

任意配合注入システムの開発と適用性の確認

伊藤節男¹・小熊 登¹・阿部義宏²・永井典久³

¹正会員 前田建設工業（株）土木本部土木設計部(〒179-8903 東京都練馬区高松 5-8 J.CITY)

²正会員 日特建設（株）技術本部グラウト部(〒104-0044 東京都中央区明石町 13-18)

³日特建設（株）営業本部エンジニアリング企画部(〒104-0044 東京都中央区銀座 8-14-14)

任意配合注入システムは、岩盤グラウチングにおいて高濃度セメントミルクと希釈水の 2 液の流量比率を任意に変更することにより、所定の配合のセメントミルクを瞬時に混合し、注入できる新しい岩盤グラウチング工法である。岩盤グラウチングにおける施工管理項目は、注入圧力、注入流量、注入材料の配合の 3 要素があるが、従来システムでは注入材料の配合変更がバッチ単位で行われるため、地山性状に対応して任意に配合を変化させることは困難である。また、注入完了時に残ったセメントミルクは通常、廃棄処理されることから、環境負荷への影響が大きい。提案する任意配合注入システムは、一定の高濃度セメントミルクと希釈水の流量比率を制御し、さらに、混合攪拌に静止ミキサーを利用することによりこれらの問題を解決した。そこで、本注入システムの概要と適用性について報告する。

キーワード 任意配合、注入システム、廃棄セメントミルク、コスト縮減、環境負荷の低減

1. はじめに

近年、ダム建設はもとより山岳トンネルや放射性廃棄物地層処分等、岩盤を対象としたグラウチング技術に関する研究が多数なされている^{1) 2)}。グラウチングは古くからの技術であるが、目視できない岩盤内での工事であることから、現在においてもその改良のメカニズム、改良程度、改良範囲などの不明な点が多い。そのためにグラウチングの設計および施工中においても施工数量の予測が難しく、全体工事数量の増大の一因となっている。

また、近年、不良岩盤の改良のための施工が増加していることから、グラウチング工事費の全体工事費に占める割合が増える傾向にある。このような状況のもと、グラウチングの品質を含めて、より合理的なグラウチング技術の確立が望まれている。例えば、平成 15 年 7 月には「合理化」というキーワードのもと、「グラウチング技術指針・同解説」³⁾が改訂されている。また、国外では単一高濃度配合のセメントミルクを用いた短時間注入を指向した GIN 工法⁴⁾に代表される新しい知見に基づく施工法も提案され、実績をあげつつある。

一方、近年の環境問題に対する認識の高まりから、建設分野においても、より環境に優しい施工法や対策が求められている。

このような背景のもと、筆者らは、より合理的なグラウチング技術の開発をめざし、さらに建設分野が多大な環境負荷を与えている現状に着目し、コスト縮減と環境負荷の低減に配慮した新しい岩盤注入システムを開発した。

本論では、ダム基礎グラウチングにおいて、セメントミルクの比重（配合比）を任意に変更するシステムを開発するとともに、廃棄セメントミルクの有効活用を可能とする

ことで、グラウチング工事のコスト削減および環境負荷の低減をめざした新しい岩盤グラウチング工法について、その概要から適用性の確認およびコスト削減効果と環境負荷低減の試算結果を報告する。

2. システムの概要

(1) システムの概要

従来からダム基礎処理グラウチングの施工管理項目としては注入圧力、注入流量、注入材料の配合の 3 要素があげられる。しかし、従来のシステムでは注入材料の配合はバッチ単位（通常 200L）で行われていることから、施工途中において注入材料の配合を任意に変更することは困難であり、地山性状に対応した効率的な注入が難しいという問題があった。

そこで、本注入システムでは、図-1 に示すように注入するセメントミルクの比重（配合比）を任意にかつ瞬時に設定および変更するために、一定比重（配合比）のセメントミルク（以下、原液ミルク）と希釈水の 2 液の流量比率を制御できる流量比率制御装置を開発した。これにより、2 液の流量を制御して所定の配合のセメントミルクを製造する。また、製造するセメントミルクの品質を確保するために 2 液の混合攪拌用に静止ミキサーを付加した任意配合注入システムを開発した。

