

論文 高温にさらされたコンクリートの強度性状に及ぼすセメントおよび 混和剤の影響

嵩 英雄*1・田山 隆文*2・松沢 晃一*3・西 祐宜*4

要旨：原子力発電所の主要構造物は、温度制限値が規定されているが制限値以下の温度でもコンクリートは劣化する。本報告はセメント、混和剤の異なる 6 配合のコンクリートの円柱供試体と長さ変化試験体を、20～175℃の 6 段階の温度で長期高温曝露後の質量減少、乾燥収縮及び圧縮強度、ヤング係数、割裂引張強度、剪断強度を試験し、コンクリートの特性に及ぼす各種要因の影響について検討したものである。曝露後の残存強度は曝露温度に伴い単調に低下せず、50～65℃で極小、80～110℃で極大を示すが、極値温度は材料・配合により異なり、乾燥収縮が少ないほど残存強度が大きく、収縮低減剤の添加による劣化抑制効果大きい。

キーワード：曝露温度、乾燥収縮、圧縮強度、割裂引張強度、剪断強度、セメント、収縮低減剤

1. はじめに

原子力発電所（以下、NPP と略記）の主要構造物のコンクリートは放射線照射と原子炉の発熱に曝されるため表-1 に示す ASME 温度制限値¹⁾が規定されており、日本機械学会(JSME)もほぼ同様の規定²⁾を設けている。温度制限値に対応するコンクリートの構造規定として、ACI-349“Code Requirement for Nuclear Safety-Related Structures and Commentary”³⁾、日本建築学会“原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説”（以下、RCN と略記）⁴⁾があり、制限値以下の温度では ACI349 は ACI-318⁵⁾、RCN は“コンクリート構造計算規準”⁶⁾と同様の材料の許容応力度、断面算定を許容している。但し ACI349-2013 では定常時の一般部の制限値 65℃を 90℃まで条件付きで緩和可能としている。また、RCN では「応力状態 2（温度荷重を含む荷重状態）」のコンクリート許容応力度を短期 9/20F_c、長期 3/4F_c まで許容している。

しかし、この制限値以下の温度でも長期間、高温乾燥されたコンクリート強度は低下するが、この温度範囲のコンクリートの性状変化に関する研究は筆者らの報告を

除くと少ない、嵩ら⁷⁾は 20～300℃の温度範囲の長期曝露後の残存強度は温度に伴い単調に低下せず、50℃で極小、80～110℃で極大となることを報じた。岸谷、嵩⁸⁾は 10, 100, 1000 日間の曝露実験から、残存強度は曝露温度・曝露期間に係わりなく質量減少率により定まり、質量減少率 4%で極小、5%で極大となることを報じた。

使用材料の影響については嵩、田村ら⁹⁾はセメント種類の影響が大きいこと、水銀圧入法細孔径試験結果から、温度 50℃近傍の極小点の強度低下はセメント硬化体の細孔径・細孔量増加に伴う強度低下によると結論した。

本報告は、高温曝露後のコンクリートの残存強度と乾燥収縮の関係に着目した収縮低減剤による高温劣化抑制を目的として行った実験研究の報告であり、本会前年度大会の松沢ら¹⁰⁾の破壊エネルギーに関する論文の続報であり、として、圧縮強度、剪断強度などの残存強度に及ぼす収縮低減剤など混和剤の影響に関する実験研究の報告であり、SMiRT-25(第25回原子炉構造力学学会議)で発表した報文¹¹⁾に加筆したものである。

表-1 NPP温度規制値(ASME CODE)の概要¹⁾

Thermal load categories	Concrete temperature (°C)			
	Area except penetration	Area of penetration	Area except jet force	Area subjected to jet force
Stable conditions (1)	65	90	--	--
Unstable conditions(2)	--	--	175	340

Note; (1)stable conditions; normal operation or long time duration(more than 24hours) except for abnormal operation
(2)Unstable conditions;abnormal operation or short time duration(less than 24 hours)

2. 実験計画の概要

セメント 2 種類、化学混和剤 2 種類と収縮低減剤を組合せた 6 配合のコンクリートで作成した円柱供試体と長さ変化試験体を定常運転時の温度制限値 175℃以下の範囲の 6 水準の温度の長期曝露後の質量減少、乾燥収縮、圧縮強度、割裂引張強度及び剪断強度を試験した。

