

高温 (175°C) を受けたコンクリートの強度性状

川口 徹 高橋 久雄

Physical Properties of Concrete Subjected to Elevated Temperature of 175°C

Tohru Kawaguchi Hisao Takahashi

Abstract

This report describes the results of experiments which investigate the influences of elevated temperature of 175°C on the physical properties of concrete, varying with types of coarse aggregates, moisture contents of concrete before and during heating, and lengths of heating periods. The test results are summarized as follows: (1) the influences of elevated temperature on physical properties of concrete greatly depend on exposure conditions of concrete during heating, (2) in an unsealed condition where moisture is allowed to escape from concrete during heating, the modulus of elasticity is lowered by 30~40% compared with that before heating, and (3) the changes in physical properties of concrete using hard sandstone due to elevated temperature are less than those using other aggregates.

概 要

本報告は、175°Cの高温を受けたコンクリートの強度特性が、粗骨材の種類、加熱前および加熱中のコンクリート含有水分量、さらには、加熱期間の長さによってどのように変化するかを調査するために行なった実験の結果について述べるものである。

試験の結果次のことが明らかになった。(1) コンクリートの物性への高温の影響は、加熱中のコンクリートの暴露条件によってかなり変化する。(2) 加熱中アンシール条件では、弾性係数は加熱前に比べ30~40%低下する。(3) 今回使用した粗骨材のうちでは、硬質砂岩コンクリートの高温による物性変化が比較的少なかった。

1. はじめに

原子力発電所施設の現行の設計上のコンクリート温度制限値は、一般部で通常運転時65°C、事故時175°Cとなっている^{1),2)}。しかし、実際の構造物に用いられるコンクリートの物性が65°C以上から175°Cまでの温度を受けた場合に、どのように変化するかといった資料は多いとは言えない^{1),3),4)}。

本報告は、事故時の許容最高温度である175°Cの高温を受けたコンクリートの基本的な強度特性が粗骨材の種類、加熱前および加熱中のコンクリート含有水分量、さらには、経過時間の長さによってどのように変化するかを基礎的な実験で調査・検討したものである。

これにより高温によるコンクリートの物性変化をあらかじめ考慮したコンクリート構造物の合理的な熱応力設計を行なうための資料とするものである。

2. 試験の概要

2.1. 試験条件

今回の試験の試験条件を一覧にして表-1に示す。検討項目は、コンクリート強度特性の代表的なものとして圧縮強度と弾性係数の二つである。

供試体は、10φ×20cmシリンダーを使用した。

この試験の主なパラメータは、粗骨材の種類、加熱前・加熱中の養生条件、加熱期間の長さである。

2.2. 粗骨材の種類、コンクリートの調査

粗骨材は次のように選定した。原発工事で従来から比較的使用実績の多いものとして、硬質砂岩、安山岩、玄武岩を選んだ。川砂利、石灰岩は、前3者に対する比較用とした。石灰岩は、欧米の原発工事では使用実績が多いが、日本では耐熱コンクリートとして適さないとされているため、その程度を調査するために今回の試験の中

試験要因	水準	項目
水セメント比	1	55%
スランプ	1	12cm
セメント	1	中庸熱セメント
細骨材	5	川砂利 (富士川産)、硬質砂岩、安山岩、玄武岩、石灰岩
粗骨材	1	富士川産川砂
加熱前養生	2	連続水中養生、4週後気中養生
加熱中養生	2	アンシール、シール
加熱開始材令	1	91日
加熱温度	1	175°C
加熱速度	1	6°C/hr
加熱期間	5	1、3、7、28、91日
試験時温度	1	常温
試験項目	2	圧縮強度、弾性係数

