

論文

[1033] 長期加熱を受けた大型コンクリート部材の強度性状に関する研究

正会員 ○ 桜本 文敏 (鹿島建設技術研究所)

正会員 山崎 敏敏 (鹿島建設技術研究所)

正会員 丸田 誠 (鹿島建設技術研究所)

1. はじめに

高温を受けるコンクリートの強度低下性状については、いわゆるテストピースレベル (10φ×20cm程度) では数多くの実験データがあるが、原子力発電所のようなマッシブなコンクリート部材での実験結果は非常に少ない。原子力発電所の厚壁は片側から加熱されるが、その反対側は自然冷却されるため、温度勾配を生じる。また、高温側には鋼製のライナーがあるため水分蒸発は許されない。本実験はその様な部位を対象として実施するもので、厚さ1.5mのコンクリート試験体に所定の温度履歴を与えた後、コア供試体を抜取り、壁厚方向の強度分布性状を把握するものである。なお、筆者らは実験結果の一部を既に文献 1), 2) において報告しているが、本報はそれらに新たな実験データを加え、総合的な考察を行ったものである。

2. 実験概要

(1) 試験体

試験体の形状、及びコアの抜取り位置を図-1に示す。試験体は80cm×80cm×150cmの角柱であり、上面以外からの水分蒸発を防止するために、上面を除く5周を厚さ1.6mmの鋼板で覆い、コンクリートと鋼板の隙間にエポキシ樹脂を充填した。また試験体は横打ちとし、打設高さによる強度差が温度勾配方向に生じないようにした。

(2) 実験条件

実験条件をまとめて表-1に示す。実験は2回に分けて行い、それぞれシリーズI、IIと称する。加熱温度は、70℃・100℃・175℃の3水準、加熱期間は、3ヶ月・12ヶ月・24ヶ月の3水準である。また、大型試験体との比較のため、10φ×20cm円柱供試体も加熱試験を行った。加熱温度は、45℃、70℃、100℃、175℃であり、水分蒸発を

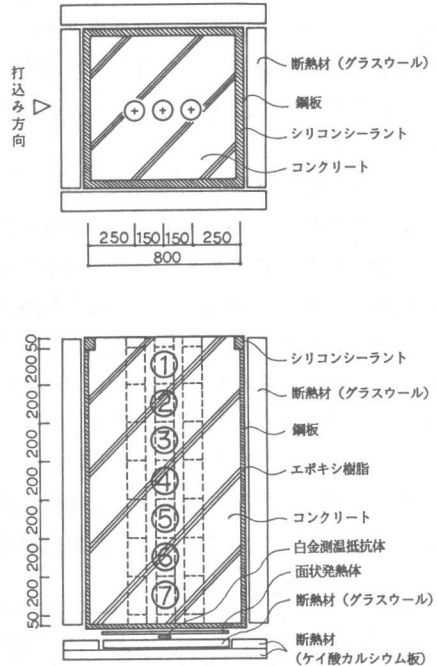


図-1 試験体及び加熱方法

表-1 実験条件一覧

試験体	加熱期間		加熱前	3ヶ月	12ヶ月	24ヶ月
	加熱温度					
大型試験体	非加熱 * 2			○	△	
	70℃			○	○	△
	100℃			○	○	△
	175℃			△	△	
円柱供試体	* 1 非加熱		○ △	○ △	○ △	△
	45℃			○	○	
	70℃			○	○	
	100℃			○ △	○ △	
	175℃			△	△	

○：シリーズI、△：シリーズII
 * 1) シール、アンシールの両条件で試験
 * 2) 同一試験体より各材令でコアを採取

許す場合（アンシール）と、許さない場合（シール）の両方について行った。

(3) 使用材料及び調査

使用したコンクリートは1種類であり、石灰岩碎石を粗骨材として用いた。コンクリートが高温を受けたときの性状は使用する骨材の影響を大きく受けるが、その中でも石灰岩を用いた場合は他の骨材を用いた場合よりも強度低下が大きいといわれている³⁾。本実験では、より厳しい条件での実験とするため石灰岩を使用した。

