

CMI 報告

トンネル補助工法に適用する 複合動的注入の研究

横澤圭一郎・近藤 亮

1. はじめに

近年、トンネル補助工法の進歩に伴い、未固結地山や小土被りといった条件を有する都市部のトンネル施工においても、経済的な優位性等から NATM が適用される事例が増えつつある。

都市部の未固結地山に対して NATM を適用する場合には、地山の強度改良や止水改良を目的とした補助工法として、地山への注入が採用されることが多い。

従来の注入技術は、注入材の粒子径を小さくすることに開発の主眼が置かれてきたが、本研究では注入方式に目を向け、懸濁型の注入材をより浸透注入させる工法として、複合動的注入の研究を進めている。

本報告では、未固結地山（砂層）を対象とした複合動的注入の効果と、その実用性について述べる。

2. 複合動的注入の特徴

注入には、注入速度を一定に保って行う静的注入（図 1）と、注入速度や注入圧を意図的に変化させる単動的注入（図 2）で注入されているのが実情である。



図 1 静的注入の概念図

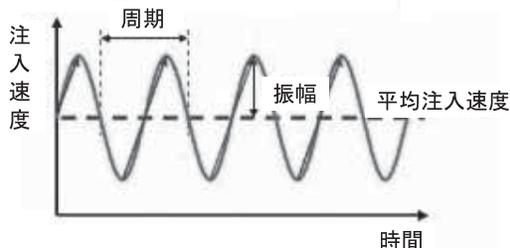


図 2 動的注入の概念図

本研究の複合動的注入は、注入時における注入圧の振幅をより遠くまで伝える「長波（低周波）」と、注入材の粒子を分散させ局所的な凝集を防ぐ「短波（高周波）」を組合せた複合波による動的変動によって、従来の静的と単動的注入に比べ、より広い範囲の地山を改良する工法である（図 3）。

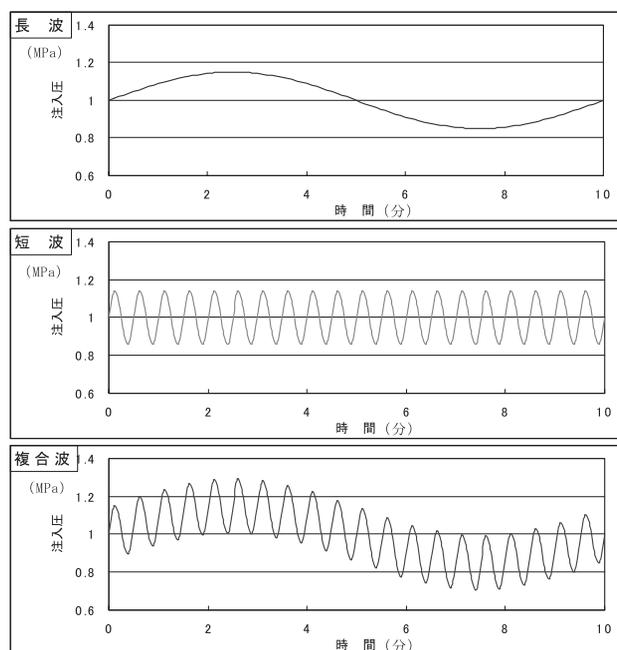


図 3 複合波の概念図

3. 複合動的注入の機械構成

複合波を発生させる機械的な原理（図 4）として、まず、ミキサーから送られた注入材は、注入ポンプに設置した動的周波数設定器（インバータ）の周波数を変換することで、流量を変化させ 0.5 Hz 以下の長波を発生させる。

次に、脈動発生装置の流路遮断板を回転させることにより、流量を変化させ 1 ~ 30 Hz の短波を発生させて、図 3 の概念図に示すような複合波となって注入孔へ送られる。

