

論文

[1063] 高温下のコンクリートの長期強度性状に関する研究

正会員○西内達雄（電力中央研究所）

正会員 金津 努（電力中央研究所）

正会員 石田博彰（電力中央研究所）

1. はじめに

原子炉格納容器や放射性廃棄物の貯蔵施設などの鉄筋コンクリート構造物は、長期間継続して高温条件下にさらされることが想定されて設計される。このため、高温条件下におけるコンクリートの長期強度性状を把握しておくことは重要な課題であるが、1年を超える長期にわたる研究は少ない¹⁾。また現在、高温条件下の設計では『原子力用コンクリート格納容器設計指針案・同解説』²⁾が拠り所となるもので、この中でコンクリートの常時継続して受ける温度制限値を65°Cに規定している。しかし、65°Cの根拠は明確でなく、また、従来より100°C程度までの温度条件であれば、短期的にはコンクリートの弾性係数の低下は大きい³⁾が、強度的には実用上問題になるほど大きな影響は及ぼさないと結果が得られている³⁾⁴⁾。

以上のことから本研究では、現行の温度制限値（現行の規定では65°C）と力学的性質の長期健全性について検討を行うことを目的として、常時65°C～110°Cの温度を長期間受けた時のコンクリートの力学的性質の特徴を実験により明らかにした。

2. 実験概要

2.1 実験要因と水準

本実験で行った実験要因の種類と水準は以下に示すように定めた。

- (1) 配合条件・・・4種類
設計基準強度400kgf/cm²および240kgf/cm²の普通コンクリート
- (2) 温度条件・・・3種類
現行の設計の温度制限値である65°Cおよび制限値よりやや高い85°C、コンクリート内部の自由水が蒸発する温度である110°C。

表-1 実験要因と測定項目

温度条件	測定項目	配合条件	密封条件
65°C	圧縮強度	配合(1)	シール, アンシール
	静弾性係数		
85°C	圧縮強度	配合(1)	シール, アンシール
	静弾性係数	配合(2)	シール, アンシール
110°C	圧縮強度	配合(1)	シール, アンシール
	静弾性係数 細孔径分布	配合(2)	シール, アンシール

ここで、配合(1)：設計基準強度400kgf/cm²のコンクリート
配合(2)：設計基準強度240kgf/cm²のコンクリート

- (3) 密封条件・・・2種類

シール（供試体をブリキ缶容器に入れて加熱）とアンシール。

ただし実際には、シール条件のものは密封性能が完全ではなく、経時的に水分の逸散があった。

2.2 測定項目

本実験で測定した項目は、圧縮強度、静弾性係数、細孔径分布である。（表-1参照）

細孔径分布は高温下のコンクリートの強度性状の低下を、微細構造の面から検討するために測定したものである。

2.3 使用材料とコンクリートの配合

使用したセメントは普通ポルトランドセメント（比重3.15）、細骨材は川砂（比重2.65、粗粒率2.64）、粗骨材は粒径が5~13mmの碎石（硬質砂岩、比重2.70）と粒径が13~20mmの碎石（輝緑凝灰岩および石灰岩、比重2.97）を重量比で1：1に混合したものである。混和剤（AE減水剤）はセメント重量に対して0.25%混入した。本実験に用いたコンクリートの配合は表-2に示す通りである。

表-2 配合表

配合	スラブ (cm)	Air (%)	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)					曝露直前の特性値 (kgf/cm ²)	
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 WRA	圧縮強度	弾性係数
(1)	8±2	3±1	43.2	43.1	160	370	789	1103	0.925	565	3.59×10 ⁶
(2)	10±2	3±1	64.8	47.0	162	908	908	1082	0.625	318	2.73

2.4 実験方法

本実験で使用した供試体はφ10×20cmの円柱供試体で、供試体は脱型後材令28日に達するまで湿潤養生を行い、その後昇温開始時まで約2ヶ月間気乾養生を行った。密封条件がシールのもは昇温開始直前にブリキ缶に入れて蓋部をハンダ付けした。

供試体が所定の曝露材令に達すると、一度降温して恒温槽より供試体を取り出し、直ちに重量測定を行った。その後20℃、60%RHの室内で一日静置し強度試験を行った。

細孔径分布の測定は、圧縮試験終了後の供試体より1cm角程度の大きさのモルタル試料をダイヤモンドカッターとハンマーを用いて採取し、水銀圧入式ポロシメーターを用いて行なった。

