

論文 地下環境における高強度高緻密コンクリートの水浸透挙動に関する検討

渋谷 和俊^{*1}・小川 秀夫^{*2}・森 大介^{*3}・大和田 仁^{*4}

要旨：超ウラン核種を含む放射性廃棄物（TRU 廃棄物）を超長期間閉じ込めるコンクリート容器の開発において、高強度高緻密コンクリート（HSULPC）への水浸透挙動を評価した。水圧 1MPa または 10MPa 環境下に HSULPC を長期浸漬した結果、HSULPC に浸透した水は、浸漬 1 ヶ月までは主に毛細管空隙中に選択的に浸透し、その後浸透した水の一部は、結合水へと変化して固定される可能性が示された。また、HSULPC では、繊維補強材の混入や養生条件の違いによる止水性能の著しい低下はないことが示された。

キーワード：TRU 廃棄物、高強度高緻密コンクリート、水浸透、閉じ込め性能

1. はじめに

使用済み燃料の再処理施設や MOX 燃料加工施設から発生する超ウラン核種を含む放射性廃棄物（以下、TRU 廃棄物）のうち、放射能が 1GBq/ton を超えるものは、地下 300m 以深の深地層への処分（以下、地層処分）を行うこととされている¹⁾。地層処分においては、処分場を構成するセメント・コンクリート、ベントナイト等（以下、人工バリア）の持つ止水性及び収着性からなる核種の移行遅延効果と、主に周辺の岩盤（以下、天然バリア）の収着性を中心とした核種の移行遅延効果とからなる、多重バリアシステムにより、放射能が十分に減衰するまで、生物圏に放射性核種の影響が及ばないよう考えられている²⁾。

TRU 廃棄物の地層処分において、人間の生活環境（以下、生物圏）への影響が大きい放射性核種としては、再処理工程の排ガスから捕集される I-129 と、使用済み核燃料の被覆管から放出される C-14 とが挙げられる³⁾。これらは、半減期が長い（I-129 は約 1570 万年、C-14 は約 5730 年）ことに加え、人工バリア及び天然バリアへの収着性が極めて低く、特に人工バリアにおける減衰効果が十分に見込みにくいため、その生物圏への影響が他の核種と比較して大きく評価される³⁾。従って、長期間にわたって人工バリア内に放射性核種を留めておくことができれば、これらの核種に対しても十分な減衰効果を得ることが可能であるが、処分場周辺の地質媒体の透水性及び動水勾配によっては、その影響が大きくなることが懸念される。

そこで、著者らはこれまでに、C-14 の影響低減のための対策として、セメント系材料を用いた TRU 廃棄物処分用の廃棄体の開発を進めてきた⁴⁾。本廃棄体の特長は、

高い止水性能により地下水と廃棄物との接触を超長期間にわたり避け、核種を地下水とともに移行させることなく閉じ込めることができる、高強度高緻密コンクリート（High-Strength and Ultra-Low Permeability Concrete, 以下、HSULPC）を用い⁵⁾、一体成型法⁶⁾という手法で製作する点である。対象としている核種は C-14 であり、C-14 の半減期（約 5730 年）の約 10 倍、6 万年間の容器内への閉じ込めを可能にすれば、その影響を約 1/1000 ($1/2^{10}$) に低減することが可能であると考えられ⁷⁾、目標閉じ込め期間を 6 万年とした。

本廃棄体の核種閉じ込めのコンセプトは、廃棄体内部への地下水の浸透速度を考慮し、目標の閉じ込め期間は廃棄物と地下水が接触しないよう適切に設計し、長期の閉じ込め性を確保するというものである。従って、長期の閉じ込め性の成立に向けては、水の浸透挙動と、その浸透を助長する化学的な劣化現象を把握し、目標とする閉じ込め期間内に、地下水と廃棄物が接触しないことを提示する必要がある。

このような背景から、著者らはこれまでに、超長期にわたる水浸透挙動を評価するための検討を行ってきた。実験室内で再現不可能な超長期の水浸透挙動を予測するにあたっては、適切なモデルによる評価が必要であるが、それに向けては、HSULPC 中への水の浸透に関わる物性値の取得や浸透挙動の把握が重要となる。

