

原子力発電所建設工事におけるコンクリートの品質管理（その3）

——寒中マスコンクリートに温度補正をする必要性の検討——

高橋久雄

森本正一

(九電玄海工事事務所)

川口徹

竹下茂俊

(九電玄海工事事務所)

大池武

Quality Control of Concrete Structures in Nuclear Power Plant (Part 3)

——Study on Correction for Concrete Strength in Cold Weather Mass Concrete——

Hisao Takahashi

Shoichi Morimoto

Tohru Kawaguchi

Shigetoshi Takeshita

Takeshi Oike

Abstract

In general, concrete placed in the winter season has a tendency to have lower strength at the age of 4 weeks due to low curing temperature after placement. Therefore, under the Japanese code, the target mix Proportions in the winter season are modified adding an extra correction factor based on air temperature. Meanwhile, the quality control system for mass concrete to be placed in the winter system is indistinct at this stage. It is the aim of this report to present the results of investigations to clarify the following two subjects: (1) whether the correction factor due to temperature is needed or not for mass concrete in the winter season; (2) what kind of curing should be applied to control cylinders for estimating strength of mass concrete.

概 要

一般建築工事では、冬期に打設するコンクリートについては、外気温の影響で打設後低温養生されるため、強度発現が悪くなるので、温度補正という概念のもとに調合強度の割増を行っている。一方、冬期に打設するマスコンクリートの場合の調合および強度の管理方法については、はなはだ不明瞭な点が多い。本報は、次の二つの問題点に対する資料を得るために行った試験の結果の報告である。(1) 冬期に打設するマスコンクリートに温度補正が必要かどうか。(2) どのような養生を行った強度管理用のシリンダーからマスコンクリートの構造体強度を推定すればよいか。

1. はじめに

原子力発電所の建設工事では、一般の建物に比べ、部材断面寸法が大きくなり、かなりマスコンクリートに近くなる。マスコンクリートでは、コンクリート打設時にセメントの水和熱による温度上昇でひびわれ発生の危険性が大きくなるので、温度上昇を抑えるため単位セメント量を低減した調合が望まれている。

日本建築学会の旧 JASS 5 では、冬期に打設するマスコンクリートについては、水和熱による内部蓄熱効果があるので、調合計画に、温度補正は考慮しなくてもよい

というのが基本的な考え方であった。

一方、昭和50年の改訂 JASS 5 では、コンクリートの強度管理を標準水中養生と現場水中養生の2本立てで行うことになった。管理上の critical な条件としては、現場水中養生供試体の強度で設計基準強度以上を確保しなければならない。ここにいう現場水中養生というのは、JASS 5T-603 によると“供試体の温度を試験時までの構造体のコンクリートの温度にできるだけ近くなるようにする”という抽象的な条件が規定されているだけであり、屋外に設置した水槽で養生するのが一般的である。このような水槽の温度は、外気温の影響を受け平均値で

は外気温とほぼ等しくなる。従って、このような養生方法では、ある程度のmassになった部材コンクリートの水和熱の蓄熱が強度発現に及ぼす影響はほと

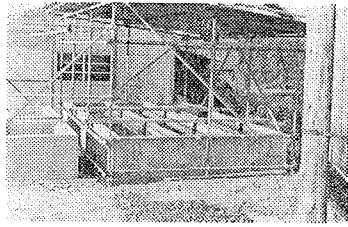


写真-1 現場水中養生水槽

んど考慮されていない。一般的な屋外水槽による現場水中養生を行なった供試体で設計基準強度を確保するためには、冬期に打設するコンクリートがいかにかマスコンクリートであろうとも、温度補正を加味してコンクリートを調合しなければならない。そうすると、単位セメント量が増えることになりひびわれ防止対策上、矛盾することになる。

