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

CONSIDERATION ON DISPERSION AMONG SPECIFIED, SEALED OR SATURATED AND CORED SPECIMEN STRENGTH OF HIGH STRENGTH CONCRETE

戸 祭 邦 之*

Kuniyuki TOMATSURI

Quality assurance of concrete consists of two kinds of quality control, production control through specified strength and structural strength control through sealed, saturated or cored specimen. This means three kinds of strength are applied to evaluate the concrete. They are equal to each other on average if certain required conditions are satisfied. But individually they will have some dispersion among them and their strength distributions are not exactly the same. This leads that percent defective expected at a concrete plant is not always maintained to structural strength.

New method will be needed, just a check of specified strength is enough to assure the quality of high strength concrete in the structure.

Keywords : *high strength concrete, structure strength, percent defective, strength distribution*

高強度コンクリート, 構造体強度, 不良率, 強度分布

1. はじめに

現在, 設計基準強度 210 kgf/cm^2 を主体とする通常強度レベルのコンクリートの圧縮強度管理 (以降, 圧縮強度を単に強度という) は体系化されているが, 設計基準強度 360 kgf/cm^2 を超える高強度コンクリートの強度管理については, まだ細目まで体系化されているとはいえない。このような中であって現状での高強度コンクリートの実際の工事への適用に際しては, 通常強度レベルのコンクリートの体系化された強度管理方式を当てはめながら, 最適な方法を模索している段階ではないだろうか。本論文は, このような高強度コンクリートの強度管理について, 通常強度レベルのコンクリートの管理方式を無条件にあてはめた場合について, 主として調合計画時と構造体強度発現時の不良率の差異および調合計画時の観点から, 調合計画時に計画する不良率と構造体強度に具現される不良率の違いを具体化に論じ, 構造体強度分布の不良率を考慮したときの調合計画法の変更について述べる。さらに高強度コンクリートの強度管理方式として暫定案とも言える方式について筆者の考えを簡単に述べるものである。

通常強度レベルのコンクリートの強度管理は, 製造時

強度管理と構造体強度管理から成り立っており, いくつかの種類の供試体による強度が関係する。標準養生, 現場水中又は封緘養生の $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱状に成形した標準供試体強度 (以降標準養生強度, 現場水中又は封緘養生強度という), およびコア供試体強度 (以降コア強度という) の3 (4) 種類である。これら3種類の供試体強度と構造体強度, および設計基準強度 (以降 F_c という) との関係に関する法関係は昭和56年に整備されている。構造体強度の定義は「構造体の各部位・部分について統計的に十分代表できる程度の回数を試験したと仮定した場合に, その平均値で代表される概念としての強度¹⁾」であり, 「一般にコア強度によって構造体の特定の部分のコンクリート強度を代表させる¹⁾」ものとしている。製造時強度管理は標準養生強度で行い, 構造体強度の管理については, 材令28日の現場水中養生強度, 又は材令28日を超え91日までの現場封緘養生強度, あるいはコア強度によることになっている。その細目については, 日本建築学会建築工場標準仕様書同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事・(以降 JASS 5 という) に規定されている。また, 製造時不良率 (JASS 5 に基づく調合計画を行ったときの材令28日標準養生強度分布に

* 大成建設 (株) 技術研究所

Taisei Corporation Technology Research Center

おける不良率に相当する)と構造体強度の不良率の関係については、必ずしも明解ではないが、昭和56年建築基準法施行令および告示改正の方針として「構造体強度に不良率の概念を導入する¹⁾」と述べられ、「かつて昭和28年度版では、構造体コンクリートの強度は設計基準強度と同じであればよいとしていたが、…(中略)…次第に設計基準強度を下回る確率の小さいものが要求されるようになってきた¹⁾」と解説されているところから、構造体強度にも製造時(調合計画時)と同じ程度の不良率が期待されているとみることができる。

本来、構造体強度と現場水中又は封緘養生強度は基本的には異なるものであり、構造体強度を現場水中又は封緘養生強度で管理することは「いわば間接的な管理方法¹⁾」である。通常強度レベルのコンクリートのコア強度と同材令現場水中又は封緘養生強度の対応関係については、調査例^{6),7)}があるが、高強度コンクリートでは余り調査例はない³⁹⁾。製造時(調合計画時)の不良率と構造体強度に具現される不良率との関係にまで言及して検討を加えた論文はほとんどないと思われる。

2. 各種供試体強度のばらつきと各種供試体強度間比較

通常強度レベルのコンクリートについての調合計画は標準養生強度によって行われ、そのほとんどは材令28日の標準養生強度(以降特に標準強度という)である。不良率を決めて調合強度を決定する際に使われるばらつきも多くは標準強度のばらつきである。調合計画を標準強度で行い、構造体強度の管理を現場水中又は封緘養生強度で行っているのは、次のような前提条件に基づいている。気温補正のない時期を対象として考えると、前提条件(イ)標準強度分布と目標とする予想平均気温履歴を経た材令の現場水中又は封緘養生強度分布は平均値と標準偏差の値が同じである。

前提条件(ロ)構造体強度と同材令の現場水中又は封緘養生強度の対応関係は良好である。

もし調合計画時に設定した標準強度分布と、構造体強度発現時の現場水中又は封緘養生強度分布が異なれば、調合計画時の不良率と現場水中又は封緘養生強度の不良率は異なってくる。

この節では、 F_c 360 kgf/cm²を超える高強度コンクリートについて、各種供試体強度のばらつきおよび強度試験を行うまでの積算温度がほぼ同程度とみられる各種供試体強度の対応関係の実態をみる。ここで各種供試体とは、前記3(又は4)種の供試体で、標準養生供試体、現場封緘養生供試体、現場水中養生供試体およびコア供試体である。その際2種類の強度指数と何種類かの強度比を新たに使用する。強度指数は、調合計画にかかわるもので、標準強度に対する強度比を意味し、何種類かの

強度比は、現場封緘・標準養生強度比のように強度試験を行うまでの積算温度が、ほぼ同じと見なせる2種の供試体強度を比較するもので、この場合、現場封緘養生強度と標準養生強度の2種の供試体強度の対応関係を比の形で表している。これらの指数および何種類かの強度比はその都度定義する。

2.1 同一工場同一調合コンクリートの標準強度および現場封緘養生強度のばらつき

表—1は、3工事、5生コン工場、14種類の調合について、標準強度と、材令28日、91日の現場封緘養生強度を調査した結果²⁾から、積算温度840°D・D時(標準養生材令28日相当、積算温度の計算の仕方はJASS5にならう)に強度分布を後述する方法によって推定したものである。生産現場での調査は温度を一定にすることができないので、異なる日に製造された同じ調合のコンクリートの強度発現の大きさを比較する場合の評価基準となる尺度として積算温度を用いている。積算温度と各種養生供試体の強度発現の関係については、養生温度がある範囲の温度を超えなければ、その相関関係は強く、どの種類の供試体でも同様の関係が成立し、その関係は硬化初期だけでなく材令1カ月～3カ月、場合によっては材令6カ月といった中長期域までも有効である^{2),3),4)}。

表—1で扱っている呼び強度は360から465までであるが、不良率のとり方がJIS 5308(レーダミクストコンクリート)で定められた値とは違っている。不良率を4.18%ではなく2.28%としたときの呼び強度で、JIS 5308とは少し意味の異なった呼び強度である。水セメント比では44.5～35.5%、実強度では測定した値を調合の種類ごとに平均した値では、452～591 kgf/cm²である。表—1は、同一養生強度のばらつきについて、調合の種類間の比較がしやすいように次のような群強度指数で表現している。表—4(後述)では個別強度指数を使用し、本論文ではこの2種類の強度指数を使用する。それぞれは次式で計算される値である²⁾。

$$\begin{aligned} \text{群強度指数} &= \text{同一工場同一調合の現場封緘等} \\ &\text{各種養生強度} / \text{その調合の標準強度平均値} \cdots (1) \\ \text{個別強度指数} &= \text{現場封緘等各種養生強度} \\ &\quad / \text{同一試料の標準強度} \cdots (2) \end{aligned}$$

群強度指数は、同一工場同一調合の一つのコンクリート群について、各種養生供試体の強度と、そのとき同時に採取し求めた標準強度をその群について平均したときの値との比を示すもので、標準強度測定値を平均した値を1.00として、標準強度の標準偏差や現場封緘等各種養生強度を表したもので、調合計画時の調合強度を意識した指数である。個別強度指数は、現場封緘等各種養生強度と同一採取試料の標準強度の比を表すもので、現場封緘等各種養生強度の標準強度に対する強度発現の割合を示している。

表一 群強度指数による 840°D・D 時強度分布比較

工事	工場	呼び強度 F_N	水セメント比 (%)	標準強度				現場封緘養生強度									
				試料数 (回)	平均	標準偏差	不良率 2.28% の値	推定強度 (1)					推定強度 (2)				
								試料数 (本)	平均	標準偏差	不良率 2.28% の値	標準強度で不良率 2.28%の値の現場 封緘養生強度での 不良率	試料数 (本)	平均	標準偏差	不良率 2.28% の値	標準強度で不良率 2.28%の値の現場 封緘養生強度での 不良率
A	a_1	420	38	31	1.00	0.050	0.90	30	0.99	0.045	0.90	2.3	(123)	1.02	0.063	0.89	2.9
		390	40.5	14	1.00	0.049	0.90	18	1.03	0.057	0.92	1.2	(60)	1.03	0.050	0.93	0.5
		360	43	5	1.00	0.028	0.94	6	1.03	0.032	0.97	0.4	(21)	1.04	0.028	0.98	0
	a_2	420	38	27	1.00	0.076	0.85	30	0.95	0.080	0.79	10.0	(111)	0.95	0.085	0.78	11.5
		390	40.5	7	1.00	0.050	0.90	6	0.94	0.025	0.89	5.5	(27)	0.94	0.055	0.83	23.3
		360	43	9	1.00	0.061	0.88	9	0.95	0.032	0.89	1.2	(36)	0.95	0.068	0.81	14.5
B	b_1	465	35.5	10	1.00	0.033	0.93	15	1.01	0.062	0.89	10.9	(54)	1.02	0.045	0.93	2.8
		450	37	12	1.00	0.058	0.88	21	0.95	0.069	0.81	16.9	(72)	0.96	0.086	0.79	18.9
		435	38.5	15	1.00	0.061	0.88	42	0.93	0.054	0.82	16.9	(129)	0.94	0.071	0.80	19.2
		405	40	14	1.00	0.054	0.89						(54)	0.96	0.026	0.91	0.4
		360	44.5	42	1.00	0.070	0.86						(249)	1.03	0.075	0.88	1.2
	b_2	450	37	49	1.00	0.045	0.91	49	0.96	0.043	0.87	12.3	(98)	0.96	0.050	0.86	15.9
		360	44.5	49	1.00	0.041	0.92	49	0.94	0.037	0.87	27.8	(98)	0.94	0.046	0.85	31.6
C		400	40	9	1.00	0.037	0.93	9	1.00	0.029	0.94	0.5	(36)	1.00	0.073	0.85	15.6
算術平均					1.00	0.051			0.97	0.047				0.98	0.059		