コンクリートの調査を表-2に、その試験結果を表-3に示す。

(4) 加熱及び試験方法

加熱方法を図-1に示す。試験体底面に設置した面状発熱体で加熱し、その下面及び4側面は断熱材で覆っているが、上面は自然冷却とした。面状発熱体の温度上昇速度はコンクリートにひびわれが入らないように15℃/日とした。なお、加熱はシリーズIでは材令108日から、シリーズIIでは221日から開始した。

コアの抜取りは加熱終了後、試験体温度が室温に戻ってから行った。なお、非加熱試験体で

表-2 調査表

W/C (%)	S/A (%)	単 位 量 (上段: kg/m ³ , 下段: l/m ³)				
		水	*1 セメント	*2 細骨材	*3 粗骨材	*4 減水剤
55.0	44.7	165	300	814	1045	0.750
			95	313	387	—

*1 普通ポルトランドセメント *2 上ノ原・佐原産 山砂
*3 秩父産碎石 (石灰岩) *4 ポソリス No. 70

表-3 コンクリートの試験結果

実 験 シリーズ	フレッシュコンクリート			硬化コンクリート *1	
	スランブ (cm)	空気量 (%)	温 度 (℃)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)
I	11.0	4.7	16.7	305	2.75
II	13.0	5.0	—	338	2.78