さらに、本注入システムでは原液ミルクは一定の高濃度セメントミルクを使用するため、注入完了時において原液ミルクの硬化時間以内であれば、原液ミルクを廃棄処理することなく次の施工箇所へ有効に活用することができる。

以上から、本注入システムの特徴をまとめると以下のようになる。

表-1 注入システムの比較

	従来システム	任意配合注入システム
配合変更	中央プラントより所定の配合のセメントミルクを随時供給	中央プラントより、常に一定の配合を必要に応じ供給
注入方式	1ショット	1.5ショット、静止ミキサー使用
注入設備	グラウトポンプ 1台、グラウトミキサー 1台 圧力流量検出器 1台	グラウトポンプ 2台、グラウトミキサー 2台 圧力流量検出器 2台、流量比率制御装置 1台
廃棄セメント	・検出器～孔口までの残ミルク ・グラウトミキサー内残ミルク	・検出器～孔口までの残ミルク
環境負荷低減	供給セメントミルクを少量づつ、細かく供給すれば、使用セメントの無駄が少なくなる	グラウトミキサー内の残ミルクが発生せず、使用セメントに無駄がない
作業効率性	・透水試験後に初期配合のセメントミルクを供給する ・注入完了毎にミキサー、ホース内の清掃が必要	・透水試験から注入作業にそのまま移行可能 ・検出器～孔口までの清掃は必要
コスト		注入設備が2系統必要となるため、1系統分増となる

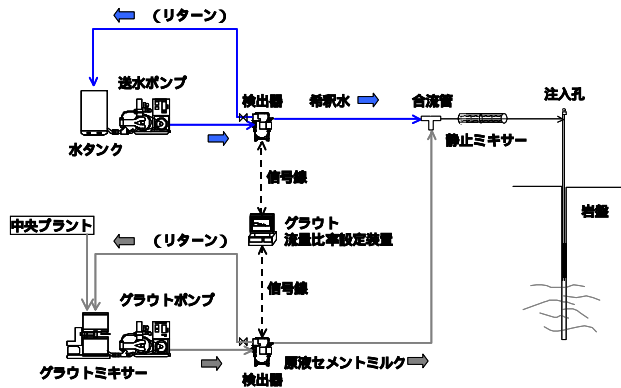


図-1 任意配合注入システム



写真-1 流量比率制御装置

注入仕様にに基づき、所定のセメントミルクの品質を確保することができる。

2 液の流量制御により、セメントミルクの比重（配合比）を任意に変更して注入することができ、地山性状に対応したきめ細かな注入が可能である。セメントミルクの有効利用により、グラウチング作業のコスト削減および環境負荷の低減が図られる。グラウチング作業の自動化により、作業効率の向上が見込める。

2 液の流量比率を設定する流量比率制御装置以外は、中央プラントから注入孔まで通常使用される機器で構成されているため、従来システムを採用しているとの現場においても大きな負担がなく導入可能である。本注入システムは1.5ショット形式で2液を混合するため、同様な薬液を用いた多くの注入工事にも適用可能である。

ここで、本注入システムの流量比率制御装置は、グラウト管理室に設置しタッチパネルを操作して2液の流量を制御するとともに、グラウチング作業全般の管理を実施する機能も備えている。そのため、流量比率制御装置により一連のグラウチング作業を自動的に制御することが可能である。写真-1に流量比率制御装置を示す。

流量比率制御装置の主な機能を以下示す。

所定の比重（配合比）のセメントミルクを製造するために、原液ミルクと希釈水の流量比率を制御する。製造されるセメントミルクの比重はグラウチング作業中においても簡単な操作により、任意にかつ瞬時に変更できる。