表一における積算温度 840°D・D 時現場封緘養生強度分布の推定方法は、推定強度 (1)、(2) の違いを含めて記述すると次のとおりである²⁾。一つの種類の調査について、材令 28 日と材令 91 日の現場封緘養生強度の測定結果を、群強度指数と積算温度の座標上に表すと図一1 のようになる。積算温度は常用対数を使用している。中央の実線は回帰線であり、点線は、統計的処理法に基づいて計算した 5 % 下方棄却域を示す曲線である。図一1 において、材令 28 日の測定点から、回帰直線と同じ勾配で積算温度の増減に応じて群強度指数も増減すると仮定して、積算温度 840°D・D 時の値を推定したのが推定強度 (1) である。これに対して推定強度 (2) は、5 % 下方棄却域の曲線の 840°D・D 読み値を正規偏差値 1.64 の位置、回帰直線の 840°D・D 読み値を 840°D・D

時分布の平均値として、平均値と標準偏差を計算した値である²⁾。

表一1 は、標準養生と現場封緘養生での強度分布を平均値と標準偏差の値で示しており、積算温度を標準強度と同じ 840°D・D にしたときの現場封緘養生強度と標準強度のばらつき状態を示している。標準強度のばらつき (標準偏差) は 0.037~0.076 であり、調査毎の標準偏差を単純に算術平均した値では 0.051 であるから、通常強度レベルの調査計画において使用されている変動係数 9~10 % よりも小さな値となっている。同一調査コンクリートの標準強度と現場封緘養生強度のそれぞれの標準偏差の値がお互いに異なっていることが注目される。

表一4 の左半分は、個別強度指数を用いて 840°D・D 時現場封緘養生強度のばらつき状態を示した表である。ここでは調査毎のみではなく、工場毎のばらつきも示している。調査毎でも、工場毎でも、表一1 の群強度指数による 840°D・D 時現場封緘養生強度に比べてそれほど大きな違いはない。調査毎では平均値、標準偏差値のほか、最大値と最小値、および平均値と標準偏差から計算される最大、最小値を与える正規偏差値を示す。その正規偏差値の算術平均値が 1.73 であり、3 シグマを超えていることを示す 3.00 以上の値は一例あるだけであるから、個別強度指数で表した 840°D・D 時現場封緘養生強度は実際には平均値から 3 シグマ以上離れた値をとることは起こりにくいと考えられる。

図一1 群強度指数と積算温度 (A 工事, a_1 工事, F_N 420 の例)

2.2 標準養生強度、現場封緘養生強度およびコア強度間の比較

2.2.1 実験の内容と結果

表一2 は、いずれも柱部材を模擬した試験体を作り、コアを抜いて、標準養生強度、現場封緘養生強度、およびコア強度の発現状況を調査した実験の結果である。標準養生と現場封緘養生は各3本の供試体の平均値、コアは、一例を除き試験体の軸方向に抜いて、20 cm ずつに切断し、強度を調査したものの平均値で、試験体の長さに応じて、4本から13本のコア供試体強度の平均値である。軸と直角方向にコアを抜いたのは実験Ⅰの一部で、この場合は3本の平均値である。各種養生用の供試体は、いずれも同一ミキサー車から試験体打設の直前に採取した試料から作成したものである。最高到達温度とは、硬化初期の水和発熱による試験体内部の温度上昇が、最高何度であったかを示すもので、温度上昇量は、そのとき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示すものである。

表一2 は積算温度では411 から 3241°D・D までのデータを含んでいる。硬化初期の温度上昇が比較的大きい場合でも材令28日以上になると現場封緘養生供試体と同材令コア供試体の積算温度の差はそれほど大きくはない。積算温度が同程度であるから、材令28日以降についてはコア強度と同材令現場封緘養生強度は同程度になっている。しかし、硬化初期の温度上昇が非常に大きい場合では違った様相を示しており、コア強度と同材令現場封緘養生強度の乖離が大きくなっている。

前述したように養生温度が通常の範囲にあれば、コンクリートの強度発現は積算温度に応じて増進する。その

通常の範囲とは、恒温養生では文献3) では38°C 以内とされており³⁾、蒸気養生では70°C 程度以内と文献5) では言っている⁵⁾。硬化初期の水和発熱による構造体内部の温度の上昇の場合は、高温状態が長く継続するわけではなく、またすべて自己発熱を原因とする温度の上昇であるが、強度と積算温度の関係の適用には表一2 にみるように上限温度があるとみられる。表一2 をみると、最高到達温度が70°C 又は温度上昇量40°C を超えると急激にコア強度と同材令現場封緘養生強度の乖離が大きくなっているところから、その強度と積算温度の関係の適用限度は最高到達温度で70°C 以内、または、温度上昇量40°C 以内程度と言える。また、それらの温度以下では、コア強度と同材令現場封緘養生強度とは同程度の強度となっているが、同程度の強度とは言っても、1割程度は相違している。その相違状況は積算温度や試験時の材令の違いによる特徴的な傾向はみられない。

硬化初期の温度上昇は、構造体の断面寸法が同じであれば、外気温と単位セメント量に大きく影響を受け、最高到達温度と温度上昇量は片方が高ければ他方も高く、低ければ低いというような傾向を示す。表一2 において、最高到達温度が70°C を超えているものは、概して温度上昇量も40°C を超えている。シミュレーション計算をしてみると外気温が低い冬季のような場合には最高到達温度より温度上昇量の方が問題になり、それ以外では最高到達温度の方が問題になる。そこで、本論文では、標準養生強度および現場封緘養生強度とはほぼ同積算温度時のコア強度との比較をする場合には最高到達温度70°C 以下のデータを主たる対象とする。

本論文では各種養生供試体の養生温度又はコアの履歴

表一2 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 度 (℃)	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					夏場封蔵養生					構造体(コ)		夏場封蔵養生		構造体(コ)	
								7日	28日	91日	28日	91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						
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				
	400× 400× 650 250× 350× 650	2 1	1 年12月		20℃80%の 室内	29.1	64 46 43	38 20 17	725	833	985	861	892	880 897 961	920 905 955	840	2730	963 910 904	2853 2800 2794				
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 71	50 34	622	781	871	779	869	775 791	772 842	1010	2802	1175 1113	2967 2905					
	400× 600× 950	1											759	782				1002	2894				
	1100×1100×3000	1				3 年7月	三 重						27.0	96			58	715	836	902	806	894	703
1100×1100×3000	2	28.5	95 86	56 48	663 674			753 767	853 862	749	857	672 666	707 674			1126 1181	3186 3241						
Ⅶ	850× 850×1000	4	3 年8月	東 京	28.0	91	53	534	665	757	851	748	590	634	984	2949	1110	3075					
						88	50						634	663			1105	3070					
						79	44						692	754			1089	3054					
						82	47						589	766			877	713	783	665	707	1076	3041
	850× 850×1000	1	2 年9月	26.0	87	49	582	707	765	684	780	671	719			1089	3054						
850× 850× 900	1		28.0	86	52	585	693	813	674	726	617	611	937	2553	1042	2658							

(※実験Ⅰは現場封緘養生ではなく現場水中養生による強度)

温度がこのような通常の範囲に納まっているもののみを対象とする。各種養生供試体の養生温度又はコアの履歴温度が通常の範囲を越脱する場合には、構造体強度と同材令現場水中又は封緘養生強度の乖離が大きくなっていくので、別な考察が必要である。

2.2.2 実験結果による現場封緘養生強度とコア強度間の比較

図-2は、表-2のうち最高到達温度70°C以下のものについて、材令28日と91日の現場封緘養生強度と、同材令コア強度を比較したものである。現場封緘養生強度と同材令コア強度の積算温度は表-2にみるように、同じ値ではないが両者の差は小さいので、比較の対象とし得ると考えた。両者の差の中で強度発現に与える影響が最も大きいのは、実験Ⅱの材令28日における現場封緘養生の411°D・Dとコアの566°D・Dであるが、両者の常用対数をとって比較すると $\log 566 / \log 411 = 1.05$ であるから、その影響度は5%である。他はもっと影響が小さい。

図-2をみると、現場封緘養生強度と同材令コア強度の対応関係は、コア強度がおおよそ現場封緘養生強度の10%以内の誤差に納まっており、マクロ的にはよい一致をみせているとみることができる。しかし、それはコア強度は同材令現場封緘養生強度と比べるとその10%以内程度の誤差を含むものであることも同時に示している。このことは、現場封緘養生強度によって構造体強度を管理する場合、現場封緘養生強度による構造体強度検査で合格しても実構造物の構造体強度はある確率で設計基準強度を下回る可能性があることを意味する。

これらの供試体強度間の対応関係については、実強度で600 kgf/cm²を超えると現場水中又は封緘養生強度と同材令コア強度の対応関係が悪くなるという指摘もあるが³⁹⁾、ここではそのような傾向はみられない。これは一つには、本論文では構造体内部の温度上昇を考慮に入れ、硬化初期の高温履歴をもつコア強度を比較の対象からはずしているからである。

いま、次式で表せるコア・現場封緘養生強度比を考える。

コア・現場封緘養生強度比 = コア強度 / 同材令 (ほぼ同積算温度時) 現場封緘養生強度……………(3)

このコア・現場封緘養生強度比の値を用いて、表-2の最高到達温度70°C以下のデータについて頻度分布を示すと図-3になる。図-3の場合は平均のコア強度を用いており試料数が少ないので、正規分布にはみえないが、平均のコア強度ではなく個々のコア強度についてのコア・現場封緘養生強度比を計算して頻度分布を示すと試料数が多くなり図-4のように、正規分布のようになる。そこで、この頻度分布は正規分布をなすと仮定すると、図-3の場合は平均値・(mean)は0.99であり、標

図-2 現場封緘養生強度とコア強度 (最高到達温度 $\leq 70^{\circ}\text{C}$)