*1) 28日標準水中養生による

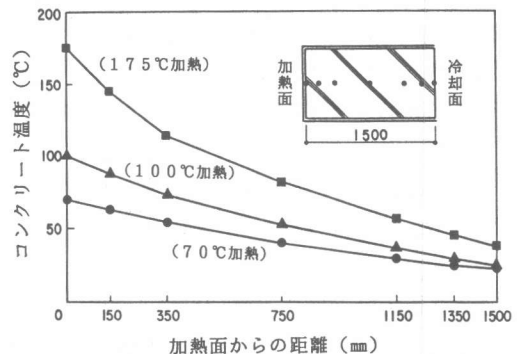


図-2 試験体の温度分布

表-4 試験結果一覧

シリーズ	シ リ ー ズ I								シ リ ー ズ II										
	非 加 熱				45℃		70℃		100℃		非 加 熱				70℃		100℃		175℃
加熱期間	0ヶ月	3ヶ月	12ヶ月	3ヶ月	12ヶ月	3ヶ月	12ヶ月	3ヶ月	12ヶ月	0ヶ月	3ヶ月	12ヶ月	24ヶ月	24ヶ月	3ヶ月	12ヶ月	3ヶ月	12ヶ月	
大型試験体	*1	3.49	4.02	4.02	/	/	4.22	3.88	4.20	3.94	4.51	4.78	4.82	5.17	5.08	5.08	4.35	4.20	
		2.38	2.39	2.69	/	/	2.64	2.72	2.67	2.81	2.73	2.75	2.75	2.92	2.87	2.76	2.78	2.87	
2		3.36	3.73	3.87	/	/	3.93	3.42	3.92	3.19	4.22	4.53	4.37	4.50	4.58	4.18	3.18	3.76	
		2.48	2.58	2.86	/	/	2.67	2.68	2.79	2.56	2.81	2.85	2.79	2.85	2.86	2.97	2.65	2.60	
3		3.23	3.66	3.65	/	/	3.82	3.42	3.80	2.98	3.92	4.31	4.31	4.32	4.43	4.12	2.96	4.12	
		2.43	2.55	2.61	/	/	2.62	2.79	2.76	2.38	2.78	2.90	2.67	3.00	2.99	2.77	2.37	3.06	
4		3.20	3.67	3.65	/	/	3.83	3.16	3.35	2.90	3.73	4.32	4.12	4.38	4.15	4.32	3.24	4.19	
		2.49	2.55	2.77	/	/	2.70	2.62	2.60	2.48	2.86	2.85	2.81	2.96	2.87	2.99	2.46	2.90	
5		3.24	3.57	3.75	/	/	3.75	3.23	2.92	2.99	4.05	4.34	4.02	4.53	4.02	4.33	3.29	4.13	
		2.33	2.53	2.76	/	/	2.65	2.66	2.66	2.60	2.73	2.86	2.75	3.02	2.83	2.77	2.24	2.73	
6		3.33	3.77	3.78	/	/	3.65	3.24	2.71	3.50	4.10	4.52	4.49	4.81	3.81	4.36	2.35	2.13	
		2.43	2.52	2.69	/	/	2.60	2.39	2.41	2.66	2.84	2.73	2.70	2.93	2.69	2.61	1.79	1.37	
7		3.70	4.12	4.33	/	/	3.32	2.82	3.04	2.25	4.32	4.64	4.76	4.93	3.03	2.75	2.27	2.34	
		2.31	2.35	2.68	/	/	2.36	2.27	2.38	2.17	2.62	2.57	2.62	2.84	2.09	1.64	1.26	1.27	
平均		3.36	3.79	3.86	/	/	3.79	3.31	3.42	3.13	4.12	4.49	4.41	4.66	4.17	4.16	3.09	3.55	
		2.41	2.50	2.72	/	/	2.61	2.59	2.59	2.52	2.77	2.78	2.73	2.93	2.74	2.64	2.22	2.40	
円柱供試体	シール	3.44	3.81	4.21	4.06	4.11	3.14	*2	2.75	*2	4.84	5.13	4.99	5.43	/	/	2.77	2.70	
	アンシール	2.65	2.68	2.92	2.74	3.01	2.52	/	2.59	/	3.13	3.19	3.24	3.39	/	/	1.75	1.93	
アンシール		/	/	/	3.43	3.45	3.30	2.94	3.06	3.05	/	/	/	/	/	/	3.07	3.00	
		/	/	/	2.12	2.16	1.97	1.68	1.87	1.54	/	/	/	/	/	/	1.37	1.37	

*1) 図-1中のコア供試体番号に相当 (1: 冷却側, 7: 加熱側), *2) シール不良にて欠測値

は1体の試験体から各材令ごとにコアを採取したが、加熱試験体では、1材令1試験体である。

3. 実験結果及び考察

(1) 温度分布

図-2に試験体の温度分布を示す。試験体を設置した場所の室温は年間で13℃から23℃の間を推移しており、それに伴い試験体冷却面の温度も変化しているが(加熱側温度は一定)、ここではその平均値を示している。いずれの加熱でもほぼ直線的な分布を示しており、加熱側と冷却側の温度差は、70℃加熱で約45℃、100℃加熱で約75℃、175℃加熱で約135℃となっている。

(2) 圧縮強度及び弾性係数の試験体内分布

表-4に強度試験結果を一覧にして示す。それぞれ3本の供試体の平均値で示してある。

図-3に温度勾配方向の圧縮強度分布を各加熱温度ごとに示す。縦軸は、加熱後の強度をそれと同位置の加熱前の強度で除した強度残存率で表してある。これによると、70℃加熱において、加熱前の強度を下回っているのは加熱側約1/4の部分だけであり、ほとんどの部分で加熱前の強度を上回っているのがわかる。100℃加熱でも、ほぼ70℃加熱の場合と同様の傾向を示している。