注入仕様に則り、あらかじめ所定の比重、流量、圧力、規定注入量などを設定しておくことで、透水試験からグラウチングまでの一連の作業が自動制御可能である。

透水試験およびグラウチング作業状況は、タッチパネル上に表示される流量・圧力・比重のチャートにより、管理することができる。

自動作業と手動作業の切り替えが容易に操作できるため、地山の性状による注入仕様の変更、機械トラブルなどによる作業変更に対応できる。

(2)従来システムとの対比

従来のダム基礎処理グラウチングの注入システムは、中央プラントで混練した所定の配合のセメントミルクをバッチ（通常 200L）単位でサブプラントに供給し、それをアジテータで受けグラウトポンプより圧力・流量計（以下検出器と呼ぶ）を経由して注入孔まで送るものである。本注入システムの特徴を従来システムとの比較において表-1にまとめる。両者をコスト面で比較すると、本注入システムは従来システムより1系統分の設備増となるためにコスト増になる。一方、環境負荷の低減や作業効率の向上等が見込める。

3. 混合試験

本注入システムの構築にあたり、2液の混合性能および混合時の比重のばらつきを把握する混合試験を実施した。

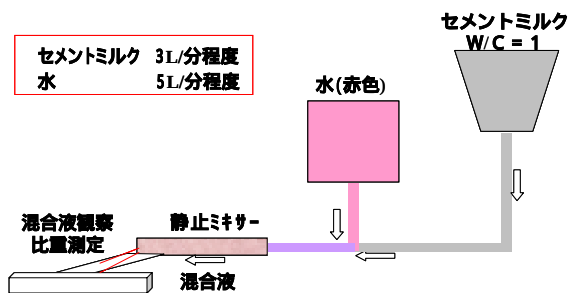


図-2 静止ミキサーによる2液の混合性能実験



写真-2 2液混合状況
(左：静止ミキサーあり，右：静止ミキサーなし)

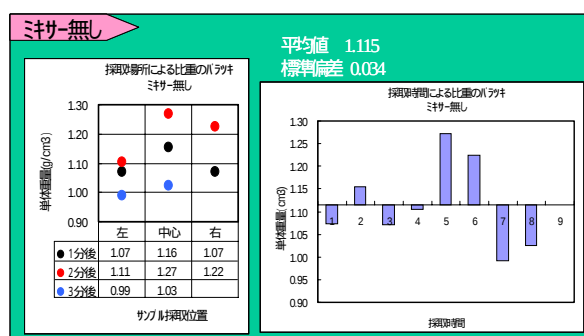
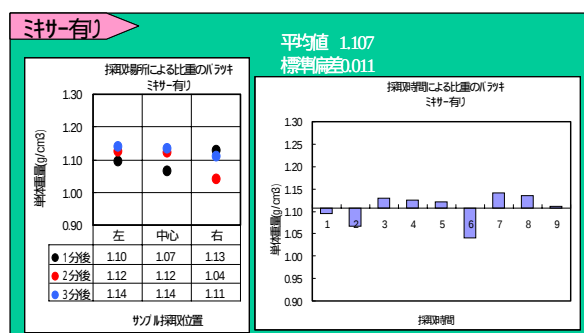


図-3 実験結果

(1) 2液の混合性能の検討

本注入システムでは2液を混合攪拌するために、耐久性があり構造がシンプルな静止ミキサーを使用する。静止ミキサーは既往の技術であり、その実用性は確認されているが、本注入システムへの導入にあたり、セメントミルクと水という比重および粘性の異なる2液の混合性能を確認するために室内試験を実施し、その適用性を確認した。

実験は、水セメント比 ($w/c=1.0$) のセメントミルクと水を管路中で合流させて、静止ミキサーを用いた場合と用いない場合の2ケースについて、両者の混合状況を比重計測と目視確認により比較した。なお、実験中に混合程度が容易に観察できるように水には食紅を用いて赤く着色した。図-2に実験の概要を示す。

写真-2に混合状況、図-3に混合後の比重を比較した実験結果を示す。

これより、以下のことが確認された。

静止ミキサーを使用することで混合液の比重のばらつきが小さくなり、より均一に混合される。

静止ミキサー内でのセメントミルクの閉塞はない。

以上より、セメントミルクと水の2液の混合において静止ミキサーの有効性が確認された。

(2) セメントミルクの品質確認

本注入システムでは、原液ミルクと希釈水の2液を合流させてセメントミルクを製造するため、両者の流量比率制御の精度が悪いと所用の配合の製品ができなくなる。そこで、開発した流量比率制御装置を用いて配合を変化させたセメントミルクを製造し、品質を確認する室内実験を行った。

