

シールドを用いた場所打ち支保システムで 用いるコンクリートの付着に関する検討

野口 守¹・三上 美輝雄²・宮崎 俊彦³・津野 究⁴・粥川 幸司⁵

¹正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 青森新幹線建設局 (〒030-0801 青森市新町2-2-4)
E-mail: mam.noguchi@jrtr.go.jp

²(独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 青森新幹線建設局 (〒030-0801 青森市新町2-2-4)
E-mail: m.mikami@jrtr.go.jp

³正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 青森新幹線建設局 (〒030-0801 青森市新町2-2-4)
E-mail: t.miyazaki@jrtr.go.jp

⁴正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: tsuno@rtri.or.jp

⁵正会員 (株) 地域地盤環境研究所 東京事務所 (〒113-0034 東京都文京区湯島1-8-4 山川ビル)
E-mail: kayukawa@geor.co.jp

シールドを用いた場所打ち支保システム（以後、「SENS」と記載する）では、掘進反力を場所打ちコンクリートの内型枠にとるため、必要な内型枠のリング数を選定する際にコンクリートとの付着力を考慮する必要がある。そこで、SENSにおけるコンクリートと内型枠の付着を模擬した室内試験を行い、圧縮強度と付着せん断強度を含めた付着特性を把握した。そのうえで、内型枠とコンクリートの付着を考慮した解析手法を提案し、実施工における付着応力や必要な型枠数について検討した。その結果、通常のジャッキ推力での掘進においてはコンクリートと内型枠の付着力は十分に確保されていることが確認できた。また、シールド掘進反力に対して十分な内型枠とコンクリートの付着を得るための内型枠数を把握した。

Key Words :SENS, shield, inner form, concrete, adhesion, analysis

1. はじめに

SENSは、シールド掘進と同時に場所打ちコンクリートによって一次覆工を構築するトンネル施工法^{1), 2)}で、現在、北海道新幹線津軽蓬田トンネルで2例目の施工を行っている³⁾。SENSでは、シールドの掘進反力を場所打ちコンクリートの内型枠にとるため、必要な内型枠のリング数を選定する際にコンクリートとの付着力を考慮する必要がある。一方、SENSの特性を考慮したコンクリート開発も行われている⁴⁾。そこで、SENSにおけるコンクリートと内型枠の付着を模擬した室内試験により圧縮強度と付着せん断力や押し付け荷重等との関係を把握するとともに、内型枠とコンクリートの付着を考慮した解析を行い、付着応力や必要な型枠数について検討したので報告する。

2. 一次覆工コンクリートの付着試験

(1) 試験概要

図-1に示す試験装置を使用し、長さ400mm×幅100mmの接着面を有する内型枠を模擬した鋼板の上に、高さ100mmのコンクリートを直接打設し、所定の圧縮強度が発現した時点で試験を行った。試験は併進工法設計施

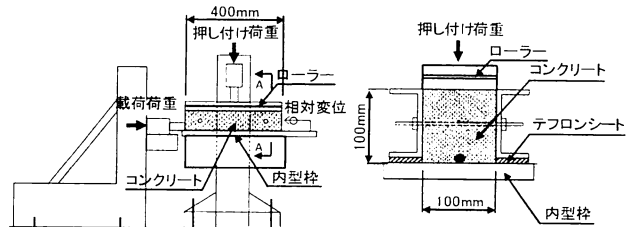


図-1 試験装置の概要

工指針（案）⁵⁾（以後、併進指針）に準拠するもので、鋼板とローラーを介して、鉛直方向の押付け荷重を作用させながら、水平方向に載荷し、図-2に示す付着破断力（ A ）と摩擦抵抗力（ B ）を相対変位（ δ ）とともに計測するものである。この試験で直接得られる付着せん断力（ A ）は、付着面全体での抵抗力であり、この中には摩擦抵抗力（ B ）が含まれるため、これらの差（ $A-B$ ）がコンクリートと内型枠の付着せん断力となる。

