

衝撃弾性波試験による棒状補強材のグラウト充填確認手法の実務への適用について

東日本旅客鉄道株式会社 正会員 ○丸山 貴広
 東日本旅客鉄道株式会社 正会員 前田 剛志
 東日本旅客鉄道株式会社 正会員 市川 達

1. はじめに

JR東日本では、首都直下地震に備えた耐震補強対策として、盛土や切土等の土構造物に対し、棒状補強材による耐震補強を進めている。変状リスクの高い土構造物を削孔したのちに棒状補強材（芯材：鋼棒+グラウト材：セメントミルク）を設置し、その周囲で発揮される摩擦抵抗により耐震性能の向上を図っている。

現在、棒状補強材による耐震補強工事の品質確保の向上及び管理面の省力化を目的として、非破壊によるグラウト充填評価手法の検証を行っている。これまで室内試験による検証を実施し、衝撃弾性波の波形（入力から鋼棒端部の反射波が生じる前までの波形）によりグラウト充填状況の評価ができることが分かっている¹⁾。

本研究では、実現場において衝撃弾性波試験を実施し、実務への本評価手法の適用可否を検証した。また、試験より得られた波形データを用いて機械学習により、グラウト充填状態を自動的に判定できるかの検証を実施した。

2. 実現場における衝撃弾性波試験

(1) 試験方法

試験は、図-1に示すように土留め壁に設置した長さ5.0m、削孔径110mmの棒状補強材を対象に実施した。測定方法は、周波数帯域20kHz程度のハンマーを用いて鋼棒先端に弾性波を入力し、ハンマー及び鋼棒先端に取付けた加速度センサから鋼棒を伝播する波形や対面から反射してきた受信波を収録した。

測定ケースを表-1に示す。Case1はグラウト充填後に引抜き試験を実施し、所定の引抜き耐力を有することを確認した箇所とし、Case2, Case3, Case4は、グラウト充填度（以下、充填度）を0%、50%、100%に変化させ、グラウト充填作業時に実施した。

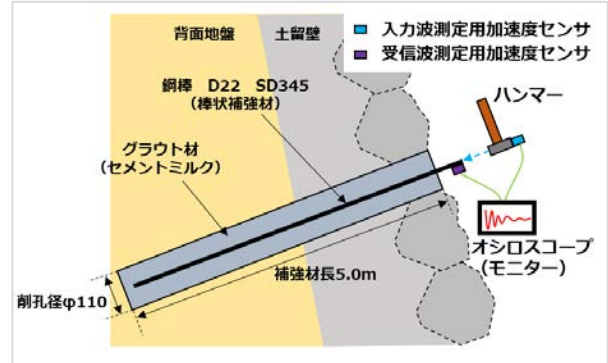
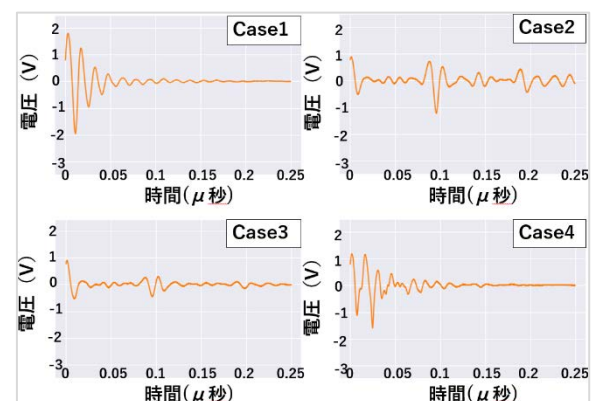


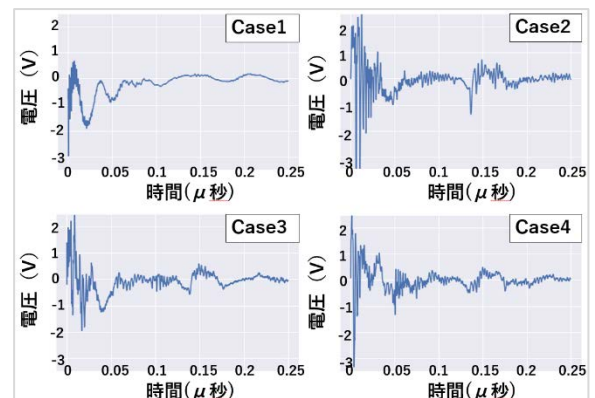
図-1 衝撃弾性波測定方法イメージ図

表-1 測定ケース

Case	グラウト充填		施工状態	箇所数
	充填度	充填状態		
1	100%	良	施工完了(引抜き試験実施済)	5
2	0%	不良	グラウト充填前	10
3	50%	不良	グラウト充填中	10
4	100%	良	グラウト充填直後	10