著者らは既報で、200～300MPa の高水圧を試験体に加圧する加速試験により、HSULPC の水の拡散係数 ($1 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$) 及び透水係数 ($4 \times 10^{-19} \text{m/s}$) を算出した。さらに、水浸透と化学劣化を連成させた解析ツールによる長期予測を行い、地下水と廃棄物の接触を長期にわたり遮断できる可能性を示した⁸⁾⁹⁾。

*1 (株) 太平洋コンサルタント ソリューション事業部 (正会員)

*2 (株) 太平洋コンサルタント ソリューション事業部 グループリーダー (非会員)

*3 (株) 太平洋コンサルタント ソリューション事業部 工修 (正会員)

*4 (財) 原子力環境整備促進・資金管理センター 工博 (非会員)

処分環境で想定される水圧条件は、1～10MPa と考えられている⁴⁾。しかし、前述の成果は、高水圧による加速試験で得られた結果であり、実処分環境の場合には水の浸透挙動が異なる可能性も考えられる。そこで、処分環境を想定した条件下で試験を行い、実処分環境における水浸透挙動を評価する必要があると考えた。

本研究では、実処分環境下における HSULPC の水浸透挙動の把握を目的に、想定される範囲の水圧条件で長期の静水加圧による透水試験を行い、試料内部への浸透挙動と浸透した水分の存在状態について評価した。

2. 試験方法

2.1 配合及び養生条件

試験に用いた HSULPC の配合を表-1 に示す。HSULPC の配合は、超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）に従い設計した⁵⁾。同設計・施工指針（案）によると、HSULPC の配合は、繊維補強材を用いることが標準となっている。しかし本廃棄体の目的は、長期間地下水と廃棄物の接触を避けることであるが、補強材とマトリックス部の界面が欠陥部になり得ると考えられた。そこで、表-1 に示す通り、2 つの配合条件（繊維補強材の有無）を設定し、繊維補強材の有無で水浸透挙動を比較した。なお、繊維補強材には、長さが 15mm、直径が 0.2mm の鋼繊維を用いた。

また、HSULPC の標準養生は、脱型時まで湿潤養生し、脱型後に 90℃48 時間を保持する加熱養生としている⁵⁾。しかし、廃棄体の製作工程で、標準養生が適用できないケースも考えられることから、常温養生（20℃の湿潤養生）を設定し、2 つの養生条件で水浸透挙動を比較した。

2.2 静水加圧による透水試験（低水圧試験）方法

既報の 200～300MPa の高水圧による透水試験⁸⁾⁹⁾に対し、1 及び 10MPa の静水加圧による透水試験（以下、低水圧試験）を行った。低水圧試験では、以下の要領で、試料質量と水の浸透深さの測定を行った。

(1) 試料の作製及び浸漬

試料は、HSULPC の標準養生または 20℃環境で 6 ヶ月間の常温養生を施した HSULPC の円柱試験体（φ5×10cm）から φ5×2cm の円盤を切り出した。試料の浸漬は、20℃60%RH で恒量となるまで試料を乾燥させた後に開始した。試料は、各材齢で測定する回数分を浸漬した。

(2) 試験装置

試験装置の概要を図-1 に示す。試験では、水で満たされた容器内を圧縮空気で加圧し、等方圧で試料内に水を浸透させた。また、浸漬開始前に、試料の質量を測定し、その後試料を圧力容器内に設置し、加圧しながら浸漬した。水圧条件は、処分環境で想定される水圧条件の最小値（1MPa）と最大値（10MPa）で設定した。

表-1 HSULPC の配合

種別	単位量 (kg/m ³)			
	水	標準配合粉体※1	補強材 (鋼繊維)	高性能減水剤※2
補強材あり	180	2254	2vol%	26.0
補強材なし		2300	—	24.0