3. コンクリートの使用材料及び配合

計画配合とフレッシュ性状及び曝露前の強度性状を表-2 に示す。

*1 青島農業大学 建築工程学院 客座教授 工博 (名誉会員)

*2 (一社) 建築研究振興協会 八王子試験所 首席技術者 (正会員)

*3 国立研究開発法人 建築研究所 工博 (正会員)

*4 フローリック (株) つくばコンクリート研究所 工博 (正会員)

表-2 コンクリートの配合・フレッシュ性状及び暴露前の強度性状

セメント	記号	W/C (%)	単位量 : kg/m ³				混和剤			フレッシュ性状		円柱供試体						梁供試体 (MPa)	
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AER	AEHR	SRA	スランプ (mm)	空気量 (%)	圧縮強度 (MPa)		ヤング係数 (GPa)		剪断強度	引張強度		
												標準	封緘	標準	封緘			封緘	封緘
												28日	91日	91日	28日	91日	91日		
MP	MP-AER	50	173	346	822	935	1.73	—	—	146	4.6	40.2	52.8	45.8	26.8	31.2	29.2	8.57	4.03
	MP-AEHR	50	173	346	822	935	—	1.73	—	155	4.7	39.1	50.2	45.8	26.8	30.2	28.1	8.25	3.78
	MP-AER-SRA	50	173	346	822	935	1.73	—	6.0	150	4.0	36.0	48.9	47.6	27.6	31.1	29.9	8.65	4.27
	MP-AEHR-SRA	50	173	346	822	935	—	1.73	6.0	168	5.0	32.7	46.2	45.3	26.4	29.5	29.5	7.67	3.78
OP	OP-AER	50	173	346	820	935	1.73	—	—	128	3.9	45.2	52.7	50.6	28.3	31.5	29.3	8.16	3.96
	OP-AER-SRA	50	173	346	820	935	1.73	—	6.0	133	4.6	40.9	48.9	48.0	27.9	31.6	29.7	8.37	3.93

セメントは中庸熟ポルトランドセメント(MP) (密度 3.21g/cm³, 粉末度 3220cm²/g) と普通ポルトランドセメント(OP) (密度 3.16g/cm³, 粉末度 3260cm²/g) を使用した。細骨材は川砂(表乾密度 2.56 g/cm³, 吸水率 2.45%, fm 2.67), 粗骨材は硬質砂岩碎石(表乾密度 2.56 g/cm³, 吸水率 0.54%, 実積率 59.0%) を使用した。混和剤は AE 減水剤(AER)と高性能 AE 減水剤(AEHR)の2種類と収縮低減剤(SRA)(グリコールエーテル誘導体)を使用した。

4. 実験方法

4. 1 コンクリート供試体の作成及び養生

コンクリートは二軸強制練りミキサで練り混ぜ、φ100mm 円柱供試体と 100×100×400mm 長さ変化試験体を各材令、各暴露温度、各3体作製、材令91日まで封緘養生後、材令91日の試験及び高温曝露に供した。

4. 2 高温曝露

曝露温度は表-1の定常運転時の温度制限値の範囲の、20,50,65,80,110,17°C5の6水準とし、20~80°Cは恒温恒湿槽、110,175°Cは循環送風式恒温槽を用い図-1に示すようにアンシール状態で90日間の長期曝露を行った。