図-3 コア・現場封緘養生強度比頻度分布 (最高到達温度 $\leq 70^{\circ}\text{C}$, 平均のコア強度)

図-4 コア・現場封緘養生強度比頻度分布 (最高到達温度 $\leq 70^{\circ}\text{C}$, 個々のコア強度)

準偏差 (s. dev) は0.062である。同様に温度上昇量が40°C以内の平均のコア強度を用いたコア・現場封緘養生強度比について行くと、平均値は1.00、標準偏差0.059、試料数30になる。

図—5 個々のコア強度の平均値に対する比

図—3でコア強度として用いているのは、4本～13本の個々のコア強度の平均値である。4本～13本では構造体強度の定義の中で述べられている「統計的に十分代表できる程度の回数」という回数には及ばないが、実験Ⅰ～Ⅷが実験であり、施工の丁寧さなどを考えるとこの平均値がこの実験Ⅰ～Ⅷのそれぞれの構造体強度に相当すると思われる。しかし、構造体強度を問題にするときには、構造体のいずれの部分の強度も問題になる。個々のコア強度を含めた、コア・現場封緘養生強度比の頻度分布は図—4のとおりである。図—4では、図—3の平均のコア強度の場合と比べるとコア強度と現場封緘養生強度の相違する割合（対応関係のばらつき）が大きくなり、現場封緘養生強度に対してコア強度は、最低0.70のものから最高1.26にまでなる。平均値と標準偏差の値から90%の信頼区間を求めると、0.83～1.12となる。図—4をみるとコア現場封緘養生強度比のほとんどがこの間に分布しており、この区間がほぼ実質的に分布するコア・現場封緘養生強度比の範囲に当たるとみられる。

また、個々のコア強度が、図—3で示したコア強度の平均値に対してどの程度ばらついているかを頻度分布に表したのが図—5である。個々のコア強度の平均値に対する比の大部分は0.8～1.2の間にあり、コア強度の平均値に対して個々のコア強度は最大でおおよそ20%前後ばらついている。

2.2.3 実験結果による現場封緘養生強度と標準養生強度間およびコア強度と標準養生強度間比較

表—2において、現場封緘養生強度又はコア強度と標準養生強度との対応関係を見るために積算温度を同じにしてそれらの強度を比較する。現場封緘養生供試体およびコア供試体の積算温度は材令28日および91日の現場封緘養生供試体およびコア供試体の積算温度時における標準養生強度の値については、材令7日（積算温度

210°D・D）、材令28日（積算温度840°D・D）、又は材令91日（積算温度2730°D・D）標準養生強度の値から、強度・積算温度（常用対数）グラフ上において直線補間することによって推定する。その方法は

210 ≤ M_A ≤ 840 の場合

$$S_m = S_7 + (S_{28} - S_7) \times (\log M_A - \log 210) / (\log 840 - \log 210) \quad (4)$$

840 ≤ M_A の場合

$$S_m = S_{28} + (S_{91} - S_{28}) \times (\log M_A - \log 840) / (\log 2730 - \log 840) \quad (5)$$

M_A : 材令28日、91日の現場封緘養生又はコアの積算温度 (°D・D)

S_m : 積算温度 M_A (°D・D) 時における標準養生強度の推定値 (kgf/cm²)

S_7 : 標準養生材令7日強度 (kgf/cm²)

S_{28} : 標準養生材令28日強度（標準強度）(kgf/cm²)

S_{91} : 標準養生材令91日強度 (kgf/cm²)

表—2をみると M_A の値は2730°D・Dを超える値もあり、この場合は S_{28} 、 S_{91} の値から外挿することになるが、最高到達温度が70°C以下の場合では2730°D・Dを超えるものはなくなる。この S_m の値を用いて、(3)式と同様下式で計算される強度比を定義する。

現場封緘・標準養生強度比

$$= \text{現場封緘養生強度} / S_m \quad (6)$$

$$\text{コア・標準養生強度比} = \text{コア強度} / S_m \quad (7)$$

(6)式で定義した現場封緘・標準養生強度比は、(2)式で定義した個別強度指数と似ているが、個別強度指数が同一工場又は同一調査を対象とし、分母が標準強度であるのに対して、現場封緘・標準養生強度比は、工場、調査が違う場合にも適用し、分母は材令が必ずしも28日ではないものも対象としていることに違いがある。

図—6は表—2を調査対象とした現場封緘・標準養生

図—6 現場封緘・標準養生強度比頻度分布

図-7 コア・標準強度比頻度分布 (最高到達温度 $\leq 70^{\circ}\text{C}$)

強度比の頻度分布であり、図-7はそのコア・標準養生強度比の頻度分布である。表-4 左半分の 840 $^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 現場封緘養生個別強度指数の調査毎、工場毎、あるいは全体の分布と図-6の現場封緘・標準養生強度比分布の平均値および標準偏差の値がよく近似していることが注目される。このことから工場や調査が違うコンクリートを対象とした図-6に示す現場封緘・標準養生強度比のようばらつきは、すべての工場、調査で起こりうるばらつきであるとみることができよう。

2.2.4 文献資料による各種強度間の比較

この各種養生強度間および各種養生強度とコア強度間の対応関係については、これらの実験のほかにも、建築学会大会で柱などの構造体を模擬した試験体実験による文献が数多く発表されている。設計基準強度 360 kgf/cm^2 を超える高強度コンクリートについての論文発表は、使用セメントを普通ポルトランドセメントに限定

すると、昭和 62 年から行われている。そこで、昭和 62 年から平成 3 年までの発表論文^{8)~37)}をもとに、今回の実験と同様の検討を行ってみる。この場合、前節で述べた実験Ⅰ～Ⅷは重複を避けるため既発表のものでも除外する。また、発表論文では、標準養生強度や現場封緘又は水中養生強度の値は、ほとんどの場合強度の実数値が記載されているが、コア強度については、強度の実数値が記載されているものと、グラフで示されているものがある。グラフで表示されているものは、コア強度はグラフから読みとった値を使用する。したがって、その際ある程度の読み取り誤差が生じることになるが、コア強度・同材令現場封緘養生強度比で表した場合の誤差は ± 0.01 程度になるとみられ、大勢の傾向を論ずるのには十分と判断した。

その結果、最高到達温度 70°C 以下の条件におけるコア・現場封緘養生強度比は平均値 1.02, 標準偏差 0.090, 試料数 79 であり、コア現場水中養生強度比は、材令を 28 日に限って、最高到達温度を 60°C 以下にした場合には、平均値 0.98, 標準偏差 0.078, 試料数 30 である。

2.2.5 ばらつきと対応関係のまとめ

これまでの各種養生供試体による強度のばらつき、あるいは各種養生供試体強度とコア強度の対応関係等についてまとめると表-3 のようになる。表-3 には高強度コンクリートだけではなく、通常強度レベルのコンクリートについての調査例も参考として含めてある^{6), 7)}。

実験Ⅰ～Ⅷの強度比に比べて、学会論文の強度比のばらつき(標準偏差の値)が大き目である。実験Ⅰ～Ⅷの場合は、いずれも成形標準供試体を試験体の打設直前に採取しているので、コアと標準供試体に調査の誤差を含まない。これに対して、学会論文からのデータでは、模擬試験体による実験データが主体であるから同様に調査誤差を含まない例が多いとは思いますが、中には成形標準供

表-3 コアおよび各種養生間強度比比較 [7]

強度比の種類	資料	試料数	平均値	標準偏差	平均値を1.00としたときの標準偏差の値	備考
コア・現場封緘養生強度比	実験Ⅰ～Ⅶ (最高到達温度 $\leq 70^{\circ}\text{C}$)	コア平均	32	0.99	0.062	
		コア個別	187	0.98	0.089	
	学会論文	現場封緘養生 (最高到達温度 $\leq 70^{\circ}\text{C}$)	79	1.02	0.090	
		現場水中養生 (最高到達温度 $\leq 60^{\circ}\text{C}$)	30	0.98	0.078	
コア・現場水中養生強度比	(参考) コンクリート懇談会 ⁶⁾		140	0.96	0.15	0.16
	(参考) 構造体コンクリートの強度管理 ⁷⁾ に関する研究	垂直部材	330	0.95	0.106	0.112
		水平部材	110	0.85	0.073	0.086
	工事 A, B, C 全体		284	0.97	0.052	0.054
現場封緘・標準養生強度比	実験Ⅰ～Ⅶ		34	0.99	0.057	0.058
コア・標準養生強度比	実験Ⅰ～Ⅶ	コア平均 (最高到達温度 $\leq 70^{\circ}\text{C}$)	32	0.97	0.063	0.065
	(参考) コンクリート懇談会 ⁶⁾ ※		138	0.89	0.16	0.18
コア個別強度のコア平均値に対する比	実験Ⅰ～Ⅶ		354	1.00	0.061	0.061

(※コア強度の積算温度は標準養生の積算温度と必ずしも同じではない)

試体用試料と試験体に打設したコンクリートはミキサー車が違う場合が考えられる。学会論文の強度比のばらつきが比較的大きいのはこの理由によると思われる。また、コア・現場水中養生強度比のデータは材令 28 日のみであるが、構造体管理方法として最も普及している方法である割にはばらつきが大きい。平均値を 1.00 としたときの標準偏差を比べてみると、実験Ⅰ～Ⅷの個々のコア強度の場合に匹敵するばらつきである。

通常強度レベルのコンクリートの場合は、構造体コンクリートの強度管理に関する研究⁷⁾の場合は実験Ⅰ～Ⅷと同様に調合のばらつきを含まないが、コンクリート懇談会⁶⁾のデータは成形標準供試体とコア供試体の試料が異なるミキサー車からのものである可能性が高く、また、コア・標準養生強度比は積算温度も異なっている。

3. ばらつきの予測³⁸⁾

3.1 予測式

2 種類の強度分布関係を扱う予測計算の方法については、すでに、本誌 428 号に「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」に記述済みであるが、本論文の展開に是非必要なので、その骨子を転記する。

コンクリートの圧縮強度を測定した結果を表す 2 つの集合 $\{s_i\}$, $\{a_i\}$ ($i=1, 2, 3, \dots, n$) を考える。 $\{s_i\}$ と $\{a_i\}$ は、同一工場、同一調合で製造されたものであり、測定されたときの積算温度又は養生条件が異なる 2 つの測定値を表している。サフィックス i が同じものは同一サンプルからのデータである。ここで、 a_i と s_i の比 a_i/s_i