試験に使用するコンクリートはSENS用に開発したものである。主な要求性能として、8時間のフレッシュ性保持（50cmフロー到達時間が180秒以下）と24時間で15N/mm²以上の圧縮強度を有すること等がある。コンクリートの配合を表-1に示す。また、押付け荷重については、津軽蓬田トンネルで計測された内型枠への作用荷重から0.13～0.44MPaとし、当該の押付け荷重の元で表-2に示す若材齢を含む各5種類の強度発現時に試験を行った。

表-1 コンクリートの配合（単位量kg/m³）

水	セメント	石灰石微粉末	細骨材	粗骨材	増粘剤		高性能AE減水剤		消泡剤
					①	②	①	②	
189	450	200	625	822	4.25	4.25	8.78	4.55	0.21

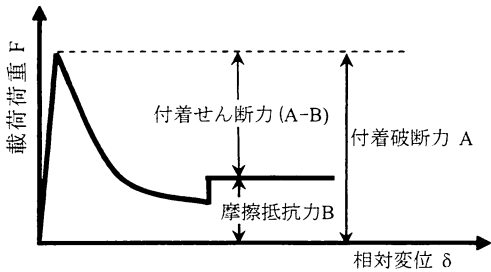


図-2 付着破断力と付着せん断力の関係

表-2 試験ケース一覧

押し付け荷重 (MPa)	供試体圧縮強度 (N/mm ²)				
	0.5	3.0	6.0	10.0	15.0
0.13	0.5	3.0	6.0	10.0	15.0
0.31	1.0	5.0	10.0	15.0	25.0
0.44	1.5	5.0	10.0	15.0	25.0

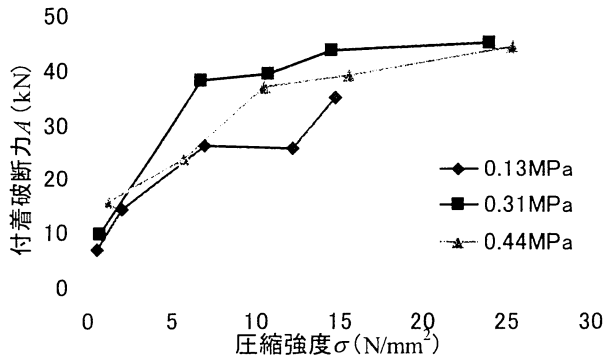


図-3 圧縮強度－付着破断力関係

(2) 試験結果

a) 付着破断力

図-3に圧縮強度（ σ ）と付着破断力（ A ）の関係を示す。それぞれの押付け荷重において、圧縮強度の増加に伴い、付着破断力がほぼ増加していることがわかる。図の勾配に着目すると、ややバラツキがあるものの、 A/σ は圧縮強度が小さい若材齢時に大きく、圧縮強度が10N/mm²を超えると付着破断力の増加量が小さくなる傾向がみられる。また、試験で行った押付け荷重の範囲内では、付着破断力と押付け荷重の間に関連性が見られないことが分かった。

b) 摩擦抵抗力

圧縮強度（ σ ）と摩擦抵抗力（ B ）の関係を図-4に示す。摩擦抵抗力は圧縮強度にかかわらず、それぞれの押付け荷重においてほぼ一定の値であることがわかる。また、摩擦抵抗力を押付け荷重で除して得られた動摩擦係数 μ を図-5に示す。同図には、併進指針の実験結果を合わせて示した。動摩擦係数は0.56～0.77で、併進指針の値（0.75～0.93）よりやや小さい値であった。