※1：標準配合粉体は、低熱ポルトランドセメント、シリカフューム、中間粒子及び骨材で構成される

※2：高性能減水剤は水の一部として用いた

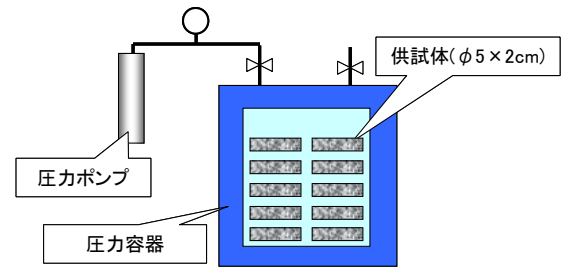


図-1 試験装置の概要

(3) 測定方法

浸漬開始から 1, 3, 6, 12, 24 及び 39 ヶ月経過後に、圧力容器からそれぞれの配合及び養生条件につき各 1 個ずつ試料を取り出し、試料表面の水を拭った後に試料の質量を測定した。その後、浸漬後の試料を割裂し、その断面の水浸透深さの最小値と最大値を測定した。

2.3 浸透した水の存在状態評価の試験方法

浸透した水の存在状態の評価では、以下の要領で、浸漬試料中の自由水及び結合水量を定量するとともに、水の浸透に起因する細孔構造の変化の有無を確認するため、空隙径分布の測定を行った。

(1) 試料の作製及び浸漬

試料は、HSULPC の標準養生を施した円柱試験体（φ5×10cm）から 1cm 角の直方体を切り出した。切り出した試料は、20℃60RH%条件で恒量になるまで乾燥させた後、所定期間、水圧 1MPa の水中環境に浸漬させた。なお、浸漬には図-1 と同じ試験装置を用いた。また、HSULPC は、繊維補強材がないものを用いた。試料は浸漬開始から 1, 3, 6 及び 12 ヶ月経過後に取り出した。

(2) 自由水量の算定方法

自由水量の割合は、既往の研究事例¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾を参考にし、105℃乾燥による質量減少率とした。また、20℃60%RH 環境での乾燥も行い、既往の研究事例¹³⁾を参考にし、105℃乾燥で逸散する水のうち、20℃60%RH で恒量となった時の質量減少率を毛細管空隙¹⁴⁾の中の水量、105℃乾燥質量と 20℃60%RH 乾燥質量の差分をゲル空隙¹⁴⁾の中の水量と見なし、経時変化を評価した。

表-2 浸透距離の測定結果

養生条件	水圧条件	補強材	目視で確認された水浸透距離 (mm)		
			12 ヶ月まで	24 ヶ月	39 ヶ月
標準	1MPa	なし	0	0	0
		あり	0	0	0
	10MPa	なし	0	0	5~7
		あり	0	0	0
常温	1MPa	なし	0	0	0
		あり	0	0	0
	10MPa	なし	0	4~6	2~4
		あり	0	0	0

(3) 結合水量の算定方法

結合水量の割合は、既往の研究事例¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾を参考にし、示差熱重量分析（以下、TG/DTA）による 105~1000℃までの質量減少率とした。TG/DTA に供する試料は、前処理としてアセトンに浸漬した後に真空乾燥を行い、40 μ m 以下に粉碎した後、さらに恒量となるまで真空乾燥を行った。TG/DTA の測定条件は、昇温速度を 10℃/min、測定雰囲気を N₂ (50ml/min) とした。

(4) 空隙径分布の測定

空隙径分布の測定は、微細な空隙構造の測定に適した BET 理論に基づく測定方法¹⁵⁾で行った。測定条件は、測定範囲を 1~30nm、測定雰囲気を N₂ とした。試料の前処理は、まず、所定期間浸漬後に質量を測定した後、試料をアセトンに浸漬し真空乾燥を行い、2.5mm 以下に粗砕した。その後、恒量になるまで再度真空乾燥を行い、1.2~2.5mm に粒度調整した試料を測定に供した。測定前の工程として、試料を試料セル内に投入した後、セルを 105℃に加熱しながら、ガスの放出が認められなくなるまで真空乾燥した。