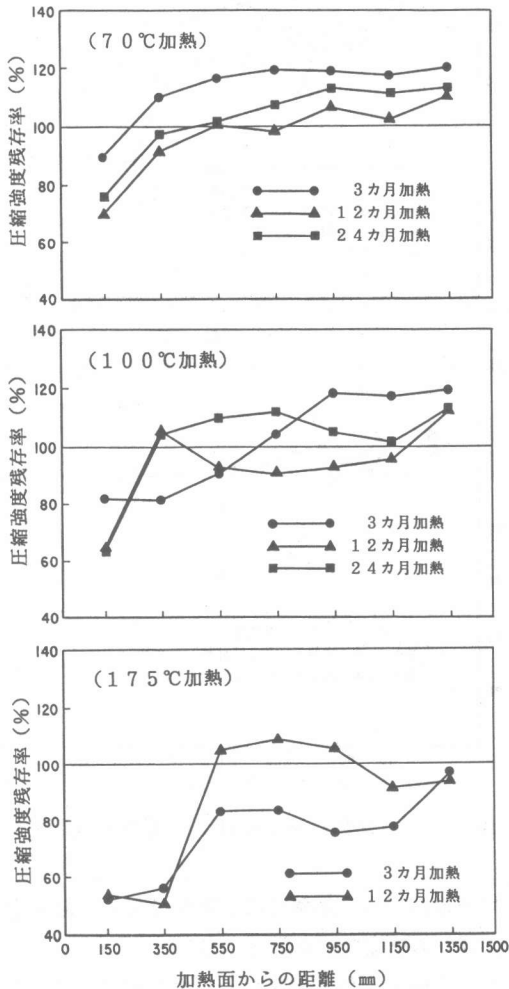


図-3 試験体の圧縮強度残存率分布

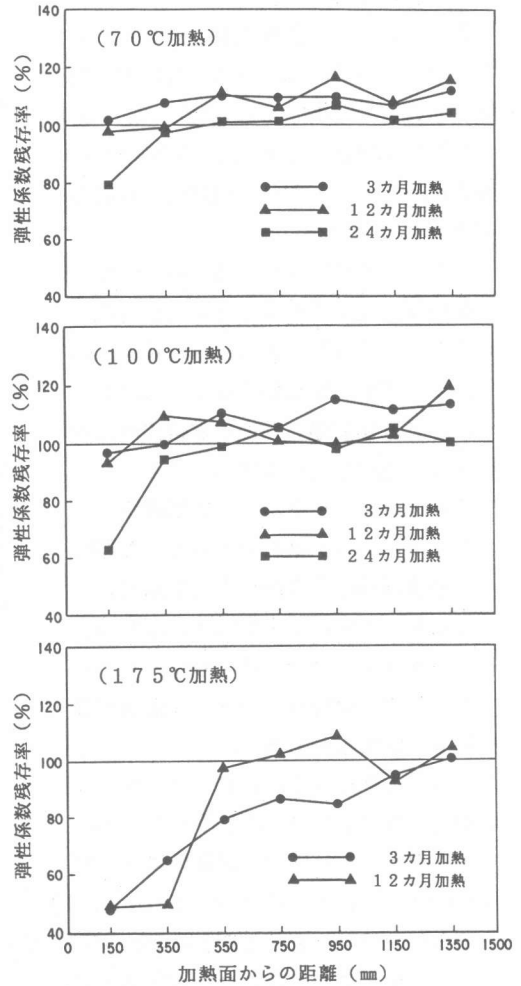


図-4 試験体の弾性係数残存率分布

しかし、175℃加熱ではほぼ試験体全域に渡って強度低下が認められ、100℃以下の場合とは大きく異なっている。特に加熱側1/4部分の低下が著しく、加熱前の約50%まで強度低下している。

加熱期間との関係に注目してみると、期間が長くなるにつれて徐々に強度が低下していくという傾向は必ずしもなく、試験体中央部付近では逆に上昇する部分もある。これは、試験体がマッシブなため、加熱によるコンクリートからの水分逸散が急激ではなく、試験体内に水分が多く残っているため、水和反応が進行したためと考えられる。

図-4は同じく弾性係数の試験体内分布を示している。70℃加熱・100℃加熱では、ほとんど低下はみられない。一方、175℃加熱では、圧縮強度と同様、かなりの低下を示しており、加熱側では50%以下となっている。

加熱による弾性係数の低下は、一般に圧縮強度のそれよりも大きいといわれているが³⁾、当大型試験体では、100℃以下においてその様な傾向は認められなかった。これは前述した様に試験体内に水分が多く残存しているためと考えられる。

