D・D時での値は最高到達温度70°C以下のデータの平均値付近である。

3. 高温履歴を受けない場合の設計基準強度の調合強度の関係

3.1 設計基準強度と調合強度の一般的な関係

高温履歴を受けない場合の設計基準強度と調合強度との一般的な関係については、設計基準強度360 kgf/cm²を超える高強度コンクリートに、JASS 5に記述されている高強度コンクリートの項と同様な構造体強度管理を適用した場合を含め、すでに本誌429号に記述済みであり本誌449号でも触れた。ここでは本論文の理解に必要な骨子のみを述べる。

JASS 5には、材令28日を超える中長期域で強度管理を行う場合、設計基準強度と調合強度の関係を与える式として、3つの条件式がある。それらは、①不良率が決められた値以下になることを求める式、②ばらついて製造される強度のうち、実質上は最も小さいと考えられる強度が、設計基準強度の決められた割合の強度を実質的に下回らないことを求める式、③材令28日における構造体強度（この場合現場封緘養生供試体強度を意味

する)が設計基準強度の70%以上であることを求める式である。設計基準強度360 kgf/cm²を超える高強度コンクリートの場合、不良率をJASS5に定義されている高強度コンクリートの場合と同様に2.3%以下とすると、製造されるコンクリートの強度が設計基準強度の値を下回るのは最大2.3%しかないということである。製造されたコンクリートの強度が実質的に設計基準強度を下回るのは非常にまれである。したがって、②の条件式は不要である。また、設計基準強度360 kgf/cm²を超える高強度コンクリートでは早期強度の発現が大きいので③の条件式は特に条件式としてとり上げる必要はない。つまり、設計基準強度360 kgf/cm²を超える高強度コンクリートでは①の条件式だけでよい。

その他、設計基準強度360 kgf/cm²を超える高強度コンクリートの調合計画についての筆者の考え方は以下の4点にまとめられる。

- ① 積算温度と強度発現の関係をベースに考え、各種養生供試体強度及びコア供試体強度は積算温度をそろえて評価する。
- ② 調合計画は常に標準強度で行う^{注)}。
- ③ 調合強度を決める際に適用するばらつきの値は、標準強度分布のばらつきの値ではなく、構造体強度を管理する供試体の養生方法によって求めた供試体強度分布の、構造体強度を管理する積算温度時のばらつきの値を使用する。
- ④ コンクリートの強度評価は一元化した方がよい。とりあえずは標準強度によって評価する。すなわち、現在JASS5の品質管理で用いている使用するコンクリートの品質を判定する方法と同じにする。

本論文ではこの先、標準養生供試体強度を構造体強度管理に用いる場合の調合強度と設計基準強度の関係について論じたい。そのため、標準強度分布で構造体強度管理を行う場合とコア供試体強度分布で構造体強度管理を行う場合とを比較しながら話を進める。つまり、標準強度分布で構造体強度管理を行う場合、構造体強度を管理する積算温度に応じてコア供試体強度分布の不良率がどのように変化するかを主題に話を進める。ただし、ここでとり上げているコア供試体強度は、任意の部分から採取した個々のコア供試体強度ではなく、本誌449号に記述したように、個々のコア供試体強度の平均値、すなわち、柱をモデルとした模擬部材から縦軸方向に採取して求めた各個別コア供試体強度の平均値である。

構造体強度の発現時期を任意の積算温度が得られたときとし、調合強度を標準強度で表すとすると、標準強度分布で構造体強度管理を行う場合、及びコア供試体強度分布で構造体強度管理を行う場合の設計基準強度と調合強度の関係は、それぞれ次のような式で表せる。

$$F_1 = F_c + 2 \cdot {}_s\sigma_{840} \cdots \cdots (1)$$

$$F_2 = (F_c + 2 \cdot {}_c\sigma_m) / {}_c r_m \cdots \cdots (2)$$

F_1 : 標準強度分布で構造体強度を管理する場合の標準強度での調合強度

F_2 : 積算温度 $m^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 時のコア供試体強度分布で構造体強度を管理する場合の標準強度での調合強度

F_c : 設計基準強度

${}_s\sigma_{840}$: 積算温度 $840^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 時標準養生供試体強度(すなわち標準強度)分布の標準偏差

${}_c\sigma_m$: 積算温度 $m^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 時コア供試体強度分布の標準偏差

${}_c r_m$: 同一調合のコンクリート群において、積算温度 $m^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 時コア供試体強度分布の平均値を、標準強度分布の平均値で除した値

