

若材齢コンクリートの弾性波速度および一軸圧縮強度の測定方法に関する一考察

東京都市大学 学生会員 ○佐藤 芙美

(独) 労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 正会員 吉川 直孝

(独) 労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 正会員 平岡 伸隆

東京都市大学 正会員 伊藤 和也

1. はじめに

山岳トンネル建設工事中の肌落ちを防止するため、掘削した直後の切羽面にコンクリートを吹付ける場合がある。硬岩から中硬岩地山の山岳 NATM 工事において、一次吹付け（鏡吹付け）終了時から支保工を建てこむために作業員が切羽近傍に立ち入るまでは通常、十数分程度であり、一次吹付けに用いられる吹付けコンクリートが支保効果を発揮するためには若材齢期間からの高い強度発現が要求される。このような状況を鑑みると、一次吹付けに用いる吹付けコンクリートの支保効果の検討を行うには、若材齢期における吹付けコンクリートの力学特性の把握が不可欠である。

そこで、本報告では、ベンダー・エクステンダーエレメント試験（以下、「BEE 試験」という。）¹⁾⁶⁾と一軸圧縮試験⁷⁾を実施し、若材齢コンクリートの剛性と圧縮強度の把握を行った。

2. 実験概要

本報告では弾性波を測定することができる BEE 試験と一軸圧縮試験を実施し、若材齢コンクリートの剛性および圧縮強度を把握する。しかしながら、若材齢期のコンクリートの供試体作製では、型枠脱型後の供試体の自立とキャッピングに困難を伴う。そこで、土質試験である土の三軸圧縮試験方法の、砂質土の供試体作製方法である「負圧法」⁸⁾と同様、予め厚さ 0.25 mm のゴムスリーブ（以下、「メンブレン」という。）を内張りにした型枠にコンクリートを打設し、脱型後は負圧を与えることで供試体を自立させた。

(1) 供試体の作製方法

本報告で適用する吹付けコンクリートの配合は、国土交通省の各地方整備局の「設計要領」⁹⁾に規定さ

表-1 吹付けコンクリートの設計配合⁹⁾

設計圧縮強度	$\sigma_{28}=18\text{N/mm}^2$
スランプ	10±2cm
W/C	56 %
単位セメント量	普通ポルトランドセメント 360 kg/m ³
粗骨材最大寸法	15 mm
急結剤	セメント使用量の 5.5 % (本実験では添加しない)
単位細骨材量	1086 kg/m ³
単位粗骨材量	675 kg/m ³

れている配合と同様とした。詳細を表-1 に示す。本報告では、一次吹付けから支保工建て込みまでの時間である約 10 分を養生時間とした若材齢吹付けコンクリートの強度変形特性を把握することを目的としている。ただし、一般的な吹付コンクリートのように急結剤を添加したコンクリートを用いて供試体を作製し、一軸圧縮試験を実施するという一連の作業を 10 分間で実施することは著しく困難を伴う。そこで、吹付けコンクリートの 10 分養生の圧縮強度に相当する急結剤を添加しない 6 時間養生のコンクリートを用いることとした。急結剤を添加した吹付けコンクリートの 10 分養生は文献値から圧縮強度換算で約 0.3 N/mm²である¹⁰⁾。

型枠には、図-1 に示すようなメンブレンを内張りにした直径 50 mm、高さ 100 mm の真鍮製円柱モールドを用いた。予め 50 kN/m²程度の負圧を与えることでモールドとメンブレンを密着させた型枠にコンクリートを打設した。コンクリートの練り混ぜは、JISA 1138「室内試験におけるコンクリートの作り方」に準拠した。供試体の作製方法については、参考文献¹¹⁾に詳しい。脱型した供試体の状況を写真-1 に示す。