図-2に50,65,80°C曝露の恒温恒湿槽の温度と相対湿度の実測値及び絶対湿度の計算値を示す。35日曝露時の温度降下と相対湿度の上昇は短期間の停電による。

コンクリート試験体の曝露と同時に、金属製軽量型枠に表乾状態の細骨材と粗骨材を充填し、各暴露温度で高温乾燥後の骨材の質量減少試験に供した。



図-1 暴露温度の概要

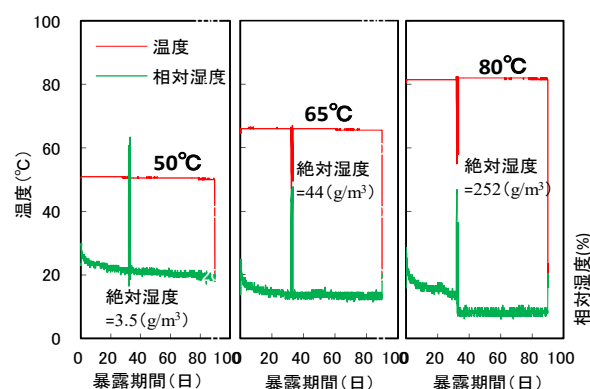


図-2 恒温恒湿槽の温度・湿度の記録

4. 3 高温曝露前後の供試体の試験

材令91日封緘養生終了後の供試体で暴露前の試験を行い、高温曝露終、常温に冷却した供試体で暴露後試験を行った。円柱供試体は質量減少、圧縮強度及びヤング係数を試験し、長さ変化試験体は質量減少、乾燥収縮測定後、前報¹⁰⁾に示した破壊エネルギー試験後の梁切片を用いて BS 1881 Part 117 による割裂引張強度試験と土木学会(JSCE-G552)による二面剪断試験を行った。図-3に二面剪断及び割裂引張強度試験の概念図を示す。

割裂引張強度は、 $f_{st} = 2P/\pi DL$ で算定した。

(P:最大荷重, D:梁切片の高さ L:梁切片の幅) 二面剪断強度は最大荷重を破断面二面の断面積で除した。

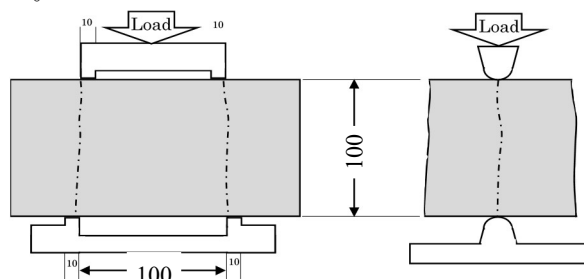


図-3 梁切片の剪断強度と割裂引張強度試験

5. 試験結果及び考察

5. 1 円柱供試体コンクリート及び骨材の質量減少

図-4に円柱供試体コンクリート及び骨材の質量減少

率と暴露温度の関係を示す。質量減少率は、暴露前の質量に対する百分率で表した。

図-5 に質量減少コンクリート 1m³ 当たりの全骨材、供試体コンクリート及びセメントペーストの質量減少量（水分逸散量）と暴露温度の関係を示す、コンクリートの質量減少の約 60%が 50℃で生じ、65 以上～175℃の間は緩やかに水分逸散が継続する。

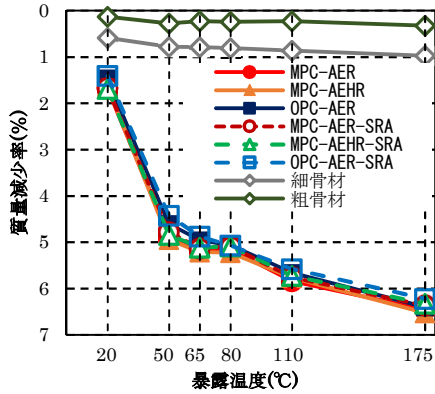


図-4 コンクリートと骨材の質量減少と温度の関係

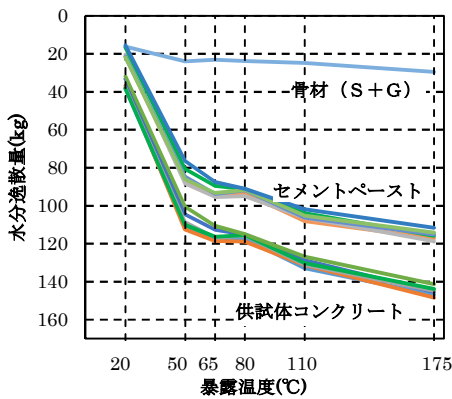


図-5 水分逸散量と暴露温度の関係

5. 2 長さ変化試験体の質量減少及び乾燥収縮

図-6 に質量減少と暴露温度の関係、図-7 に乾燥収縮と暴露温度の関係を示す。質量減少、乾燥収縮とも 65℃より 80℃が小さい。これは図-2 に示したように、80℃曝露の絶対湿度が 65℃より大きいことによると考えられる。SR の質量減少への影響はないが、乾燥収縮低減効果が全温度域で認められる。

