

中・低レベル放射性廃棄物処理用セメント固化体の 圧縮強度と動弾性係数の関係

申, 相澈
九州大学大学院人間環境学府空間システム専攻 : 研究生

金, 振晩
韓国公州大学校建築工学科 : 教授

小山, 智幸
九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門

<https://doi.org/10.15017/1462171>

出版情報 : 都市・建築学研究. 24, pp.123-130, 2013-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
バージョン :
権利関係 :

中・低レベル放射性廃棄物処理用セメント固化体の 圧縮強度と動弾性係数の関係

Relationship between Compressive Strength and Dynamic Modulus of
Elasticity in the Cement Based Solid Product for Consolidating
Disposal of Medium-Low Level Radioactive Waste

申 相澈*, 金 振晩**, 小山智幸***

Sangchul SHIN, Jinman KIM and Tomoyuki KOYAMA

Recently, the medium-low level radioactive waste from nuclear power plant must be transported from temporary storage to the final repository. Medium-low level radioactive waste, which is composed mainly of the liquid ion exchange resin, has been consolidated with cementitious material in the plastic or iron container. Since cementitious material is brittle, it would generate cracks by impact load during transportation, signifying leakage of radioactive ray. In order to design the safety transporting equipment, there is a need to check the compressive strength of the current waste. However, because it is impossible to measure strength by direct method due to leakage of radioactive ray, we will estimate the strength indirectly by the dynamic modulus of elasticity. Therefore, it must be identified the relationship between of strength and dynamic modulus of elasticity. According to the waste acceptance criteria, the compressive strength of cement based solid is defined as more than 3.44 MPa (500 psi). Compressive strength of the present solid is likely to be significantly higher than this baseline because of continuous hydration of cement during long period. On this background, we have tried to produce the specimens of the 28 day's compressive strength of 3 to 30 MPa having the same material composition as the solid product for the medium-low level radioactive waste, and analyze the relationship between the strength and the dynamic modulus of elasticity. By controlling the addition rates of AE agent, we made the mixture containing the ion exchange resin and showing the target compressive strength(3 ~ 30 MPa). The dynamic modulus of elasticity of this mixtures is 4.1~10.2 GPa, about 20 GPa lower in the equivalent compressive strength level than that of ordinary concrete, and increasing the discrepancy according to increase strength. The compressive strength and the dynamic modulus of elasticity show the liner relationship.

Keywords: *Medium-low level radioactive waste, Ion exchange resin, Air entraining agent, Compressive strength, Dynamic modulus of elasticity*

中・低レベル放射性廃棄物, イオン交換樹脂, 空気連行剤, 圧縮強度, 動弾性係数

1. はじめに

放射性廃棄物は核エネルギーを利用する過程で発生する原子力副産物である。放射性廃棄物は、含まれている放射性核種に応じて高レベル放射性廃棄物と中・低レベル放射性廃棄物に大きく分類される。

高レベル放射性廃棄物は、原子炉において使用済み核燃料として発生するものであり、ウランなどの分裂で生じたすべての種類の核分裂生成物を含んでいる。一時保存以外の処理経験を有している国はなく、通常の発電所

の内部に特殊設計された水槽の中に一時的に保持されている。中・低レベル放射性廃棄物は、原子力発電所から出る廃フィルタ、廃潤滑油、廃イオン交換樹脂などの中レベル廃棄物と、作業服、手袋、ブーツ、廃部品、放射性同位元素廃棄物などの低レベル廃棄物からなる。中・低レベル廃棄物の処理方法は、特別な操作をすることなく、放射能が自然放射能レベルに下がるまで、人間や自然界から完全に隔離し、原子力発電所内の一時保管施設や岩盤洞窟に格納して保管するものである¹⁾。

本研究で対象としている廃イオン交換樹脂は、原子力関連施設の放射性液体廃棄物の処理過程で発生するもので、主にセメントやアスファルト、高分子物質を用いて

* 空間システム専攻研究生

** 韓国公州大学校 建築工学科 教授, 工博

*** 都市・建築学部門

固化するか、コンクリートに密閉された 200L ドラム管に入れて発電所内に保管されている²⁵⁾。韓国では、年間にドラム管数千本分の中・低レベル放射性廃棄物が発生しており、これらは、現在、各原発の一時貯蔵庫に保存されている。しかし近年、一時貯蔵庫が飽和状態に到達し、最終廃棄物処分場（韓国慶尚北道慶州市、2014 年竣工予定）に移送して管理すべき事態に至った。