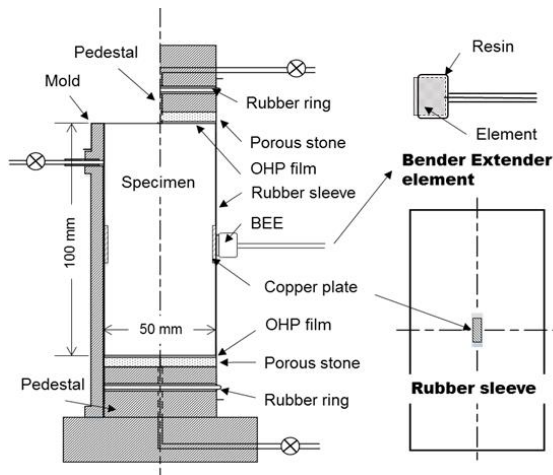


図-1 供試体および BEE 概略図

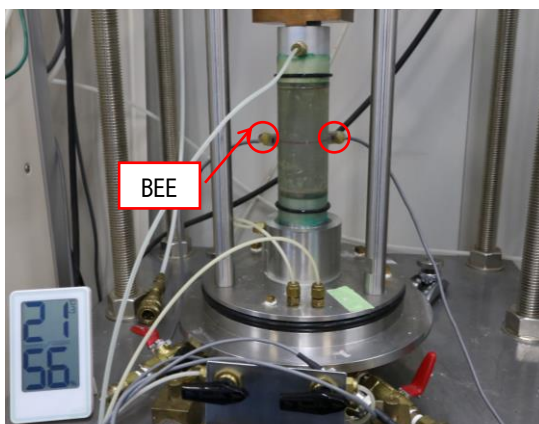


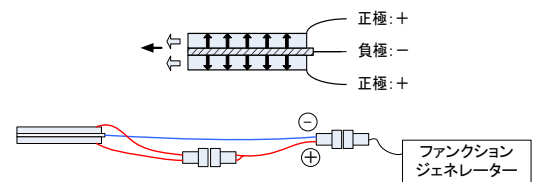
写真-1 BEE を接着した供試体

なお、本試験で使用した供試体計 5 本の内、供試体 No.1 と No.5, No.6 は表-1 の配合に基づき、型枠の容量（約 $0.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ ）に対して $0.25 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 分の材料を用いて手練りで作製したコンクリートであり、供試体 No. 2 と No. 3 は $3.5 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ の材料を用いてミキサー（容量 $70 \times 10^{-2} \text{ m}^3$ ）で練り混ぜられたコンクリートである。

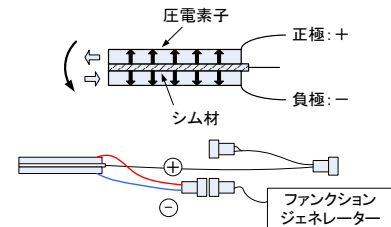
(2) BEE 試験について

BEE 試験は、既存の試験装置に取り付けて圧密中やせん断試験中に S 波速度を測定し、せん断弾性係数 G を求める波動試験法として地盤工学会 TC29 国内委員会で国際一斉試験を行うなど試験方法の国際標準化に向けた検討がなされている^{2), 3)}。エレメントの結線方法を直列から並列結線に変えることによって、S 波だけでなく P 波速度も計測することが可能である^{1)~6)}。

本研究で使用したエレメントはバイモルフ型アク



(a) 並列結線 (P 波)



(b) 直列結線 (S 波)