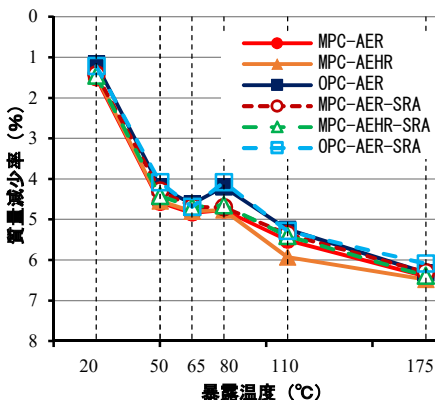


図-6 梁供試体質量減少率と暴露温度の関係

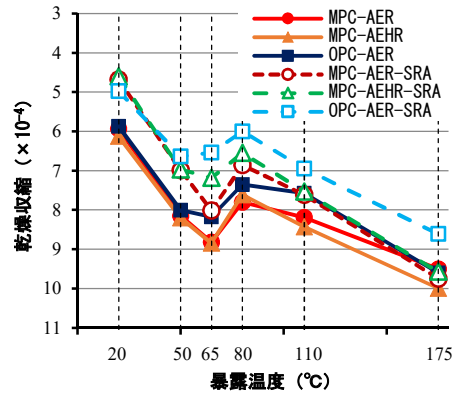


図-7 乾燥収縮と暴露温度の関係

5. 3 円柱供試体の圧縮強度及びヤング係数

図-8 に圧縮強度残存率と暴露温度、図-10 にヤング係数残存率と暴露温度の関係を示す。残存率は、材令 91 日強度に対する百分率で表した。圧縮強度残存率は、SR 添加の MPC 及び OPC は 50～65℃で増大し、概ね 80℃で極小、110℃で極大となった。ヤング係数は 50℃で極小、65～80℃で極大となった。

なお、圧縮強度残存率の極小点温度 80℃は、筆者らの既往の研究^{7) 8)}の 50℃より高い、これは、図-2 に示したように暴露温度 80℃の絶対湿度が 50℃、65℃より高く、水分逸散が少ないことによると考えられる。

図-9 に SR 添加の有無による圧縮強度残存率の比較を示す。50℃～175℃の全温度域で SR 添加による残存強度低下の抑制効果が顕著である。

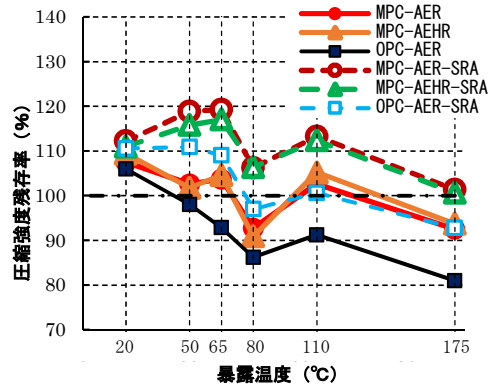


図-8 圧縮強度残存率と暴露温度の関係

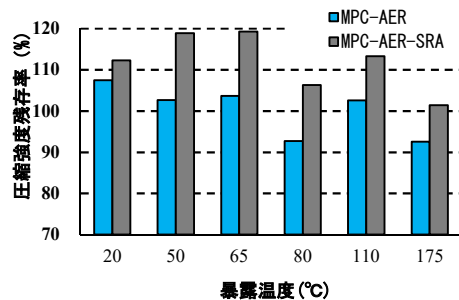


図-9 SR 添加の有無による圧縮強度残存率の比較

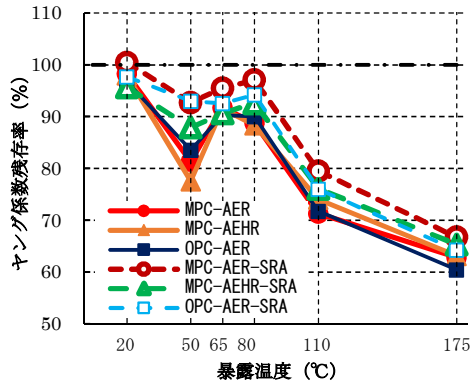


図-10 ヤング係数残存率と暴露温度の関係

5. 4 長さ変化試験体の割裂引張強度及び剪断強度

図-11に引張強度残存率と暴露温度の関係を示す。

引張強度残存率は円柱供試体の圧縮強度と同様に明確な極値を示すが、極値の温度は極小点50°C、極大点65°Cで圧縮強度より低温である。また、極大点以降の暴露温度上昇に伴う強度低下が圧縮強度より大きい。

図-12に剪断強度残存率と暴露温度の関係を示す。

剪断強度残存率は圧縮強度及び引張強度残存率と傾が異なり、明確な極商点・極大点を示さず、暴露温度の上昇に伴う強度低下も緩やかであった。

図-13にSR添加の有無による剪断強度残存率の比較を示す。80°C以下の温度では、SR添加による残存強度低下の抑制効果が大いだが、110°C、175°Cでは効果が少ない。