実験では、原液ミルクと希釈水の2液を混合することにより、原液ミルクと希釈水の流量値から算出される制御比重と注入仕様により規定される設計比重（配合比）を比較し、制御比重が設計比重の許容値以内であることを確認した。セメントミルクの比重は、コリオリ式の密度計を用いて連続計測を行い確認した。

実験条件を表-2に示す。実験では設定した4種類の設計比重、比重=1.08 ($W/C=8$)、1.11 ($W/C=6$)、1.16 ($W/C=4$)、1.29 ($W/C=2$) のセメントミルクを作製した。なお、今回の実験では、実験開始から目標比重までの変更時間は2分に設定した。

この結果、表-3に示すようにいずれの設計比重においても、制御比重の値は $\pm 2.0\%$ 以内の許容範囲内に入っていた。ここで、2液の流量は設定値である2分以内で概ね安定しており、制御比重は設計比重に対して十分に品質の確保がされていることを確認できた。

表-2 実験条件

項 目	原液ミルク	希釈水
設定流量(混合量)	10.0 t /min	
設定圧力(混合圧力)	0.3N/mm ²	
比重	1.514	1.000
設計比重 1.08 の流量(比率) 値	1.6 t /min	8.4 t /min
設計比重 1.11 の流量(比率) 値	2.1 t /min	7.9 t /min
設計比重 1.16 の流量(比率) 値	3.1 t /min	6.9 t /min
設計比重 1.29 の流量(比率) 値	5.7 t /min	4.3 t /min

表-3 実験結果

設計比重	(許容範囲)	実験平均	標準偏差	最大値	最小値
1.08(W/C=8)	(1.06~1.10)	1.074	0.00076	1.082	1.061
1.11(W/C=6)	(1.09~1.13)	1.102	0.00099	1.109	1.088
1.16(W/C=4)	(1.14~1.18)	1.152	0.00066	1.160	1.146
1.29(W/C=2)	(1.27~1.31)	1.297	0.00119	1.311	1.286



写真-3 現場実験状況

4. 現場実験

(1) 現場実験の目的

実岩盤に本注入システムを適用することにより、
任意に配合が変更可能なこと
長時間注入時の注入材料の配管内での閉塞状況
の確認を行い、本注入システムの実用性を確認した。

(2) 現場実験の方法と結果

実験は、Tダム(山形県)の右岸天端カーテン軸の下流
約20mのヤードで実施した。写真-3に実施状況を示す。

実際の岩盤注入において、本注入システムの実用性を確
認するために、以下のケースについて実験した。

セメントミルクの比重(配合比)を段階的に切り替える
機能

セメントミルクの比重(配合比)を連続的に切り替える
機能

長時間注入による本注入システムの実用性の確認

図-4～図-6に実験結果として注入チャートを示す。
現場実験により以下のことが確認された。

段階的切り替え(比重: 1.08 → 1.52)

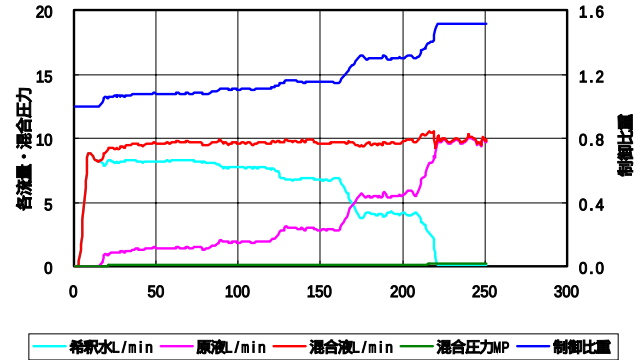


図-4 比重(配合比)段階切替え(横軸×10秒)

連続的切り替え(比重: 1.08 → 1.52)