(3) コンクリート温度と各残存率

図-5に、コア供試体が履歴した温度と圧縮強度残存率の関係を加熱期間ごとにまとめて示す。コア供試体の温度は、そのコアが受けた最も高い温度とした。また、図中には10φ×20cm円柱供試体の結果も点線で示してある。

3カ月加熱をみると、コンクリート温度が50℃程度までは強度低下しないが、それを超るといずれの試験体においても強度低下を起し始める事がわかる。70~100℃の範囲では、加熱前の約80%の値ではほぼ一定であるが、100℃を超えると強度はさらに低下し、50%程度までになっている。

12カ月加熱では、全体的に強度が低下しているが、60~70℃から強度が上昇する傾向が認められ、履歴温度と強度との関係は必ずしも直線的では無い事がわかる。しかし、100℃を超えると

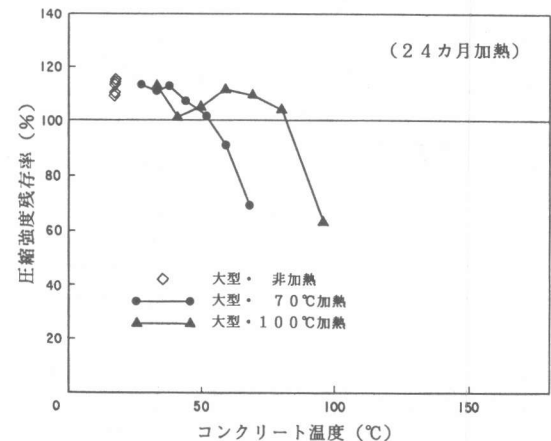
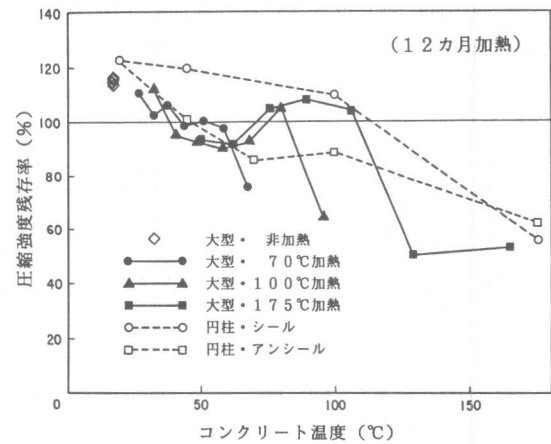
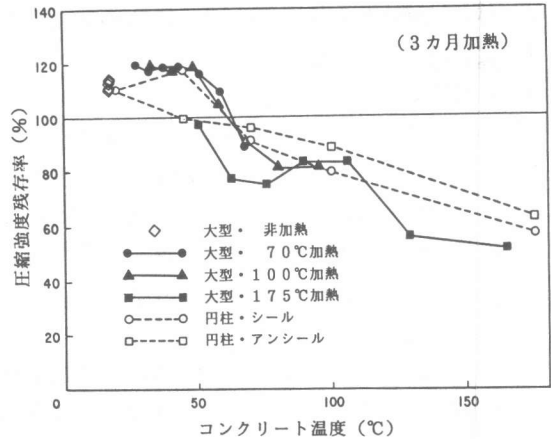


図-5 コンクリート温度と圧縮強度残存率

大きく強度が低下するのは3カ月加熱の場合と同様である。

24カ月加熱においても、50℃を超えるると強度低下が始まっている事がわかる。

図-6に同じくコンクリート温度と弾性係数残存率の関係を示す。3カ月加熱の場合、弾性係数の低下は温度とほぼ直線的な関係にあり、70~80℃を超えると加熱前の値を下回るようになる。

円柱供試体と比較してみると、100℃以下では、シール条件での加熱が良い対応を示しているが、100℃を超えると、逆にアンシールの方がよく対応している。この傾向は12カ月加熱の場合で顕著に現れている。