$=r_i$ を定義すると $\{a_i\}/\{s_i\}$ に対応して $\{r_i\}$ の集合が定義できる。ここで 2 つの測定値の関係を考えるとき、任意の $r_j (=a_j/s_j)$ は a_j と s_j の比を示す 1 つの値であるが、今回は偶発的に a_j , s_j のときに r_j の値をとったが、何回も繰り返しデータを採れば a_j/s_j の値は $r_1, r_2, \dots, r_n$ いずれの値にもなり得る可能性がある。すなわち、逆に a_i/s_i において、いずれの i の値のときでも r_j となり得る可能性がある、とも考えることができる。すなわち、 $\{r_i\}$ は s_i と a_i の関係を表す強度比の集合であるという仮定が成り立つ。この仮定をすると $\{s_i\}$, $\{r_i\}$ が与えられたとき、 $\{a_i\}$ において、 a_i の値が取り得る可能性の範囲を確率分布の形で計算することが可能である。

n が十分に大きく $\{s_i\}/\{r_i\}$ を平均値と標準偏差で表される分布と考えれば、 $\{s_i\}$ のデータ数と $\{r_i\}$ のデータ数は同じである必要はない。これらを $\{s_i\}/\{r_j\}$ で表し、 $\{s_i\}/\{r_j\}$ の頻度分布を正規分布であると仮定して、その確率密度関係を $S(s_i)$, $R(r_j)$ とすると、 a_i の値がとり得る可能性を示す確率密度関数 $F(f_i)$ は次のようになる。

$$F_1(f_i) = \iint S(s_i) R(r_j) d_s d_r \dots \dots \dots (8a)$$

$$F_2(f_i) = \iint S(s_i) \cdot K \cdot R(r_j) d_s d_r \dots \dots \dots (8b)$$

$$K = 1/2 \int_{-a}^a R(r_j) d_r \dots \dots \dots (9)$$

K : 補正係数

a : $\{r_j\}$ の分布を調整する正規偏差値

(8a) 式は、 $\{s_i\}$ と $\{r_j\}$ から $\{f_i\}$ の分布の可能性を予測計算するものであり、(8b) 式は、 $\{r_j\}$ の分布をできるだけ実情に近づけて、 $\{f_i\}$ の分布が $\{a_i\}$ の分布にできる

表—4 840°D・D 時個別強度指数と 840°D・D 時現場封緘養生強度分布予測

工事	工場	呼び強度 F _N	840°D・D時個別強度指数、推定強度(1)										840°D・D時現場封緘養生強度予測値、群強度指数			
			工場毎			調合毎					最大値、最小値 の正規偏差		モデルⅠ		モデルⅡ	
			試料数	平均	標準偏差	試料数	平均	標準偏差	最小値	最大値	最小値	最大値	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
A	a ₁	420				30	1.00	0.056	0.91	1.11	1.61	1.96	1.00	0.075	1.00	0.089
		390	54	1.02	0.051	18	1.03	0.036	0.96	1.09	1.94	1.67	1.03	0.062	1.03	0.059
		360				6	1.05	0.023	1.02	1.08	1.30	1.30	1.05	0.037	1.05	0.035
	a ₂	420				30	0.96	0.047	0.89	1.09	1.49	2.77	0.96	0.086	0.96	0.083
		390	45	0.95	0.046	6	0.92	0.031	0.89	0.97	0.97	1.61	0.92	0.055	0.92	0.053
		360				9	0.94	0.038	0.88	1.00	1.58	1.58	0.94	0.068	0.94	0.066
B	b ₁	465				15	1.03	0.057	0.94	1.12	1.58	1.58	1.03	0.066	1.03	0.059
		450				21	0.98	0.046	0.89	1.05	1.96	1.52	0.98	0.073	0.98	0.069
		435	78	0.97	0.059	42	0.94	0.047	0.86	1.05	1.08	2.34	0.94	0.074	0.94	0.070
		405														
	b ₂	450				49	0.96	0.035	0.90	1.05	1.71	2.57	0.96	0.055	0.96	0.052
		360	98	0.95	0.031	49	0.94	0.023	0.90	1.01	1.74	3.04	0.94	0.045	0.94	0.043
C		400	9	1.00	0.027	9	1.00	0.027	0.97	1.04	1.11	1.48	1.00	0.046	1.00	0.044
算術平均				0.98	0.043		0.98	0.039			1.50	1.95	0.98	0.062	0.98	0.059
全 体						284	0.97	0.052			1.73					

だけ近似するようにした実験式である。(8a) 式によるものをモデルⅠ, (8b) 式によるものをモデルⅡとする。計算は (8a), (8b) 式を階段変数に変形して行う。

3.2 予測式の適用

(8a) 式, (8b) 式を使用して, 表—1 の標準強度分布, 表—4 の左半分の調合毎個別強度指数分布から, $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時現場封緘養生強度分布を予測する。表—1 の標準強度分布を $\{s_i\}$ とし, 表—4 の調合毎個別強度指数分布を $\{r_i\}$ として, 計算した結果が表—4 右半分に示す表である。

計算した結果をみると, 平均値は (8a) 式, (8b) 式による計算結果と表—1 における $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時現場封緘養生推定強度分布の値はほぼ一致している。そのため, 標準偏差の値のみを比較したのが表—8 である。図—8 (b) では $a=1.73$ を用いた。この値は, 表—4 の調合毎の個別強度指数の最大値, 最小値を与える正規偏差を計算し, その値を算術平均した値である。全体にモデルⅡの方がモデルⅠよりも予測値が表—1 の現場封緘養生推定強度の値に近くなっている。モデルⅠでは, $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$

(a) モデルⅠ

(b) モデルⅡ

図—8 $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時現場封緘養生強度分布標準偏差とその予測

推定強度 (1) 分布との比較では 20 % 前後標準偏差を大きく計算する傾向があるが, $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 推定強度 (2) 分布との比較では, ほぼ $\pm 20\%$ 以内の範囲でよく予測している。標準偏差の値が, 0.04 以下のように極端に小さい場合を除けば, モデルⅡは, 図—8(a), 図—8(b) 双方に対して $\pm 20\%$ の誤差範囲で予測している。

4. 各種強度分布間の対応関係の検討

4.1 同一工場同一調合コンクリートの標準養生強度分布と現場封緘養生強度分布

ここでは前提条件 (イ) に対する検討を行う。

前提条件 (イ) において, 目標とする予想平均気温履歴を経た材令での積算温度は, 構造体強度管理材令 28 日の場合で $784^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$, 同 42 日, 56 日および 91 日では, それぞれ 1030, 1232 および $1183^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 以上となっている。筆者らは文献 2) において, 積算温度が同じであれば各種供試体の強度は現場封緘養生を除き平均値的には, ほぼ同じであり, 現場封緘養生強度の場合は他に比べて 2~3 % 低いことを示した²⁾。現場封緘養生強度で構造体強度を管理する材令 29~91 日の場合, いずれも積算温度が $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ を超えているのはこの事情を反映している。ここでは, 積算温度がバラバラで比較がしにくいので, 積算温度を $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ に揃えて比較検討を行う。

一般に 2 種類の強度分布の違いは, それぞれの分布の平均値と標準偏差の差として表せる。表—1 において, 標準養生強度分布と同積算温度時現場封緘養生強度分布を比較すると, 平均値の方は最大 7 % の差であるが, 標準偏差つまりばらつきの差の方は大きくなっている。

図—9 は, 表—1 における標準強度分布と $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時現場封緘養生強度分布それぞれの標準偏差を比較したものである。群強度指数で表した標準偏差の値が 0.04 とは, 実強度では, $452\sim 591 \times 0.04 = 18.1\sim 236 \text{ kgf/cm}^2$ となり, 経験的にはかなり低い値と考えられる。標準偏

図—9 標準強度分布と $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時現場封緘養生強度分布の標準偏差比較

図—10 840°C·D 時強度分布比較

差が 0.04 以下のものを除くと図—9 からはある傾向が読みとれる。すなわち、推定強度 (1) の場合の現場封緘養生強度分布のばらつきは、積算温度が同じであれば、標準強度分布のばらつきとはほぼ等しいが、推定強度 (2) の場合の現場封緘養生強度分布の標準偏差 (ばらつき) は、標準強度分布の標準偏差 (ばらつき) より 20 % 前後大きいとみることができる。

推定強度 (1) のようにマクロ的にみて、標準強度分布と 840°C·D 時現場封緘養生強度分布のばらつきが同程度であっても、図—9 を個々の調査別にみれば、まだ標準偏差の値が ±10 % のばらつきの差がある。仮に、標準強度分布と 840°C·D 現場封緘養生強度分布の平均値が同じとすると、標準強度分布の標準偏差が 840°C·D 現場封緘養生強度分布の標準偏差より大きい場合には、ある不良率を想定して標準強度で調査を決めたコンクリートの、840°C·D 時現場封緘養生強度の評価での不良率は標準強度で想定した不良率より小さくなる。逆に標準強度分布の標準偏差より 840°C·D 時現場封緘養生強度分布の標準偏差の方が大きければ、840°C·D 時現場封緘養生強度で評価する不良率の方が高くなる。

図—10 は、標準強度と 840°C·D 時現場封緘養生強度の分布の違いを、平均値と標準偏差の両方からみたものである。群強度指数で表現したときの調査毎の強度分布を、平均強度と不良率 2.28 % を示す強度の位置で示している。図—9 にみるように、標準偏差は標準強度分布に比べて 840°C·D 時現場封緘養生強度分布の方は等しいかやや大きい、平均値が概して 840°C·D 時現場封

緘養生強度分布の方が小さいので、強度分布の形でみると 840°C·D 時現場封緘養生強度分布は標準強度分布よりややばらつきが大きく強度分布が全体にやや低くなっている。したがって、標準強度分布で不良率 2.28 % の位置の強度の値を、840°C·D 時現場封緘養生強度で評価すると、不良率は図—10 の上にあるように 2.28 % よりも総じて大きな値になる。調査計画のときに使用する標準偏差の値は、実質的な標準強度分布の標準偏差よりはるかに大き目の標準偏差値を使用することが多く、標準強度分布の標準偏差の値は、表—1 から大き目の値として群強度指数で 0.07～0.09 程度であろう。しかし、その場合でも 840°C·D 時現場封緘養生強度の平均値が標準強度の平均値に比べて多少低くなることを考慮しなければ、図—10 中段のグラフにみるように、一部は現場封緘養生強度分布での不良率 2.28 % をクリアできない可能性も多くな