3. 試験結果

3.1 静水加圧による透水試験(低水圧試験)

(1) 浸透距離の測定

浸透距離の測定結果の一覧を表-2 に、また、割断面面の外観観察結果の写真を写真-1 に示す。

観察の結果、浸漬開始より 12 ヶ月までは水の浸透を目視で確認することはできなかったが、常温養生では 24 ヶ月より、標準養生では 39 ヶ月より水の浸透を目視で確認することができた。目視で確認された浸透距離は、標準養生条件で 5~7mm、常温養生条件で 4~6mm であった。また、目視で確認できた条件は、水圧 10MPa の繊維補強材なしの条件であり、水圧 10MPa の繊維補強材あ

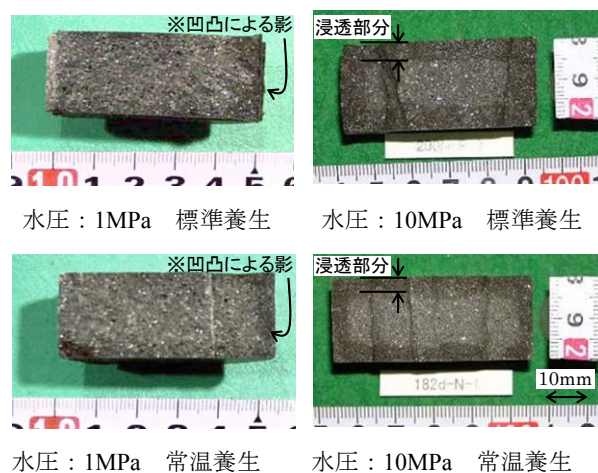


写真-1 浸漬試料の割裂断面写真

(浸漬期間: 39 ヶ月, 繊維補強材なし)

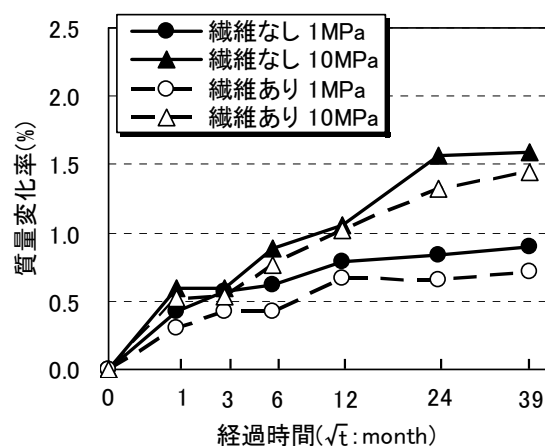


図-2 質量変化率の経時変化 (標準養生条件)

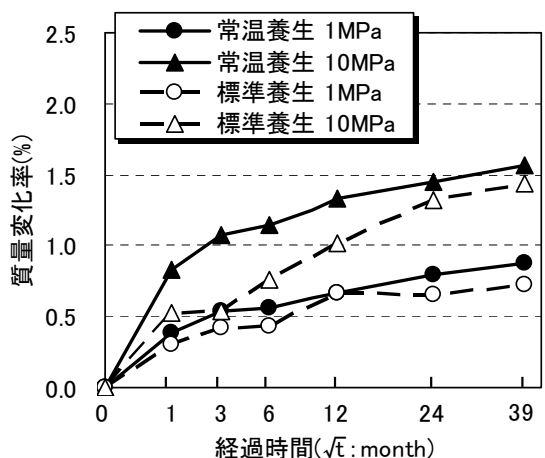


図-3 質量変化率の経時変化 (繊維補強材あり)

りの条件及び水圧条件 1MPa では認められなかった。目視で確認された水浸透距離について、標準養生と常温養生で比較すると、浸漬期間 24 ヶ月では常温養生の方が、浸漬期間 39 ヶ月では逆に標準養生の方が上回っていたが、常温養生の浸透距離が 24 ヶ月よりも 39 ヶ月の方が小さいことから、試料の個体差によるものと考えられた。

