論文　温度に依存しない流動性の保持性能を有する高流動モルタルの開発

木ノ村　幸士[*1]・武田　均[*2]・宮原　茂禎[*3]・松元　淳一[*4]

要旨：余裕深度処分施設に適用する充填材を想定し，廃棄体温度に空間的なばらつきがある狭隘な充填環境に対し，環境温度によらず高い流動性を保持できる高流動モルタルの開発を試みた。環境温度 20℃，40℃，60℃でフレッシュ性状確認試験を行った結果，混和剤の種類や組合せおよび各々の添加量を調整することにより，温度に依存しない流動性の保持性能を有する高流動モルタルを実現することができた。本モルタルは，市販の混和剤の組合せであることから，現場環境や材料の品質変動に対し柔軟な対処が可能であり，実施工に適したモルタルであると考えられる。

キーワード：高流動モルタル，フレッシュ性状，流動性，ブリーディング

1. はじめに

主に原子力発電所から発生する放射性廃棄物は，含まれる放射性物質の放射能濃度や性状に応じて，高レベル放射性廃棄物とそれ以外の低レベル放射性廃棄物に大別される。さらに，低レベル放射性廃棄物は，放射能濃度が極めて低いもの，比較的低いもの，比較的高いものに分類される。低レベル放射性廃棄物のうち，放射能濃度が比較的高いものを埋設する施設である余裕深度処分施設は，**図－1** のようにベントナイト系及びセメント系材料で構成される多重人工バリアシステムを持つことが特徴である。

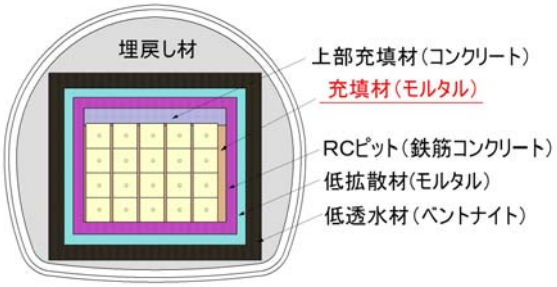
RC ピット内に定置される廃棄体は放射性核種の逐次崩壊により発熱状態にある。その一方で，施設閉鎖後，核種の外部移行をバリア機能上確実に遅延させるためには，発熱廃棄体の狭隘間隔を充填材（モルタル）により隙間なく充填する必要がある [1)]。さらに，この充填作業は放射線管理区域内での作業であり，完全無人化施工とする必要がある。したがって，余裕深度処分施設で使用する充填材には，高温環境下における高い流動性の保持性能，配管閉塞リスクを極力排除可能な優れたポンプ圧送性，締固めや仕上げの不要なセルフレベリング性を付与することが，材料・配合設計の面で期待される。

そこで，後述する基本配合に対し，廃棄体による熱影響を模擬した室内試験を実施し，モルタルのフレッシュ性状に及ぼす影響について定量的検討を行うことによって環境温度によらず高い流動性を保持できる高流動モルタルの開発を試みた。以下に，本検討結果から明らかとなった高流動モルタルの諸特性について詳述する。

2. 試験内容

2.1 基本配合および使用材料

余裕深度処分施設で使用する充填材には，施設閉鎖後に核種の外部移行を遅延させることを目的として，核種収着機能が期待される。そこで，本検討では，配合を変更した場合の核種収着特性への影響を懸念し，すでに高い物質移動抵抗性を有することが確認されている**表－1**



図－1　余裕深度処分施設の人工バリア構成

表－1　高流動モルタルの基本配合

目標スランプフロー(mm)	目標空気量(%)	W/B (%)	W/P (%)	単位量 (kg/m³)						*SP1* P×%	*Ad1* P×%	*As* P×%
				W	粉体 P				*S*			
					結合材 B			*LS*				
					LPC	*FA*	*LEX*					
750±50	2.5±1.5	45	28	230	338	153	20	307	1205	0.7~0.75*	0.25*	0.008

*予備検討の結果，決定した添加率

*1 大成建設（株）　原子力本部原燃サイクル部　工修　(正会員)
*2 大成建設（株）　技術センター土木技術研究所土木構工法研究室　工博　(正会員)
*3 大成建設（株）　技術センター土木技術研究所土木構工法研究室　工修　(正会員)
*4 大成建設（株）　技術センター土木技術研究所土木構工法研究室　工博　(正会員)