(1)式は、構造体強度の管理をあらかじめ設定した積算温度時の現場封緘養生供試体強度分布やコア供試体強度分布の値を使用して行うのではなく、間接的に構造体強度の管理を標準強度分布で行うときの、設計基準強度と調合強度との関係を示す式である。これに対して(2)式は、あらかじめ設定した積算温度時のコア供試体強度分布で直接構造体強度管理を行う場合の条件式である。すなわち構造体強度発現を期待する積算温度 $m^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 時のコア供試体強度分布において、不良率が2.3%以下の条件を満たすことを条件とする場合の条件式である(コア供試体強度分布で構造体強度を管理するのではなく、現行JASS5の高強度コンクリートの項に準じて、現場封緘養生供試体強度分布で構造体強度管理を行う場合は、(2)式のコア供試体強度分布の代わりに現場封緘養生供試体強度分布の値を使用することになる)。

注) これと区別するため、本論文では、標準強度分布を想定して不良率を定め、標準強度で構造体強度を管理するいわゆるポテンシャル管理をする場合を、標準強度分布で構造体強度を管理するといういい方をする。同様に、所定の材令または積算温度時の現場封緘養生供試体強度分布を想定して不良率を定め、その現場封緘養生供試体強度で構造体強度を管理することを所定の材令または積算温度時現場封緘養生供試体強度分布で構造体強度を管理するという。

3.2 標準強度分布による構造体強度管理とコア供試体強度分布における不良率

ここでは、構造体強度管理に標準強度分布を適用したときの、標準強度分布における不良率とコア供試体強度分布における不良率の関係について検討する。

3.2.1 任意の積算温度時コア供試体強度分布の計算

(2)式の条件式で調合計画を行う場合、任意の積算温度 $m^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 時におけるコア供試体強度分布での標準偏差の値が必要である。

筆者は本誌428号と449号とに2つの強度分布に關す

る実験式を示した。これは、 A 、 B 2つの強度分布があるとき、 A 強度分布及び B 強度と A 強度の比の分布から、 B 強度分布を予測する実験式である。次式で表せる。

$$B(l) = \iint A(j) \cdot K \cdot R(i) d_j d_i \dots \dots \dots (3)$$

$B(l)$: B 強度分布の確率密度関数

$A(j)$: A 強度分布の確率密度関数

$R(i)$: B 強度/ A 強度 (比) の確率密度関数

K : 補正係数

K は A 強度分布、 B 強度分布の関係から決定される実験定数で、 $K=1.0$ の場合は B 強度分布の可能性の範囲を示し (モデルⅠ)、 $K<1.0$ の場合は可能性の最も高い B 強度分布の予測をするもの (モデルⅡ) である。本論文ではモデルⅠを使用する。

いま、 A 強度分布を標準強度分布、 B 強度分布を $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時コア供試体強度分布とする。 $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時コア供試体強度・標準強度比の分布については、表—4の結果から本誌 449 号に計算法を示した方法で得られたコア・標準養生強度比分布を使用する。これは、表—4の材令 28 日、91 日コア供試体と同じ積算温度時の標準養生供試体強度を材令 28 日と 91 日標準養生供試体強度から比例配分によって計算し、その値で材令 28 日、91 日コア供試体強度を除した比の分布である。この分布の平均値は 0.97、標準偏差は 0.063 である。

同様に A 強度分布を材令 91 日標準養生供試体強度分布、 $2730^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時コア供試体強度・材令 91 日標準

養生供試体強度比分布を、上記のコア・標準養生強度比分布とすれば、 B 強度分布すなわち $2730^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時コア供試体強度分布が計算できる。 $840\sim 2730^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時間のコア供試体強度分布は、 $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時及び $2730^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時コア供試体強度分布から比例配分によって計算する。

群強度指数¹⁾で表したとき (群強度指数とは、各材令または積算温度時点での各種供試体強度を、標準強度での調査強度を 1.0 とした指数で表現するものである。)、標準強度分布は平均値 1.0、標準偏差 0.07、材令 91 日標準養生供試体強度分布は平均値 1.12、標準偏差 0.09 とすると、(3) 式モデルⅠで計算したコア供試体強度 (群強度指数) 分布の平均値と標準偏差の値は $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時でそれぞれ 0.97、0.09、 $2730^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時で 1.08、0.11 となる。これらの平均値を図—9(a)、(b) の最高到達温度 70°C 以下の部分の平均値と比べるといくぶん低い値となっている。これは、群強度指数では標準強度自身が標準強度分布平均値より低いことが起こり得るからである。図—9(a)、(b) の縦軸は個別強度指数を表しており、群強度指数で表される平均値が $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時、 $2730^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時いずれにおいても最高到達温度 70°C 以下の平均値を表す実線よりやや低い値になっているのは理解できる。