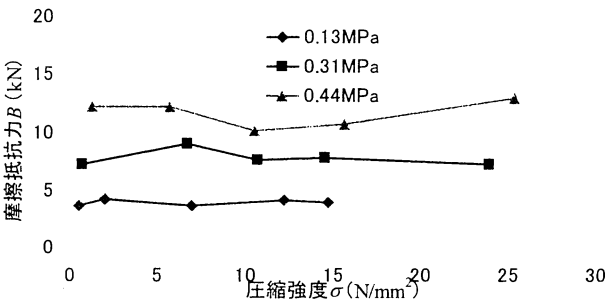


図-4 圧縮強度－摩擦抵抗力関係

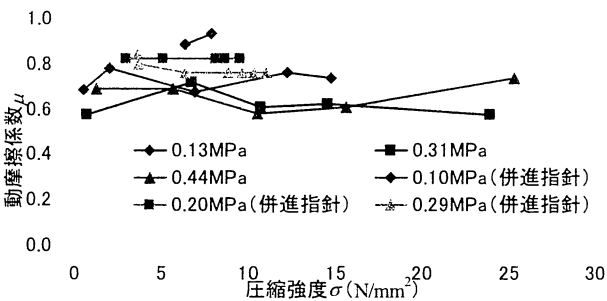


図-5 圧縮強度－動摩擦係数関係

c) 付着せん断力

圧縮強度（ σ ）と付着せん断強度 $\tau_{A/B}$ の関係を図-6に示す。付着せん断強度は付着せん断力（ $A-B$ ）を付着面積で除すことにより算定できる。また、同図には併進指針の実験結果も併記した。図より、付着破断力と同様に圧縮強度の増加に伴い付着せん断強度が増加しており、勾配である $\tau_{A/B}/\sigma$ に着目すると、付着せん断強度の増加量は若材齢時に大きく、圧縮強度が10N/mm²を超えると小

さくなる傾向がみられた。また、付着せん断強度と押付け荷重の間に関連性はみられないことが分かった。

以上のように、実験により圧縮強度と付着せん断強度の関係が得られた。

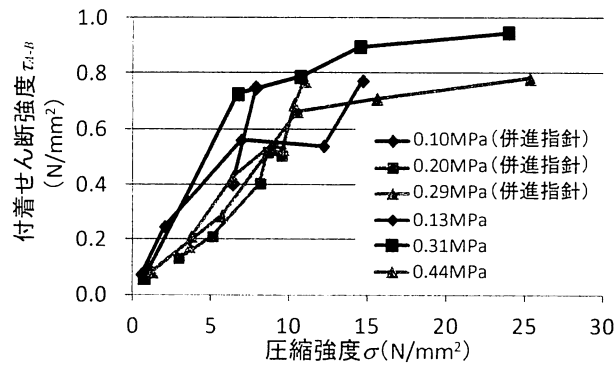


図-6 圧縮強度－付着せん断強度関係

3. 内型枠の付着に関する解析的検討

(1) 解析概要

SENS では、シールドの掘進反力を内型枠とコンクリートとの付着力にとるため、付着力を十分確保する必要がある。ここで、SENS では連続してコンクリートを打設するため、地山と内型枠の間には材齢の異なるコンクリートが充填された状態となっており、コンクリートの圧縮強度や付着力も位置によって異なっている。

そこで、2 で得られた若材齢時の圧縮強度および付着強度の発現特性と津軽蓬田トンネルの施工情報（施工サイクル・ジャッキ推力など）を用いて、内型枠の付着に関する解析を実施した。

a) 解析モデル

解析に用いたモデルを図-7 に示す。ここでは、内型枠を 1 リング当り桁高方向に 20 分割、トンネル軸方向に 12 分割した二次元平面ひずみ要素でモデル化した。そのうえで、モデルの地山側に線形ばねを取り付け、内型枠とコンクリートとの付着を模擬した。垂直ばね定数 K_c 、付着ばね定数 K_s は、次式で算出した。

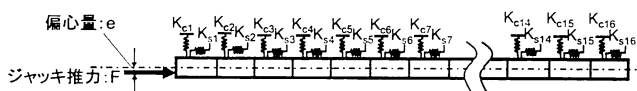


図-7 解析モデル

$$K_c = \frac{EA}{L} \quad (1)$$

$$K_s = \lambda \times K_c \quad (2)$$

ここで、 E はコンクリートのヤング係数、 A は単位面積、 L は一次覆工コンクリートの厚さ、 λ は換算係数⁹⁾である。

b) コンクリートの材料特性

SENS で用いられているコンクリートの材料試験により得られた材齢と圧縮強度の関係（図-8）より、次式の圧縮強度発現特性の推定式を求めて解析に用いた。

$$f'_c(t) = 16.1 \times \log_e(t/24 - 0.42) - 0.9 \times (t/24 - 0.42) + 32 \quad (3)$$