原発敷地内に一時的に保存して管理しているこれらの放射性廃棄物ドラム管を最終廃棄物処分場に搬送するためには、ドラム管の内容物の物理・化学的特性が処分事業者が提示した買収基準⁶⁾を満たしていることを確認する必要がある。特に、分析項目の圧縮強度は、破壊試験を実施すると、放射性物質の漏出が懸念されるなど、安全上の問題が発生する⁷⁾。したがって、非破壊試験により廃棄物の圧縮強度を予測する必要があるが、一般的な‘非破壊試験によるコンクリートの圧縮強度推定式’を適用するのは材料構成が異なるため適切ではなく、廃イオン交換樹脂放射性廃棄物と同様の試験体を再現して圧縮強度と非破壊試験を実施した後、その関係を分析して適用する方法がより合理的である。買収基準によれば、廃棄物は基準値以上の圧縮強度を持つ必要があり、セメントなどの硬質固化体の場合、圧縮強度は、3.44 MPa (500 psi) 以上と規定されている。現状では、過去に処理した廃棄物の圧縮強度を正確に知ることができないが、セメントの水和反応は、長い時間をかけて強度発現に寄与するために、基準値を大幅に上回る可能性もある。よって本研究では、中・低レベル放射性廃棄物処理用セメント固化体の材料構成を維持しながら、基準における最低限度付近の 3 MPa から比較的高強度の 30 MPa 程度までの広い範囲の強度を有するセメント固化体の製造を試みた。このため、AE 剤の使用量を多段階に精密に調整し、様々な強度を有するイオン交換樹脂固化体を製造し、これを対象に、圧縮強度と動弾性係数の関係を導出した。

2. 研究の内容及び範囲

2.1 研究計画

本研究では、1989 年に韓国電力公社技術研究院が発表した報告書「放射性廃棄物の固化工程の開発」⁸⁾の内容に基づいて廃イオン交換樹脂を固化させた廃棄物を、再現の対象とした。上記の廃棄物と同様の試験体を製造するために放射能吸着工程で実際に使用される陰イオン交換樹脂を使用しており、調合条件及び調合比は、当時の調合を再現するために、報告書の内容に基づいている。

本研究は、Fig. 1 に示すように 2 段階に分けられる。第 1 段階は、予備実験として、AE 剤の使用量と使用方法に応じた強度発現特性を検討し、圧縮強度と AE 剤の使用量との関係を推定した。第 2 段階実験では、1 次実験の結果をもとに最適な調合を導出して試験体を製造するこ

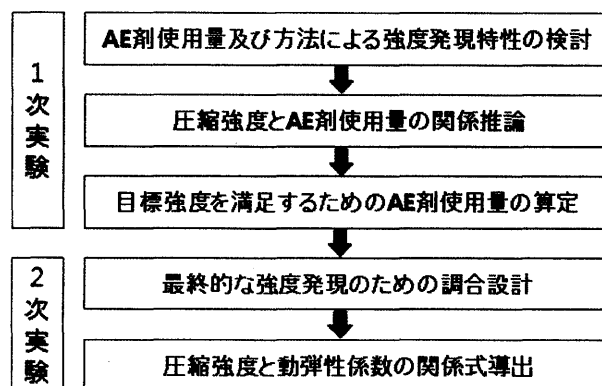


Fig. 1 Process of research

とにより目標強度を満足させて物理・力学的特性を検討し、最終的に固化体における圧縮強度と動弾性係数の関係式を提示した。

2.2 使用材料

2.2.1 固化材料

本研究に使用された固化材料の化学組成を Table 1 に示す。材料は、過去に廃イオン交換樹脂の固化に使用されたものと同じセメントと消石灰を使用した。セメントは、KS(Korean Standard) L 5201 の規定を満足する韓国の H 社の普通ポルトランドセメント(密度 3.15 g/cm³, 粉末度 3,000 cm³/g) を使用し、消石灰は、CaO の含有量が 90% 以上の 1 級消石灰を使用した。

Table 1 Chemical composition of solidifiable materials

Type	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	SiO ₃	K ₂ O	SrO	ZrO ₂	TiO ₂
PC ¹⁾	72.1	11.2	2.3	0.1	5.5	5.2	2.7	0.1	-	0.3
CH ²⁾	93.8	1.4	0.6	0.1	1.4	1.5	-	0.1	-	-

1) PC : Portland Cement, 2) CH : Calcium Hydroxide

2.2.2 イオン交換樹脂

実際の廃イオン交換樹脂放射性廃棄物と本実験のイオン交換樹脂を固化させた試験体と同じ条件になるように実験を実施した。ただし樹脂は未使用のものを用いた。イオン交換樹脂は、放射性液体廃棄物処理の際にイオン交換工程で用いているもので、Cl をイオン交換基として持ち、スチレンとジビニルベンゼンの共重合体をマトリクスとする強塩基性陰イオン交換樹脂である。軽い多孔性固体として径 1~2mm の球状になっており、含水率は約 50% であるが、樹脂内部の水分はセメントの硬化には影響を与えない。一方、樹脂粒子の間の空隙を満たしている水分は、セメントの硬化に影響を与えるため、樹脂の粒子の周辺に静電的に囲まれた水分がなく、樹脂の内部にのみ水分が存在している状態で使用した。陰イオン交換樹脂の形状及び特性を Photo. 1、Table 2 に示す。

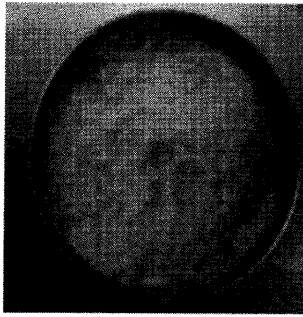


Photo 1 Anion exchange resin

Table 2 Properties of anion exchange resin

Matrix	Styrene divinyl-benzene copolymer
Physical form	Pale yellow translucent beads
Ionic form	Chloride
Specific gravity	1.063 ~ 1.093
Moisture (%)	49 ~ 55
Exchange capacity (eq/ℓ)	above 1.3
Effective diameter (mm)	0.35 ~ 0.55