そこで、今回の試験は、次の2つの問題点に対する資料を得る目的で行なったものである。

(1) 冬期に打設するマスコンクリートの調合計画、温度補正を必要があるか。

(2) マスコンクリートの構造体強度を推定するための供試体の養生はどのような方法がよいか。

この試験では、骨材最大寸法 (25, 40 mm), 温度補正の有無の別による計4種のコンクリートを使用した。それぞれのコンクリートについて、原子力発電所建設工事において最も多く見られる部材最小断面寸法の代表的なものとして、30 cm 部材, 100 cm 部材, 及び超大型マスコンクリートを想定した模型部材を製作した。各模型部材について、コアボーリングを行ない部材コア強度の発現性状を調べ、同時に、養生温度レベルをかえた強度管理用シリンダーの強度試験も行ない、それらの結果の比較・検討を行なった。

2. 試験の概要

2.1. 試験の実施場所・時期

この試験は、大林組九電玄海工事事務所の現場内に設置されている生コンプラントで行なった。試験の時期は、コンクリート打込み後4週間の予想外気温が最低になる厳寒期の1月23日にコンクリートを打設した。

2.2. コンクリートの調合条件と使用材料

2.2.1. 調合の種類 コンクリートは以下の条件の合計4種類の調合について試験した。

- (1) 設計基準強度: 210 kg/cm²
- (2) 調合上の標準偏差: 30 kg/cm² (仮定値)
- (3) 品質の級: “高級”
- (4) 温度補正: アリ (T=60kg/cm²), ナシ (T=0kg/cm²)
- (5) 骨材最大寸法: 25 mm, 40 mm

(6) セメント: フライアッシュB種セメント

(7) スランプ: 10±1 cm

(8) 空気量: 4±1%

2.2.2. 調合設計の考え方 2.2.1.の調合条件から、現行 JASS 5 に従うと調合強度(F₀)は次のようになる。

$$F_c = 210 \text{ kg/cm}^2, \sigma = 30 \text{ kg/cm}^2, T = 0 \text{ 又は } 60 \text{ kg/cm}^2$$

コンクリートの品質の級は“高級”であるから、

$$F_0 \geq F_c + T + 1.64 \sigma$$

$$F_0 \geq 0.8(F_c + T) + 3 \sigma$$

上式から、温度補正ナシの場合、F₀ ≥ 260 kg/cm²

温度補正アリの場合、F₀ ≥ 320 kg/cm²

となるが、今回の試験では温度補正のアリ・ナシの違いから、水セメント比, 単位セメント量, 発生する水和熱にできるだけ差をつくり出すため、図-1に示すように、温度補正ナシの調合では、理想的な強度分布の山の左側に、温度補正アリの調合では、山の右側にそれぞれ目標強度がなるように調合設計することとした。なお、この試験では、JASS 5 に規定している耐久性, 充填性, ワーカビリティ等からの水セメント比, 単位セメント量についての制約条件は無視した。