ここに、 $f'_c(t)$ ：材齢 t の圧縮強度

また、付着試験により得られた図-3 および図-6 をもとに、材齢と付着せん断強度 τ_{A-B} との関係（図-9）を求めたうえで、次式の付着せん断強度 τ_{A-B} 発現特性の推定式を求めて解析に用いた。

$$\tau_{A-B}(t) = 0.32 \times \log_e(t/24 - 0.42) + 0.11 \times (t/24 - 0.42) + 1.0 \quad (4)$$

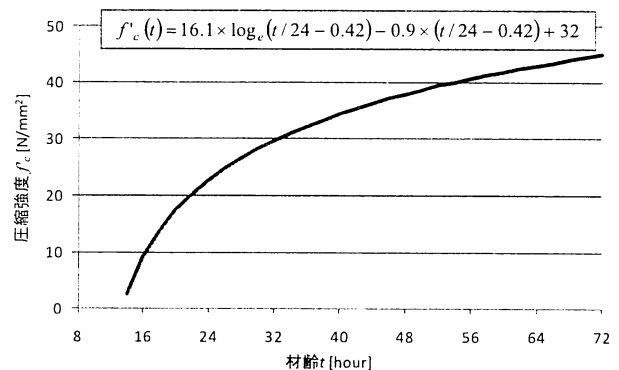


図-8 材料－圧縮強度関係

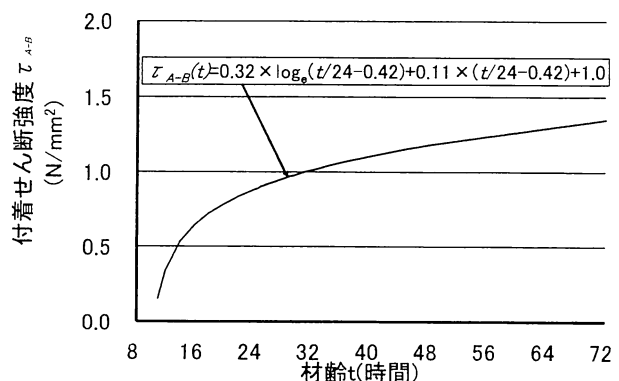


図-9 材料－付着せん断強度関係

c) 解析ケース

解析ケースを表-3に示す。4ケース設定しており、ケース1は通常の連続掘進サイクルを模擬している。ケース2は清掃明け直後の掘進サイクルを模擬しており、前リング掘進から14時間経過後に掘進を再開した場合である。ケース3は清掃明け連続掘進サイクルを模擬しており、休日明けに6リング連続掘進した後である。ケース4は連続掘進サイクルで装備推力全てがシールド反力として作用した場合を想定している。ケース2は、ケース1と比較してコンクリートの硬化が進んでいるため期待できる付着力が大きくなる。ケース3はケース1と2の中間的な状況である。また、津軽蓬田トンネルの施工データ(図-10)をもとに通常の連続掘進サイクル、清掃明け直後の掘進サイクルおよび清掃明けの連続掘進サイクルの代表リングを399R、384Rおよび389Rとしてジャッキ推力(総推力)を設定した。なお、内型枠の装備台数を16リング(ただし内1リングは脱型される)として検討を行っているが、ケース4については内型枠数を変えた場合についても解析を行った。

表-3 解析ケース

ケース	ジャッキ推力	掘進サイクル
ケース1	30,000kN	通常連続掘進サイクル
ケース2	39,000kN	清掃明け直後サイクル
ケース3	30,000kN	清掃明け連続掘進サイクル
ケース4	105,000kN (装備推力)	通常連続掘進サイクル