2.2.3 空気連行剤

様々な強度を有する試験体を製造するために、マトリクスの内部に空隙を導入し、強度を低下させる目的で使用した AE 剤は、陰イオン性界面活性剤を主成分とするコンクリート用空気連行剤を使用した。

2.2.4 気泡

気泡の製造は Fig. 2 で示したように空気圧出方式で気泡剤の希釈水溶液を流入させた後、発泡機を利用して製造した。製造された気泡は、固化材料とイオン交換樹脂が混合されたスラリーに直接投入してさらに練混ぜられることになる。Photo 2、3 は、気泡発生器と発泡した気泡の外観を示す。

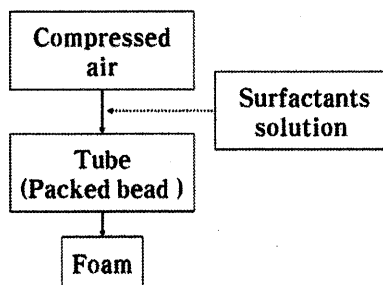


Fig. 2 Schematic diagram of foam production method

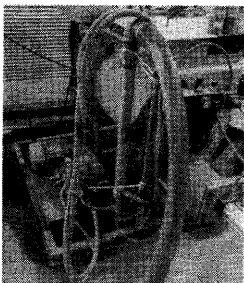


Photo 2 Foam generator

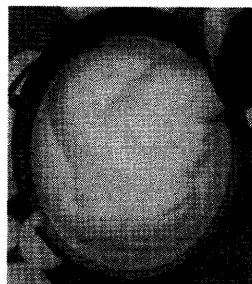


Photo 3 Produced foam

2.3 実験方法

試験体は、普通ポルトランドセメント、消石灰及び陰イオン交換樹脂を空練りした後、水を添加して練り混ぜたセメントスラリーに AE 剤を投入して高速で攪拌して製造した。製造した試験体は $\phi 100 \times h 200$ mm の鋼製型枠に打ち込んで温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿チャンバーで気乾養生した。イオン交換樹脂は、水と接触すると膨張する特性があり、またセメントの乾燥収縮によるひび割れによって亀裂から放射性物質が漏洩する可能性があるため密封して外気と遮断した状態で養生した。

測定項目中にフローは「KS L 5111、セメント試験用フローテーブル」に準じて実施し、圧縮強度は、「ASTM C495-99a Standard test method for compressive strength of lightweight insulating concrete」によって測定した。また、スラリー状態及び硬化後の試験体の単位容積質量と空気量は「KS F 2409、フレッシュコンクリートの単位容積質量及び空気量試験方法(質量法)」により算出した。動弾性係数は「KS F 2437、共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数及び動ポアソン比の試験方法」によって測定した。

2.4 調合設計

先ず、様々な強度を有する試験体の調合設計のために予備実験により 7 日強度と 28 日強度の相関関係を検討し、その結果を Fig. 3 に示した。これによりイオン交換樹脂を混合したセメント固化体の 7 日と 28 日強度の相関関係は、次の Eq. (1) で表すことができる。

$$\sigma_{28} = 1.10 \times \sigma_7 + 0.90 \quad \text{Eq. (1)}$$

ここで、 σ_{28} : 28 日の圧縮強度(MPa)
 σ_7 : 7 日の圧縮強度(MPa)

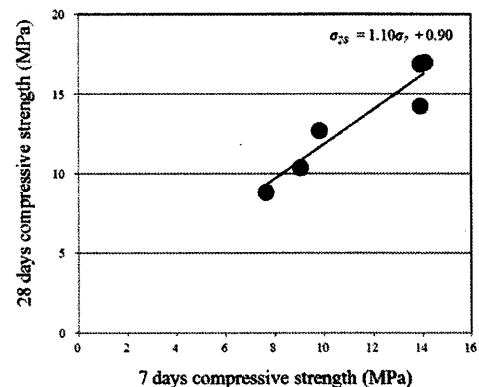


Fig. 3 Relationship between 7 and 28 day compressive strength from the previous experiment

調合の算定は、1 次実験で測定した材齢 7 日における強度に基づいて、上記の式を適用して、28 日の強度を推定した後、推定された強度値と使用された AE 剤添加率との関係を導出し、それぞれの強度レベルに必要な最適な AE 剤添加率を逆算して 2 次実験に適用した。