2.2.3. 使用材料 以下の材料を使用した。

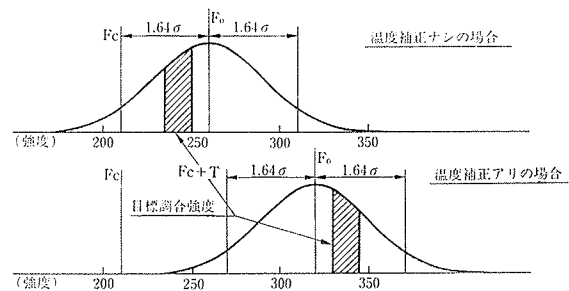


図-1 仮定した強度分布と目標調合強度

試験日	試料名	所定の級	混合比(骨材:セメント)	産地	試験担当者
S.53.1.21.	2.5mm	1 級	海砂	前原	熊谷
絶対比重	2.53 ± 2.5	単位容積重量	1561 kg/m ³	洗い試験	0.92 ± 2.0%
表乾比重	2.573 ± 2.5	実積率	61.7%	有機不純物試験	標準色より濃い
吸水率	1.523%	粗粒率	2.46	粘土塊量の試験	0.2 ± 1.0%
試験日	試料名	混合比(10mm:25mm)	産地	室温, 湿度	試験担当者
S.53.1.21.	25mm	40:60	波多津	9.5℃, 89%	熊谷
絶対比重	2.576 ± 2.5	単位容積重量	1668 kg/m ³	洗い試験	0.466 ± 1.5%
表乾比重	2.80 ± 2.5	実積率	60.5 ± 57%	粘土塊量の試験	0.0993 ± 0.25%
吸水率	1.595 ± 2.0%	粗粒率	6.99	—	—
試験日	試料名	混合比(15mm:25mm:40mm)	産地	室温, 湿度	試験担当者
S.53.1.21.	40mm	30:30:40	波多津	9.5℃, 89%	熊谷
絶対比重	2.753 ± 2.5	単位容積重量	1682 kg/m ³	洗い試験	0.453 ± 1.5%
表乾比重	2.799 ± 2.5	実積率	60.5 ± 57%	粘土塊量の試験	0.0997 ± 0.25%
吸水率	1.682 ± 2.0%	粗粒率	7.34	—	—

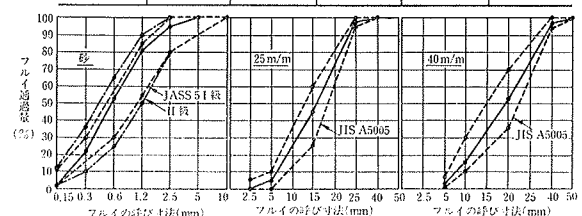
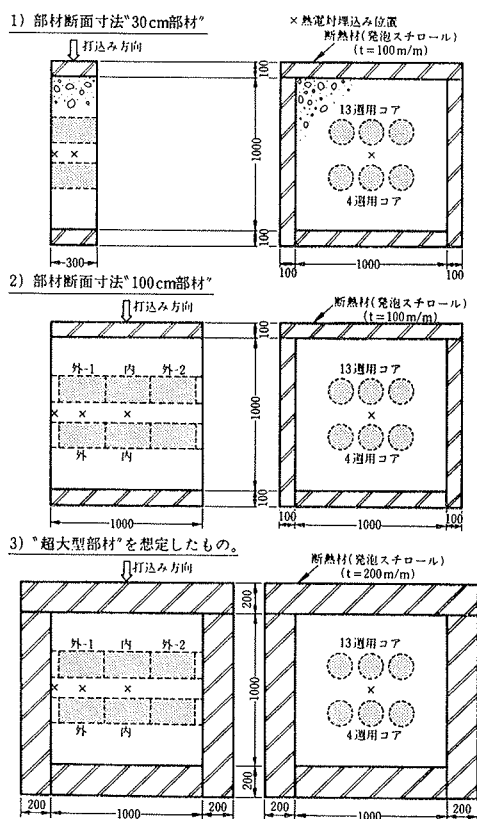


表-1 骨材試験データ



図一2 模型部材

セメント：M社製フライアッシュB種セメント

砂：海砂（塩分0.013%）

砂利：玄武岩砕石

混和剤：凝結遅延型分散剤（P社製）

骨材試験データは、表一の通りである。

2.3. 模型部材の種類

模型部材は、打設後の水和熱の蓄熱（温度履歴）にできるだけ差をつくりだすため断面寸法、断熱方法を変えて、図一2に示す3種類とした。なお、骨材最大寸法40mmのコンクリートは、図中2）、3）の部材のみを製作した。各部材での温度測定およびコア抜き取り位置は、図に示す通りである。

2.4. コンクリートの打込みと養生

コンクリートは、ポンプによって打込んだ。締め固めは、棒状バイブレーターによって入念に行った。側板の脱型は打込み後5日目に行なった。模型部材は、仮設小屋の中で養生し、原則として、雨水、直射日光をさけた。その他、散水、シートによるおおい、加温等の特別な養生は行なわなかった。