の基本配合[2), 3)]の部分は変更せず，使用する混和剤の種類や組合せおよびそれらの添加量を調整することにより，所定の要求性能の達成を図る方針とした。

一方，基本配合は，材料分離抵抗性確保の観点から，粉体系高流動コンクリートの一般的な水粉体比の下限値（W/P=28%）[4)]で配合設計されており，混和剤の添加量の調整により流動性を高めた場合には，材料分離抵抗性が損なわれることが懸念された。したがって，材料分離が発生する限界を確認することから検討を開始し，その結果，目標スランプフローを 750±50mm に設定した。基本配合に用いる材料を**表－２**に示す。

表－２　使用材料

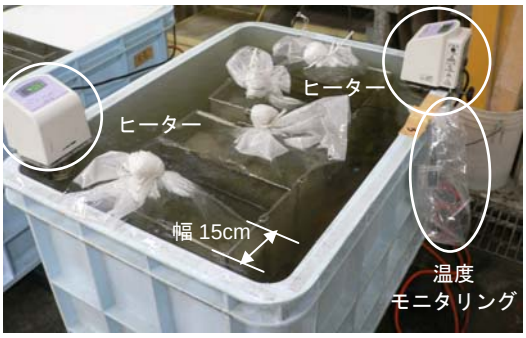
材料	記号	概要
セメント	LPC	低熱ポルトランドセメント 密度=3.22g/cm^3，比表面積=3,630cm^2/g
フライアッシュ	FA	Ⅱ種：密度=2.29g/cm^3， 比表面積=3,810cm^2/g
膨張材	LEX	石灰系膨張材：密度=3.05g/cm^3
石灰石微粉末	LS	密度=2.70g/cm^3，比表面積=5,390cm^2/g
細骨材	S	石灰砕砂：密度=2.66g/cm^3，FM=2.76
混和剤	SP1	高性能 AE 減水剤，標準形：，カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物
	Ad1	減水剤，超遅延形：，変性リグニンスルホン酸系化合物とオキシカルボン酸化合物の複合体
	As	空気量調整剤：ポリアルキレングリコール誘導体

2.2 試験方法

(1) 試験条件

廃棄体の発熱影響による周辺の温度上昇が最高温度で 60℃であると仮定し[5)]，フレッシュ性状確認試験を実施する環境温度を 20℃，40℃，60℃の 3 水準とした。なお，本検討では，実施工適用時のモルタルの運搬条件を考慮し，出荷から荷降しまで 60 分程度かかることから，練り上がり後 60 分までは 20℃恒温室内，それ以後は上記 3 水準の環境温度で試験を行った。

環境温度 40℃，60℃の試験に用いる試料は，各経過時間で実施するフレッシュ性状確認試験に必要な 1 回分の容量毎に袋詰めし，60 分経過時点から所定の時間まで専用カゴ内に静置して湯せんした。湯せん状況を**写真－1** に示す。ここでは，専用カゴに幅 15cm の仕切り網を設置することにより，実際の廃棄体狭隘部と同様に試料が幅 15cm の両側から平面的に温度の影響を受けるという実施工の環境を模擬している。温水槽は電熱ヒーターにより一定温度に制御しており，十分な容量の温水槽を用いることで，モルタル試料投入時にも温度変化がないことを，温度モニタリングにより確認している。なお，環境温度 40℃，60℃でのフレッシュ性状確認試験は，各所定時間経過時点で袋詰めしたモルタル試料を温水槽から素早く取り出し，常温環境下で実施することとした。これは，高温環境において高い流動性を保持しているモルタル配合にとって，試料取り出しから試験の実施までに受ける短時間の温度影響は小さいと考えられること，また試験時の作業性に配慮して決定したものである。



写真－１　モルタル湯せん状況

(2) 試験実施項目および品質管理目標値

モルタル練り上がり後，各経過時間における試験の実施項目を**表－３**に示す。また，ブリーディング試験，凝結時間試験，圧縮強度試験を，上記環境温度 3 水準においてそれぞれ実施した。充填材に期待される性能に対し，本検討で設定した品質管理目標値を**表－４**に示す。

表－３　試験実施項目

試験項目		20℃			20,40,60℃	
		5 分後	30 分後	60 分後	90 分後	120 分後
フレッシュ性状確認試験	モルタル温度	○	○	○	○	○
	スランプフロー	○	○	○	○	○
	500mm フロー到達時間	○	○	○	○	○
	モルタル V 漏斗流下時間	○	○	○	○	○
	空気量	○				
	単位容積質量	○				
性能確認試験		ブリーディング試験，凝結時間試験，圧縮強度試験を各環境温度で実施				