3. 1次実験 — AE 剤使用量及び方法による強度発現特性の検討

3.1 実験計画

1次試験は、廃イオン交換樹脂を使用したセメント固化体の強度範囲を調べるための実験として、AE 剤を直接使用して目標強度を満足させる方法と、AE 剤を希釈した水溶液を発泡させて作った気泡を混入して空隙率を向上させる方法の二つを使用した。報告書で提案された最適な調合として W/B を 35%、樹脂混入率は 17.9% に固定した後、AE 剤の添加量は、結合材に対し質量比で 0.0~2.0% の 9 レベルに設定した。また、発泡した気泡を 10、30、50、70% の容積比でスラリーに混入した。試験体はフレッシュ状態でフローを測定し、硬化後、材齢 3 日と 7 日における圧縮強度を測定し、強度発現性状の把握を試みた。また、測定された圧縮強度と AE 剤の使用量の相関関係を分析し、目標強度を満足できる試験体の製造のための AE 剤使用量を推定した。1 次実験の計画と調合は、Table3、4 に示す。

3.2 実験結果及び考察

3.2.1 フロー

報告書で規定されている最小の流動性 (210mm) と比較した各試験体のフロー測定結果は、Fig. 4 に示す。フローは、AE 剤を添加していない場合約 217 mm、AE 剤を添加すると、やや増加することがわかった。一般的にコンクリートに AE 剤を添加すると、コンクリート内に球状の微細な独立気泡を発生させ ball bearing 効果によって打設時の作業性が向上するが、本研究でも同様の傾向がみられた。しかし、AE 剤添加率の増加に伴う変化は認められなかった。

一方、気泡発生器を介して発泡させた気泡を混合して試験体を製造した場合には、気泡の混入率が増加するにつれて、フローは減少することがわかった。これは、気泡混入率が増加するにつれて、単位質量が低い気泡が容積の大部分を占めるようになり、スラリー密度が低くなって流動エネルギーが相対的に減少したためと考えられる。また、長鎖構造の疎水基の気泡剤分子が水の界面に配列されて、気泡薄膜内の排水速度を減少させ液体の粘性が増加されるためであると判断される^{9,10)}。特に、気泡

Table 3 Plan of first experiment

Factor	Levels	Test items
Addition rates of AE agent (%)	0.0, 0.1, 0.2	- Flow - Compressive strength (3, 7days)
	0.3, 0.4, 0.5	
	1.0, 1.5, 2.0	
	10*, 30*, 50*, 70*	

* : Addition rates of foams

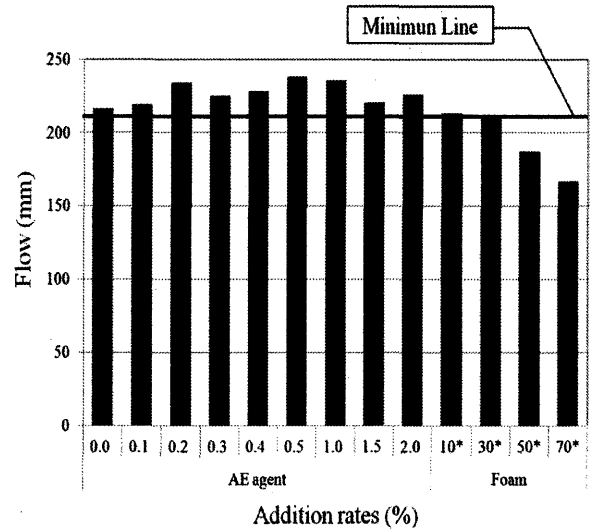


Fig. 4 Results of flow test

混入率が 50% と 70% の場合、最小フロー値を満足していなかったため、過去に処理したセメント固化体の再現には無理があると思われる。

3.2.2 圧縮強度

Fig. 5 は 1 次試験の圧縮強度測定結果を示す。AE 剤を使用していない試験体の圧縮強度は、材齢 7 日で約 26 MPa を示し、AE 剤を使用すると、マトリックス内の空隙の導入効果が現れ、圧縮強度は減少することが確認された。0.1% の AE 剤添加率でも圧縮強度は約 60% 程度と大きく減少し、その後は、AE 剤添加率が増加しても、圧縮強度の減少幅が大きくないことが確認された。したがって、0.1% 以下の AE 剤添加率についても検討することにより、目標とする範囲 (3~30 MPa) で様々な強度を有する試験

Table 4 Mixing design of first experiment

Resin (%)	W/B (%)	AE agent (%)	Foam ratio (%)	Water (kg/m ³)	Unit volume (ℓ/m ³)				Unit weight (kg/m ³)			AE agent (kg/m ³)
					PC	CH	AER*	Foam	PC	CH	AER	
17.9	35	0 ~ 2	0	372	306	41	281	0	965	97	312	0~21
		0	10	334	276	37	253	100	869	87	281	0
		0	30	260	214	29	197	300	676	68	218	0
		0	50	186	153	21	141	500	483	48	156	0
		0	70	111	92	12	84	700	290	29	94	0

* AER : Anion Exchange Resin

体の製造が可能であると判断される。また、発泡した気泡を混入した試験体の場合にも、圧縮強度のコントロールが可能なが分かった。しかし、気泡を70%混入した試験体の場合、手で触ってもこなごなになるほど低強度であったため、圧縮強度を測定することができなかった。