る。

JASS 5 では、現場封緘養生強度によって構造体強度管理を行う場合には、構造体強度管理材令時の積算温度が 840°C·D より大きくなっているため、図—10 にみる 840°C·D 時現場封緘養生強度分布での評価に比べると、不良率は小さくなる。しかし、840°C·D 時現場封緘養生強度分布の平均値が標準強度分布の平均値より 2～3 % 低いことを考慮しても、表—4 左半分にみるような個別強度指数分布のばらつきがあれば、図—10 にみるほどではないにしても、構造体強度分布での不良率が製造時不良率に比べて大きくなることは避けられないとみられる。また、積算温度が大きくなって強度発現が大きくなった場合には、その強度発現の大きさに応じて現場封緘養生強度分布の標準偏差は大きくなるから²⁾、JASS 5 では図—10 の 840°C·D 時現場封緘養生強度分布の標準偏差よりは大きな値となることが予想され、標準偏差が大きいことによる不良率の増加が懸念される。

JASS 5 による構造体強度の管理では、標準強度で調査計画をしたコンクリートを、必ずしも 840°C·D 時現場封緘養生強度で評価するわけではない。積算温度を揃えて強度を評価した場合、その評価した強度をどのように扱って調査計画を行うかについては、本論文でもおおよそ御判断頂けると思うが、詳しくは文献 40) を参照して頂きたい。

4.2 現場水中又は封緘養生強度分布とコア強度分布

ここでは前提条件 (ロ) についての考察を行う。

高強度コンクリートの調査計画においても、JASS 5 の高強度コンクリートの項と同様に不良率を 2.28 % 以

下と設定し、設計基準強度の90%を下回る確率がほとんどないことを条件とした調合計画を考える。JASS5では気温補正のない時期を、本論文では調合計画に用いた標準養生による調合強度の積算温度(840°D・D)が得られたときとすれば、下式で調合強度を決定できる。

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

$$\text{かつ } F \geq 0.9 \times F_c + 3 \times \sigma \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$F \geq |F_c + 2 \times \sigma_d / r_a| \quad \dots\dots\dots (10)'$$

$$\text{かつ } F \geq |0.9 \times F_c + 3 \times \sigma_d / r_a| \quad \dots\dots\dots (11)'$$

F : 標準強度における調合強度

F_c : 設計基準強度

σ : 標準強度分布の標準偏差

σ_d : 現場水中又は封緘養生強度分布の標準偏差

r_a : 現場封緘又は水中・標準養生強度比分布の平均値

(10), (11) 式は標準強度分布を対象として調合計画を行う場合で、JASS5の気温補正を必要としない時期と同じであり、(10)', (11)' 式は840°D・D時現場水中又は封緘養生強度分布を対象として標準強度における調合強度を決める式である。

(10)', (11)' 式による調合計画では、840°D・D時現場水中養生強度の場合は標準強度と双方の強度分布の平均値がほぼ同じであるから $r_a = 1.00$ になる²⁾。840°D・D時現場封緘養生強度の場合は標準強度に比べると2~3%小さいので $r_a = 0.97 \sim 0.98$ である²⁾。しかし、ここでは表—3における実験Ⅰ~Ⅶでの現場封緘・標準養生強度比分布の平均値が0.99であることもあり、現場封緘養生強度分布とコア強度分布の対応関係を検討するのが目的であるから、計算を簡単にするためにこの場合も含めて $r_a = 1.00$ とする。また、この節は前提条件(イ)を固定して、現場水中又は封緘養生強度分布と、コア強度分布の対応関係を検討するのが目的であるから、やや問題はあるものの前提条件(イ)があるので、 σ_d の値は標準強度分布の標準偏差の値と同じ値を用いる。そのとき、調合計画時の840°D・D現場封緘又は水中養生強度(すなわちこの場合標準強度)のばらつきと840°D・Dの積算温度が得られたときの構造体強度(コア強度)のばらつきとの関係を、表—3のデータと(8a), (8b) 式によって計算検討する。JASS5での構造体強度は同材令の現場封緘又は水中養生強度で評価しているのであって、同積算温度時ではないが、構造体温度履歴

の特殊な場合は除いているので、同積算温度時の検討でも前提条件(ロ)の考察になると考える。

(8a), (8b) 式において、 $S(s_i)$ は840°D・D時現場封緘、又は水中養生強度分布すなわち標準強度分布であり、 $R(r_j)$ は、表—3におけるコア・現場封緘養生強度比、又はコア・現場水中養生強度比の分布である。標準強度分布の平均値を1.00とした指数で表す。この際、図—6の現場封緘・標準養生強度比分布と、表—4左半分の840°D・D時現場封緘養生個別強度指数分布がよく、似ていることなどを参考として、次のような仮定をする。表—3にまとめた各種強度間を比較する強度比のばらつきデータは、積算温度が表—2に示したように411°D・Dから3000°D・Dを超えるものまでを含めて、積算温度に関係なく総合したばらつきのデータであるが、総合する以前の個々のコア・現場封緘養生強度比などの強度比の値は、その個々の積算温度のときだけでなく、積算温度が違う場合でも起こり得る強度比の値である、つまり、どの積算温度のときでも共通して起こりうる強度比であり、積算温度を一定としたとき例えば840°D・D時におけるその強度比の確率分布は総合したばらつき結果と同じ確率分布になると考える。

表—5、図—11~13はその計算結果である。

表—5はコア強度分布の標準偏差(8a), (8b) 式を用いて計算した結果である。標準強度分布におけるばらつきと、コア強度分布のばらつきにはかなりの差が認められる。このため標準強度の不良率とコア強度の不良率には差が生じる。図—11は、標準強度で不良率を2.28%以下として調合計画を行ったときに、設定した標準

図—11 コア強度の不良率予測計算結果

表—5 コア強度分布の標準偏差予測計算結果

		(調合強度=1.00)						
標準(現場封緘又は現場水中)養生強度分布の標準偏差		0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04
モデルⅠ	実験Ⅰ~Ⅶ							
	コア平均	0.116	0.106	0.100	0.093	0.085	0.079	0.073
	コア個別	0.132	0.125	0.118	0.112	0.106	0.101	0.097
	学会論文	0.135	0.128	0.121	0.114	0.108	0.103	0.099
モデルⅡ	現場封緘養生	0.125	0.117	0.110	0.103	0.097	0.092	0.087
	現場水中養生	0.110	0.102	0.093	0.085	0.078	0.071	0.064
	コア平均	0.121	0.114	0.106	0.100	0.093	0.087	0.083
	コア個別	0.125	0.117	0.109	0.102	0.095	0.089	0.084
学会論文	現場封緘養生	0.116	0.108	0.100	0.093	0.086	0.080	0.075
	現場水中養生

図—12 不良率を2.28%以下の条件にしたときの設計基準強度低下量予測計算結果

図—13 (10), (11) 式により決定したときの設計基準強度加算量予測計算結果

強度の標準偏差の値に応じてコア強度分布では不良率がどの程度になるかを示したものである。実線がモデルⅠ、点線がモデルⅡである。モデルⅡには図—8と同様、 $\alpha = 1.73$ を用いた。この値を使用したのは図—4での実質的な分布も考慮した結果である。標準強度分布の標準偏差が小さいほど、コア強度の不良率は急激に大きくなっている。図—9に示したように、実際の標準強度分布の標準偏差は実績的には0.04~0.06程度であるが、調査計画ではやや大きな値をとるので、0.07程度が適当とすると、実質的なコア強度での不良率として見込まれるのは10~15%程度になる。実験Ⅰ~Ⅶにおいて、平均のコア強度を対象とする場合と、コア1本ごとの個別のコア強度を対象とする場合とでは、10%近いコア強度分布不良率の違いがでる。学会論文から得られたコア・現場封緘養生強度比分布のばらつきが大きいにもかかわらず、学会論文(現場封緘養生)のコア強度分布不良率が小さく計算されているのは、コア・現場封緘養生強度比分布の平均値が、1.02と高いからである。コア強度分布で不良率が2.28%以下となりそうなのは、図—11での線を左側に延長してみると、標準強度分布の標準偏差を0.13~0.15位にとるときである。これは現実には起こりにくい値である。(10)', (11)'式での r_a の値を $r_a=1.00$ としているため、構造体強度管理を現場封緘養生強度で行う場合では、JASS 5に比べてモデル

ルとしている調査計画が多少不利に扱われている面はあるが、図—9にみるように、840°D・D 現場封緘養生強度分布の標準偏差の値は現実には標準強度分布の標準偏差の値よりは大きく、JASS 5に基づく構造体強度材令29~91日管理を行う場合には構造体強度発現時の積算温度は前にみたように840°D・Dより大きいので、その標準偏差は840°D・D時のときより更に大きいと考えられる。このようなことからコア強度分布での不良率は、調査計画を行ったときに見込んだ不良率2.28%を一般的に超えているとみられる。

それではこのモデル計算において、標準強度を行った調査強度などの条件を上記と全く同じにして調査計画を行った場合、コア強度で不良率2.28%以下の条件を満たすには、その製造されたコンクリートは、コア強度分布では、どの程度最初計画した設計基準強度を下げて評価されなければならないであろうか。それを示したのが図

—12である。横軸は図—11と同様に標準強度分布の標準偏差、縦軸に設計基準強度の評価低下量を表している。当初計画時の、最初の設計基準強度を100としたときの割合で表している。右の縦軸に $F_c 420, 600 \text{ kgf/cm}^2$ の場合の目盛を実強度で示す。図—12でみると、コア・現場封緘養生強度比分布のばらつき具合によって5%程度の差はあるが、不良率2.28%以下の条件をコア強度で満たすためには、マクロ的には10%前後の設計基準強度の評価の低下が必要である。 $F_c 600 \text{ kgf/cm}^2$ であれば $F_c 540 \text{ kgf/cm}^2$ 程度に、 $F_c 420 \text{ kgf/cm}^2$ であれば $F_c 380 \text{ kgf/cm}^2$ 程度に評価が下がる。

また、コア強度で不良率2.28%以下になるような調査計画を、コア強度分布において不良率が2.28%以下になり、かつ設計基準強度の90%を下回る強度の出現率がほとんどない条件で((10), (11)式と同条件で行う場合に、最初の設計基準強度をどの位割増しして調査計画をしなければならないかを計算してみよう。調査計画では、不良率を規制する式((10)式に相当する)のみではなく、設計基準強度の下回り方を規制する式((11)式に相当する)があるので、この場合図—12の値とは違ってくる。コア強度分布においてこれらの2条件で((10), (11)式と同条件で)設計基準強度を満足させる場合の条件式について考えると、(10), (11)式の代わりに次のような条件式を使用しなければならなく