表-1 試験条件

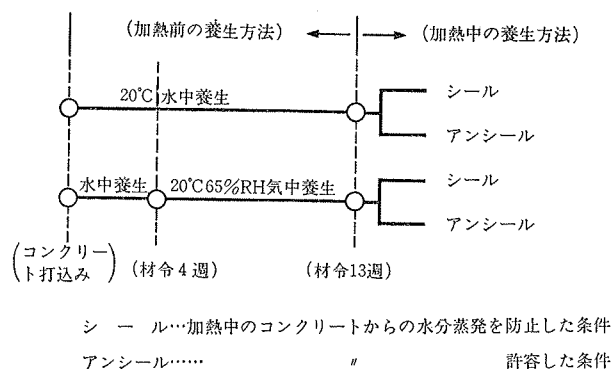


図-1 加熱前後の供試体の養生方法

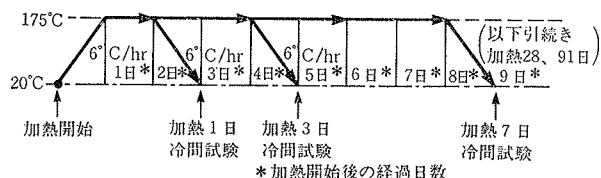


図-2 加熱プログラムと試験の時期

粗骨材の別	コンクリートの調合 (m ³)							まだ固まらないコンクリートの性質				材令 4 週時	
	W/C (%)	S/a (%)	水 (ℓ)	セメント (kg)	細骨材 (kg)	粗骨材 (kg)	混和剤 (g)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単重 (kg/m ³)	コンクリート温度 (°C)	圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (×10 ⁴ kg/cm ²)
川砂利	55	40.5	153	278	761	1146	695	12.5	3.9	2319	19	323	3.19
硬質砂岩	55	43.5	165	300	797	1055	750	12	4.1	2288	16	363	3.19
安山岩	55	43	160	291	797	1153	728	12	4.2	2369	16	353	3.24
玄武岩	55	43	165	300	787	1110	750	12	3.5	2357	17	324	2.92
石灰岩	55	42	153	278	789	1142	695	13.5	3.5	2342	19	408	3.91

表-2 コンクリートの調合表

にもりこんだものである。

コンクリートの調合条件は、ごく一般的な原発工事で使われている条件を参考にして設定した。コンクリートの調合、まだ固まらないコンクリートの性質、および材令 4 週時の強度試験の結果をまとめて、表-2 に示す。

2.3. 加熱前・加熱中の養生条件

加熱前・加熱中のコンクリートの養生条件については、次のような考え方から試験条件の設定を行なった。実際の構造体で高温を受けると想定されるコンクリート中の水分条件は、部材の大きさ・部位の違いによって大きく

変わっていると考えられる。又、特に加熱中のコンクリートの含有水分量の違いがコンクリートの耐熱性に大きく寄与することが従来からも指摘されている。しかし、現状でその水分量を定量的に決めることは困難である。そこで、この試験では、加熱前・加熱中のコンクリート水分量の両極端をそれぞれ設定した。つまり、加熱前の養生条件としては、コンクリート中の水分量の最も多い条件として加熱直前まで水中養生したもの、最も少ない条件として、材令 4 週まで水中養生し以後加熱直前まで気中養生 (20°C・RH 65%) して、あらかじめコンクリート中の水分を取り除いた条件を設定した。加熱中の養生条件としては、加熱に伴ってコンクリート中の水分が自由に散逸される条件としてアンシールと 100°C 以上の高温を受けてもコンクリート中からの水分の散逸を

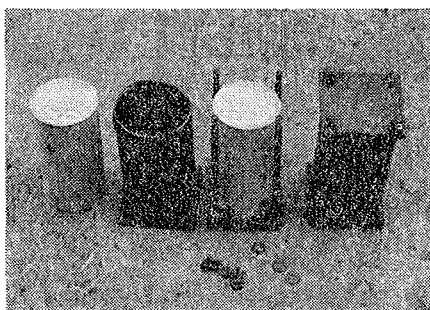


写真-1 シール容器

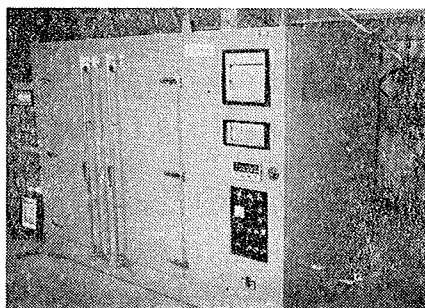


写真-2 加熱炉

内 寸	1,300×1,100×1,000mm 開口 600mm 2 室型
棚 板	3 段 6 枚 引出し式 耐荷重 200kgf/1 枚 ステンパンチング網使用
フ ァ ン	φ230 シロッコファン 400W モーター
ヒ ー タ ー	12kw 手動容量切替スイッチ付
最 高 温 度	300°C
冷 却	水冷コンデンサー式
温 度 設 定	光電式プログラム設定器
温 度 調 節	電子式指示調節計
温 度 記 録	電子式自動平衡形記録計
調 節 方 式	白金抵抗式 3 位置式
過 界 防 止	ロバートショウ式
安 全 器	ブレーカースイッチ