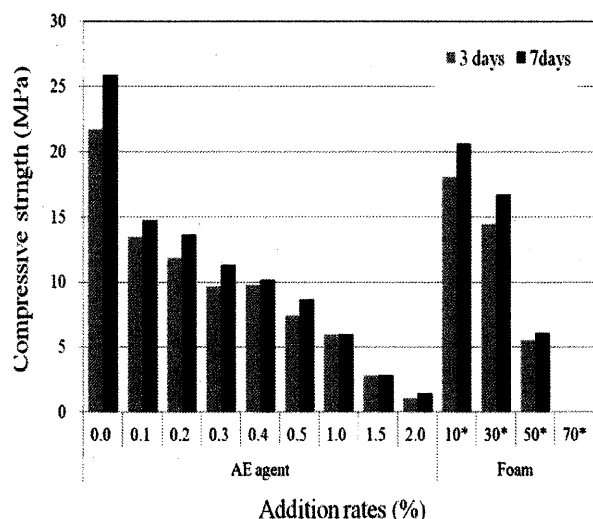


Fig. 5 Results of compressive strength test

1次実験の結果、目標強度を満足するための強度のコントロールは、AE剤を直接使用した場合と気泡を製造して混合した場合の両方も可能であると判断される。しかし、AE剤を直接使用した場合に実験が簡単なだけでなく、より安定的で精密な結果を示した。また、同じ強度水準での作業性が有利であるため、AE剤を添加する方法で十分に強度の範囲を多様化することができるものと判断した。

3.3 強度水準別 AE 剤添加率算定

先行実験で得られた結果を分析検討し、目標強度を満足して試験体を製造するための最適の割合を算定した。この割合の算定は、Fig. 6 に示す。一先ず、1次実験の28

日強度を Eq. (1) の推定式から推定した (A)。その後、AE 剤添加率による 28 日の推定圧縮強度の関係をログ関数として導出し、(B) この関数を使用して、目標となる強度を得るために必要な AE 剤添加率を算定した (C)。ここで得られた AE 剤添加率が目標強度を満足するかどうかは、2次試験で確認した。

4. 2次実験 — 様々な強度を有する試験体の製造と圧縮強度-動弾性係数の関係式導出

4.1 実験計画

2次実験の調査は、Table 5 に示す。目標強度は、3、5、7.5、10、15、20、25、30 MPa の 8 水準に設定し、これを満足させるために、1次試験から算出された適正量の AE 剤を添加した。試験体はフレッシュ状態で流動性と単位容積質量及び空気量を測定した。また、硬化した後、単位容積質量、空気量、長さ変化を測定し、圧縮強度と動弾性係数の関係式を導出した。

4.2 実験結果及び考察

4.2.1 フロー

Fig. 7 は、フローの測定結果を示す。フローは、1次実験の結果と同様に約 220~240 mm となった。AE 剤を添加すると、流動性はやや増加した。0.01~0.07% 範囲の極少量を使用した場合、AE 剤添加率の増加とともにフローも増加するが、これらの特性は、限界を有することが分かった。0.07% 以上の添加率でフローはやや減少するか、同等の値となった。これは、フローテーブルの垂直落下を手作業で行った実験誤差と判断することもできるが、AE 剤添加率によってスラリーの粘度や分散挙動などが異なる場合があり、これらを検討してみる必要がある。そのため、AE 剤添加量の変化がスラリーの流動性に及ぼす影響についての研究と考察がさらに必要になると思われる。反面、すべての試験体の流動性が実際の廃棄物を処理した時のフロー基準 (210 mm 以上) を満たしており、過去に固化処理した廃イオン交換樹脂廃棄物の再現が可能であった。