$840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時及び $2730^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時コア供試体強度 (群強度指数) 分布の計算された値を用いて、 $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ から $2730^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時までの標準養生供試体強度 (群強度指数) 分布及びコア供試体強度 (群強度指数) 分布における平

図—10 積算温度と標準養生及びコア強度分布 (強度は群強度指数表示)

均値と不良率 2.3 % の位置を示す強度（群強度指数）の軌跡をかけば図—10 となる。図—10（強度はすべて群強度指数）において、不良率 50 % つまり平均値を表す標準養生供試体強度の軌跡は f_{50} で示す実線であり、同不良率 2.3 % の位置の軌跡は $f_{2.3}$ の実線である。同様に点線はコア供試体強度分布の場合を表す。図—10 によれば、コア供試体強度分布における不良率 2.3 % の位置を示す強度の値は、積算温度に応じて高くなっている。図—10 の下の部分のグラフは材令と積算温度の関係を示すものである。例えば材令 28 日の場合は平均外気温が 2°C であれば積算温度は $336^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 、 28°C であれば $1064^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ であり、平均外気温に応じて材令 28 日の場合は $336\sim1064^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 間の積算温度をとることを示している。

3.2.2 積算温度の経過とコア供試体強度分布不良率の変化

図—10（強度はすべて群強度指数）にみるように、標準強度分布で所要強度を下まわる不良率 2.3 % 以下の条件で製造されたコンクリート群は、材令の経過によって積算温度が増加するとともに所要強度を超える強度の存在割合が高くなり、コア供試体強度の不良率は小さくなる。構造体が、 $2730^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ の積算温度が得られる材令になれば、コア供試体強度分布で所要強度を下回る不良率は、標準強度分布で設定した不良率 2.3 % 以下と同じ不良率になる。このことは、図—10 において、標準強度で不良率 2.3 % 以下で注文したときの注文強度 f_{ns40} （不良率 4.17 % 以下を不良率 2.3 % 以下に読みかえた呼び強度を意味する。）を表す横軸に平行な直線と、コア供試体強度分布で評価したとき不良率 2.3 % を表す位置 $f_{2.3}$ の軌跡の線が、積算温度 $2730^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ の位置で交わっていることに示されている。このコンクリートは構造体が $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ の積算温度が得られた時点では、構造体強度分布（コア供試体強度分布）評価では所要強度を下回る不良率は 2.3 % より大である。そのときの不良率は次のように計算される。群強度指数で表したとき、表—4、(3) 式、モデル I によって計算した $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時コア供試体強度分布での平均値 $c\tau_{840}$ と標準偏差 $c\sigma_{840}$ の値は、それぞれ 0.97、0.09 である。標準強度分布での標準偏差は 0.07 であるから、所要強度は $1-2\times 0.07=0.86$ 、つまり $f_{ns40}=0.86$ である。したがって、 $(0.97-0.86)/0.09=1.22$ より、不良率は 11.1 % である。

筆者は本誌 419 号に、構造体強度を現場封緘養生供試体強度で管理する場合についての検討を行い、 $1365^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ の積算温度が得られれば気温補正は不要である。つまり、設計基準強度で考えたとき $1365^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時現場封緘養生供試体強度分布においては標準強度分布での不良率と同じ不良率が得られることを述べた。この場合す

なわち $1365^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時のコア供試体強度分布での不良率は、図—10（強度は群強度指数表示）に示すように積算温度 $1365^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時のコア供試体強度分布が f_{50} の線と交わるから、所要強度（すなわち設計基準強度）を下回る不良率の値は 5.0 % である。つまり、図—10 のような関係が成立する条件下においては、構造体強度管理を不良率 2.3 % 以下を条件とする標準強度分布で行うことは、不良率 2.3 % 以下を条件とする $1365^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時現場封緘養生供試体強度分布、不良率 5.0 % 以下を条件とする $1365^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時コア供試体強度分布で行うことに等しく、さらに、前述したように不良率 2.3 % 以下を条件とする $2730^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時コア供試体強度分布で行うのにも等しい。