2.5. コア供試体の強度試験

(1) コア供試体は、一試験につき、各部材・部位で3体づつ用意した。

(2) コア供試体の大きさは、試験結果のばらつきをで

骨材最大寸法 (mm)	温度補正の有無	W/C (%)	S/A (%)	セメント (kg)	水 (ℓ)	砂 (kg)	砕石 (10%) (kg)	砕石 (25%) (kg)	砕石 (40%) (kg)	混和剤 No.8 (g)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積重量 (kg/ℓ)	コンクリート温度 (℃)
25	アリ	52	44.1	313	163	795	440	655	—	782	10.2	4.5	2.365	12.4
25	ナシ	63	45.6	267	168	835	435	650	—	668	9.5	4.4	2.313	12.0
40	アリ	52	39.1	296	154	720	365	365	490	740	10.7	4.2	2.345	11.5
40	ナシ	62	40.5	252	156	760	365	365	485	630	9.9	4.1	2.334	11.0

表一2 コンクリートの調合と練り上がり時の性質

きるだけ少なくし、かつ、強度管理用シリンダーと大きさを合わせるため、15φ×30cmとした。

(3) コア抜き取りは、打込み方向に対し直交するように水平方向に抜き取った。

(4) コア抜き取りは、予定した試験材令の5日前に抜き取り、端面の切断、キャッピングを行なった後、現場気中放置養生をしておいた。

2.6. 強度管理用シリンダーの強度試験

強度管理用シリンダーの強度試験は、模型部材内の温度履歴、乾燥程度を考慮した以下の6種類の養生について、それぞれ行なった。

(1) 標準水中養生：調合強度管理用

(2) 現場水中養生：一般の建築工事で構造体コンクリートの強度推定用とされているもの。

(3) 25℃水中養生：大規模なマスコンクリートを想定したもの。

(4) 材令1週まで標準水中養生して以後現場水中養生：小規模なマスコンクリートを想定したもの。

さらに、部材中のコンクリートの乾燥を考慮して、

(5) 材令1週まで標準水中養生、以後現場気中養生

(6) 材令1週まで現場水中養生、以後現場気中養生

3. 試験結果

3.1. コンクリートの調合と打込み時の性質

2.2.の調合条件にもとづき、従来の実績を考慮し、試し練りを行なって求めた調合および、模型部材打込み時のコンクリートの性質は表一2の通りである。

3.2. 模型部材の温度履歴

図一3、4には、骨材最大寸法25mmの温度補正アリ・ナシの別に、各部材の打込みから材令1週までの温度履歴を示す。表一3には、調合別の各部材・部位の最高温度とその到達時間、および代表的な期間毎の平均部材温度（部材コンクリート温度の履歴を平均したもの）を一覧にして示した。

3.3. 強度試験の結果

表一4には、強度管理用の各種養生シリンダーの強度試験の結果を示す。表一5には、模型部材から抜き取ったコア供試体による強度試験の結果を示す。図一5には各調合毎に養生別シリンダーの強度と部材コア強度を比

較して示して示した。

4. 結果の検討

今回の試験により次のことが明らかになった。

(1) 模型部材の温度履歴については次のことがいえる。部材寸法が大きいほど最高温度は高く、打設後の平均部材温度も高い。同じ大きさの部材では、単位セメント量が多いほど部材コンクリート温度が高い。断熱温度上昇への単位セメント量の影響は、既報の文献¹⁾通り、セメント 10 kg/m³ につき 1℃程度と理解できる。

(2) マスコンクリートでひびわれ防止上、温度上昇を制御する必要性が強い場合には、最大寸法の大きい骨材を用いると、セメント量を低減することができ、わずかではあるが最高温度を低く抑えることができることがわかった(骨材最大寸法を 25 mm から 40 mm にすると、単位セメント量を 15~17 kg/m³ 低減できる)。

(3) 調合強度(水セメント比)、骨材の最大寸法の別にかかわらず、通常、温度補正量と考えられている材令 4 週における標準水中養生(以後“標水”と記す)と現場水中養生(以後“現水”)の強度差は約 63 kg/cm² あった。実測した 4 週間の平均外気温 6.1℃ と合せて考えると、一般的なコンクリートについて JASS5 で規定している温度補正の標準値はほぼ妥当な値であると考えられる。