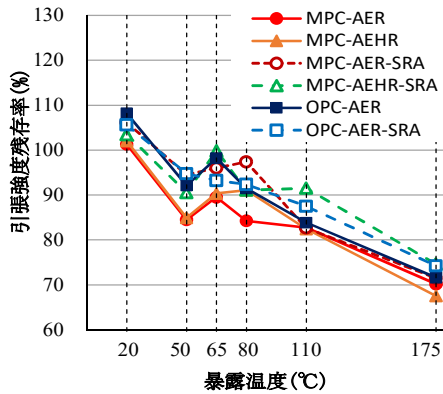


図-11 引張強度残存率と暴露温度の関係

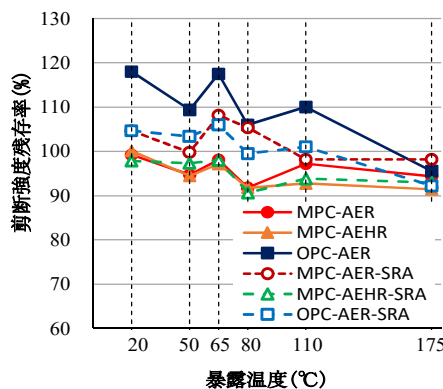


図-12 剪断強度残存率と暴露温度の関係

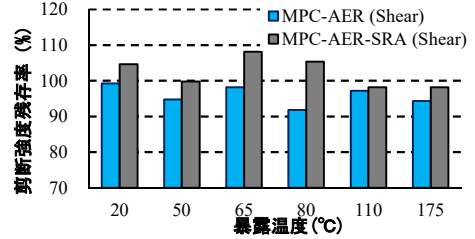


図-13 SR添加の有無による剪断強度残存率の比較

5. 5 乾燥収縮の影響

図-14～図-16にMPコンクリートの圧縮・引張・剪断強度残存率と乾燥収縮の関係を示す。いずれの強度においても乾燥収縮率の増加に伴い、強度残存率は低下したが、引張強度は、圧縮強度・剪断強度より乾燥収縮増大に伴う強度低下が顕著である。

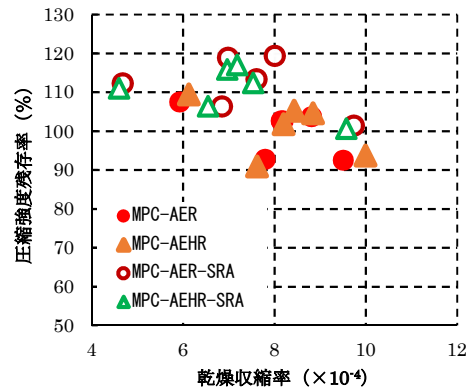


図-14 圧縮強度残存率と乾燥収縮率の関係

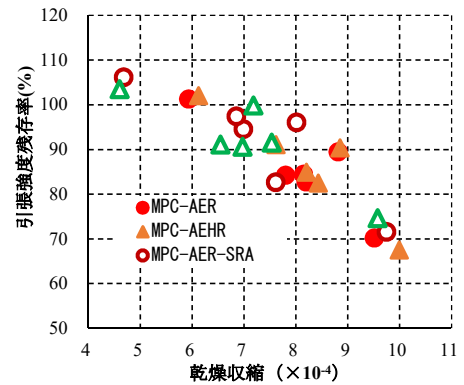


図-15 引張強度残存率と乾燥収縮率の関係

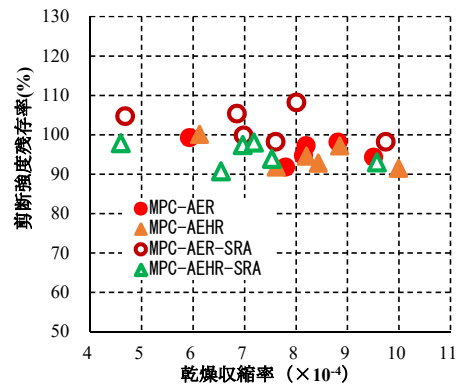


図-16 剪断強度残存率と乾燥収縮率の関係

5.6 収縮低減剤 SR 添加による高温劣化抑制効果の考察

図-7～図-13 に示されるように、圧縮強度、ヤング係数、引張強度及び剪断強度のいずれにおいても、収縮低減剤を添加したコンクリートは、強度残存率の低下が少なく、収縮低減剤による高温劣化抑制効果が認められる。