(a) 入力波の平均値波形



(b) 受信波の平均値波形

図-2 ケース毎の平均値波形

キーワード Ai解析, 弾性波, グラウト充填, 耐震補強

連絡先 〒101-0041 東京都千代田区神田須田町2丁目10番地1 東日本旅客鉄道株式会社 東京支社 東京耐震補強工事区

(2) 試験結果

各ケースの測定データの平均値波形を図-2に示す。なお、平均値波形は時間毎の測定値の平均をプロットしたものである。

入力波の波形では、充填度100%のケースに比べ、充填度0%、50%のケースはエネルギー（振幅の大きさ）の減衰に時間を要する傾向にあることが分かる。これは、これまで実施した室内試験と同様の結果となった。

受信波の波形では、入力波のような充填度に応じた傾向を確認することができなかった。これは、鋼棒の継手位置で弾性波の部分的な反射が生じ、多重反射により波形が重なり合っているためと考えられる。

3. 機械学習による検証

(1) 機械学習の概要

試験より得られた波形データを用いて、機械学習による充填状況の判別の検証を行った。検証では、機械学習技術の一つであるOne-class Support vector machine（以下、OCSVM）を用いた。OCSVMは、正常データのみから学習を行い、外れ値を検出することができる手法である。

本検証では、充填度100%且つ引抜き試験実施済のCase1を正常データとして学習させCase2, Case3, Case4を比較データとして異常検知分類（充填状況の判別）を実施することとした。

(2) 特徴量の設定

異常検知分類の手掛かりとなる特徴量（変数）として、図-3に示すとおり、最大振幅Lを記録してから振幅が半減するまでの時間を半減時間Tと定義した。

各ケースの半減時間の関連性を図-4に示す。入力波では、半減時間0.08 μ 秒を閾値として、充填度100%のCase1, Case4が充填度の低いCase2, Case3に比べ半減時間が短くなる傾向となる。受信波では、前述のとおり、多重反射により半減時間に明確な閾値を確認できなかった。

(3) 充填状況の判別

充填度の低いCase2, Case3を異常データとし、充填度100%のCase4を正常データとして異常検知分類を行った結果を表-2に示す。

OCSVMによる検証の結果、グラウト充填状態（良、不良）の正答率は83%となり、非常に高い精度でグラウト充填状況を判定できることが分かった。

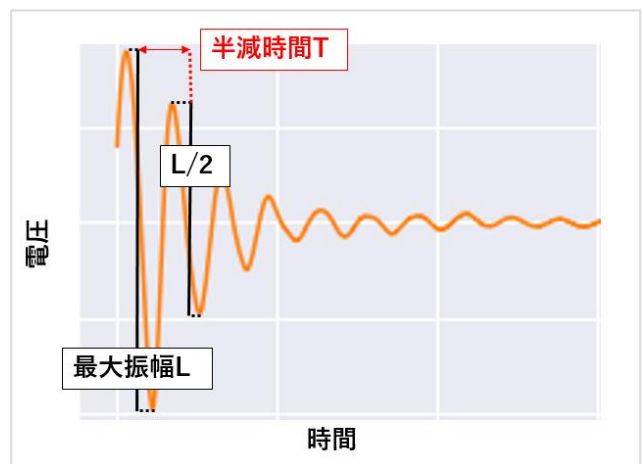


図-3 半減時間Tの定義イメージ

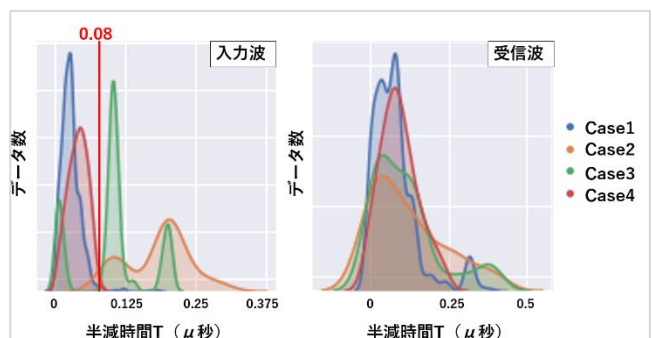


図-4 データ数と半減時間Tの関連図

表-2 機械学習での検証結果

分類	Case	グラウト充填状態	サンプル数	正答率
基準データ	1	良	500	—
比較データ	異常データ	不良	100	89%
	正常データ	良	50	77%
			平均正答率	83%

4. さいごに

本研究では、実現場において衝撃弾性波試験を実施し、波形の減衰傾向（半減時間）に着目することで、グラウト充填状況を評価できることを確認した。また、OCSVMにより、高い精度でグラウト充填状態の判別ができることを確認した。

今後は、異なるケースの検証を重ねることで、本工法を確立し、耐震補強工事の品質確保の向上及び管理面の省力化を図っていく所存である。

5. 参考文献

- 前田剛志, 市川達, 杉原竜二: 衝撃弾性波試験による棒状補強材のグラウト充填確認方法の検討, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, VI-16. 2021.