(4) 材令 4 週以後外気温は徐々に高くなっているが、材令 13 週でも標水と現水の強度差は約 66 kg/cm² あり、その差はほとんど縮まっていない。今回の結果では、現水の材令 13 週強度は、標水の材令 4 週強度程度であると理解できる。

(5) 30 cm 部材では、打込み後 3 日以内は外気温より高温養生されるが、4 週間の平均部材温度は、ほぼ外気温の平均値と等しい。部材コア強度は、材令 4 週、13 週共に、強度管理用の現水強度をやや上回った。これは、部材中のコンクリートの乾燥状態が影響しているものと思われる。

(6) 100cm 部材では、打込み後 1 週間は外気温より高温養生され、1 週間の平均部材温度で標水の養生温度 20℃ 以上が維持されるが、材令 1 週以後はほぼ外気温の動きに追従し、4 週間の平均部材温度では、外気温より 5~6℃ 高いが、標水の 20℃ までは至っていない。部材コア強度は、初期に水和熱により高温養生された割には強度発現は低く、材令 4 週、13 週共に、30 cm 部材の強度と同程度か、やや低く、現水強度と同程度か、やや上回る程度である。

(7) 超大型部材では、最高温度が 40.8~

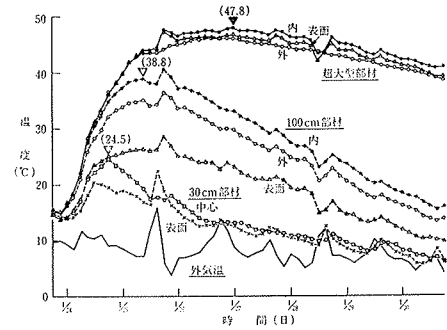


図-3 打込み後一週間の温度変化 (G_{max}=25 m/m, T=60 kg/cm²)

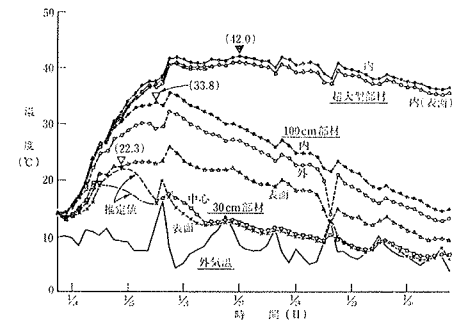


図-4 打込み後一週間の温度変化 (G_{max}=25 m/m, T=0 kg/cm²)

調査の別	部材・部位	最高温度と到達時間		期間別の平均部材温度 (°C)		
		最高温度(°C)	到達時間(H)	打込み~7日目まで	7日目~28日目まで	打込み~28日目まで
G _{max} =25% 温度補正 :アリ	30 cm 部材	24.5	25	13.8	6.3	8.2
	100cm部材・外側	35.0	40	25.6	7.9	12.3
	"・内側	38.8	40	28.4	8.4	13.4
	超大型部材・外側	46.0	79	40.3	20.9	25.8
"・内側	47.8	79	41.6	22.5	27.3	
G _{max} =25% 温度補正 :ナシ	30 cm 部材	22.3	27	13.1	6.3	8.0
	100cm部材・外側	30.0	39	22.8	7.8	11.6
	"・内側	33.8	42	25.4	8.4	12.7
	超大型部材・外側	41.2	78	35.7	20.5	24.3
"・内側	42.0	78	36.5	21.0	24.9	
G _{max} =40% 温度補正 :アリ	100cm部材・外側	30.2	35	22.8	7.5	11.3
	"・内側	34.4	38	25.8	8.0	12.4
	超大型部材・外側	44.5	77	37.8	18.5	23.3
	"・内側	44.6	77	38.0	18.8	23.6
G _{max} =40% 温度補正 :ナシ	100cm部材・外側	26.0	40.5	19.2	6.4	9.6
	"・内側	30.2	37.5	23.0	7.8	11.6
	超大型部材・外側	41.2	76.5	35.5	21.1	24.7
	"・内側	40.8	76.5	35.1	20.8	24.4
外 気 温				8.5	5.3	6.1