(2) 試料質量の経時変化

浸漬試料の質量変化率の経時変化を図-2 及び図-3 に示す。なお、質量変化率は、浸漬前の試料質量に対する質量増加量の百分率とした。

試験の結果、目視観察で水の浸透が認められなかった条件でも、浸漬期間の経過と共に試料質量は増加する傾向が認められた。試料質量は、39 ヶ月の浸漬期間で、繊維補強材の有無や養生条件によらず、水圧 1MPa で 1% 程度、水圧 10MPa で 1.5% 程度増加していた。質量の増加要因は、試験環境から、浸漬水が試料内部に浸透したものと考えられる。繊維補強材の有無で質量変化率を比較すると、図-2 より、どちらの水圧でも繊維なしの方が 0.2% 程度大きかった。また、養生条件の相違で比較すると、図-3 より、1MPa では 0.1~0.2% 程度、10MPa では 0.2~0.5% 程度常温養生の方が大きかった。

3.2 浸透した水分の存在状態の評価

(1) 自由水量及び結合水量の定量結果

浸漬期間 12 ヶ月までの自由水量及び結合水量の経時変化を図-4 に示す。

試験の結果、浸漬に伴って自由水、結合水の何れも増加する傾向を示した。浸漬開始以降の自由水量の経時変化に着目すると、毛細管空隙中の水分と考えられる 20℃ 以下の自由水量は、浸漬 1 ヶ月で 0.50% 増加し、その後は徐々に増加する傾向が認められた。また、ゲル空隙中の水分と考えられる 20~105℃ の自由水量は、ばらつきが認められるものの、浸漬 1 ヶ月以降は平均して約 3.3% で推移していた。

一方、浸漬開始以降の結合水量の経時変化に着目すると、未浸漬試料と浸漬 1 ヶ月試料で結合水量の差はほとんど認められないが、浸漬期間が 3 ヶ月を超えると、徐々に増加する傾向が認められた。浸漬 1 ヶ月から 12 ヶ月の間における自由水及び結合水の増加量を比較すると、自由水量が 0.1% の増加に対し、結合水量は 0.73% の増加であった。

(2) 空隙径分布の測定結果

浸漬期間 12 ヶ月までの浸漬試料の空隙径分布を図-5 に示す。

試験の結果、何れの試料条件でも、3~4nm 付近でゲル空隙¹⁴⁾と推定される細孔が認められた。この細孔に着目し結果を比較すると、ゲル空隙の細孔容積は、浸漬期間によらず概ね同程度であった。これは、自由水の定量結果で、ゲル空隙中の水分量に顕著な変化が認められなかった傾向と一致する。一方、10nm 以上の累計細孔容積に着目すると、浸漬期間 3 ヶ月以降の試料は、未浸漬試料に比べ、累計細孔容積が若干減少していたが、浸漬 3 ヶ月と 12 ヶ月を比較すると、概ね同程度の細孔容積であり、浸漬 3 ヶ月から 12 ヶ月の間では、見かけ上、30nm