表-3 加熱炉の仕様

粗骨材の別	川 砂 利				硬 質 砂 岩				安 山 岩				玄 武 岩				石 灰 岩				
	連続水中		4 週後気中		連続水中		4 週後気中		連続水中		4 週後気中		連続水中		4 週後気中		連続水中		4 週後気中		
Fc, Ec の別	Fc	Ec	Fc	Ec	Fc	Ec	Fc	Ec	Fc	Ec	Fc	Ec	Fc	Ec	Fc	Ec	Fc	Ec	Fc	Ec	
基 準 値	437	3.53	465	3.13	491	3.68	469	3.17	472	3.65	481	3.43	410	3.38	417	3.05	480	4.04	492	3.82	
*1 アン シール	1*2	514	2.43	435	2.28	540	2.46	461	2.24	519	2.47	438	2.45	473	2.34	410	2.19	482	2.54	455	2.55
	3	489	2.20	449	2.24	519	2.26	448	2.09	509	2.57	425	2.27	467	2.29	417	2.12	498	2.46	470	2.55
	7	487	2.24	433	2.17	517	2.32	438	2.26	501	2.47	439	2.30	454	2.25	397	2.09	473	2.39	455	2.30
	28	479	2.22	428	2.17	494	2.21	431	2.13	484	2.35	421	2.26	426	2.14	380	1.99	496	2.27	445	2.32
*1 シ ール	91	456	2.16	382	2.02	468	2.16	382	2.18	465	2.39	404	2.38	425	2.15	376	2.02	429	2.35	425	2.29
	1*2	396	3.14	382	3.00	505	3.36	473	3.13	432	3.32	393	3.12	382	2.87	348	2.69	388	2.65	394	2.94
	3	452	3.11	410	2.99	484	3.33	454	3.08	396	2.95	388	2.95	351	2.71	341	2.63	388	2.63	384	2.66
	7	485	2.85	431	3.00	534	3.38	456	3.30	448	3.12	395	3.16	416	2.82	339	2.55	422	2.51	395	2.47
28	536	3.17	543	3.28	539	3.36	545	3.36	520	3.24	515	3.19	436	2.68	473	2.79	547	2.89	571	2.95	
	91	434	2.69	467	2.96	463	3.19	482	3.27	403	2.96	448	3.20	380	2.54	431	2.77	445	2.77	515	3.01

*1: 加熱中養生の別。*2: 加熱期間(日)。Fc: 圧縮強度(kg/cm²)。Ec: 弾性係数(×10⁵kg/cm²)

表-4 強度試験の結果

防いだ条件としてシールを設定した。

以上の結果、加熱前後のコンクリートの養生条件の組合せとしては図-1 になる。

なお、加熱中シール養生は次のように行なった。175℃の高温でコンクリート中の水分を完全に密封するためには、175℃での水の飽和蒸気圧 9.1 kg/cm² に耐えなければならない。そのため、供試体 1 本づつを写真-1 に示す鋼製シール容器に入れ、Oリングを介して密封し、加熱中の水分の散逸を防いだ。シール性能は、加熱前後のシール容器込みの供試体の重量測定を行ない、重量変化がないことから確認した。

2.4. 加熱方法・加熱継続期間

供試体の加熱には、表-3、写真-2 に示す熱風循環式加熱炉を使用した。

加熱温度の継続期間は、比較的短期間の 1 週間以内の物性変化からある程度長い期間として、3 カ月までを範囲として次の 5 段階を設定した。つまり、昇温、降温に要する時間を除いた定常状態が継続する期間を、1, 3, 7, 28, 91 日とした。なお強度試験は、すべて所定の期間高温加熱を行なったコンクリートを常温まで冷却した直後に行なった。加熱プログラムと試験の時期を模式的に図-2 に示した。