逆に、コア供試体強度分布で設計基準強度を下回る不良率 5.0 % 以下を是認すれば、 $2730^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ コア供試体強度分布で、不良率 5.0 % 以下の条件で、構造体強度を管理する場合の設計基準強度は、群強度指数で表すと図—10 より 0.90 であるから、標準強度での調合強度は、標準強度分布で設計基準強度を下回る不良率 2.3 % 以下（= $1365^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時現場封緘養生供試体強度分布で不良率 2.3 % 以下）の条件で製造したコンクリート群に比べて、 $(1/0.90)/(1/0.86)=0.96$ つまり、4 % 調合強度を低く設定できる。

さらに、図—10 において $2730^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時標準養生供試体強度分布で設計基準強度を下回る不良率が 2.3 % 以下となる条件で調合計画を行う場合を考える。そのときの設計基準強度は $(1.12-20\times 0.09)$ より 0.94 である。この場合の標準強度での調合強度は、 $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時標準養生供試体強度分布（=標準強度分布）で設計基準強度を下回る不良率 2.3 % 以下の条件で行う調合強度に比べて $(1/0.94)/(1/0.86)=0.91$ つまり 9 % 小さく設定できる。 $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時コア供試体強度分布評価では不良率は $(0.97\sim 0.94)/0.09=0.33$ より 37 %、 $2730^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時コア供試体強度分布評価では $(1.08-0.94)/0.11=1.27$ より 10.2 % である。現在のレデミクストコンクリート製造における不良率が 4.17 % 以下であるから、不良率 10.2 % では不良率が大きいようにも思えるが、最初に調合計画に統計の考え方が導入された昭和 32 年版 JASS 5 での不良率が 16 % だったことを思えば、不良率 10.2 % というのは決して大きすぎる値ではない。その JASS 5 には不良率 16 % は材料関係者と構造関係者の協議によって決定したと解説されている。不良率を理由もなく大きくすることは許されるべきことではないが、不良率 16 % も許容されていた時期が存在したことは確かである。このようなことから、筆者は施工条件によっては $2730^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時標準養生供試体強度分布でのポテンシャル評価位までは高強度コンクリートの調合計画に適用してもよいのではないかと考える。

表—5 それぞれの積算温度を達成するに要する日数

都府県	月	(単位 日)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
札幌	840°D・D	上旬	105	84	63	46	37	32	28	26	32	44	94
		中旬	98	77	57	43	35	31	26	27	35	53	111
		下旬	91	69	51	39	33	29	26	28	39	69	117
	1365°D・D	上旬	132	109	87	69	57	50	44	44	57	107	156
		中旬	125	102	80	64	55	48	43	46	65	138	156
		下旬	117	94	74	60	52	46	43	50	80	151	154
	2730°D・D	上旬	187	162	138	117	102	93	92	109	213	226	208
		中旬	178	154	130	111	98	92	95	129	221	226	218
		下旬	170	146	123	106	96	91	100	174	225	225	213
仙台	840°D・D	上旬	73	64	51	40	33	29	26	24	28	35	49
		中旬	70	59	47	37	32	28	25	25	30	39	57
		下旬	67	55	43	35	30	27	24	25	32	43	64
	1365°D・D	上旬	104	89	74	60	52	46	41	40	49	65	96
		中旬	99	84	69	57	50	45	40	42	53	74	105
		下旬	95	79	64	54	48	43	40	44	58	85	109
	2730°D・D	上旬	160	142	123	107	95	86	84	91	133	176	183
		中旬	154	135	117	103	91	85	85	98	152	181	181
		下旬	148	129	112	98	89	84	87	109	167	182	178
東京	840°D・D	上旬	56	51	42	34	29	26	24	22	25	31	39
		中旬	55	48	39	32	28	26	23	23	27	33	43
		下旬	53	45	37	31	27	25	22	23	29	36	47
	1365°D・D	上旬	85	75	63	53	46	42	38	37	43	54	72
		中旬	82	71	59	50	45	41	37	38	46	59	78
		下旬	79	67	56	48	43	39	36	39	50	65	83
	2730°D・D	上旬	139	124	109	96	87	79	76	81	105	139	154
		中旬	135	119	104	93	84	78	76	86	116	146	154
		下旬	130	114	100	89	81	77	78	92	129	151	153
那覇	840°D・D	上旬	32	31	29	27	25	23	22	22	22	24	26
		中旬	32	31	29	26	24	22	21	22	23	25	27
		下旬	32	30	28	25	24	22	22	22	23	25	29
	1365°D・D	上旬	52	50	47	43	40	37	35	36	37	40	45
		中旬	52	49	45	41	39	36	35	36	38	41	46
		下旬	51	48	44	40	38	36	35	36	39	43	48
	2730°D・D	上旬	100	95	88	82	76	73	71	73	78	87	96
		中旬	99	92	86	80	75	72	72	74	81	90	98
		下旬	97	90	84	78	74	72	72	75	84	93	100