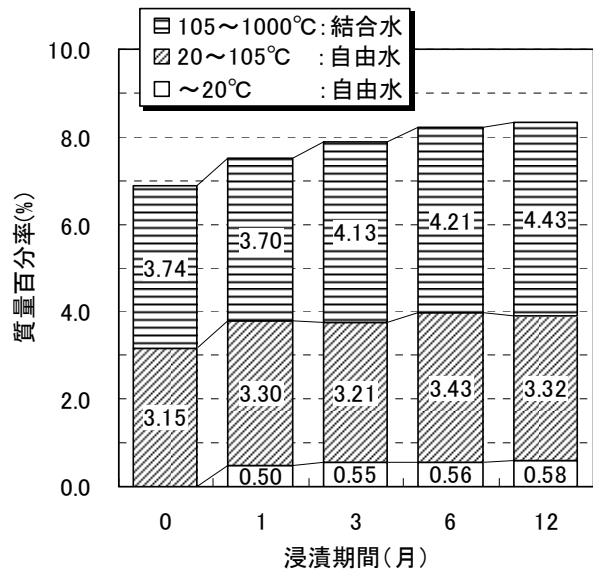


図-4 自由水量及び結合水量の経時変化

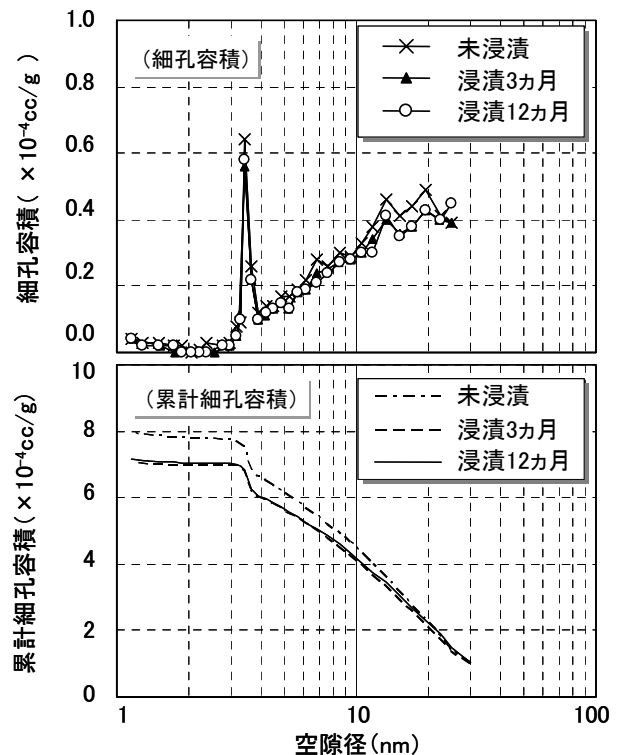


図-5 空隙径分布の経時変化

以下の空隙径分布に大きな変化は認められなかった。

4. 考察

4.1 HSULPC の水浸透挙動に関する考察

試験結果で述べたように、水の浸透を観察することができなかった試料でも、質量の変化が観察され、このことから、HSULPC 内に僅かながら水が浸透していることが示唆されたが、その浸透形態については明らかでない。既往の研究報告¹⁶⁾によれば、コンクリート空隙中の自由水のうち、液状水が移動するのに最低限必要な動水勾配

(始動動水勾配)が存在し、透水フロントの移動に伴って低下していく動水勾配がこの閾値を下回ることにより、液状水の移動がいずれは停止する可能性が高いとしている。即ち、HSULPC への水の浸透挙動は、液状水以外の形態、例えば水蒸気による浸透を想定する必要性もある。また、本試験は等方圧で試料内に水を浸透させているが、試料中の空隙は気体で満たされており、HSULPC のように系外に出にくい試料では、空気の層により水が浸透しにくくなる現象も想定される。本試験では、目視で水の浸透を観察できる条件とできない条件の相違点、並びに、目視で観察できない条件における水浸透深さについては明確でない。また、水の浸透形態と到達深さに関する実験的検証も十分ではないが、ここでは、得られた試験結果から推察される、標準養生の HSULPC 内への水の浸透挙動及び存在状態について考察する。

図-4 に示した通り、自由水量及び結合水量の定量の結果、時間の経過に伴い、自由水及び結合水がともに増加する傾向が認められた。自由水量及び結合水量の増加の程度を時系列で見ると、浸漬期間 1 ヶ月時点での質量増加は、毛細管空隙中の水分と考えられる 20℃以下の自由水量の増加が主であった。このことから、水分は毛細管空隙中に選択的に浸透しているものと推察される。

既往の報告¹⁷⁾によると、普通コンクリートにおいて、毛細管空隙は、物質の拡散の場として働き、毛細管空隙を減少させ、毛細管空隙が連結しないようにすることが物質移動抑制に重要であるとされている。このことから、空隙率の低い HSULPC においても、普通コンクリートと同様、物質移動は、毛細管空隙の水分状態に大きく左右されると考えられる。