圧縮強度に対しては、175℃までの全温度域で SR 剤添加の方が残存率が高いが、剪断強度に対しては 80℃までは SR 剤添加の効果が顕著であるが、110・175℃では抑制効果が小さい。

常温における収縮低減剤の収縮低減作用とそのメカニズムについては、I.Maruyama, E.Gardner ら¹³⁾、福島、石森ら¹⁴⁾及び寺本、丸山¹⁵⁾の論文に示されている。

本論文の実験研究は、高温曝露前後の力学特性の試験に留まるため、上記の3論文に基づいて、収縮低減剤によるコンクリートの高温劣化抑制効果について、下記のように推論した。

- 1)水分逸散と乾燥収縮の関係性が SRA の添加により著しく変化している。これは、水分逸散が収縮の駆動力となっていないことが考えられる。この原因は水和物の構造変化に起因し、水分の存在箇所が変化していると考えられる。CSH 内の水分移動が収縮の駆動力と捉えれば、この水分量に変化が生じている可能性が高いと推察している。
- 2)高温に晒された際、セメントペーストと骨材の熱膨張係数の差または脱水に伴う収縮の差は微細ひび割れおよび骨材界面の剥離を生じやすい条件であり、SRA 添加により変形性能が変化し、これらの現象を抑制した可能性も考えられる。水分内や水分界面に存在する SRA が、水分の化学的特性を変化させる影響も考慮する必要がある。

5.7 圧縮強度に対する引張及び剪断強度比に関する考察

図-17 に MP コンクリートにおける圧縮強度残存率に対する引張残存率の関係を示す。

圧縮強度に対する引張強度残存率の比率は暴露温度により異なり、50℃で極小、80℃で極大となり、温度上昇に伴い単調に減少し 175℃では 70%に低下する。

図-18 に MP コンクリートにおける圧縮強度残存率に対する剪断残存率の関係を示す。

これに対して剪断強度残存率の比率は、65℃で極大、110℃で極小となるが、全体として暴露温度の上昇に伴って増大の傾向を示す、175℃ではほぼ 100%となる。

これらの図から高温に曝された構造体のコンクリート強度をコア供試体の圧縮強度から剪断強度を算定する場合に、低い温度領域においても危険側の推定となるものと考えられる。