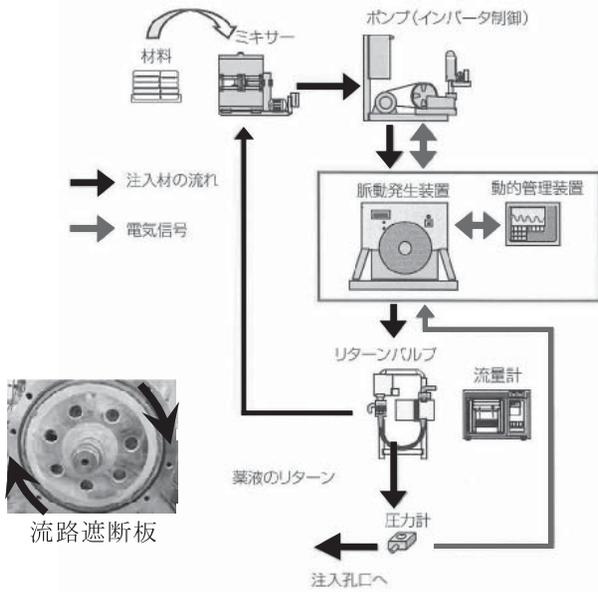


図 4 複合動的注入の機械構成

4. 室内試験による注入効果の確認

(1) 複合動的注入の効果確認

注入方式（静的・単動的・複合動的）による材料の到達距離を比較するため、一次元浸透試験用モールド（透明塩ビ製 79 mm，L = 150 cm）に 6 号珪砂を詰め、各注入方式における浸透距離の経時変化を室内モデル試験（写真 1）にて比較した（図 5）。なお、注入材は、懸濁型（超微粒子スラグ）を使用した。

全ての室内モデル試験は 0.1 MPa の圧力で注入を開始し、浸透距離の動きが止まった時点を試験終了とした。

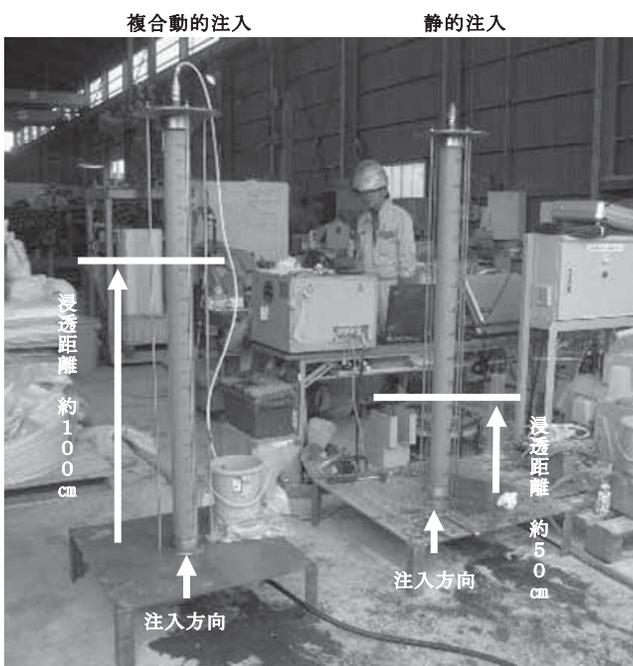


写真 1 室内モデル試験の状況

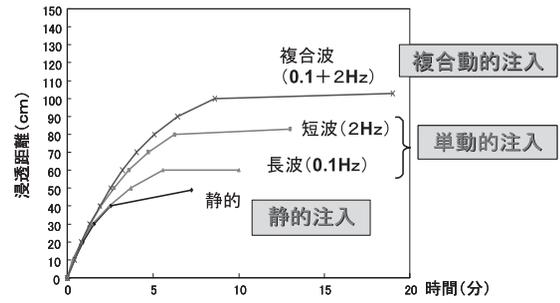


図 5 浸透距離の経時変化（注入方式別）

(2) 最適な周波数の確認

注入方式毎の室内試験結果を受け、周波数の組合せによる材料の到達距離を比較し、複合動的注入として最も適した周波数の組合せを実験により確認した（表 1）。

表 1 周波数の組合せと浸透距離の関係（6 号珪砂）

浸透距離 (cm)	長波 (Hz)			
	0	0.05	0.1	0.3
短波 (Hz)	0	64	75	
	2	87	114	118
	4	83	107	113
	6	81	94	97
8			93	