3. 高温下の物性の長期性状

高温下におけるコンクリートの残存圧縮強度比（試験時の圧縮強度／昇温直前の圧縮強度）、残存静弾性係数比（試験時の静弾性係数／昇温直前の静弾性係数）の曝露材令3年までの経時変化を図-1、2に示す。

(1) 残存圧縮強度比

残存圧縮強度比について次のことが判断される。

- ①配合条件、温度条件にかかわらず、シール条件の残存強度比の方がアンシール条件の場合よりも小さい。
- ②残存強度比は、温度条件の高い方が小さいが、65℃から110℃までの温度条件ではその差は小さい。
- ③残存強度比は、曝露材令2年から3年でほとんど変化しておらずほぼ終息している。この時点

での残存強度比は、シール条件で 0.8、アンシール条件で 0.9である。

著者らは図-3に示すように、既往の研究成果を整理し、高温曝露材令が最長1年程度の比較的短期のデータ（密封、配合条件など全ての条件を含んでいる）に基づいて、実用上の圧縮強度の残存比の下限値を 200°C以内の温度条件で 0.7であることを示した⁵⁾。本実験は高温曝露材令が3年にわたる長期のデータではあるが、65°C~110°Cの温度条件で圧縮強度の残存比は 0.7を下回らない結果が得られた。従って、残存圧縮強度比の下限値 0.7は比較的長期間の高温下への曝露に対しても、安全側の評価を与えるものと考えられる。

以上の結果から判断すると、コンクリートの残存圧縮強度比は 100°C程度までは温度条件に依存せず、約 0.7で一定と考えられる。設計合理化の観点から現行のコンクリートの温度制限値65°Cを引き上げることにについて見れば、強度性状の面からは可能であると考えられる。

(2) 残存静弾性係数比

残存静弾性係数比について次のことが判断される。

- ①高強度のコンクリートでは、圧縮強度の場合と反対に、シール条件の残存比の方がアンシール条件のものよりも大きい。しかし、低強度コンクリートではアンシール条件のものが大きい。
- ②残存比は温度条件の高い方が小さく、65°Cと100°Cでは残存比で0.15から0.2程度の差が認められる。
- ③残存比は、圧縮強度と同様材令2年から3年の変化がほとんどなく、ほぼ終息している。この

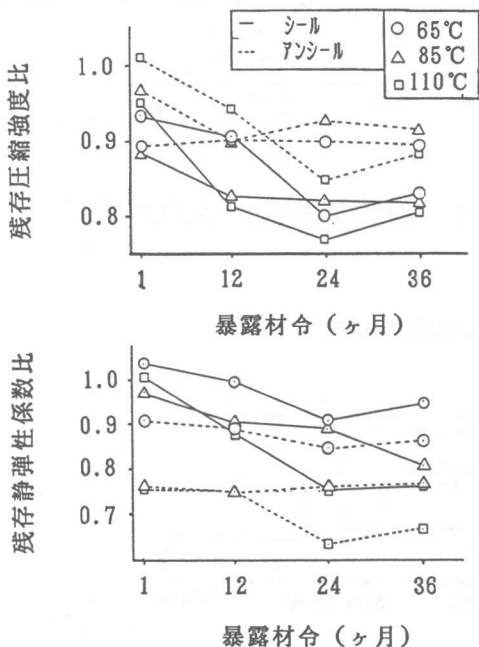


図-1 設計基準強度400kgf/cm²のプレーンコンクリート

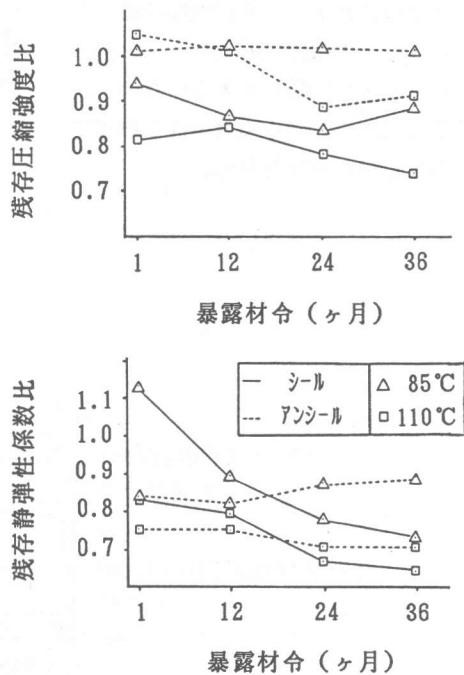


図-2 設計基準強度240kgf/cm²のプレーンコンクリート

時点の残存静弾性係数比は、シール条件で、65°Cが0.9~0.95、85°Cが0.75~0.9、110°Cが0.65~0.75、アンシール条件で、65°Cが0.85~0.9、85°Cが0.75~0.8、110°Cが0.65~0.7である。