表－４　充填材の品質管理目標値

期待する性能	確認項目	充填材
流動性 セルフレベリング	スランプフロー	750±50mm
	V 漏斗流下時間	7～13 秒
分離抵抗性	ブリーディング	3.0%以下
確実な充填	熱による影響	120 分までフレッシュ性状維持

2.3 予備検討

予備検討では，熱影響に対しスランプフローの経時ロスの抑制が期待できる市販の混和剤として，**表－５**に示す 4 種類の AE 減水剤と 2 種類の減水剤を選定し，混和剤の種類や組合せおよびその添加量が，練り上がり時のスランプフローや各環境温度におけるフローの経時変化に及ぼす影響について検討を行った。

検討開始にあたり，まずは基本配合に対し，高性能 AE 減水剤を単独で使用した場合のスランプフローの経時変化を測定した。**図－２**は SP1 を単独で使用した場合の測定結果を示しており，熱影響下でスランプフローが急激に低下する傾向が確認された。また，ここには示していないが，SP0，SP2，SP3 をそれぞれ単独使用した場合についても，同様の傾向が確認された。

続いて，凝結時間をコントロールする目的で高性能 AE 減水剤と減水剤を組合せる検討を実施した。その結果，混和剤の種類や組合せによって流動性能が大きく変動することが明らかとなった。検討の結果，最終的に SP1 と Ad1，あるいは SP3 と Ad1 を所定の添加量で組合せた場合のみ，**表－４**に示す目標値を満足する結果を得ることができた。一例として，環境温度 60℃における両組合せのスランプフローの経時変化を**図－３**，**図－４**に示す。いずれの組合せにおいても，120 分まで目標スランプフローである 750±50mm を保持していることが確認できる。ただし，SP3 と Ad1 の組合せでは，Ad1 の添加量を増加すると，練り上がり時のスランプフローの低下が顕著となり，練り上がり直後では管理目標値の範囲外となるため，前者の組合せに比べると品質管理が難しい。また，いずれの組合せにおいても，Ad1 の添加量が 0.2%では，60 分以降に若干スランプフローの低下が見られるが，添加量を 0.25%とすることにより，練り上がり時のスランプフローに大きな影響を与えず，熱影響下でのスランプロスを抑制できることが明らかとなった。本組合せ手法では，SP1（あるいは SP3）の添加量の調整によりスランプフローの大きさを，Ad1 添加量の調整によりスランプフローの経時ロス改善を独立して調整できることから，現場環境や材料の品質変動に対処しやすく，実施工への適用上大きなメリットがあると考えられる。

以上の結果を踏まえ，本試験では，各環境温度において最も安定した経時変化が確認された SP1 と Ad1 の組合せについて，**表－２**の配合に基づき詳細検討を実施した。

3. 本試験結果

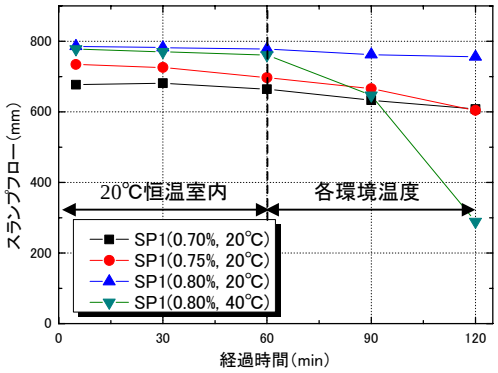
3.1 フレッシュ性状確認試験

(1) モルタル温度

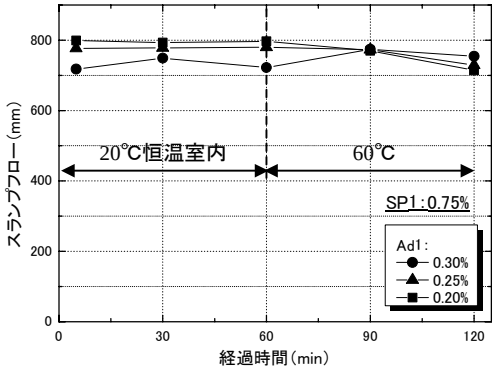
各経過時間において，モルタル温度を測定した。湯せん後のモルタル温度は，温水槽から素早く袋を取り出し，