特に現行の日本建築学会の RCN⁹⁾の応力状態[2]にお

ける温度応力との組合せ荷重時の長期許容応力度 $3/4f_c$ で設計された構造物の場合においては極めて危険側の推定となる恐れが生ずる。

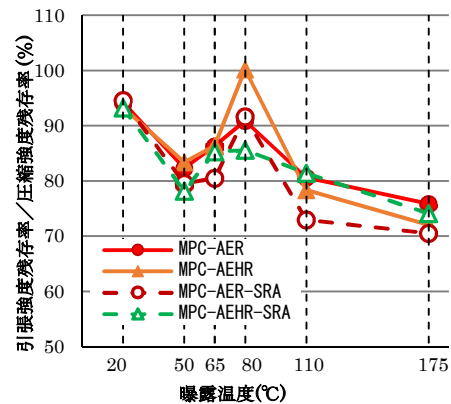


図-17 圧縮強度残存率に対する引張強度残存率の比率

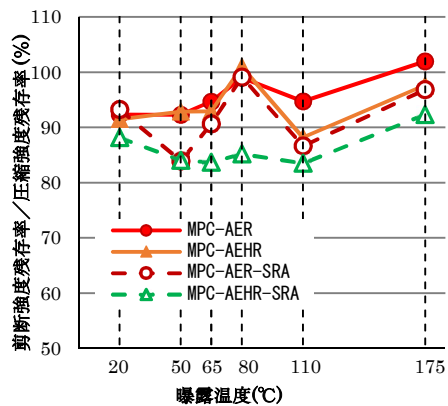


図-18 圧縮強度残存率に対する剪断強度残存率の比率

6. 実験結果のまとめ

- 1)高温乾燥後の圧縮強度残存率は筆者らの既報と同様に暴露温度及び質量減少率に伴う単調な減少を示さず、温度 65～80℃、質量減少率 5.1～5.2%で極小、温度 110℃、質量減少率 5.7%で極大を示した。
- 2)引張強度は圧縮強度と同様な極小、極大を示すが、暴露温度に伴う残存強度の低下が大きく、175℃では 60%まで低下した。
- 3)剪断強度も圧縮強度・引張強度と同様な極小・極大を示し、50℃の極小点の低下が著しいが、温度上昇に伴う残存率低下の進行は引張強度より緩慢である。
- 4)高温曝露後の乾燥収縮の増大に伴い残存強度の低下が増大する傾向が顕著である。
- 5)収縮低減剤の添加は高温曝露後のコンクリートの乾燥収縮の低減のほか、圧縮強度、引張強度、剪断強度などの力学特性低下の抑制の効果が顕著である。
- 6)セメントの種類の影響も認められ、中庸熟は普通ポルトランドセメントより残存強度の低下が少ない。

7) 現行の温度制限値の範囲でも常温時の許容応力度の適用には再検討の要がある。

7. あとがき

本報告の主題は、高温乾燥によるコンクリートの力学特性の変化と収縮低減剤の高温劣化抑制効果の実証である。そのため、コンクリートの高温劣化、特に極小点・極大点の生成のメカニズム及び収縮低減剤の高温劣化抑制のメカニズムの解明に必要なセメント化学的な分析は行っておらず、考察で述べたこれらのメカニズムは推論に留まる。従って、これらのメカニズムのか解明は今後の課題として残されている。

謝辞

本報告は、建築研究振興協会、建築研究所及びフローリックの共同研究によるものであり、実験研究に携わった関係者各位に謝意を表す。特に、試験体の作成・養生から曝露後の各種測定まで多大の尽力を賜ったフローリック技術部(当時、現・戸田建設株式会社技術研究所の守屋健一氏)に感謝いたします。

参考文献

- 1) American Society of Mechanical Engineers, "Code for Concrete Reactor Vessels and Containments", USA, 2013,
- 2) 日本機械学会, "発電用設備規格, JSME S NEI 2010, コンクリート製原子炉格納容器規格(CCV 規格), 2010
- 3) ACI-49, "Code Requirement for Nuclear Safety Related Structures and Commentary", 2013
- 4) 日本建築学会, "原子力施設 鉄筋コンクリート構造物 計算規準・同解説", 2013,
- 5) ACI-318, "Code Requirement for Reinforced Concrete Structures and Commentary", USA, 2010,
- 6) 日本建築学会, "鉄筋コンクリート構造計算規準" 2013

- 7) H, Kasami, T, Okuno, S, Yamane, "The effects of sustained elevated temperature exposure to elevated temperatures up to 300°C", Trans. of SMiRT-3, London, UK, 1975.9
- 8) 岸谷 嵩, 奥野, "高温に曝されたコンクリートの性状の変化に冠する研究", コンクリート工学年次講演会論文報告集, Vol. 1, 1979,
- 9) 岸谷 嵩, "長期間の高温に曝されたコンクリートの性状に冠する実験的研究", セメント・コンクリート, No. 444, 1984
- 10) H, Kasami, M, Tamura, T, Kaneko, H, Quan, "Effects of cement type on the properties of concrete exposed to sustained elevated temperatures", Int, Congress on Durability of Concrete", Trondheim, Norway, C7-1, pp.1-12, 2012
- 11) 松沢, "長期高温暴露を受けたコンクリートの破壊エネルギーに関する実験的検討" コンクリート工学年次論文集, Vol.41, 2019,
- 12) H, Kasami, T, Tayama, K, Matsuzawa, H, Nishi, "Effects of Cement, Chemical Admixture and Shrinkage-Reducing Agent On the Strength Characteristics of Concrete Subjected to Sustained Temperature Exposure", Trans. of SMiRT-25, Charlotte, NC. USA, 2019.8
- 13) Ipeei Maruyama, Ellis Gartner, Katsutoshi Beppu, Ryo Kurihira, Role of alcohol-ethylene oxide polymers on the reduction of shrinkage of cement paste, Cement and Concrete Kuriha Research 111, pp.157-168, 2018
- 14) 福島浩樹, 石森正俊, 胡桃澤清文, 名和豊春: 乾湿繰り返しによるセメント硬化体の収縮・膨張挙動, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.74-81, 2010
- 15) 寺本 篤史, 丸山 一平: 水和反応に起因する線膨張係数の経時変化に及ぼす収縮低減剤の影響, セメント・コンクリート論文集, 70 巻 1 号, pp.236-pp.243, 2016