本誌 419 号に筆者は、積算温度的にみた場合日本国内は札幌、仙台、新潟、東京以西本州、沖縄の四地域におおよそ分類できることを示した。積算温度 840°D・D、1365°D・D、2730°D・D が得られるそれら四地域での日数を、丸善発行の理科年表の気温の半月別平均値を用いて計算すると表—5 のようになる。東京でいえば 1365°D・D は材令 91 日以内には達成できそうであり、2730°D・D を最高 154 日であるから約 5 か月で達成できる。

4. 高温履歴を受ける場合の設計基準強度と調合強度の関係

初期の構造体温度上昇が大きい場合の設計基準強度と調合強度の関係は次式のようにになる。

$$F_4 = (F_c + 2 \cdot s \cdot \sigma_{s40}) / (1 - h_0) \dots \dots \dots (4)$$

$$F_5 = \{ (F_c + 2 \cdot s \cdot \sigma_m) / (1 - h_m) \} / c \cdot r_m \dots \dots \dots (5)$$

F_4 : 標準強度分布で構造体強度を管理する場合の標準強度での調合強度

F_5 : 積算温度 $m^\circ\text{D} \cdot \text{D}$ 時のコア供試体強度分布で構造体強度を管理する場合の標準強度での調合強度

h_0 : 標準強度分布で構造体強度を管理する場合に、間接的に想定している任意の積算温度時コア供試体が高温履歴によって受ける強度発現の低下割合

h_m : 構造体強度を管理する任意の積算温度 $m^\circ\text{D} \cdot \text{D}$ 時コア供試体強度において、高温履歴の影響を

受けるときと受けないときの強度発現の差の割合

(4) 式は標準強度分布で構造体強度管理を行う場合であり、(5) 式は任意の積算温度 $m^\circ\text{D} \cdot \text{D}$ 時のコア供試体強度分布で構造体強度管理を行う場合である。

5. 調合強度計算例

図—11 は、ある工事における水セメント比と強度の関係、及び平均気温ごとの設計基準強度と柱での最高到達温度との関係を示すものである。標準強度分布で構造体強度の管理を行う場合でかつ高温履歴の影響を受けない場合の水セメント比と設計基準強度との関係は変動係数を 7 % として計算すると、図—11 の下のグラフ横軸に示すような関係になる。設計基準強度 600 kgf/cm² の場合について、高温履歴の影響を受ける場合と受けない場合、及び構造体強度管理を標準強度分

布、不良率 2.3 % 以下と 2730°D・D 時標準養生供試体強度分布、不良率 2.3 % 以下で行う場合の、調合強度を計算する。

構造体強度管理を標準強度分布で行い、高温履歴の影響を受けない場合の調合強度は、変動係数を 7 % とすると図—11 上のグラフにも示してあるように、600/(1-2×0.07)-698 kgf/cm² である。図—11 下のグラフから、698 kgf/cm² すなわち水セメント比 31.5 % の位置では、平均気温が 23°C を超える位になると高温履歴の影響を受けるようになる。この場合、調合強度を上げると平均気温 28°C の場合では柱内最高到達温度は 80°C 位になることが図—11 から予想される。同 80°C では図—9(a) より同 70°C 以下の場合と比べるとコア供試体強度の低下率は 0.04/0.99=0.04 位である。標準強度分布全体のコンクリートが同 80°C の 840°D・D 時コア供試体強度ではこの低下率で低下すると仮定すると、調合強度は 698/(1-0.04)-727 kgf/cm²、水セメント比 30.4 % となる。

構造体強度管理を 2730°D・D 時標準養生供試体強度で行う場合では高温履歴の影響を受けない場合は、標準強度分布で構造体強度管理を行う場合に比べて 9 % 低くできるとすると、698×0.91=635 kgf/cm²、水セメント比約 30 % である。図—11 より、平均気温が 28°C では最高到達温度は 70°C をわずかに超え、そのために調合強度を上げると同 73~4°C 位が予想される。図—9(b) からそのときコア供試体強度は 0.04/1.11=0.036 の低