表－５　予備検討で選定した混和剤の種類

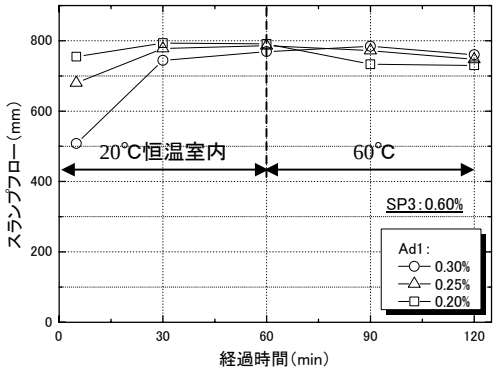
	名称	分類	成分
高性能AE減水剤	SP0	標準形（Ⅰ種）	カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物
	SP1	標準形（Ⅰ種）	ポリカルボン酸エーテル系化合物と配向ポリマーの複合体
	SP2	標準形（Ⅰ種）	ポリカルボン酸エーテル系化合物
	SP3	遅延形（Ⅰ種）	
減水剤	Ad1	遅延形（Ⅰ種）	変性リグニンスルホン酸化合物とオキシカルボン酸化合物の複合体
	Ad2	遅延形（Ⅰ種）	ポリオール複合体



図－２　SP1 のみを使用した場合のスランプフローの経時変化



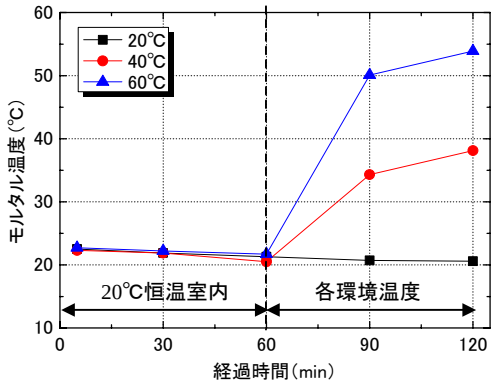
図－３　SP1 と Ad1 を組合せた場合のスランプフローの経時変化（環境温度 60℃）



図－４　SP3 と Ad1 を組合せた場合のスランプフローの経時変化（環境温度 60℃）

袋中のモルタル中心部に接触式のデジタル温度計を挿入して測定した。測定結果を**図－５**に示す。

モルタル温度は，60 分経過後までは 20℃恒温室内に静置された状態にあることから，緩やかに低下する傾向を示す。その後，40℃あるいは 60℃で湯せんを行った場合，120 分経過後（湯せん開始 60 分後）のモルタル温度は，それぞれ 38℃，54℃程度まで上昇している。

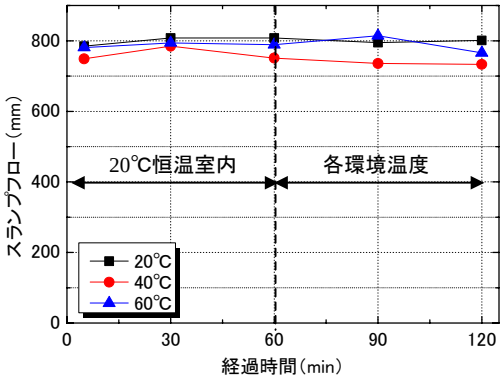


図－５　モルタル温度の経時変化

(2) スランプフロー

各経過時間において，モルタルのスランプフローを測定した。各環境温度におけるスランプフローの経時変化を**図－６**に示す。また，環境温度 60℃で 120 分経過後（湯せん開始 60 分後）のフロー状況を**写真－２**に示す。

図－６において，練上がり時のスランプフローに若干のばらつきは見られるものの，いずれの環境温度においても，品質管理目標値である 750±50mm を 120 分間保持していることが確認できる。このように，基本配合に対し SP1 と Ad1 を適切な添加量で添加した結果，環境温度によらず経時的にほぼ一定なスランプフローを示す高流動モルタルを実現することができた。このように経時変化が温度に依存しないという性質は，各廃棄体の発熱量のばらつきによりピット内の環境温度に局所的な違いが生じる実施工の充填環境を想定した場合に，所定の流動性を確実に発揮できることから，間隙のない充填を保証する上で理想的な性質であるといえる。