100℃以下において、大型試験体の結果がシール条件での結果とよく一致することは、その様な温度を受ける部位では試験体内に水分が多く残っている事のひとつの証左といえよう。

一方、100℃を超えると、コンクリートは急激に水分蒸発する事が知られており⁴⁾、その様な温度を長期間受けると、この様に非常にマッシブな部材でも、水分逸散を起こし、強度や弾性係数が大きく低下していくものと考えられる。

(4) 各残存率の経時変化

図-7に大型試験体の圧縮強度残存率の経時変化を示す。図には、試験体全体の平均的強度としてコア強度を単純平均した値と、試験体の最弱部を表すコア強度の最小値の2通りの値を示した。なお、この最小値は、ほとんどの場合、最も高温を受けた部分の強度である。

この様な部材が、温度勾配方向と直角方向に面内せん断力や軸圧縮力を受ける

ような場合は、全断面で力を受け持つものと考えられ、その様な力を受ける場合には、ここで示した平均的な強度や弾性係数が部材の強度性状を表現するひとつの指標となるものと考えられる。また、当試験体は厚さ1.5mという限られた条件での結果であるが、部材厚さが大きくなるほど水分逸散率は小さくなり、平均的な強度低下も小さくなると考えられる。したがって、ここで示

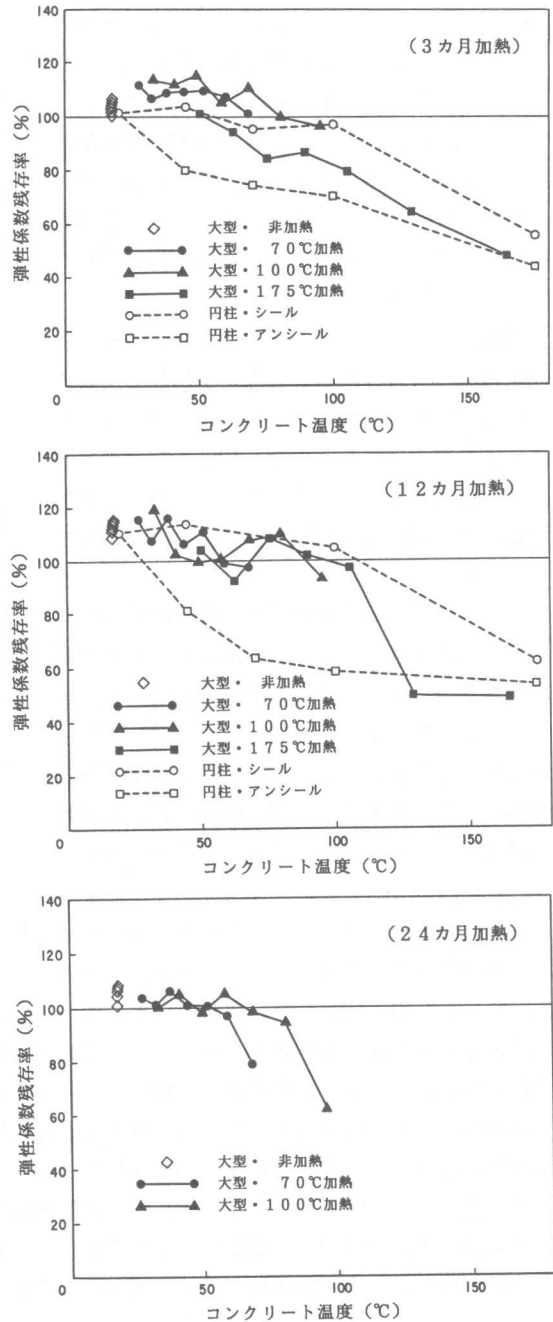


図-6 コンクリート温度と弾性係数残存率

た値は、1.5m以上の厚さを有する部材の強度低下性状の下限値を表すものと考えられる。

これによると、大型試験体の平均的強度としては、70℃加熱・100℃加熱のいずれの場合も24カ月までの加熱ではほとんど低下しない事がわかる。175℃加熱では、加熱3カ月から強度低下を生じているが、12カ月では強度がやや上昇し、15～25%の低下に留まっている。