表-3 各部材・部位の最高温度と期間別の平均養生温度

調査の別	試験材令	G _{max} =25% T=60kg/cm ²			G _{max} =25% T=0 kg/cm ²			G _{max} =40% T=60kg/cm ²			G _{max} =40% T=0 kg/cm ²		
		1週	4週	13週	1週	4週	13週	1週	4週	13週	1週	4週	13週
	標準水中(標水)	227	335	393	157	252	333	210	332	405	164	241	323
	現場水中(現水)	177	268	329	119	189	266	165	262	337	117	190	259
	25℃水中	237	367	456	169	289	360	231	360	402	177	295	352
	標水後現水	(227)	288	355	(157)	205	287	(210)	269	350	(164)	208	282
	標水後現気	(227)	321	366	(157)	227	258	(210)	301	352	(164)	218	268
	現水後現気	(177)	293	346	(119)	208	240	(165)	268	313	(117)	188	234

表-4 各種養生シリンダーの強度試験結果 (kg/cm²)

調査の別	試験材令	G _{max} =25% T=60kg/cm ²		G _{max} =25% T=0 kg/cm ²		G _{max} =40% T=60kg/cm ²		G _{max} =40% T=0 kg/cm ²	
		4週	13週	4週	13週	4週	13週	4週	13週
	30 cm 部材	297	368	203	288	—	—	—	—
100cm 部材	外側	289	356	215	281	261	351	215	282
	内側	261	342	210	252	258	308	202	238
	平均	275	351	212	271	260	332	209	268
超大型 部材	外側	379	385	256	300	337	377	288	321
	内側	321	370	253	295	336	360	281	283
	平均	350	378	255	298	336	373	285	310

表-5 各部材・部位のコア強度試験結果 (kg/cm²)

47.8℃で、打込み後1週間の平均部材温度で35.1~41.6℃、打込み後4週間の平均部材温度で23.6~27.3℃と、冬期にもかかわらず、かなり高温養生され、4週間の平均部材温度でさえ、標水の20℃を上回っている。部材コア強度は、平均部材温度から、かなり高くなるものと推定していたが、4週間の平均養生温度がほぼ等しい25℃水中養生したシリンダー強度よりは全般に低く、材令4週で標水強度をわずかに上回る程度で、材令13週では、標水強度さえも下回っている。これは、打込み後最初の1週間に40℃程度の高温で養生されたため、初期強度が過ぎて長期的な強度の伸びが悪くなっているものと考えられる。

(8) 100cm 部材、超大型部材の内側・外側の部位による強度は、当初、内側が外側より高温養生されるため、内側が高くなるものと予想していた。ところが、今回の試験では、材令4週、13週共に程度の差こそあれ、すべての調査で外側の強度が内側より高い結果になった。この原因については明らかにすることはできなかった。

5. まとめ

以上の検討をもとに、冬期のコンクリート強度管理については次のようなことが言えるのではなかろうか。

(1) 材令4週で構造体コンクリートの強度が設計基準強度以上を確保するように強度管理をしようとするれば、超大型部材を除いて、部材断面最小寸法が1~2m程度のマスコンクリートでは、調査計画、JASS 5の標準