浸漬期間 3 ヶ月以降では、結合水量が大きく増加する傾向が認められた。累計細孔容積の測定で、未浸漬試料に比べ、浸漬期間 3 ヶ月以降は若干減少していた結果と併せて考察すると、浸透した水の一部は、水和反応等により結合水として固定され、細孔容積に変化が生じたものと考えられた。

結合水の増加量は、自由水のそれを上回っており、浸透した水は、時間の経過に伴い、徐々に結合水として固定されているものと考えられた。一方で、図-5 によると、浸漬期間 3 ヶ月以降、30nm 以下の空隙径分布の測定で大きな変化は認められず、結合水量の測定結果と相反する結果となった。この要因としては、本研究における空隙径分布測定の上限は 30nm であるが、これよりも大きい空隙径で変化し、見かけ上、空隙径分布の変化を検出できなかった可能性が考えられた。これらを総括すると、HSULPC における水の浸透挙動及び水の存在状態は、次のように推察される。

先ず、水分は HSULPC 内の毛細管空隙より選択的に浸

透する。更に時間の経過に伴い、浸透した水の一部は水和反応等により結合水として固定されるものと推察される。

4.2 繊維補強材の有無に関する考察

HSULPC における繊維補強材の混入が水浸透に及ぼす影響に関しては、補強材が混入された試料では繊維とマトリックス部の界面が欠陥部となり、無混入のものに比べ水が浸透しやすくなると考えられた。しかし、図-2 に示した通り、試料質量の経時変化では、水圧条件によらず、繊維ありの方が繊維なしより 0.2%程度小さく、予想に反する結果となった。この要因について、実験的検証は十分ではないが、次のように推察される。HSULPC は一般的なコンクリートに比べ極めて低い水結合材比である。故に繊維とマトリックス部の界面において、いわゆる遷移帯のようなものが生成しにくく、付着が良好な状態となっていると推察される。このことから、HSULPC では繊維補強材を混入したことによる著しい止水性能の低下はないものと考えられた。

4.3 養生条件に関する考察

HSULPC の養生条件が水浸透に及ぼす影響に関して、標準養生と常温養生で比較すると、目視確認の結果では、表-2 に示した通り、初めて目視で水浸透が確認された時期が、標準養生と常温養生で異なっていた。このような現象が生じた要因は、本試験で得られた目視観察の結果が少ないため、検証は十分ではないが、養生条件の違いにより生じたものと考えられる。

浸透した水を視覚的に確認できるかは、試料内の湿度分布、細孔中の水分の凝集、細孔への水分の吸着等の状態が影響すると考えられる。また、4.1 項において、標準養生の試料内に浸透した水の一部は、結合水として取り込まれている可能性を示したが、試料質量の増加量が同程度であっても、常温養生における試料中の自由水量及び結合水量の割合は、標準養生のそれと異なる可能性がある。つまり、試料中の自由水量及び結合水量の差に起因するものと推察したが、本試験では要因の特定には至らなかった。

一方、試料質量の経時変化は、図-3 に示した通り、1MPa では 0.1~0.2%程度、10MPa では 0.2~0.5%程度、標準養生より常温養生の方が大きかった。これは、常温養生に比べ標準養生は組織が緻密で、水が浸透しにくいためと考えられた。しかし、養生条件の違いによる質量変化率の差は僅かであり、また、時間経過とともに小さくなる傾向にあることから、HSULPC では養生条件の違いによる著しい止水性能の低下はないものと考えられた。