3. 試験結果および検討

強度試験の結果を一覧にして表-4 に示す。強度試験時の応力-歪関係の一例を図-3 に示した。なお弾性係数は、圧縮強度の 1/4 の応力時の割線勾配で算定した。

従来の研究報告の中には強度試験する前の加熱中に供試体が崩壊した例も報告されているが^{5),6)}、今回加熱した供試体で加熱期間中に高温の影響によりコンクリート

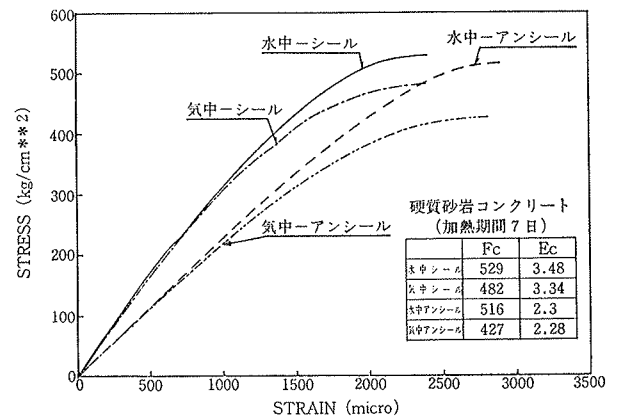


図-3 応力-歪関係の一例

が破損したものは皆無であった。

また、加熱中のコンクリートの水分を密封するために用いたシール容器は、数本の供試体でOリングのセットが不良で水分の漏れが認められたが、それ以外は当初予定したシール性能を充分満足するものであった。

加熱中アンシール条件の供試体の重量変化を脱型時重量を対する変化率で図-4 に示した。

図-5~9 には、粗骨材ごとに、加熱直前における加熱前養生別の試験値を基準とする圧縮強度と弾性係数それぞれの相対変化を示した。各図とも上段が相対圧縮強度、下段が相対弾性係数の加熱期間による変化を示したものである。

3.1. 供試体の重量変化について

図-4 より次のことがわかる。加熱前の養生条件の違いにより、加熱直前の供試体には以下の差がある。水中養生したものが脱型時に比べ 0.82~1.04% 重量が増加するのに対し、気中養生したものは、-1.01~-1.82% 重量減少している。加熱による重量変化は、加熱前後の