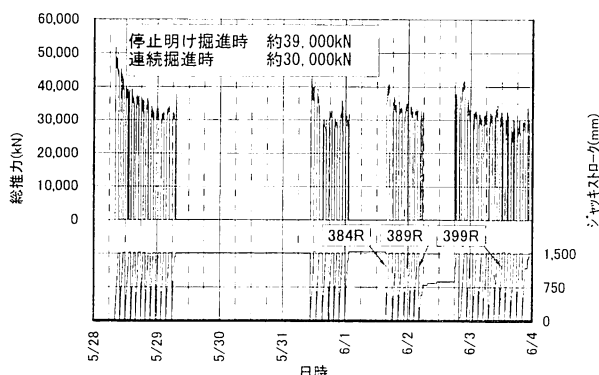


図-10 計測箇所付近の推力履歴

(2) 解析結果

ケース1~3の解析結果を図-11~図-13に示す。付着せん断強度 τ_{AB} に対し、解析より得られたジャッキ推力30,000~39,000kN作用時の付着応力度(ジャッキ推力を内型枠外周面積で除した値)は十分下回っており、通常のジャッキ推力での掘進においてはコンクリートと内型枠の付着力は十分に確保されていることが確認された。

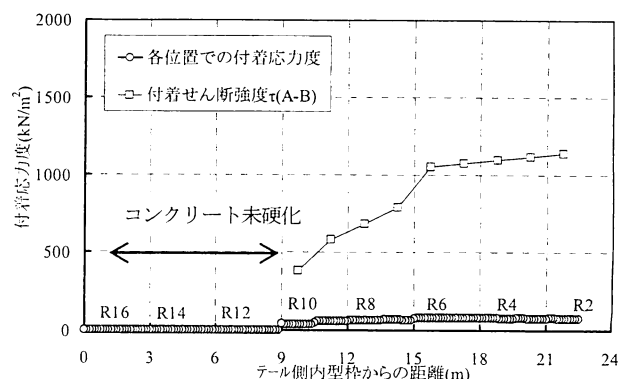


図-11 ケース1 (通常連続掘進サイクル)

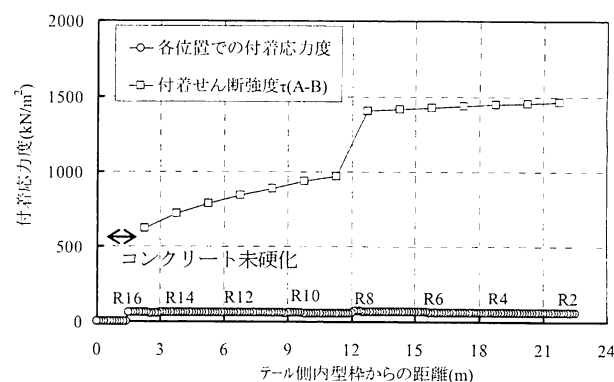


図-12 ケース2 (清掃明け直後サイクル)

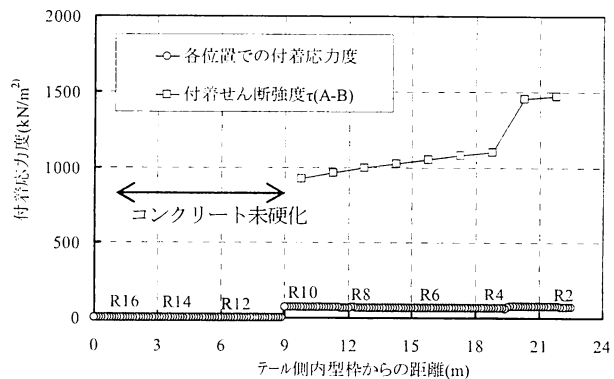


図-13 ケース3 (清掃明け連続掘進サイクル)

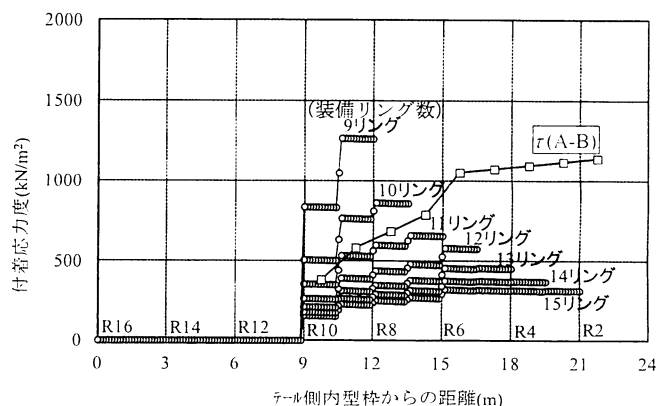


図-14 ケース4 (装備推力作用・通常連続掘進サイクル)