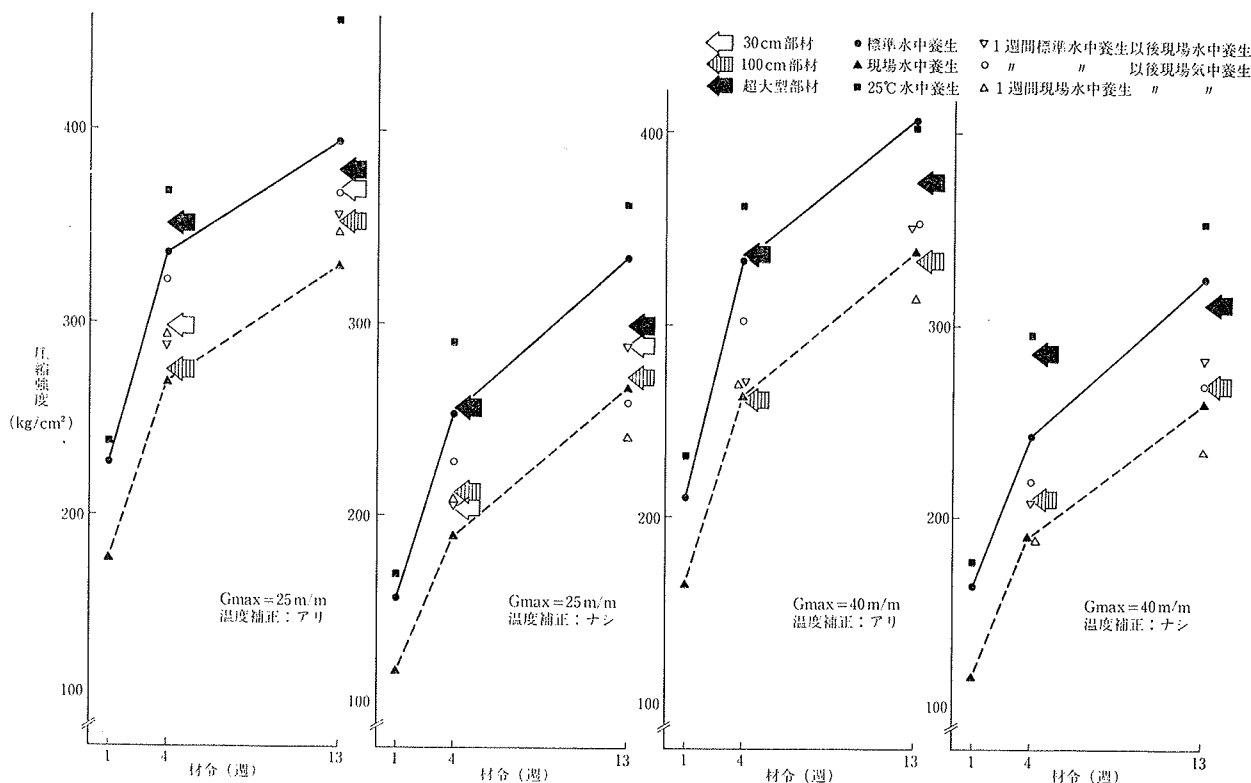
値なみの温度補正が必要となるであろう。なお、部材強度推定用シリンダーの養生方法としては、小規模なマスコンクリートでは打設後の水和熱の影響を考慮して、1週間標準水中養生にして以後現場水中養生するか、さらに、安全側に評価するなら、一般コンクリートと同様に脱型直後から現場水中養生を行なうのがよいであろう。超大型部材では、温度履歴は全く異なるが、標準水中養生したシリンダー強度から推定してよいであろう。

(2) 材令13週で構造体コンクリートの強度が設計基準強度以上を確保するように強度管理をしようとするれば、超大型マスコンクリート、小規模マスコンクリート、一般コンクリートの別にかかわらず、材令13週の部材強度は標準水中養生したシリンダーの材令4週強度(材令13週強度ではない)以上が確保されていると考えた方がよい。そうすれば、めんどろな温度補正の概念も、現場水中養生供試体の強度試験も必要なくなるであろう。しかも、実際の運用面では、打込み後13週間待たなくても、4週間経過した時点で可否の判定ができることになる。

ただし、強度管理の材令を4週から13週に延長するには、コンクリート品質管理の担当者ばかりでなく、構造設計、施工、施主、監督官庁それぞれの関係者相互の十分なコンセンサスを得る必要がある。

参考文献

- 1) 塚山, 他: 各種セメントを用いたコンクリートの温度上昇, セメント技術年報, XXV, (昭和46)



図—5 各種養生シリンダー強度と部材コア強度の比較