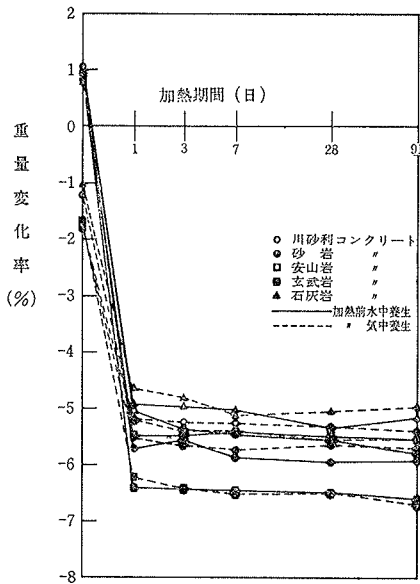


図-4 供試体の重量変化

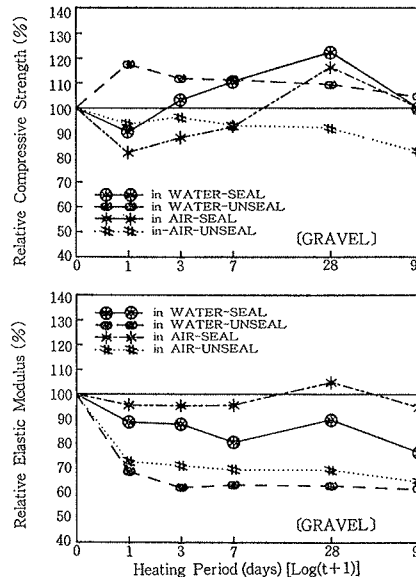


図-5 川砂コンクリートの結果

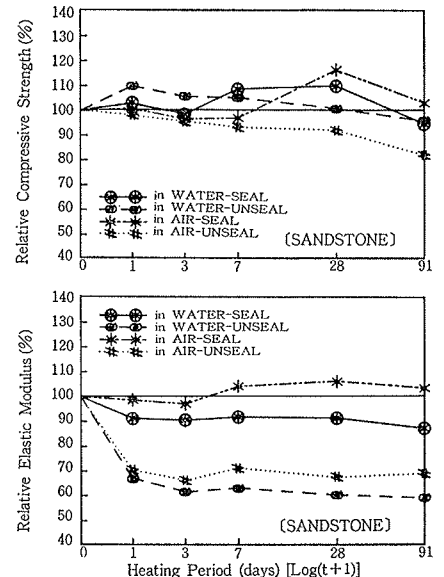


図-6 硬質砂岩コンクリートの結果

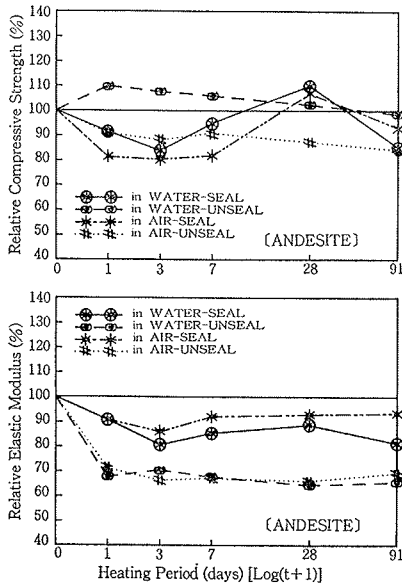


図-7 安山岩コンクリートの結果

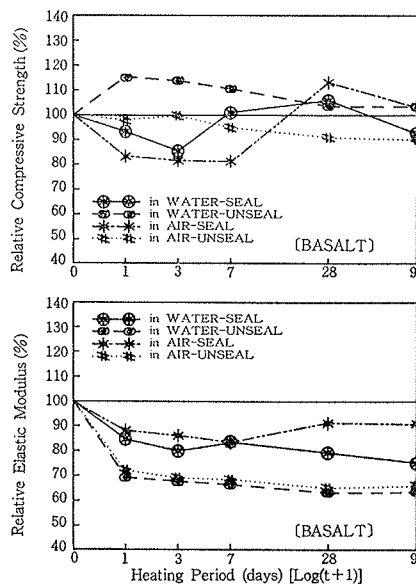


図-8 玄武岩コンクリートの結果

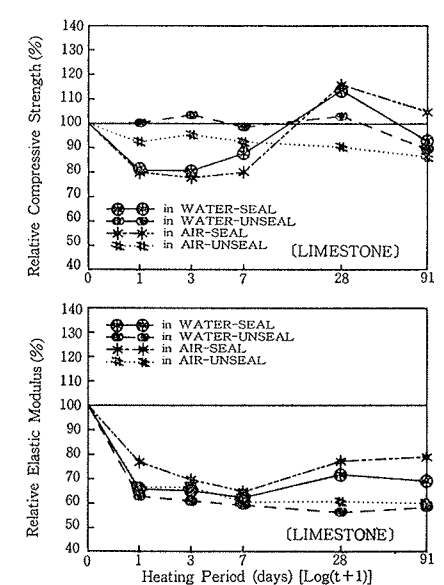


図-9 石灰岩コンクリートの結果

変化率で見ると当然加熱前養生条件の違いによる差が生じるが、脱型時以後からの全重量変化率でみると、その差はほとんどない。175°Cで加熱した場合、加熱期間1日で急激な重量変化を生じ、それ以降加熱を継続しても重量変化の進行はほとんどない。概算すると散逸した水分量は練混ぜ時の全水量（練混ぜ水+骨材中の含水量）のおおよそ70%に相当する。

3.2. 圧縮強度について

図-5~9より加熱中の養生条件のちがいで、強度変化の性状がかなり異なることがわかる。

加熱中アンシールのうち、加熱前連続水中養生したものは、粗骨材の種類によらず、加熱初期で加熱前に比べて強度が増加している。これは、加熱に伴う乾燥が影響していると考えられる。その後は加熱期間が長くなるに

従ってわずがずつではあるが、徐々に強度がさがる傾向が認められる。ただし、加熱期間28日まででは、加熱前強度を下回るものはなかった。一方、加熱前気中養生したものは、加熱初期での前者のような強度の増加現象はみられず、時間経過に伴い一般的な強度低下の進行が認められる。ただし、その低下率は、加熱期間28日まででは、ほとんどが10%以内におさまっている。

加熱中シールしたものは、粗骨材の種類・加熱前養生条件によらず、加熱初期で一旦強度低下を生じ、その後熱水反応の進行に伴って強度が回復し、今回の試験では、加熱期間28日で極大値を示し、その後加熱期間が長くなるにつれて、再び強度が低下している。このような強度変化の極小・極大現象は、熱水反応の温度・時間依存性によるものと考えられる。加熱期間が長くなり過ぎると

コンクリートの強度が低下するといわれている⁷⁾。なお、加熱初期での強度低下の割合は、加熱前養生条件のちがいでよって多少異なり、加熱中のコンクリート水分量の少ないものの方が低下が大きくなっている。ただし、低下率は、20%以内におさまっている。今回の試験では、粗骨材の違いに関わらず加熱期間の経過による強度変化性状には大きな差異はなかった。これは、使用した細骨材がすべて同じであり、熱水反応が特に細骨材微粒分の成分と関係しているためと理解される。今回試験した粗骨材のうちでは、硬質砂岩コンクリートが、他に比べて初期の強度低下が少なかった。