著者らは、静弾性係数の残存比についても既往の研究成果をとりまとめており、圧縮強度と同じように、図-4に示すように残存比の下限値の温度依存性評価式として次の式を得ている⁵⁾。

$$E_c(T) / E_{c,n} = -0.00146T + 0.73$$

常温 ≤ T ≤ 500°C

本実験で得られた65°C~110°Cの温度条件下に長期間曝露されたデータも、上式による値を下回ることがなく、上式は安全側の評価を与えていることがわかる。

以上のことから、弾性係数は温度上昇に対して直線的に低下し、その割合は圧縮強度に比較して大きいため、設計的にはさらされる温度条件に応じて定めることが必要となる。

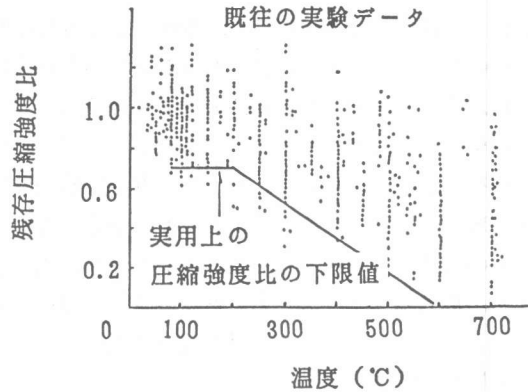


図-3 残存圧縮強度比と温度条件⁵⁾

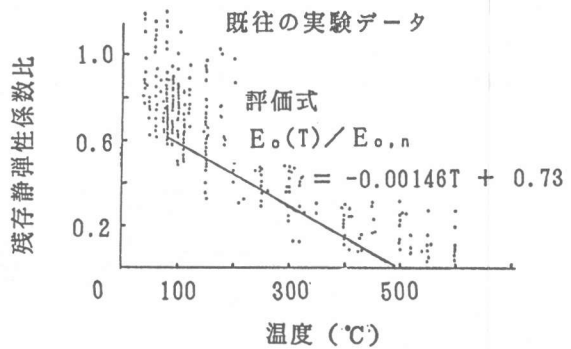


図-4 残存静弾性係数比と温度条件⁵⁾

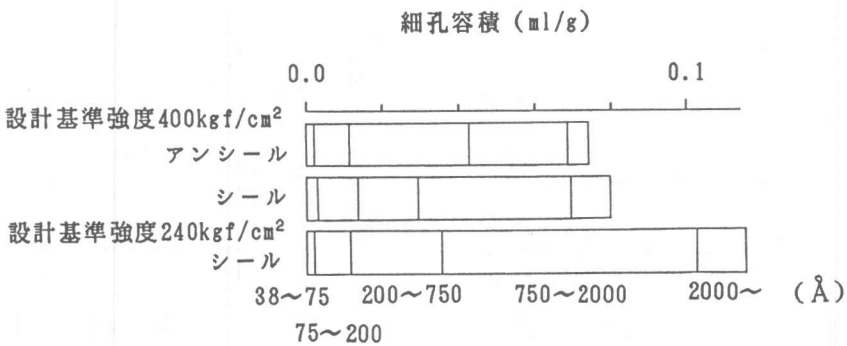


図-5 コンクリートの細孔径分布 (占有率)
(温度条件 110°C)

4. 高温下のコンクリートの細孔構造

温度条件 110°Cのコンクリートの曝露材令3年における細孔構造を、各細孔半径別の空隙が細孔容積に対して占める割合で示したものを図-5に、コンクリートの細孔容積と残存圧縮強度比との関係を示したものを図-6に示す。