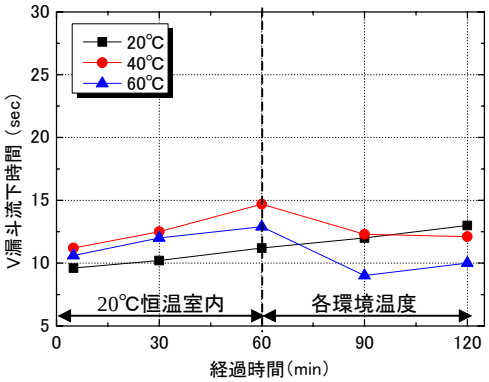
図－６　スランプフローの経時変化

写真－２　60℃，120 分経過後のフロー状況

(3) モルタルＶ漏斗流下時間

各環境温度におけるモルタルＶ漏斗流下時間の経時変化を**図－７**に示す。

Ｖ漏斗流下時間は，環境温度 20℃一定では，時間の経過とともに徐々に増加するのに対し，湯せんした場合には，湯せん後にＶ漏斗流下時間がいったん小さくなる傾向が見られる。また，この傾向は湯せん温度が高いほど顕著であり，**図－６**においても 60℃湯せん後のスランプフローの増加としてその影響が現れている。



図－７　Ｖ漏斗流下時間の経時変化

3.2 性能確認試験

(1) ブリーディング試験および凝結時間試験

各環境温度において，ブリーディング試験および凝結時間試験を実施した。試験方法は，それぞれ JIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」，JIS A 1147「コンクリートの凝結時間試験方法」に準拠している。各環境温度での各試験の測定条件を**表－６**に示す。

表－６　各環境温度での各試験の測定条件

環境温度	ブリーディング試験	凝結時間試験
20℃	20℃恒温室内で実施	
40℃	恒温乾燥炉内に試料を静置し，乾燥炉内でブリーディング水を採取	恒温乾燥炉内に試料を静置し，測定時のみ試料を取り出し，貫入抵抗値を測定
60℃		

表－７に，各環境温度におけるブリーディング率ならびに凝結始発時間，終結時間の測定結果を示す。同表より，環境温度が高くなると，凝結の始発時間ならびに始発から終結までの時間が短くなる傾向が確認できる。したがって，廃棄体発熱による高温環境では，ブリーディングを抑制する効果が期待できると考えられる。一方，環境温度 20℃では，大幅なブリーディング率の増加が見られ，**表－４**に示すブリーディング率の品質管理目標値を上回る結果となっている。これは，Ad1 を添加したことによる凝結時間の大幅な遅延がブリーディング率の増加に寄与した結果であると推測される。なお，環境温度 20℃でのブリーディングの抑制については，今後改善に向けた検討を実施する予定である。

表－７　各環境温度における凝結時間の比較（SP1+Ad1）

環境温度	ブリーディング率（%）	凝結時間（分）		
		始発	終結	始発－終結
20℃	3.92	675	858	183
40℃	0.78	427	498	71
60℃	0.52	391	438	47

(2) 圧縮強度

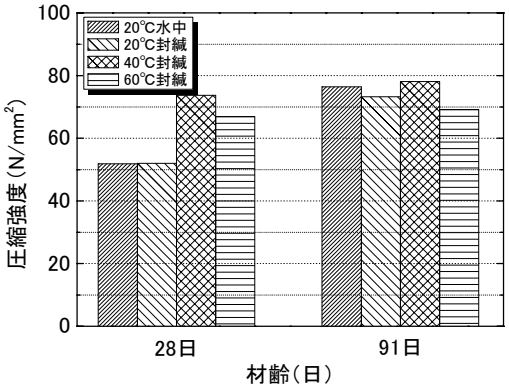
上述するフレッシュ性状を有する SP1 と Ad1 の組合せ配合について，圧縮強度試験を実施した。圧縮強度試験に用いる供試体は材齢 1 日で脱型し，その後材齢 28 日および 91 日まで各環境温度で養生を行った。養生は，環境温度 20℃の場合のみ水中および封緘養生を行い，40℃および 60℃の場合については恒温乾燥炉内で封緘養生を行った。圧縮強度試験の結果を**図－８**に示す。

環境温度 20℃で養生を行った場合，材齢の経過に伴い圧縮強度の増加が確認される。この間の強度の増加は，封緘養生よりも水中養生の場合の方が大きい。これは，本配合が低熱ポルトランドセメントを使用しており，また多量のフライアッシュを含んでいることから，材齢の経過に伴い水和反応，ポゾラン反応が進展した結果であると考えられる。

一方，環境温度 40℃あるいは 60℃で養生した場合には，材齢経過に伴う強度増加はほとんど見られず，材齢 28 日時点で 20℃養生 91 日圧縮強度とほぼ同等の強度が発現している。また，養生温度 40℃と 60℃で強度を比較すると，60℃養生の方が圧縮強度は小さい。この原因は定かではないが，材齢初期から高温履歴を受けるために，空隙構造の粗大化や水和阻害を生じた結果ではないかと推測される。