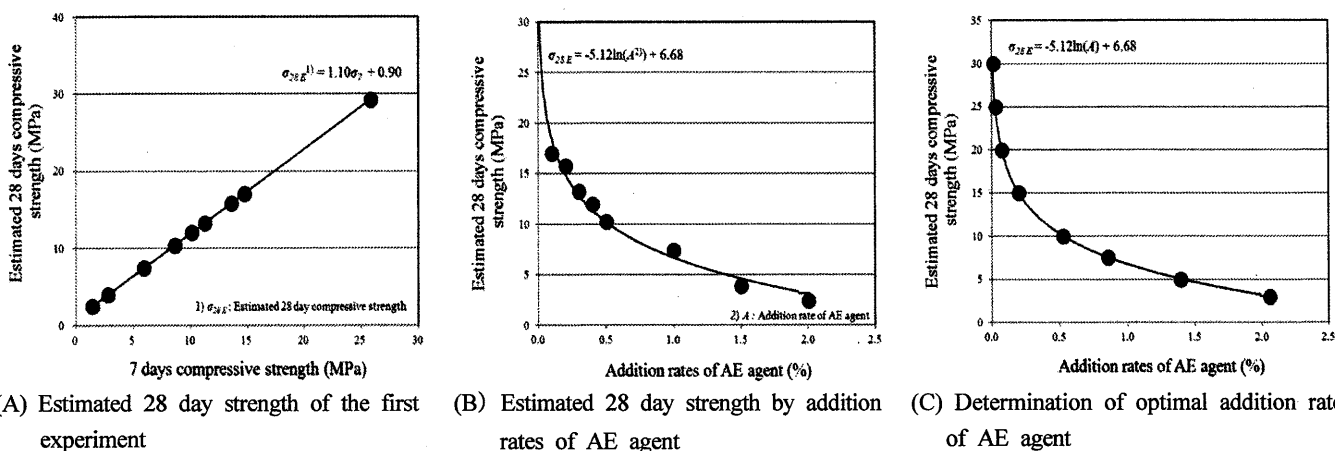


Fig. 6 Process of calculation of optimal addition rates of AE agent

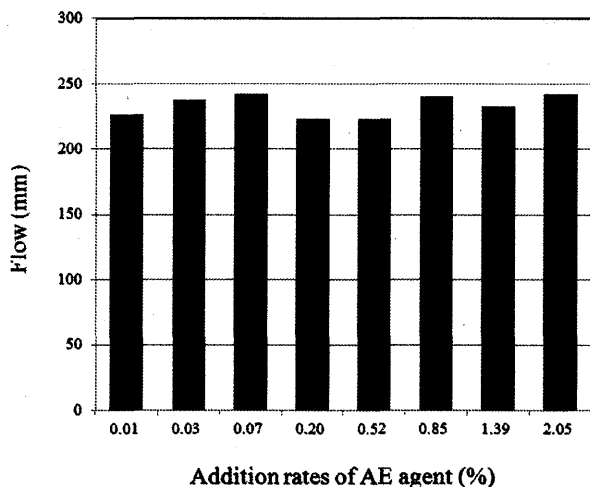


Fig. 7 Results of flow test

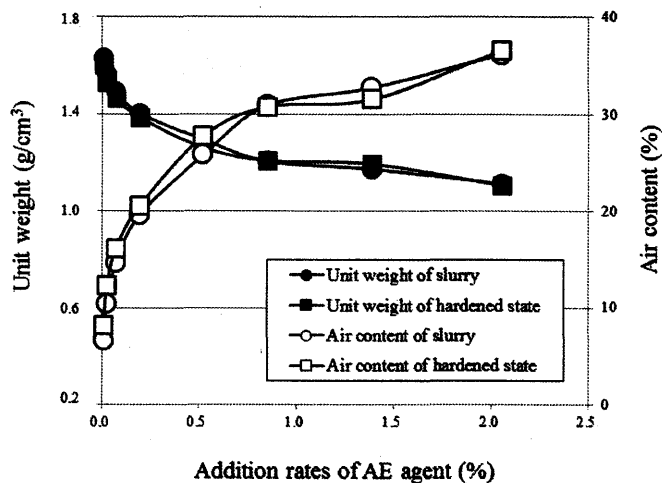


Fig. 8 Results of unit weight and air content test

4.2.2 単位容積質量と空気量

一般的にセメント系硬化体の圧縮強度は、試験体の単位容積質量によって支配的に影響を受ける。すなわち、使用材料及び調合条件が同じ場合、単位容積質量が低いほど、試験体内部に空隙が増加し、圧縮強度は減少することになる。本研究でも、このような特性を利用して、様々な密度を有する試験体を製造することを目的としており、その結果は Fig. 8 に示した。

AE 剤添加率の増加につれて、試験体の空隙量が高くなり、単位容積質量は減少することがわかった。特に、0.1%未満の添加率で単位容積質量は他の条件と比較して大幅に減少し、その後緩やかに低下する傾向を示した。また、硬化した後、試験体の単位容積質量はやや減少した。これは、養生過程で水分の蒸発により内部の空隙率が増加した結果と考える。

空気量は理論的な調合上の単位容積質量 (1.745 g/cm³) と、実際の測定値との差を空隙とみなして計算した。従って、空気量は単位容積質量の結果と正反対の傾向を示している。AE 剤を 0.1%未満の極少量添加しても、空気

量は急激に増加し、その後緩やかに増加することがわかった。AE 剤を最大 2.1%使用した試験体の空気量は 37%まで増加し、単に機械的な攪拌だけでマトリクス内に多くの空隙を生じることが確認された。

4.2.3 圧縮強度

Fig. 9 は 2 次試験の圧縮強度測定結果を示す。試験体の圧縮強度は、AE 剤添加率が低い水準で急激に減少し、添加率の増加に伴い緩やかに低下することがわかった。一般的にコンクリートの混和剤として添加する AE 剤の量は、0.02~0.05%であり、本実験でも少量の AE 剤の使用で気泡を連行させ、圧縮強度を減少させることができ、使用量を増加させると、より低い水準の強度を得ることが可能であった。その結果、一定範囲 (3.3~28.6 MPa) の強度水準を得て目標強度 (3~30 MPa) を満たすことができる。特に 1 次実験で確認していない 0.1%未満の AE 剤添加率の条件で推定した強度範囲を比較的よく満足していることが分かった。目標強度に対する、実際の強度発現率は平均約 88%と、7 日強度に基づいて推定したものであることを勘案すればかなり良好なものと判断される。