5. まとめ

本試験で得られた成果を以下にまとめる。

- (1) 1 及び 10MPa の静水圧環境に長期間浸漬した試料の浸透深さを測定した結果、水の浸透は、浸漬開始より 12 ヶ月まで目視で確認することはできなかったが、10MPa のみで、常温養生では 24 ヶ月より、標準養生では 39 ヶ月より確認することができた。また、水浸透が目視観察で認められなかった試料でも、質量の増加が観察され、HSULPC 内に僅かながら水が浸透していることが示唆された。
- (2) HSULPC における水の浸透挙動は、自由水量及び結合水量の定量の結果より、浸漬 1 ヶ月試料では主に毛細管空隙中の水分と考えられる自由水量が増加したことから、水分は毛細管空隙中に選択的に浸透しているものと推察された。また、時間の経過に伴い、浸透した水分の一部は、結合水として取り込まれている可能性が示された。
- (3) HSULPC における繊維補強材の混入が水浸透に及ぼす影響は、繊維有無の試料質量の経時変化より、水圧条件によらず繊維ありの方が繊維なしより 0.2% 小さかった。このことから、HSULPC では、繊維補強材の混入による止水性能の低下はないものと考えられた。
- (4) HSULPC の養生条件が水浸透に及ぼす影響は、標準養生と常温養生の比較より、目視観察では水浸透距離が異なった。これは、試料中の自由水量及び結合水量の差に起因するものと推察したが、本試験では要因の特定には至らなかった。一方、試料質量の経時変化では、常温養生の質量増加は標準養生より大きかったが、養生条件の違いによる質量変化率の差は僅かであり、その差は時間経過とともに小さくなる傾向にあることから、HSULPC では養生条件の違いによる著しい止水性能の低下はないものと考えられた。
- 3) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構：TRU 廃棄物処分技術検討書 -第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-，2005. 9
- 4) (財) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 18 年度 地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査 放射化金属廃棄物炭素移行評価技術調査報告書，2007. 3
- 5) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー113，2004. 9
- 6) Kazutoshi Shibuya et al.: Development of waste package for TRU-disposal (3) -Examination of manufacturing technique of TRU waste package made of High- Strength and Ultra Low-Permeability concrete-, Proc. of GLOBAL 2005, CD-ROM, Oct. 2005
- 7) Hitoshi Owada et al.: Development of waste packages for TRU-disposal (1) -Concepts and Performances-, Proc. of GLOBAL 2005, CD-ROM, Oct. 2005
- 8) 坂本浩幸，武井明彦，川寄透，片桐誠，名和豊春，魚本健人：高強度高緻密モルタルを用いた放射性廃棄物処分廃棄体の開発(1) -静水圧加圧法を用いたモルタルへの水浸透挙動の評価-，土木学会第 57 回年次学術講演概要集，共通セッション，pp.487-488，2002. 9
- 9) Tooru Kawasaki et al.: Development of waste package for TRU-disposal (4) -Evaluation of Confinement Performance of TRU Waste Package Made of High-Strength and Ultra Low-Permeability Concrete-, Proc. of GLOBAL 2005, CD-ROM, Oct. 2005
- 10) セメント協会：セメント硬化体委員会報告書，pp. 273-289, 2001.5
- 11) 高橋茂：結合水と乾燥条件，セメント・コンクリート，No. 539，pp. 52-53, 2001.5.
- 12) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの試験・分析マニュアル，pp. 55-60, 2000.5
- 13) 郭度連，國府勝郎，宇治公隆：コンクリートの乾燥下における水分の存在状態および経時変化，コンクリート工学論文集，第 16 巻第 3 号，pp.1-10, 2005.9
- 14) セメント協会：C&C エンサイクロペディア，pp.171-172, 1996
- 15) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの試験・分析マニュアル，pp. 128-129, 2000.5
- 16) 高岡秀明，岸利治：コンクリート中のび微速透水現象の支配メカニズムとダルシー則適用性に関する研究，生産研究 57 巻 2 号，pp.123-126, 2005
- 17) セメント協会：わかりやすいセメント科学，pp.93-104, 1993

謝辞

低水圧法の試験は、日立 GE ニュークリア・エナジー社（当時社名は日立製作所）と共同で実施した。また本報告は、経済産業省からの委託による「地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査 放射化金属廃棄物炭素移行評価技術調査 -C-14 の長期閉じ込め技術の高度化-」の成果の一部である。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁：TRU 廃棄物の地層処分について考えてみませんか，pp.8, 2007.2
- 2) 核燃料サイクル機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 -地層処分研究開発第 2 次取りまとめ-，pp.1-12, 1999.11