3.3. 弾性係数について

圧縮強度と同様に、弾性係数の場合も加熱中の養生条件の違いによって、その変化の性状がかなり異なることがわかる。しかも、高温による劣化の程度は全般に圧縮強度の場合より大きい。

加熱中アンシールでは、粗骨材・加熱前養生条件によらず、加熱期間1日で弾性係数が急激に低下し、その後加熱期間が長くなっても低下の進行はほとんど認められない。これは、コンクリート中の水分の散逸過程(図4)とよく似かよっている。水分散逸に伴うセメントペーストの収縮による骨材界面の付着劣化が原因しているのではないかと推察される。この場合の低下の割合には、粗骨材の違いによる差はそれほど大きくない。従来石灰岩コンクリートの劣化が大きいと言われていたが、今回の試験では他の骨材のものと顕著な差はなかった。

加熱中シールでは、前者ほど弾性係数の大きな低下はない。水分散逸を生じないためと理解される。低下の割合は、粗骨材によって異なり、骨材中のシリカ含有量と何らかの関係があるものとみられ⁸⁾、シリカ含有量の多い硬質砂岩では低下が小さく、シリカ含有量の少ない石灰岩では、低下が大きくなっている。特に、加熱中シール条件での石灰岩コンクリートの弾性係数の劣化が他に比べて大きいことは注目すべき現象である。

なお、加熱後の相対弾性係数比は、加熱中の養生条件の別に関わらず、加熱前気中養生したものに比べ、水中養生した方が一様に低下率が大きくなっている。これは、加熱後の弾性係数の値そのものには、加熱前養生条件の差はないにも関わらず(図3)、加熱直前の弾性係数が加熱前養生条件の差により異なっており、加熱前水中養生の弾性係数は加熱前気中養生したそれに比べ大きくなっているためである(表4参照)。

4. まとめ

今回の試験により次のようなことが明らかになった。

(1) 粗骨材の種類の影響は、加熱中シールでの石灰岩

コンクリートの弾性係数の劣化が大きいのを除いて顕著な違いが認められなかった。今回試験した粗骨材のうちでは、硬質砂岩コンクリートの高温による物性変化が比較的少なかった。

(2) 特に加熱中のコンクリート含水分量の違いが高温での強度性状へ大きく影響する。弾性係数は水分量の多い方が劣化が少ない。ただし、圧縮強度は必ずしも水分量の多いほど有利とは言えない。

(3) 全般に加熱期間が長くなると高温による劣化が進行する傾向が認められる。ただし、加熱中シールの圧縮強度は一樣な変化は示していない。また、加熱中アンシールの弾性係数は加熱初期で急激に低下し、その後の変化はほとんどない。

今回の試験は、実験室での小型テストピースを用いて行なったものである。これに対し、比表面積が小さく規模の大きな部材や温度勾配を受ける部材のコンクリート中からの水分散逸課程は非常に複雑になるものと予想される。今後は、実構造体規模でのコンクリートの加熱に伴う水分移動を含めて物性変化を調査する必要があると考える。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 原子力コンクリート格納容器設計指針案・同解説, (昭和53.8), p. 72
- 2) 資源エネルギー庁: 原子力発電用コンクリート格納容器技術基準(案), (昭和56.11), p. 9
- 3) R. Kottas, et al.: Strain Characteristic of Concrete in the Temperature Range of 20°C to 200°C, SMIRT, (1979), H1/2
- 4) 原口 晃: 長期間高温をうけたコンクリートの力学特性に関する実験的検討, 電力中央研究所報告, 依頼報告: 379511, (昭和54.7)
- 5) 赤石, 他: 高温下(80~250°C)におけるコンクリートの強度性状について(その5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和57.10), p. 321
- 6) G. G. Carette, et al.: Sustained High Temperature Effect on Concretes Made with Normal Portland Cement, Normal Portland Cement and Slag, or Normal Portland Cement and Fly Ash, Concrete International, Vol. 4, No. 7, ACI, (1982), p. 41
- 7) 西晴 哉: オートクレーブ養生と超高強度コンクリート, コンクリート工学, Vol. 18, No. 5, (1980), p. 9
- 8) 川口 徹: コンクリートの熱膨張係数に関する既往の研究成果について, コンクリート工学マスコンコロキウム, JCI-C2, (1982), p. 15