図-11 1.1m×1.1m柱 最高到達温度と調合強度関係図

下率となることが予想されるので、調合強度は $635 / (1 - 0.036) = 659 \text{ kgf/cm}^2$ 、水セメント比 33.5 % となる。

同様に、設計基準強度 540 kgf/cm^2 の場合は図-11 に示すような値になる。設計基準強度 480 kgf/cm^2 以下では高温履歴の影響は受けないと見込まれる。図-11 にみるように、構造体強度の発現は水セメント比が小さいほど高温履歴の影響を大きく受ける。高温履歴を受けて構造体強度が低下する分を補うため、調合強度の割増しを行うと、さらに構造体の上昇温度が大きくなって構造体強度の低下が激しくなる。したがって、設計基準強度が大きいほど、構造体温度の初期の上昇が小さくなるような調合を計画し、また、構造体強度の管理材令を長くする方が有利である。

構造体の初期温度上昇が大きい場合には構造体強度発現の停滞が起こり、その停滞が起き始める温度として本論文では最高到達温度 70°C を用いている。これは、表-4 の結果を主たる根拠にしているが³⁾、正確なその温度の大きさについては表-4 のデータのみで一般化するのは難しい。最高到達温度に応じた強度発現の期待値も特定し得るほどではない。現在のところでは、上昇温度の予測値が 70°C 程度以上になるような場合には、実験によって、その値を個々の工事ごとに確認するのが正確

であると考える。

まとめ

- 初期の高温履歴が構造体強度発現に影響を与える項目として最高到達温度と温度上昇量が考えられるが、最高到達温度との関係のみでも高温履歴と構造体強度発現の関係のおおよその傾向はとらえられる。
- 平均的には設計基準強度 480 kgf/cm^2 以下の場合には、初期の水和発熱による温度上昇は構造体強度発現に影響を与えないとみなすことができる。
- 初期の水和発熱による温度上昇が構造体強度発現に影響を与えない場合、構造体強度が設計基準強度を満足する時期を積算温度 $2730^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 時の中長期にとって調査計画を行うと、 $2730^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 時コア供試体強度分布での不良率は標準強度分布で計画した不良率より多少大きくはなるが、構造体強度が設計基準強度を満足する時期を $840^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 時にして調査計画をしたときに比べて 9 % 程度調査強度を下げる可以降低。
- 初期の高温履歴の影響を受ける場合、積算温度 $2730^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ 時の構造体強度（コア供試体強度）発現は $840^\circ\text{D}\cdot\text{D}$ の構造体強度発現に比べて影響が大きく、その割合は初期の温度上昇が大きいほど激しい。

謝辞

本論文に使用している調査、実験については大成建設（株）技術研究所黒羽健嗣君、丸嶋紀夫君、並木 哲君および各支店建築部技術室、現場作業所の皆様方のご協力を得たものである。論文をまとめるにあたっては東京大学友澤史紀教授のご助言を頂いた。ここに深く感謝致します。

参考文献

- 1) 戸祭邦之、黒羽健嗣：設計基準強度 360 kg/cm^2 以上の高強度コンクリートの調査設計における気温補正について、日本建築学会構造系論文報告集、第 419 号、pp. 39～46、1991 年 1 月
- 2) 戸祭邦之：中長期の強度伸展を考慮した高強度コンクリートの調査計画に関する一考察、日本建築学会構造系論文報告集、第 429 号、pp. 17～29、1991 年 11 月
- 3) 戸祭邦之、黒羽健嗣、丸嶋紀夫：水和発熱による高温履歴を初期に受けた高強度コンクリートの強度発現とその管理についての一考察、日本建築学会構造系論文報告集、第 445 号、pp. 1～10、1993 年 3 月
- 4) 戸祭邦之：高強度コンクリートにおける各種養生供試体強度とコア供試体強度の関係について、日本建築学会構造系論文報告集、第 449 号、pp. 17～30、1993 年 7 月
- 5) 戸祭邦之：高強度コンクリートの強度増進に伴うばらつきの変化およびその予測について、日本建築学会構造系論文報告集、第 428 号、pp. 35～46、1991 年 10 月

(1993 年 9 月 10 日原稿受理、1994 年 3 月 1 日採用決定)