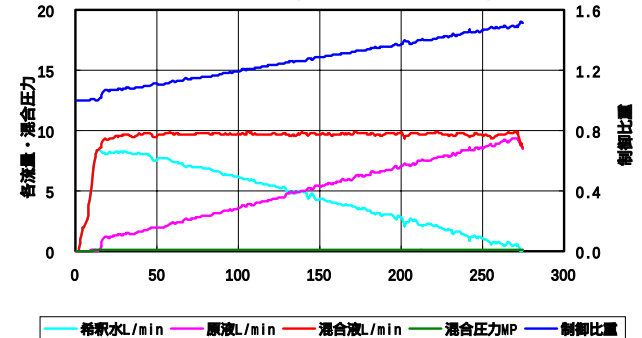


図-5 比重(配合比)連続切替え(横軸×10秒)

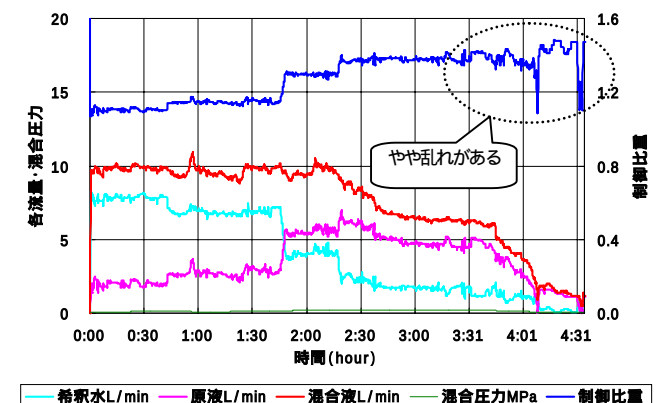
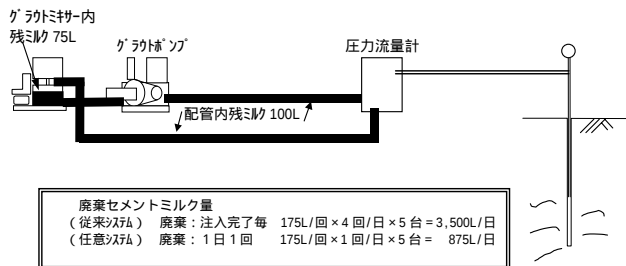


図-6 長時間注入

本注入システムは、配合切替えなど、任意に配合を設定
することが可能であり、その実用性が高いシステムであ
る。ただし、低流量において、設定した配合がやや乱れ
る状況が確認された。これは、本注入システムが流量を
制御することにより、配合を規定していることに起因す
ると考えられる。

長時間注入に対しては、本注入システムの特徴である合
流部、静止ミキサー部において、セメントミルクの閉塞
は見られなかった。

以上より、本注入システムは、十分実用性があることが
確認された。



【セメントミルク側の管路】

試算条件：

廃棄ミルク 175L (=ミキサー内75L+配管内100L)
 日あたり注入回数 4回/日
 グラウト機械台数 5台
 年間稼働日数 250日
 注入長 5m

図-7 廃棄セメントミルク量の試算方法

5. コスト削減効果

ここでは、本注入システムと従来システムを比較して、廃棄セメント量の低減によるコスト削減の試算を行う。

(1)最終配合別廃棄セメント量の試算

廃棄セメントミルクは、グラウティング完了時のアジータ内と配管内の残セメントミルクが大部分を占める。そこで、本注入システムと従来システムの注入完了時の廃棄セメントミルク量を以下のように仮定する。

本注入システム：原液ミルクに水セメント比 (w/c =) 1.0のセメントミルクを使用し、かつ、配管内の閉塞防止のため1日に1回アジータ内および配管内の残セメントミルクを全量廃棄するものと仮定する (1回/台/日)。