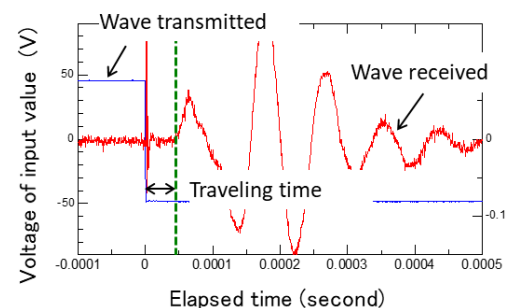
図-2 電極および結線方法と弾性波の関係⁶⁾

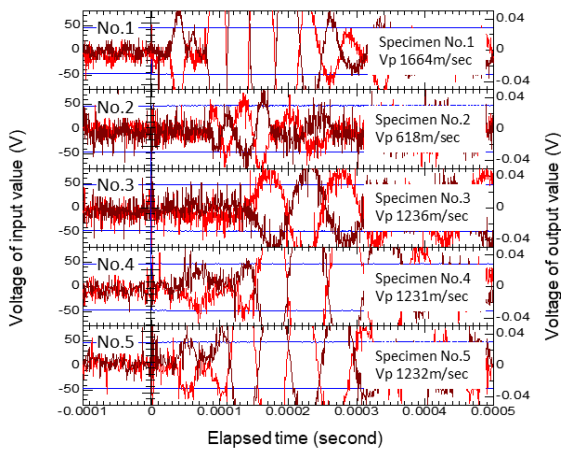
図-3 Start to start 法の概念図

チュエータであり、圧電素子を二枚貼り合わせた構造をしている。なお、二枚のエレメントの分極方向は異なる型を用いた。

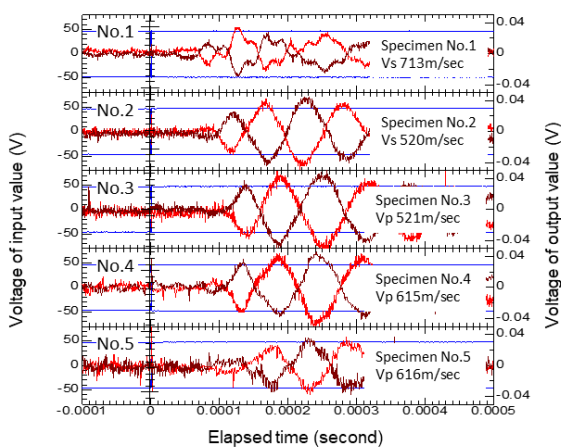
図-2に電極および結線方法と弾性波の関係を示す⁶⁾。図-2 (a)に示すように並列に結線した場合、電圧を印加することで二枚のBEEは同じように伸縮するためP波速度の計測が可能である。また、図-2 (b)のように直列に結線した場合は、一方のBEEは伸び、もう一方のエレメントは縮むため、エレメントは上下方向に振れ、S波速度の計測が可能である。

エレメントの設置方法として、メンブレンにあらかじめエレメントより少し大きな穴（長辺15 mm，短辺4 mm）を開けて、内側から銅板（長辺25 mm，短辺10 mm，厚さ0.15 mm）を接着し、外側から銅板にBEEを固定した。（写真-1参照。）供試体作製後、P波およびS波速度を計測した。

BEE 試験は電圧 $\pm 10 \text{ V}$ で周波数 5 Hz のパルス波を用いて実施し、得られた結果を平均することで弾



(a) P 波



(b) S 波

図-4 6時間養生コンクリートの BEE 試験結果

性波の伝播時間とした。弾性波の伝播時間は、図-3に示すような送信波と受信波の波の立ち上がりを時間差とする start to start 法によって求めた。土質試験基準 JGS2110-2009「パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法」¹⁾では、「透過した波の立ち上がり部分から透過時間を原則として 0.1 μ s まで読みとる」とあり、本研究でも同様な方法で伝播時間を求めた。

(3) 一軸圧縮試験について

一軸圧縮試験は、JISA 1216「土の一軸圧縮試験方法」に基づき、変位制御方式で実施した。エレメントを設置した状態で変位速度 2 mm/min にて、荷重軸方向変位量が供試体初期高さの 15% となるまで荷重した。荷重荷重および荷重軸方向の変位はそれぞれロードセルおよび外部変位計により計測した。



(a) 荷重前

(b) 荷重後

写真-2 荷重前後の供試体の状況

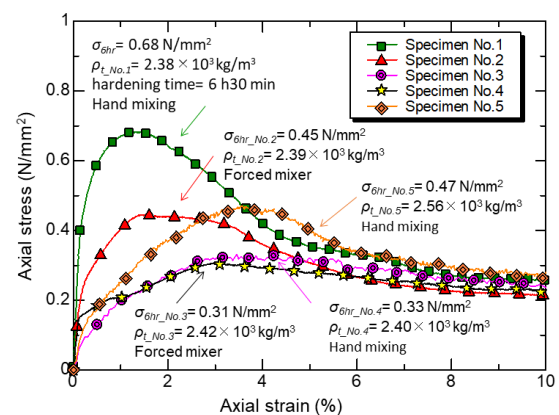


図-5 一軸圧縮試験による応力ひずみ関係

(図中に圧縮強度、湿潤密度、養生時間、練り混ぜ方法を明記)

3. 実験結果

本研究では、BEE 試験は 5 時間 30 分 (± 10 分) 養生後から開始し、その後、6 時間 (± 30 分) 養生後に一軸圧縮試験を実施した。以下に、得られた結果を示す。