また、最適な周波数と透水係数の違いによる比較を行うため、一次元浸透試験用モールド（透明塩ビ製）に 8 号珪砂を詰め、周波数の組合せによる材料の到達距離を比較した（表 2）。

表 2 周波数の組合せと浸透距離の関係（8 号珪砂）

浸透距離 (cm)	長波 (Hz)		
	0	0.05	0.1
短波 (Hz)	0	19	26
	2		41
	4		38
	6		32
8			29

(3) 室内試験結果のまとめ

注入方式（静的・単動的・複合動的）の違いによる浸透距離から以下のことが確認された。

単動的注入の浸透距離は、静的注入の 1.2 ~ 1.6 倍
複合動的注入は、静的注入の 2 倍

また、複合動的注入時の浸透距離に対して、最も効果的な周波数の組合せから以下のことが確認された。

6 号珪砂：長波 0.1 Hz，短波 2 Hz

8 号珪砂：長波 0.05 Hz，短波 2 Hz

そのため、透水係数の違う 6 号珪砂（透水係数： 2.82×10^{-2} cm/sec）と 8 号珪砂（透水係数： 2.86×10^{-3} cm/sec）との比較から、透水係数が小さい程、長波は小さい方が効果的であると考えられる。

5. 模擬地盤による注入効果の確認

(1) 砂層（互層）モデル試験

砂層（互層）を想定した模擬地盤モデルに注入（静的と複合動的）を行い、浸透度合いの差異を比較する目的でモデル試験を行った（写真 2）。なお、注入材は懸濁型（超微粒子スラグ）を使用した。

砂層（互層）モデル試験では、注入量（252 ml）と注入速度（4L/min）を一定とした定量注入を行った。

(2) 砂層（互層）モデル試験の注入状況

改良形状を比較すると、静的注入における出来形改良径は、1 m 程度（写真 3）であり、注入孔から不



写真 2 砂層（互層）模擬地盤によるモデル試験



写真 3 静的注入による試験結果（改良径：1 m）



写真 4 複合動的注入による試験結果（改良径：1.9 m）

均一に拡がった形状となっていたが、複合動的注入における出来形改良径は、1.9 m 程度（写真 4）と注入孔を中心とする円形形状であった。これは、静的注入の約 2 倍の浸透距離を示し、面積に換算すると約 4 倍になることが確認された。

(3) 試験結果のまとめ

砂層（互層）モデル試験における複合動的注入の効果として、以下のことが確認された。

浸透距離は、静的注入の約 2 倍（面積に換算すると約 4 倍）

注入孔を中心とした広い範囲に均等かつ均質な改良

確認された効果から、未固結地山（砂層）を対象とした施工において、注入孔の間隔を広く設計することも可能となり、注入孔の減少による施工能率の向上が期待できると考えられる。

6. おわりに

複合動的注入工法の施工コストは、従来の静的注入とほぼ同等であり、その確認された効果（注入孔の間隔を広くすることも可能）から施工能率の向上が考えられる。

また、トンネル施工時の適用地盤としては、未固結砂層や砂礫層において、強度と止水性が必要な箇所を考慮しており、今後のトンネル補助工法（主に都市 NATM）での効果に期待できるものとする。

最後に、本報告で述べた複合動的注入工法は、清水建設㈱、ライト工業㈱および日本建設機械化協会施工技術総合研究所の三者による共同開発の成果である。研究開発に尽力いただいた各社の関係者の方々に、感謝の意を表するしだいである。

JICMA

[筆者紹介]

横澤 圭一郎（よこざわ けいいちろう）
日本建設機械化協会
施工技術総合研究所
研究第 1 部
部長



近藤 亮（こんどう りょう）
日本建設機械化協会
施工技術総合研究所
研究第 1 部
研究員