従来システム：注入完了毎にアジータ内および配管内の残セメントミルクを廃棄し、配管内の清掃を実施するものと仮定する (4回/台/日)。

図-7に概念図と廃棄セメントミルク量を示す。

最終配合別の廃棄セメント量の試算結果を表-4に示す。本注入システムと従来システムの差は、最終配合がW/C=6以上の薄い配合で注入完了する場合には、従来システムの廃棄セメント量が少なく、W/C=4以下の濃い配合では、本注入システムの廃棄セメント量が少なくなる。

これより、濃い配合で注入完了することが多い条件下では、本注入システムによる廃棄セメント量の低減効果が明瞭に現れることがわかる。

(2)単位注入セメント量別の廃棄セメント量の試算

注入実績のうち、単位注入セメント量区別に本注入システムと従来システムの廃棄セメント量の試算結果を

表-4 最終配合別の廃棄セメント量の試算

最終配合	ミル比重	従来システム	任意配合注入システム	廃棄セメント	低減率
		年間廃棄セメント (t/年)	年間廃棄セメント (t/年)	(t/年)	(%)
W/C	(t/m ³)				
8.0	1.08	105	-	-84	158.3
6.0	1.11	139	-	-50	119.8
4.0	1.16	203	-	14	81.9
2.0	1.29	376	-	187	44.2
1.0	1.52	665	166	476	25.0

175L × 1.08 (比重) / 9 × 4 回/日 × 5 台 × 250 日 / 1000 = 105t

表-5 単位注入量別廃棄セメント量の試算

単注区分	年間使用セメント (t/年)	従来システム	任意配合注入システム	低減効果
		年間廃棄セメント (t/年)	年間廃棄セメント (t/年)	(千円/年)
(kg/m)				
10	250	60	165	-840
30	750	180		120
50	1250	300		1,080
70	1750	420		2,040
100	2500	600		3,480

本システム年間廃棄セメント量：175L × 1.512 (比重) / 2 × 5 台 × 250 日 / 1000 = 165 t / 年
 注入長：5m、平均注入回数：4回、グラウト機械台数：5台、年間稼働日：250日
 廃棄ミルク量：175L/回、セメント廃棄率24%、セメント単価：8,000円/t

表-5に示す。ここで、従来システムの廃棄セメント量は、実績より使用セメント量の24%と仮定した。

表-5に示すように、単位注入セメント注入量が30kg/m以上となると本注入システムの廃棄セメント量の低減効果が出てくることがわかる。

以上より、本注入システムを用いた場合の廃棄セメント量は単位注入セメント量区別に異なるが、従来システムの1/4～1/3程度まで低減できる。

(3)濁水処理費用の試算

ダムグラウティングでは、廃棄セメントミルク量の削減が可能となれば、濁水処理費用の大幅な低減が可能となる。ここでは、廃棄セメントミルク量の低減によるコスト削減効果を試算した。

まず、グラウティングによる濁水発生量は、ダム施工機械設備設計指針(案)⁵⁾より、ダムサイトの濁水処理設備の容量を決める基準となる濁水発生量を用いるものとする。

従来システムのグラウティングによる濁水発生量

グラウティングの排水量 (Q_B) は、

$$Q_B = 0.06 \times n \times H \times q_b$$

ここで、

n ：グラウト機械の工程上の最大台数 (=5 台/日)

H ：グラウト機械の1日当たり運転時間 (=8 時間/日)

q_b ：グラウトポンプの突出量 (=20L/min)

とすると

$$Q_B = 0.06 \times 5 \times 8 \times 20 = 48 \text{ m}^3 / \text{日}$$

本注入システムのグラウティングによる濁水発生量

前述の通り、本注入システムの廃棄セメントミルク

表-6 濁水処理費用の試算結果

	従来システム	任意配合注入システム	削減効果 (-)
濁水量 (m ³ /日)	48.0	12.0	36.0
濁水量 (m ³ /年)	12000.0	3000.0	9000.0
濁水処理費 (円/m ³)	1,000	1,000	-
概算処理費 (千円/年)	12,000	3,000	9,000