また，本試験結果と，既往の文献[6)]で報告されている同配合の Ad1 を添加しない場合の圧縮強度を材齢 91 日で比較すると，両者はほぼ同等であることが確認された。

以上のことから，Ad1 の添加がモルタルの圧縮強度に及ぼす影響はほとんどなく，また封緘養生であれば養生温度に関わらず最終的に十分な強度を期待できることが確認できた。ただし，実施工において充填後の養生が十分ではなく，充填材内部の温度上昇に伴い充填材上面から充填材中の自由水の逸散が許容される場合には，著しい水和阻害を生じる可能性も考えられる。したがって，充填後の養生については，十分に留意する必要がある。



図－８　圧縮強度試験の結果比較

4. まとめ

本検討では，既往の研究において高い物質移動抵抗性を有することが確認されているモルタルの基本配合に対し，使用する混和剤の種類や組合せおよび各々の添加量を調整することにより，高温環境下においても所定の要求性能を満足できる高流動モルタルの開発を試みた。試験では，発熱廃棄体による熱影響を想定し，環境温度 20℃，40℃，60℃の 3 水準に対し，フレッシュ性状確認試験ならびに性能確認試験を実施した。検討の結果，得られた知見を以下に示す。

基本配合に対し SP1 と Ad1 を適切な添加量で添加した結果，環境温度によらず 120 分間ほぼ一定なスランプフローを示す高流動モルタル配合を実現することができた。SP1 の添加量は練り上がり時のスランプフローを，また，Ad1 の添加量は流動性の保持性能向上を支配する傾向が見られた。したがって，両者の異なる性質を各々の添加量で独立して調整できることから，現場環境や材料の品質変動に対処しやすいという点においても，実施工への適用にメリットがある。ただし，常温環境では，減水剤の添加により水和が大幅に遅延するため，ブリーディング率が増加する傾向が見られた。ブリーディング率の低減については，今後の検討課題である。

圧縮強度については，Ad1 添加の有無による影響がないこと，また封緘養生であれば養生温度に関わらず最終的に十分な強度が期待できることが確認できた。

本検討の結果，実現に至った温度に依存しない流動性の保持性能を有する高流動モルタルの発想は，今回想定した余裕深度処分施設への適用に留まらず，例えば，夏場に日射を受けて高温状態にある鋼コンクリート合成構造の沈埋函や橋梁床版の充填などにも適用が可能であると考えられる。流動性が温度に依存しないことから，施工時に環境温度が刻々と変化する場合や空間の温度にばらつきがある場合でも，一定の流動性を確保でき確実な充填が期待できる。また，市販の混和剤の組合せにより実現可能であることから，混和剤費用が材料費の増加に及ぼす影響は小さく費用対効果も期待できる。

今後，本工事への適用を目指し，引き続き鋭意検討を進める予定である。

参考文献

1) 土木学会 エネルギー委員会 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会：余裕深度処分における地下施設の設計，品質管理および検査の考え方，pp.122-141，2009.7
2) 根木政広，寺田賢二，秋山吉弘，山田憲和，佐藤哲也，加藤博康：地下空洞型処分施設性能確証試験におけるセメント系材料の拡散抑制に関する検討，土木学会第 64 回年次学術講演会, CS5-025, pp.183-184, 2009.9
3) 杉橋直行，庭瀬一仁，金子岳夫，枝松良展：低熱ポルトランドセメントとフライアッシュ，膨張材を使用したコンクリートおよびモルタルの材齢 2 年までの諸特性（その 2），土木学会第 64 回年次学術講演会，CS5-027，pp.187-188，2009.9
4) 土木学会：コンクリートライブラリ 93 高流動コンクリート指針，pp.48-49，1998.7
5) 増田良一，佐々木規行，高村尚，奥津一夫：トンネル型処分施設の施設内温度上昇に対する影響因子，土木学会第 63 回年次学術講演会，CS5-046，pp.259-260，2008.9
6) 庭瀬一仁，金子岳夫，枝松良展，杉橋直行，西川洋二：低熱ポルトランドセメントとフライアッシュ，膨張材を使用したコンクリートおよびモルタルの材齢 2 年までの諸特性（その 1），土木学会第 64 回年次学術講演会，CS5-026，pp.185-186，2009.9