(1) BEE 試験結果

本試験では、一軸圧縮試験と BEE 試験の実施時刻をできる限り同様とするため、パルス波のみを用いて弾性波速度を測定した。養生 6 時間の BEE 試験における弾性波速度測定結果を図-4 に示す。同図より、送信波の立ち上がりと受信波の立ち上がりの時間から到達時間を計測することが可能である。送信箇所と受信箇所の銅板間の伝播距離を到達時間で除すことにより、P 波および S 波速度をそれぞれ求めることができる。なお、本報告では位相の異なるパルス波を

2 回に分けて送受信させていることに留意する必要がある。また、受信波の到達位置の前に見られるわずかな波の乱れは、near field effect と呼ばれる P 波に起因するノイズである。

図-4(a)の P 波速度測定結果について、供試体 No.2 における弾性波の到達時刻が No. 1 と比較して著しく遅れていることが確認されるが、これは銅板と供試体が完全に密着しておらず縦波である P 波の伝達時間にそれが影響を与えた可能性がある。このため、供試体 No.2 の P 波速度の結果は平均値から省いた。よって、6 時間養生したベースコンクリートの平均弾性波速度は、それぞれ P 波速度 $V_{p_mean} = 1341$ m/sec, S 波速度 $V_{s_mean} = 617$ m/sec と求められた。

(2) 一軸圧縮試験結果

写真-2 に載荷前と載荷後の供試体の状況を示す。写真-2(b)より、破壊後の供試体上部は圧縮を受けて供試体内部に押し込まれるように変形しており、横方向の亀裂が発生した。また、供試体側面は樽型に膨張しており、斜め方向に亀裂が確認できる。

本試験で得られた応力ひずみ関係を図-5 に示す。同図中には、試験で得られた一軸圧縮強度 σ_{6hr} と供試体の寸法と質量より算出した湿潤密度 ρ_t および練り混ぜ方法を併記している。同図より、6 時間養生したベースコンクリートの応力ひずみ関係における初期勾配には相違があるが、それぞれの供試体の一軸圧縮強度や湿潤密度、練り混ぜ方法の差異は影響していないことが確認できる。このため、平均一軸圧縮強度は計 5 本の一軸圧縮強度より、 $\sigma_{6hrs_mean} = 0.45$ N/mm² と求められた。

4. まとめ

本報告では、吹付けコンクリートの 10 分養生の圧縮強度に相当する 6 時間養生のコンクリート（急結剤なし）を用いて本研究では土質試験で実用され始めている BEE 試験と一軸圧縮試験を実施し、ベースコンクリートの強度変形特性の把握を試みた。

その結果、得られた知見を以下に述べる。

(1) 「負圧法」を適用することによって若材齢コンクリートの一軸圧縮試験と BEE 試験を実施することができた。

(2) 若材齢コンクリートの初期剛性および初期圧縮強度を議論する上で、BEE 試験と一軸圧縮試験が適用できることが示唆された。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，pp. 259-270, 2009.
- 2) 地盤工学会：International Parallel Test on the Measurement of Gmax Using Bender Elements Organized by TC-29, <https://www.jiban.or.jp/file/e/tc29/>.
- 3) 山下聡：土と基礎，Vol.55, No.4, pp. 47-48, 2007.
- 4) Lings, M. L. and Greening, P. D.: A Novel Bender/Extender Element for Soil Testing, Géotechnique, Vol. 51, No. 8, pp. 713-717, 2001.
- 5) 堀智仁, 山下聡, 鈴木輝之：ベンダーエレメント試験による S 波および P 波速度の測定，第 60 回土木学会年次学術講演会講演概要集，3-465, 2005.
- 6) 吉川直孝, 堀智仁, 伊藤和也, 三田地利之：固結粒状材料における個別要素法パラメータの決定方法の検討，地盤工学ジャーナル，Vol. 8, No.2, pp. 221-237, 2013.
- 7) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，pp.541-549, 2009.
- 8) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，557-569, 2009.
- 9) 国土交通省中部地方整備局：道路設計要領—設計編—，pp. 7-27, 2014.
- 10) 土木学会：コンクリートライブラリー第 121 号吹付コンクリート指針（案）[トンネル編]，pp. 15, 2005.
- 11) 佐藤芙美, 吉川直孝, 平岡伸隆, 伊藤和也：若材齢コンクリートの弾性波速度および一軸圧縮強度の測定方法，第 27 回トンネル工学研究発表会，2017.