試験体の最弱部を表す最小強度は、いずれの加熱温度でも3カ月目から低下を起こしている。しかし、175℃加熱では3カ月から12カ月までに大きな変化はなく、また、100℃加熱では12カ月から24カ月までの変化がないなど、いずれにおいても24カ月の加熱で、ほぼ定常状態になっていると考えられる。

図-8に、同じく弾性係数残存率の経時変化を示す。圧縮強度と同様、平均値は70℃及び100℃加熱では24カ月までほとんど低下せず、また、175℃加熱では15～20%低下しているにすぎない。最小値をみると、ほぼ圧縮強度と同様の傾向がうかがえるが、70℃加熱・100℃加熱では24カ月までに一定値に収束してはいない。

4. まとめ

厚さ1.5mの大型コンクリート部材を片側から加熱し、その時の圧縮強度及び弾性係数の低下性状を把握する実験を行った。その結果、以下の事が明らかとなった。

- ①70℃・100℃・175℃のいずれの加熱においても、コンクリートが履歴した温度が50～60℃を超えると強度低下が始まる。また、100℃を超えるとさらに大きな低下を生じる。
- ②円柱供試体の結果と比較すると、100℃までは水分蒸発を許さないシール条件での結果が大型試験体とよく対応するが、100℃を超えると逆にアンシール条件の方が対応が良くなる。
- ③大型試験体の平均的な強度及び弾性係数は、70℃及び100℃加熱では加熱期間24カ月までに大きな低下は認められない。しかし、175℃加熱の場合は12カ月加熱で80%程度まで低下する。
- ④大型試験体の最弱部は、概ね最も高温を受けた部分であり、その低下は残存率で表すと、圧縮強度が50～70%、弾性係数が50～80%とかなり大きな値となる。

<参考文献>

- 1) 桜本文敏：片面から加熱を受ける大型コンクリート部材の強度性状に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、1988、pp.581～582
- 2) 丸田 誠、山崎敏敏：長期間高温加熱を受けたコンクリート部材の強度性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集 11-1、1989、pp.523～528
- 3) 高 英男、大野定俊：高温下のコンクリート物性、コンクリート工学 Vol.22, No.3, March 1984、pp.13～20
- 4) Browne, R. D., P. B. Bamforth: The Long Term Creep of Wylfa P. V. Concrete for Loading Ages up to 12 1/2 Years、3rd Int. Conf. SMIRT、Vol. H、1975

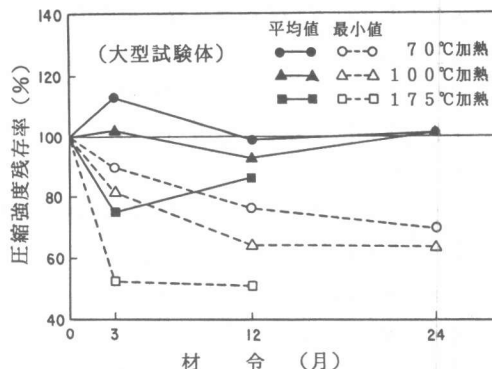


図-7 圧縮強度残存率の経時変化

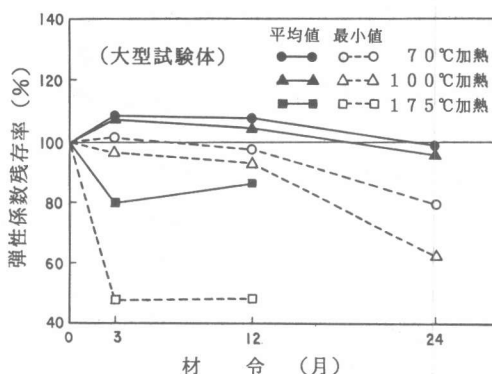


図-8 弾性係数残存率の経時変化