表—6 通常強度レベルにおけるコア強度不良率等予測計算結果 (参考)

		コア強度分布不良率 (%)					コア強度分布で不良率4.18%以下としたときの設計基準強度低下量※ (kg/cm ²)					コア強度分布で(16)(17)式を満足するような設計基準強度を得るための設計基準強度加算量※ (kg/cm ²)				
標準強度 (現場水中養生強度) 分布の標準偏差 (調合強度=1.00)		0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.10	0.09	0.08	0.07	0.06
モデルⅠ	コンクリート懇談会	23.0	25.5	28.1	31.2	34.8	45	46	47	49	50	117	112	109	106	105
	構造体コンクリートの強度管理に関する研究	19.5	21.2	25.1	28.8	33.0	31	33	34	35	36	56	52	53	54	56
	垂直部材 水平部材	42.1	48.4	44.8	37.5	60.2	44	44	45	46	47	68	68	68	69	70
モデルⅡ	コンクリート懇談会	19.8	22.1	24.8	28.1	31.9	35	36	37	38	40	71	67	65	63	63
	構造体コンクリートの強度管理に関する研究	16.9	19.2	22.1	25.5	30.2	25	26	27	28	29	40	41	41	42	43
	垂直部材 水平部材	41.3	47.6	54.8	63.3	72.2	40	40	41	42	43	60	60	60	60	61

(※ $F_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ として計算)

なる。

$$F' \geq F'_c + 2 \times \sigma \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\text{かつ } F' \geq 0.9 \times F'_c + 3 \times \sigma \quad \dots\dots\dots (13)$$

または

$$F' \geq (F_c + 2 \times \sigma_c) / r_m \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\text{かつ } F' \geq (0.9 \times F_c + 3 \times \sigma_c) / r_m \quad \dots\dots\dots (15)$$

F' : コア強度分布で不良率 2.28 % 以下かつ $0.9 F_c$ 以下の強度がほとんど出現しないように計画したときの標準強度での調合強度

F'_c : コア強度分布で不良率 2.28 % 以下、かつ $0.9 F_c$ 以下の強度がほとんど出現しないように計画したときの標準強度における割増しを含めた設計基準強度の換算値

σ_c : コア強度分布の標準偏差

r_m : コア・現場封緘養生強度比分布の平均値

(14), (15) 式は (10)', (11)' 式と同じ考え方に基づく式である。ここで、もし標準強度分布と $840^\circ\text{D} \cdot \text{D}$ 現場封緘養生供試体強度分布とが同じ分布ではないとすると、(14), (15) 式は、 $840^\circ\text{D} \cdot \text{D}$ 時現場封緘養生供試体強度分布での調合強度を表す式になり、更に標準強度分布での調合強度を表す式に直すためには、(10)', (11)' の式の $(F_c + 2 \times \sigma_a)$ 又は $(0.9 \times F_c + 3 \times \sigma_a)$ のところに (14), (15) で求めた F' を代入して、 F の値を求める必要がある。しかし、ここでは、標準強度分布と $840^\circ\text{D} \cdot \text{D}$ 時現場封緘養生供試体強度分布とは同じと考えているので、 F' が標準強度分布での調合強度になる。(12), (13) 式は、 $840^\circ\text{D} \cdot \text{D}$ 現場封緘養生供試体強度分布と同じ分布であるとした標準強度分布と、 $840^\circ\text{D} \cdot \text{D}$ 時コア供試体強度分布との関係から導かれる式である。

図—13 が計算結果を表したグラフである。標準強度分布の標準偏差には余り関係なく、コア・現場封緘養生強度比分布のばらつき具合に応じて設計基準強度を割増しする量 (加算量) がほぼ決まってくる。標準強度分布の標準偏差が小さいところは (12) 式で、大きい部分は (13) 式で設計基準強度の加算量が決まっているためである。コア・現場封緘養生強度比分布のばらつきによって 5 % 程度、平均のコア強度と個々のコア強度では 10 % 程度の差があるが、おおよそ 15 % 前後の設計基準強度への加算が必要である。 $F_c 600 \text{ kgf/cm}^2$ であれば、 F'_c

$= F_c + (\text{図—13 の設計基準強度加算量})$ であるから、 $F'_c = 600 \times 1.15 = 690 \text{ kgf/cm}^2$, $F_c 420 \text{ kgf/cm}^2$ の場合では、 $F'_c = 420 \times 1.15 = 483 \text{ kgf/cm}^2$ となる。

なお、設計基準強度を下回る不良率を 2.28 % 以下にすることができれば、筆者は設計基準強度の下限を規制する (11) 式、および (13) 又は (15) 式は不必要だと思うが、JASS 5 高強度コンクリートの項の調合決定式をそのまま適用した。(11) 式は、不良率が 15.9 % 以下と割合大きな値であったときに加えられた条件式である。)

以上、JASS 5 に基づいて調合計画を行うときの気温補正のない時期を対象として論じてきたが、気温補正が加わる場合は気温補正の値の分だけ設計基準強度の値を大きくみて調合計画を行うだけで、基本的には気温補正のない時期と同様のことが言える。

参考までに表—3 における通常強度レベルのコンクリートについて、同様の検討を行った結果が表—6 である。この場合には (10), (11) 式にかえて次式を使用している。

$$F \geq F_c + 1.73 \times \sigma \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$F \geq 0.8 \times F_c + 3 \times \sigma \quad \dots\dots\dots (17)$$

調合誤差を含むデータもあるので、高強度コンクリートの場合と同列に論ずるわけにいかない面もあるが、コア強度での不良率が 50 % 近くになっている例もみられ、この種のばらつき問題は高強度コンクリートだけではなく、通常の強度レベルのコンクリートにおいても依然として存在している懸念がありそうである。

4.3 標準強度分布と現場封緘又は水中養生強度分布を介したコア強度分布

ここでは前提条件 (イ) および (ロ) を同時に検討する。ここでも積算温度を揃えて標準強度分布とコア強度分布を比較する。すなわち、(10), (11) 式によって標準強度分布を対象として調合計画を行ったとき、 $840^\circ\text{D} \cdot \text{D}$ 時現場封緘養生強度ではどのような強度分布になり、更にそこから $840^\circ\text{D} \cdot \text{D}$ 時コア強度分布を計算して、最初の標準強度分布での不良率 2.28 % と標準偏差の値が $840^\circ\text{D} \cdot \text{D}$ 時コア強度分布ではどのように変化するかを検討する。

標準強度分布と現場封緘又は水中養生強度分布を介し

図—14 標準・現場封緘養生強度比分布の差を考慮したときの
コア強度分布の不良率および設計基準強度低下量

たときのコア強度分布との対応関係を検討するので、3種類の強度分布の関係を扱うことになる。このような場合には、(8a) (8b) 式の考え方を延長した次式を使用する。

$$F_1(f_i) = \iiint S(s_i) R_1(r_{j1}) R_2(r_{j2}) d_s d_r \dots \dots \dots (12a)$$

$$F_2(f_i) = \iiint S(s_i) K_1 R(r_{j1}) K_2 R_2(r_{j2}) d_s d_r \dots \dots \dots (12b)$$

$S(s_i)$ は標準強度、 $R_1(r_{j1})$ は現場封緘・標準養生強度比、 $R_2(r_{j2})$ はコア・現場封緘養生強度比の分布である。

表—7 がこの計算結果である。コア強度分布の予測標準偏差および不良率は、表—5、図—11 に比べて更に大きな値になっている。したがって、コア強度分布で(10)、(11) 式と同条件、すなわち、コア強度分布において不良率が2.28%以下であり、かつ設計基準強度の90%を下回る確率がほとんどない条件を満たす調査計画を行うときの設計基準強度加算量 ($F'_c - F_c$) も、図—13 の値より大きな値になる。

図—14 に、予測計算されるコア強度の不良率とコア強度分布での不良率を2.28%以下の条件を満たすとき

表—7 標準養生、現場封緘養生およびコア強度分布の差を考慮したときのコア強度分布予測計算結果

			コア強度分布の標準偏差 (調合強度＝1.00)				コア強度分布で(10)(11)式を満足 するような設計基準強度を得るた めの設計基準強度加算量 ($F_c = 100$)			
標準強度分布の標準偏差 (調合強度＝1.00)			0.08	0.07	0.06	0.05	0.08	0.07	0.06	0.05
モデルⅠ	実験Ⅰ～Ⅶ	コア平均	0.109	0.103	0.097	0.092	19.9	19.2	18.8	18.7
		コア個別	0.125	0.119	0.115	0.110	31.8	31.3	31.0	31.1
	学 会 論 文 (現場封緘養生)		0.128	0.123	0.117	0.113	25.5	25.0	24.8	24.9
	モデルⅡ	実験Ⅰ～Ⅶ	コア平均	0.099	0.092	0.086	0.080	14.1	13.2	12.7
コア個別			0.111	0.105	0.099	0.094	22.3	21.6	21.2	21.2
学 会 論 文 (現場封緘養生)		0.114	0.108	0.102	0.097	16.8	16.1	15.7	15.6	

表—8 コア・標準養生強度比分布からのコア強度分布予測計算結果

標準強度分布の標準偏差 (調合強度=1.00)		0.10	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04
モデルⅠ	コア強度分布の標準偏差 (調合強度=1.00)	0.115	0.107	0.099	0.092	0.085	0.079	0.074
	コア強度の不良率 (%)	4.95	7.08	9.85	11.9	14.9	19.2	25.1
	コア強度で不良率2.28%以下と したときの設計基準強度低下量 ($F_c = 100$)	5.04	6.98	8.36	8.80	9.32	9.94	10.7
	コア強度で(10)(11)式を満足す るような設計基準強度を得るた めの設計基準強度加算量 ($F_c = 100$)	12.2	12.7	12.8	11.8	11.1	11.0	12.0
モデルⅡ	コア強度分布の標準偏差 (調合強度=1.00)	0.109	0.101	0.093	0.085	0.077	0.071	0.064
	コア強度の不良率 (%)	4.92	5.71	8.08	9.68	12.1	15.9	21.5
	コア強度で不良率2.28%以下と したときの設計基準強度低下量 ($F_c = 100$)	3.35	5.25	6.57	6.91	7.33	7.83	8.46
	コア強度で(10)(11)式を満足す るような設計基準強度を得るた めの設計基準強度加算量 ($F_c = 100$)	8.91	9.31	9.21	8.13	7.91	8.50	9.24