単注セメント区分の10kg/mは除く
 濁水処理量 = 0.06 × グラウト機械台数 × グラウト機械の日運転時間
 × グラウトポンプの吐出量

表-7 コスト削減効果まとめ

	従来システム	任意配合注入システム	削減効果 単位: 千円/年
材料費 (セメント)	1,440~4,800	1,320	120~3,480
濁水処理費	12,000	3,000	9,000
機械経費	36,000	39,000	-3,000
合 計	-	-	6,120~9,480

量は従来システムの1/4であることより

$$Q_B = Q_B / 4 = 12 \text{ m}^3/\text{日}$$

ここで、廃棄セメントミルクの処理費用を1,000 円/ m³と設定した場合、本注入システムと従来システムの濁水処理費用の試算結果を表-6 に示す。

(4)本注入システムの機械費用の試算

一方、本注入システムでは、2 液の流量を制御する必要があることから、アジテータ、グラウトポンプ、流量・圧力検出器のラインが2 系統必要となり、注入単価は従来システムより増額となる。これを実績から評価すると、施工費としては300 万円/ 年程度の増額となる。

(5)コスト削減効果

以上より、コスト削減効果をまとめると表-7 のようになる。

これより、セメントミルクの有効利用による経済性向上が見込まれ、本注入システム導入による廃棄セメントミルク量の低減と濁水処理費の削減により、本注入システムでの機械費用増分を吸収でき、最低(薄い配合で注入完了する場合)でも約600 万、最大(濃い配合で注入完了する場合)で約950 万の年間コスト削減効果がある試算となった。ダム基礎処理グラウチングは通常、数年かかることから、トータルでは数千万のコスト削減効果が見込めることになる。と考える。

また、本注入システム導入により、注入前の水押しから注入までの作業が連続的に実施することが可能となり、従来システムよりも時間短縮が可能となる。

表-8 CO₂削減量推定結果

単注セメント区分 (kg/m)	廃棄セメント換算 (t/年)		CO ₂ 削減量 (t-CO ₂)	換算樹木数 (本年)
	従来システム	任意配合注入システム		
10	60	165	-105	-
30	180		15	1,140
50	300		135	10,260
70	420		255	19,380
100	600		435	33,060

CO₂原単位: 土木学会推奨値6) 0.228 × 44/12 = 0.836kg-CO₂
 樹木換算値: 11kgCO₂/年 (胸高直径2cm、樹高2m、常緑広葉樹高木)

なお、清掃回数の削減による作業工程の短縮などを考慮すると、全体工程の相当の短縮化が図れるものとする。

6. 環境負荷の低減

単位注入セメント量による本注入システムと従来システムの廃棄セメント量より CO₂削減量を試算した結果を表-8 に示す。表中には、換算樹木数も記載した。本注入システムは単位注入セメント量区分 30kg/m 以上の場合、CO₂削減に寄与することが見込めることがわかる。

7. まとめと今後の課題

今回提案した任意配合注入システムは、高濃度のセメントミルクに1.5 ショット形式で希釈水を加え、静止ミキサーにより 2 液を攪拌混合し瞬時に任意の配合に変更できるものである。これより、地山性状に応じたきめ細かな注入による効率的な注入を実現するとともに、従来と比べて廃棄ミルクを削減し、コスト縮減と環境問題に配慮した新しい注入システムであることが確認された。

今後本注入システムを用いて様々な岩盤を対象とした注入実験を行い、注入時間短縮や改良効果の向上も含めた効率的な注入の検証と実用化を図っていきたい。

参考文献

- 1) 関電興業株式会社: K K 式自動グラウチングシステム, ダム技術 No.185, 2002
- 2) 内田善久, 蓮本清二他: ダム基礎グラウチングにおける動的注入工法の開発, 大ダム No.177, pp.108-115, 2001.10
- 3) (財) 国土技術研究センター: グ라우チング技術指針・同解説, 2002.5.
- 4) G. Lombardi: Selecting the grouting intensity, Hydoropower & Dams Issue4, pp.409-434, 1996
- 5) 建設省河川局開発課監修: ダム施工機械設備設計指針 (案), pp.84~85, 1990.11
- 6) 酒井寛二: 土木建設物の二酸化炭素排出量原単位の推定, 第4回地球環境シンポジウム, 2000.4.