Table 5 Mixing design of second experiment

Resin (%)	W/B (%)	Target strength (MPa)	AE agent (%)	Water (kg/m³)	Unit volume (ℓ/m³)			Unit weight (kg/m³)			AE agent (kg/m³)	Test items
					PC	CH	AER	PC	CH	AER		
17.9	35	30.0	0.011	372	306	41	281	965	97	312	0.1	- Flow
		25.0	0.028									- Unit weight (slurry & hardened state)
		20.0	0.074									- Air content (slurry & hardened state)
		15.0	0.197									- Length change
		10.0	0.523									- Compressive strength
		7.5	0.853									- Dynamic modulus of elasticity
		5.0	1.390									
		3.0	2.054									

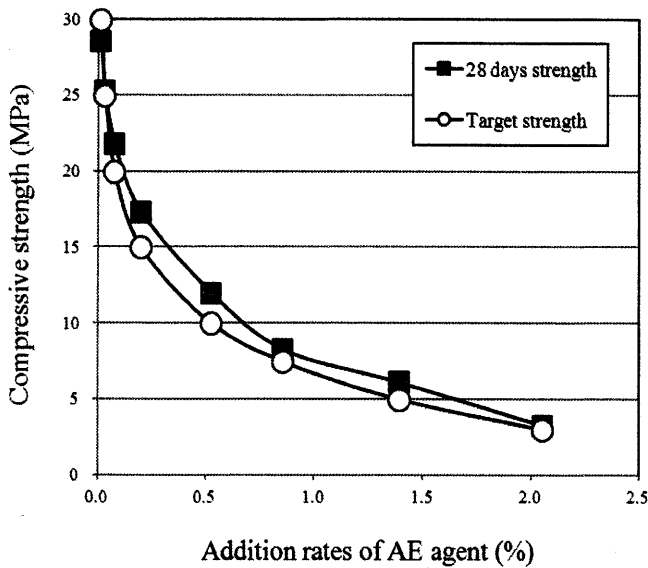


Fig. 9 Results of compressive strength test

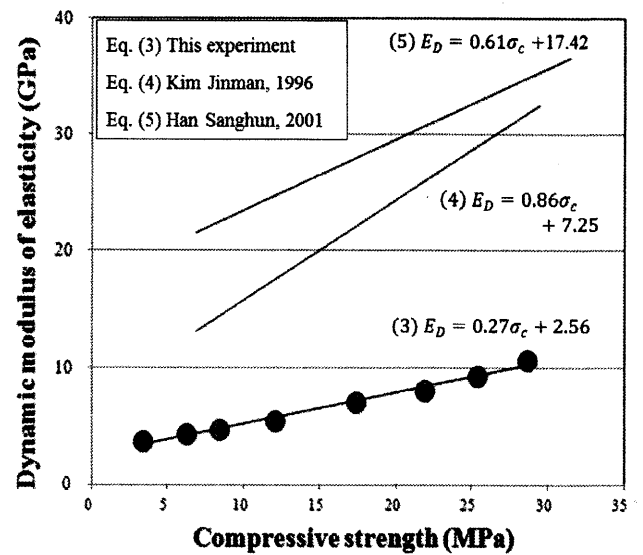


Fig. 10 Relationship between compressive strength and dynamic modulus of elasticity

4.2.4 動弾性係数

放射性物質が含まれている廃イオン樹脂固化体は、圧縮強度を直接測定することが難しいので、測定の容易な動弾性係数を測定して、間接的に現在の強度を推定する必要がある。動弾性係数を測定する方法には、超音波伝播速度と振動による共鳴周期を利用するなどのいくつかの方法があるが、本研究では、試験体の1次共鳴周期、すなわち、固有振動数による方法を用いて、次のEq. (2) (KS F2437 参照) により導出した¹¹⁻¹³⁾。

$$E_D = 161 \times 10^{-5} \frac{L^3 T}{d^4} W f^2 \quad \text{Eq. (2)}$$

ここで、 E_D : 動弾性係数(N/mm²)
 L : 試験体の長さ(mm)
 d : 試験体の直径(mm)
 W : 試験体の質量(kg)
 f : 1次共鳴振動数(Hz)
 T : 修正係数

Fig. 10 に、試験体の圧縮強度と動弾性係数の関係を示す(下記のEq. (3))。また、これらの相関関係と比較するために、既存の文献で提示しているコンクリートの圧縮強度-動弾性係数の関係(Eq. (4) ~ (5))も図中に併記している^{14,15)}。

$$E_D = 0.27\sigma_c + 2.56 \quad \text{Eq. (3)}$$

$$E_D = 0.86\sigma_c + 7.25 \quad \text{Eq. (4)}$$

$$E_D = 0.61\sigma_c + 17.42 \quad \text{Eq. (5)}$$

廃イオン交換樹脂固化体を再現した試験体の動弾性係数は、圧縮強度が高くなるほど増加する一定の傾向が現れ、約3.7~10.7 GPaの範囲を示している。しかし、既往の文献で提示している一般的なコンクリートにおける圧縮強度と動弾性係数の関係と比較すると、同じ強度でも動弾性係数は低い値となることがわかった。本研究での試験体と通常のコンクリートの動弾性係数の差は、強度の増加に応じて多少増加し、平均して約20 GPa程度であることが確認された。強度を同じにしても硬化体の構成材料、すなわち、骨材の有無やイオン交換樹脂が含まれていることなどから、材料の特性によって異なる硬化体の内部組織によって共鳴振動数に差が生じていると判断される。これらの結果より、固化体の強度が基準で求められている4 MPa (500 psi) を満足していることを確認するためには、動弾性係数の値が3.49GPa以上あることを確認すればよく、これにより最終処分場まで移送時の問題が発生しないと判断することができる。ただし本研究では、内部に空隙を導入する方法により種々の強度の固化体を作成しているため、実際の固化体の動弾性係数-強度関係と若干の差異が生じる可能性がある。この点についてはさらに検討が必要である。