の設計基準強度の低下量を示す。コア強度の不良率は前提条件(口)を検討した図—11 と比べると、図—14(a)の方が5～7%多くなっている。実際には、標準強度分布と現場封緘又は水中養生強度分布は必ずしも同じではないので、この結果は当然といえ当然である。設計基準強度の低下量も図—12 に比べて図—14(b)の方が設計基準強度の5%程度大きく、コア強度での不良率2.28%以下の条件を満たすように見直ただけでも、コア強度分布に考慮を払うことなく調査計画をした時より設計基準強度度は15%前後小さくなる。 $F_c 420$ kgf/cm²では60 kgf/cm²前後、 $F_c 600$ kgf/cm²では80～100 kgf/cm²前後の割引きになる。設計基準強度の90%以下の強度が、コア強度ではほとんどない条件(13)又は(15)式を、これに加えると設計基準強度の割増しは更に大きくなる。表—7にみるように、調査計画時に、本来必要とする設計基準強度に、設計基準強度の20～30%を加えなくてはならなくなる。

4.4 標準強度分布とコア強度分布

構造体強度はコア強度がその値を具現しているから、調査計画時に使用する標準養生強度とコア強度の関係を直接検討してみるのが賢明である。表—3のコア・標準養生強度比分布のばらつきから、標準強度分布の標準偏差をいろいろに変えて予測計算をしてみる。その結果が

表一8である。表一8の計算には実験Ⅰ～Ⅷの平均のコア強度を使用しており、個々のコア強度ではない。個々のコア強度の値を使ってコア1本ごとにみれば、コア強度分布に予測される標準偏差も不良率も当然表一8よりは大きな値となる。

表一8を使って調合計画でコア強度分布を考慮に入れて計画したときと、考慮しない場合の差をみるために次のような計算を行ってみる。つまり、コア強度分布において F_c を下回る不良率が2.28%以下でありかつ0.9 F_c を下回る強度がほとんどない条件(すなわち(12), (13)式又は(14), (15)式)を満足するように調合計画を行う場合と、コア強度分布を考慮しないで一般に行われているように標準強度分布のみで(10), (11)式を満足するように調合計画を行う場合とでは、調合強度にどの程度の差が出るかを計算してみる。

調合計画で使用する標準強度分布における標準偏差の値は0.07程度である。標準強度分布の標準偏差が0.07のときには、表一8よりコア強度分布の標準偏差は、可能性のある大きい目の値として0.092(モデルⅠ)、可能性の高い値としては0.085(モデルⅡ)が予測される。標準強度における調合強度は、コア強度分布の標準偏差が0.083より大きいので、(14)式ではなく(15)式によって決まる。

モデルⅠ

(10) 式に $\sigma=0.07 \times F$, (15) 式に $\sigma_c=0.092 \times F$, $\tau_m=0.97$ を代入して

(10) 式より

$$F \geq F_c + 2 \times 0.07 \times F$$

$$F \geq 1.16 \times F_c$$

(15) 式より

$$F' \geq (0.9 \times F_c + 3 \times 0.092 \times 1.16 \times F_c) / 0.97 = 1.26 \times F_c$$

又は、(13) 式より

$$F' \geq 0.9 \times 1.118 \times F_c + 3 \times 0.07 \times 1.16 \times F_c = 1.25 \times F_c$$

したがって、 F' (コア強度分布を考慮) と F (コア強度分布不考慮) の比は

$$(F'/F)_I = 1.26 \times F_c / 1.16 \times F_c = 1.08$$

モデルⅡ

$\sigma=0.07 \times F$, $\sigma_c=0.085 \times F$, $\tau_m=0.97$ を代入して、(10) 式より

$$F \geq F_c + 2 \times 0.07 \times F$$

$$F \geq 1.16 \times F_c$$

(15) 式より

$$F' \geq (0.9 \times F_c + 3 \times 0.085 \times 1.16 \times F_c) / 0.97 = 1.23 \times F_c$$

したがって

$$(F'/F)_{II}$$

$$= 1.23 \times F_c / 1.16 \times F_c = 1.06$$

つまり、調合計画においてコア強度分布に考慮を払って計画する場合は、コア強度分布に考慮を払わず標準強度分布のみで計画する場合に比べて、標準強度における調合強度は6%～8%の増加である。 $F_c=420 \text{ kgf/cm}^2$ の場合は29～40 kgf/cm^2 , $F_c=600 \text{ kgf/cm}^2$ の場合42～56 kgf/cm^2 の増加になる。

表一8の予測計算値は、表一7、図一14よりは、図一11～13に近い値である。前提条件(イ)の立場に立って調合を計画し、現場封緘又は現場水中養生強度でコア強度を管理する場合と、標準強度によって調合計画を行い、コアと同一積算温度の標準養生強度でコア強度も管理する場合とでは、コア強度における不良率や設計基準強度の再評価が同じような値になるということである。表一7、図一14におけるように、標準強度で調合計画を行い、コア強度を現場封緘養生強度で管理するというようなことを行くと、標準強度、現場封緘養生強度、コア強度は同じ積算温度であっても多少ばらついて表れるので、2段階になっただけ、コア強度分布の不良率が大きくなりまた複雑にもなると考えられる。

5. 強度評価の一元化

JASS 5に基づく現在の通常強度レベルのコンクリートでの強度管理では、標準養生強度、現場水中又は封緘養生強度およびコア強度の3(4)種類の強度が同じ調合のコンクリートの評価に使用されている。これまで検討してきたように、この3種類の強度は積算温度を同じにしても異なる種類の強度間の相違はある程度避けられないから、標準強度で設計基準強度との関係から不良率を決めて製造したコンクリートでも、現場水中又は封緘養生およびコア強度分布でその同じ設計基準強度に対する不良率を評価すると、それぞれの強度分布で不良率の値が違ってくる。製造時に設定した不良率は最終的に構造体強度を評価するコア強度分布では一般に大きな値になる傾向がある。

一般に構造体強度および現場封緘養生強度のばらつきと製造時強度のばらつきの関係、およびその要因は図一15のように表される。a, bの他にc, dが構造体強度のばらつきの要因として加わるほか、eはfに比べてばらつきの要因となる要素が大きいから、構造体強度のばらつきが製造時強度のばらつきに比べて大きくなるのは当然である。調合計画を行う上において最もよい方法は、標準強度での不良率を決めるのではなく、コア強度分布における不良率を設定し、それによって標準強度で行う製造時の調合強度を決定することである。しかし、現状ではコア強度分布を構造計画上の関係でどうとらえるかもはっきりしないうえに、定性的にc, dのような要因を明らかにすることはできても、定量的にコア強度

図-15 製造時強度、現場水中又は封緘養生強度および構造体強度のばらつきとその要因

分布と標準強度分布の関係をとらえることは困難である。

このように、種類の違う強度を同一調合のコンクリートの評価に使えば、種類の違う強度間の相違に基づくばらつきを伴うことは避けられないことである。これを解消する一つの方法は、同一調合のコンクリートの評価には1種類の強度を適用し、評価を一元化することである。その評価には標準強度を使用する。

JASS 5において、「間接的な管理方法」¹⁾とは言いながらも、構造体強度として現場水中又は封緘養生強度を主として使用しているのは、図-15において構造体強度のばらつきの要因と考えられる③、④は、通常強度レベルのコンクリートの構造体強度管理には、それほど大きな影響を与える要因とはならないという判断がある。そのため、構造体強度検査は荷卸し時に行ってもよいことになっており、現場水中又は封緘養生強度は③、④の要因には結びついていない。現場水中又は封緘養生強度は図-15において、積算温度がおおよそ同じであるならば、構造体強度よりは標準強度で行う製造時の強度に近い存在であり、 $840^{\circ}\text{D}\cdot\text{D}$ 時現場水中又は封緘養生強度と標準強度の差は封緘状態や温度履歴の差（積算温度は標準強度と同じでも高低温の繰り返しなどで一定温養生よりは強度のばらつきが大きくなる要因となり得る）が存在するのみである。それに比べれば、高強度コンクリートの構造体強度管理を標準強度による管理に一元化しても、設計基準強度 360 kgf/cm^2 を超える高強度コンクリートでは、通常強度レベルのコンクリートに比べて、③、④の要因に関するばらつきは次のような理由から更に小さいから、通常強度レベルの構造体強度管理よりは、製造時と製造体強度発現時の不良率の違いが小さいと考えられる。

① 1回の打設量が少なく、対象となる部材が垂直部材で柱が主体であり、適用部材が大きい。また、水平方向、

垂直方向を分けてコンクリートを打設することが多く打設管理がしやすい。

② 上下方向の圧密による強度差が小さいかほとんどない。

③ バケット打設が多く、その場合は圧送による品質の変化が生じない。

④ 硬化コンクリートからの水分の逸散が小さく、構造体の乾燥による強度増進の停滞から生じる構造体強度のばらつきが小さい。

現場封緘養生強度で行う構造体強度管理は図-15における③、④の要因を含まず、現場封緘養生には標準養生に比べて供試体取扱いなどの点で不確定要因が加わりやすい。強度を管理するという意味においては不確定要因の入らない標準強度の方がよいと考えられる。コンクリート工事に無理のない設計をすることなど品質管理にとって設計の協力も必要であるが、高強度コンクリートの強度管理としては

① 使用するコンクリートの標準強度による製造時強度管理を十分に行う。

② コンクリート施工の仕様を決める（打設手順、締固め方法、養生方法など）

ことを条件とすれば、コア強度分布における不良率を最少限にすることが可能ではないだろうか。

しかし、これは製造時不良率と構造体強度不良率が異なることへの本質的な解決策というわけではない。この不良率不一致の問題を解決するためには、構造体強度はコア1本1本を対象とするか何本かの平均値を対象とするかなどの問題も含めて、かなりの実態調査、実験および討論を必要とすると思われる。この問題は、畢竟構造体強度の頻度分布を調査計画との関連で把握することである。材料の分野のみではなく、構造的な面から検討も必要であろう。ある頻度分布をもつ強度のコンクリートを鉄筋コンクリート部材に適用したときに頻度分布の違

いに応じて部材がどのような挙動を示すかとか、更にはそのような部材を実験の建物の設計にどう生かしていくかなどの問題を若起する可能性も否定することはできない。そのような細かな対応が設計上可能かなどの問題も含めて、かなりの検討時期を必要とするように思われる。しかし、実際の建物に使用されているコンクリートの強度がばらついていることは現実であり、これら不良率不一致の問題は、いずれは解決したい問題ではなかろうか。つまり、コア強度分布の不良率から標準強度で行う調査強度を決める方法がいずれは必要であろう。