これらの図より、高温下のコンクリートの細孔構造については次のことが判断できる。

- ①シール条件のものの方がアンシール条件のものに比べて細孔容積が大きく、750Å以上の粗大孔（微細ひびわれをも含むと思われる）の占める割合が大きい。
- ②低強度のコンクリートの方が細孔容積は大きく、750Å以上の粗大孔の占める割合が大きくなっている。
- ③同一の設計基準強度においては密封条件に関わらず、圧縮強度の低下が大きいものほど細孔容積が大きい。

また、コンクリートの細孔構造に関する種々の研究結果⁶⁾と本研究の結果とから、110°Cの高温条件がコンクリートの細孔構造に及ぼす影響を検討すると、高温条件下ではコンクリートの組織は弱体化し、内部に微細ひびわれを含む空隙が多くなるため、分布のピークが常温下のものに比べて粗大孔の方へシフトする傾向にあることが明らかとなった（図-7参照）。

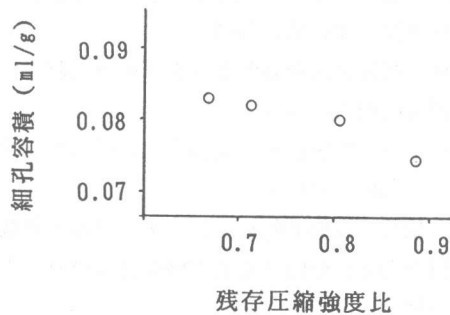


図-6 細孔容積と残存圧縮強度比との関係
($f_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$, 110°C)

5. まとめ

長期間高温条件下（65°C～110°C）にさらされたコンクリートの材料特性を調べた結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 圧縮強度：残存比はシール条件の方がアンシール条件よりも小さく、また、温度条件の高い方が小さくなる傾向があるが、65°C～110°Cまでの温度条件ではその差は小さい。
- (2) 弾性係数：残存比は圧縮強度の場合とは反対に、アンシール条件の方がシール条件よりも小さい。また、温度の上昇とともに残存静弾性係数比は直線的に低下し、圧縮強度

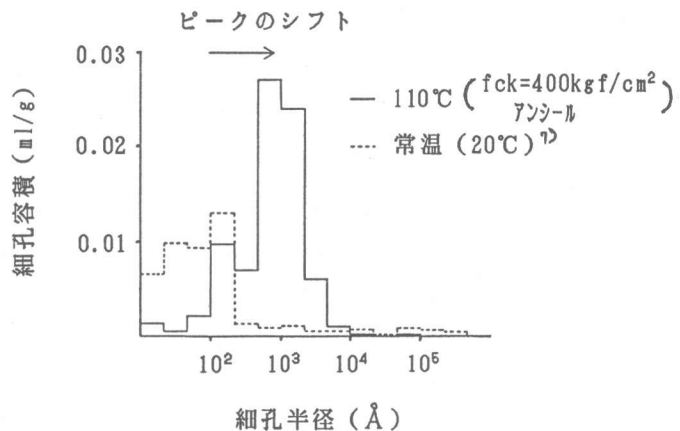


図-7 温度条件が細孔径分布に及ぼす影響

に比較して温度変化に敏感に影響される。

- (3) 細孔構造：圧縮強度と密接な関係を持ち、細孔容積が大きいものほど圧縮強度の低下量は大きい。110°Cの高温下では常温下のものに比べてコンクリートの組織は弱体化し、粗大孔、微細ひびわれが発生するため、細孔径分布のピークは粗大な方へシフトする。
- (4) 設計用温度制限値：現行では65°Cの制限値が設けられているが、強度特性の面からは、残存比を考慮することにより、この制限値を引き上げることは可能と考えられる。

参考文献

- 1) 川瀬 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，第10回セメントコンクリート研究討論会概要集，1983
- 2) 原子力用コンクリート格納容器設計指針案・同解説，日本建築学会，1978
- 3) 嵩 他：高温にさらされたコンクリートの性状の変化に関する研究，第1回コンクリート工学年次講演会論文報告集，1979
- 4) 原口 他：高温持続期間がコンクリートの強度，弾性的性質に及ぼす影響，電力中央研究所技術第二研究所報告，1975
- 5) 金津 他：100 °Cを超える高温下におけるコンクリート・鉄筋コンクリートの力学的性質，電力土木 No.202，1986
- 6) 例えば、依田：長期間熱を受けたモルタルの性状，セメントコンクリート No.437，1983
- 7) 西内：打設条件に起因する異方性がコンクリートの諸性状に及ぼす影響，東京大学大学院修士論文，1989