5. まとめ

本研究では中・低レベル放射性廃棄物処理用セメント固化体を再現して、それをターゲットに圧縮強度と動弾性係数の関係を調べた結果、以下の結論を得た。

- 1) AE 剤添加率の変化により目標に設定した3~30 MPa

範囲を満足する中・低レベル放射性廃棄物処理用セメント固化体の製造が可能であった。

- 2) 事前に気泡を製造して混入する方法より AE 剤を直接使用した場合に単位容積質量及び強度をより正確に調整することが可能である。
- 3) AE 剤の添加率による単位容積質量と空気量の変化は、添加率が低い範囲では、非常に敏感であったが、添加率が増加するほど、その変化は小さくなった。
- 4) イオン交換樹脂処理用セメント固化体の動弾性係数は、4.1~10.2 GPaの範囲に現れ、通常のコンクリートよりも、同じ圧縮強度で約 20 GPa低く、その差は、強度の増加に伴って増加する。
- 5) 動弾性係数による実際の中・低レベル放射性廃棄物である廃イオン交換樹脂固化体の圧縮強度は、本文中の(3)式により推定することができる。同式により、実際の固化体の強度が、基準で求められている 3.44MPa を満足していることを確認するためには、固化体の動弾性係数の値が 3.49GPa 以上あることを確認すればよいことが示された。ただし本研究では、内部に空隙を導入する方法により種々の強度の固化体を作成しているため、実際の固化体の動弾性係数-強度関係と若干の差異が生じる可能性がある。この点についてはさらに検討が必要である。

参考文献

- 1) Lee Jaemin : A study on the characteristics of solidified waste form produced at korean nuclear power plant and durability of disposal facility for the safety assessment of low and intermediate level radioactive waste disposal, KyungHee University doctoral dissertation, pp. 1~12, 2002.
- 2) Hoberg, A. J., Watson, C. D., and West, G. A. : An evaluation of asphalt and other materials for lining radiochemical waste storage basins, ORNL-2508, 50pp, 1958.
- 3) Rodier, J., Scheidhauer, J., and Malabra, F. : The conditioning of radioactive waste by bitumen, CEA-1992, 23pp, 1961.
- 4) Hild, W., Kluger, W., and Krause, H. : Bituminization of radioactive wastes at the nuclear research center karlsruhe-experience from plant operation and development work, ISBN 92-64-01509-4, pp. 129~145, 1976.
- 5) Eschrich, H. : The bitumination of radioactive waste solutions at Eurochemic, ISBN 92-64-01509-4, pp. 26~55, 1976.
- 6) Park Jongkil and Hwang Taewon : Evaluation of X-ray system for nondestructive testing on radioactive waste drums, Journal of korean radioactive waste, Vol. 6, No.

3, pp. 189~203, 2008.

- 7) Sung Seokhyun : Radwaste characteristics and disposal facility waste acceptance criteria, Journal of korean radioactive waste, Vol. 6, No. 4, 352 pp, 2008.
- 8) 韓国電力公社技術研究院 : 放射性廃棄物の固化プロセスの開発, 研究報告書, pp. 284~304, 1989.
- 9) Jeon jiyong : Properties of light weight foamed concrete according to types of foam agent and using method, Kongju University doctoral dissertation, 94 pp, 2012.
- 10) Kim Taekuk and Song jongsik : A study on the leaching characteristics of bituminized solid form of radioactive waste resin by addition of poly ethylene, Journal of korean society of environmental engineers, Vol. 26, No. 1, pp. 35~36, 2004.
- 11) Kim jinkun : Estimation of mechanical properties of concrete in early age by resonance frequency test, Journal of korea concrete institute, Vol. 7, No. 5, pp. 164~165, 1995.
- 12) Seo Manchul, Kin Hyounsoo and Jang boan : A comparative study on dynamic & static elastic modulus of cement mortar specimens, Journal of korea geophysical society, Vol. 3, No. 2, pp. 128~130, 2000.
- 13) 韓国技術標準院, KS F 2437 共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数及び動ポアソン比の試験方法, 2008.
- 14) Han Sanghun, Kim Jinkun, Park Woosun and Kin Donghyun : Effect of temperature and aging on the relationship between dynamic and static elastic modulus of concrete, Journal of korea concrete institute, Vol. 13, No. 6, pp. 610~618, 2001.
- 15) 金振晩 : 高强度領域コンクリートの工学的特性に及ぼす要因の影響に関する研究, 忠南大學校 博士論文, pp. 275~286, 1996.

(受理 : 平成 25 年 5 月 23 日)