だが、現在の高強度コンクリートの適用物件の増加を考えると、とりあえず通常の強度レベルの強度管理に近い結果が得られ、しかも単純化できる高強度コンクリートの強度管理法すなわち標準強度による製造時強度管理方式を決めておくことが先決であるように思われる。構造体強度の不良率が製造時に設定する不良率より大きくなることを補償するために、製造時にあらかじめ設計基準強度にある一定の強度の見込み加算を行うなどの方法を探る必要はあるかも知れないが、高強度コンクリートの強度管理をこの製造時強度管理のみに頼る方法を考えてもよいのではないだろうか。ただ、この製造時強度管理のみに頼る方法は本質的な解決策ではないという意味で暫定的ではある。

6. まとめ

現在通常の強度レベルのコンクリート工事で行われている強度管理の方式を 360 kgf/cm^2 を超える高強度コンクリート工事に適用すると、同一コンクリートに対して標準養生強度、現場水中又はは封緘養生強度およびコア強度の3種類の強度を適用することになる。条件を同じにするとこれら3種の強度は平均値的にはおおそよい一致を示すが、個々のデータでは1割程度のばらつきがある。このばらつきを考慮すると調査計画時の不良率2.28%はコア強度では一般に大きくなり、条件にもよるが予測計算をすると平均のコア強度では10~15%、個々のコア強度では20~25%前後の不良率をもつ結果になることも考えられる。その場合、コア強度で不良率が2.28%を維持するように調査計画を行うためには設計基準強度を15%~30%前後割増して、計画する必要がある。

高強度コンクリートでは通常の強度レベルのコンクリートに比べて施工誤差や適用位置部材に係るばらつき要因が小さくなるので、そのようなばらつきをできるだけ小さくするような設計施工をすることを条件として、製造的強度管理のみの強度評価に一元化して強度を管理するのが取りあえずはよいと考える。

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御協力を得たものである。論文をまとめるに当たっては東京大学友澤史紀教授の御助言を頂いた。ここに深く感謝致しますとともに、多くの貴重なデータを活用させて頂きました参考文献の関係各位の方々に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築学会：構造体コンクリート強度に関する研究の動向と問題 昭和62年11月
- 2) 戸祭邦之、黒羽健嗣：設計基準強度 360 kgf/cm^2 以上の高強度コンクリートの調査計画に於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、平成3年1月
- 3) J. M. Plowman: Maturity and the strength of concrete Magazine of Concrete Research, pp.13~22, March, 1956
- 4) 新屋栄一、梶田佳寛、阿部道彦、松本雅之：高強度コンクリートを用いた構造体コンクリートの強度発現性状に関する実験 その1一定温度条件下における強度発現性状、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.557~558、平成元年10月
- 5) 藤沢和久：蒸気養生コンクリートの圧縮強度に関する研究、p.45、建築研究報告、第52号、昭和43年3月
- 6) コンクリート懇談会：最近の現場におけるコンクリート強度の一例、GBRC、日本建築総合試験所、Vol.3, No.1, 1978
- 7) 中根 淳、高橋久雄、川口 徹、大池 武：構造体コンクリートの強度管理に関する研究 その5実験結果の総括と今後の課題、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.131~132、昭和52年10月
- 8) 高畑顯信、角 彰、小島政章、浅野満男、両角昌公、光枝 良：高強度コンクリートを用いた高層鉄筋コンクリート造建物の設計と施工(その2)構造体コンクリートの品質に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、pp.733~734、昭和62年10月
- 9) 星野博彦、芝池達司、渡辺康則、白塚芳郎、湯谷孝夫、梶山 毅：高強度コンクリートの品質と施工性に関する実験研究 その2実大柱による高強度コンクリートの施工実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、pp.743~744、昭和62年10月
- 10) 上岡 寛、中田博之、小野洋一郎、笹原 厚、河田秋燈、山田人司、稲川 尚：高強度コンクリートの実大打設実験による品質の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、pp.747~748、昭和62年10月
- 11) 近藤晴貞、有坂七郎：高強度コンクリートを用いた構造体のコンクリート強度に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)、pp.749~750、昭和62年10月
- 12) 福岡 信、山下益穂、加藤 容、代田佳史、桜井 徹、立山創一：超高層RC造用高強度コンクリートに関する施工実験(その2、実大モデル実験)、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)、pp.543~544、1989年10月
- 13) 西田 朗、鈴木忠彦、桑原隆司、手塚武仁：高強度コンクリートの品質管理方法の研究(その1. 高強度コンク

- リート構造体の実大実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp. 551~552, 1989 年 10 月
- 14) 桑原隆司, 西田 朗, 金森洋史: 高強度コンクリートの品質管理方法の研究 (その 3. コンクリート強度予測・管理システムの試作と検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp. 555~556, 1989 年 10 月
 - 15) 松本雅之, 榊田佳寛, 阿部道彦, 新屋栄一: 高強度コンクリートを用いた構造体コンクリートの強度発現性状に関する実験 (その 2. 低温時におけるコア供試体および管理用供試体の強度発現性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp. 559~560, 1989 年 10 月
 - 16) 松尾 忠, 鬼塚雅嗣: 高強度コンクリートを使用した構造体コンクリート強度に関する実験 (その 2). 実大柱の施工実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp. 563~564, 1989 年 10 月
 - 17) 笹原 厚, 河田秋澄, 山田人司, 稲川 尚: 高強度コンクリートの実大打設実験による強度の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp. 565~566, 1989 年 10 月
 - 18) 梶山 毅, 芝池達司, 吉田正三: 超高強度コンクリートの実用化に関する一実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp. 537~538, 1990 年 10 月
 - 19) 崎山和隆, 島垣利久, 立松和彦: 高性能 AE 減水剤を用いた高強度コンクリートの諸物性と施工性に関する実験研究 (その 2. 実大施工実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp. 543~544, 1990 年 10 月
 - 20) 本間敏明, 清水昭之, 梅津裕二, 柳 敬, 榊田佳寛, 阿部道彦, 崎山和隆, 島垣利久, 立松和彦: 高強度コンクリートの品質と施工性に関する実験的研究 (その 3. 硬化コンクリートの性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp. 549~550, 1990 年 10 月
 - 21) 柳 敬, 清水昭之, 本間敏明, 梅津裕二, 榊田佳寛, 阿部道彦, 崎山和隆, 島垣利久, 立松和彦: 高強度コンクリートの品質と施工性に関する実験的研究 (その 4. 実大構造部材への打設性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp. 551~552, 1990 年 10 月
 - 22) 塩見伊津夫, 有賀重雄, 中島健治, 東 良志, 後藤俊二, 若林 元: 超高層鉄筋コンクリート造建築物の実大施工実験 (その 1. 高強度コンクリートを用いた構造体コンクリート強度に関して), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp. 553~554, 1990 年 10 月
 - 23) 岡村一臣, 佐藤孝一, 藤井和俊, 宮下剛士, 寺田謙一, 安部 聡: 高強度コンクリートのポンプ圧送性に関する実験研究 その 5. 構造体コンクリートの温度履歴および圧縮強度, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp. 569~570, 1990 年 10 月
 - 24) 新屋栄一, 榊田佳寛, 安部道彦, 高塩美佐子, 松本雅之: 高強度コンクリートを用いた構造体コンクリートの強度発現性状に関する実験 (その 3. 夏期におけるコア供試体と管理用供試体の強度発現性状およびまとめ), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp. 577~578, 1990 年 10 月
 - 25) 林 芳尚, 清水俊久, 上西 隆: 高強度コンクリートの一体打ちによる構造体品質について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp. 583~584, 1990 年 10 月
 - 26) 梅本宗宏, 矢野瑞穂, 篠崎 徹, 三浦勇雄, 寺井靖人: 高強度コンクリートの品質管理に関する実験的研究 その 1. 各種養生条件における強度発現性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp. 585~586, 1990 年 10 月
 - 27) 平澤一郎, 酒井孝司, 岩井信彰, 永塚 徹: 模擬部材による構造体コンクリートの強度管理方法の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp. 189~190, 1990 年 10 月
 - 28) 立部正則, 田中伸幸, 今井 実: 超高強度コンクリートの実用化に関する実験的研究 (その 3. 構造体打込み実験), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp. 269~270, 昭和 63 年 10 月
 - 29) 山崎庸行, 今井 実, 坂口 昇: 超高強度コンクリートの実用化に関する実験的研究 (その 4. 材令 1 年までの強度特性), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州), pp. 493~494, 1989 年 10 月
 - 30) 中根 淳, 久保田昌吾, 一瀬賢一, 仙田孝志: RC 超高層建物用コンクリートに関する研究 (その 4. 実大柱形部材の強度に関する検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp. 295~296, 昭和 63 年 10 月
 - 31) 小松勇次郎, 森田司郎: 1000 kgf/cm² 級コンクリートに対する引抜試験法の適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), pp. 575~576, 1990 年 10 月
 - 32) 篠塚 徹, 平賀友晃, 梅本宗宏, 寺井靖人, 佐治 昭: 高強度コンクリートの品質と施工性に関する実験的研究 (その 2. 実大柱部材の強度性状), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp. 747~748, 1991 年 9 月
 - 33) 松本雅之, 榊田佳寛, 阿部道彦, 安田正雪, 塩見伊津: 高強度コンクリートの調合方法に関する実験 (その 3. 硬化コンクリートの諸性質), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp. 799~800, 1991 年 9 月
 - 34) 吉野敏郎, 牛島 栄, 酒井芳文, 板倉一男, 鈴木 猛, 貴田建城: 柱が正方形蛇腹鋼管で横補強された RC ラーメン造超高層建築の開発に関する研究 (その 9. 高強度コンクリートの施工性に関する検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp. 847~848, 1991 年 9 月
 - 35) 笹原 厚, 河田秋澄, 山田人司, 紺野弘毅: 超高強度コンクリートの実大柱打設実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp. 855~856, 1991 年 9 月
 - 36) 熊田誠謙, 佐藤 茂, 阿野真司: 鉄骨鉄筋コンクリート部材に対する高強度コンクリートの施工性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp. 857~858, 1991 年 9 月
 - 37) 岩井信彰, 平澤一郎, 酒井孝司: 模擬部材による構造体コンクリートの強度管理方法の検討 (夏期), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北), pp. 885~886, 1991 年 9 月
 - 38) 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
 - 39) 日本建築学会: 高強度コンクリートの技術の現状, p. 164, 平成 3 年 1 月
 - 40) 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合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

(1992 年 7 月 10 日原稿受理, 1993 年 4 月 6 日採用決定)