なお、図中で付着応力度を分担していない内型枠は強度発現前の若材齢コンクリートである。

ケース4の解析結果を図-14に示す。内型枠が16リングある場合、装備推力が作用した場合でも、作用する付着応力度は付着せん断強度を十分下回っており、コンクリートと内型枠との付着力が十分確保されていることが確認できた。また、内型枠数11リング以上では作用する付着応力度が付着せん断強度を下回っているが、内型枠が10リング以下の場合、作用する付着応力度が付着せん断強度を上回っている。この場合、シールド掘進反力が掘進不可能になることが懸念される。

以上のように、シールド掘進反力に対して十分な内型枠とコンクリートの付着を得るためには、最低11リングが必要であるとの結果が得られた。なお、実施工においては、脱型時に十分な強度が発現していることや、施工時の想定外の事象なども考慮して、必要な内型枠数を選定する必要がある。

4. おわりに

SENSにおけるコンクリートと内型枠の付着を模擬した室内試験を行って圧縮強度と付着せん断力や押付け荷重等との関係を把握するとともに、内型枠とコンクリートの付着を考慮した解析を行い、付着応力や必要な型枠数について検討した。得られた成果は、以下の通りである。

- ・SENSにおけるコンクリートと内型枠の付着を模擬した室内試験を行うことにより、圧縮強度と付着せん断強度の関係も含めた付着強度特性を把握した。
- ・内型枠を二次元平面ひずみ要素、内型枠とコンクリ

ートとの付着をばねで模擬し材齢に応じたばね特性を設定することにより、内型枠とコンクリートとの付着について解析的に検討する手法が提案できた。

- ・内型枠の付着に関する解析を行うことにより、通常のジャッキ推力での掘進においてはコンクリートと内型枠の付着力は十分に確保されていることが確認できた。また、装備推力が作用した場合でも、作用する付着応力度は付着せん断応力度を十分下回っており、コンクリートと内型枠との付着力が十分確保されていることが確認できた。

なお、今後も施工データを蓄積し、解析手法の精度向上を図っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 飯田廣臣，磯谷篤実，井浦智実，川嶋潤二，小西真治：シールドを用いた場所打ち支保システムの施工，トンネル工学報告集，第14巻，pp.195-202，2004。
- 2) 飯田廣臣，野々村政一，小山幸則，小西真治，小泉淳：シールドを用いた場所打ちライニングの挙動に関する現場計測結果とその考察，土木学会論文集 F，Vol.63，No.3，pp.349-360，2007。
- 3) 小川淳，小伊豆俊博，玉井達毅，小林孝志：小土被り区間の SENS による初期掘進—北海道新幹線津軽蓬田トンネル—，トンネルと地下，第41巻，第10号，pp.7-15，2010。
- 4) 長谷川正明，野口守，玉井達毅：SENS（シールドを用いた場所打ち支保システム）のコンクリート開発—北海道新幹線，津軽蓬田トンネル—，コンクリート工学，Vol. 49，No.1，pp.106-109，2011。
- 5) 日本鉄道建設公団：併進工法設計施工指針（案）山岳トンネル編，pp.235-241，1994。
- 6) 国土交通省：鉄道構造物等設計標準・解説，基礎構造物・抗土圧構造物，pp.127，2000。

(2012.9.3 受付)

INVESTIGATION OF ADHESION BETWEEN INNER FORM AND CONCRETE FOR SENS METHOD

Mamoru NOGUCHI, Mikio MIKAMI, Toshihiko MIYAZAKI,
Kiwamu TSUNO and Koji KAYUKAWA

In applying SENS, it is required to determine the number of inner form in consideration of adhesion between inner form and concrete because the reaction force of TBM acts on the inner form. The laboratory test was carried out to know the characteristics of adhesion between inner form and concrete, including the relationship between compressive strength and adhesion shear strength. This paper also describes the proposed numerical calculation method to simulate the adhesion under excavation and introduce the results under the condition of construction site. It is verified that sufficient adhesion is kept under the normal condition at the site and it is also known the number of form to obtain the necessary adhesion.