

若材齢トンネル吹付けコンクリートの 変形特性に関する研究*

谷 卓也¹ 青木 智幸² 小川 豊和²
武田 均³ 藤井 義明⁴

Study on Deformation Characteristics of Young-Age Tunnel Shotcrete

by Takuya TANI^a, Tomoyuki AOKI^b, Toyokazu OGAWA^b,
Hitoshi TAKEDA^b and Yoshiaki FUJII^c

- a. International Operations Headquarters, 1-25-1, Nishi-Shinjuku, Sinjuku, Tokyo, 163-0606, Japan
b. Taisei Technology Center, Taisei Corporation, Totsuka, Yokohama, Kanagawa, 245-0051, Japan
c. Faculty of Engineering, Hokkaido University, N13W8, Sapporo, 060-8628, Japan
(Corresponding author, E-mail: fujii6299@frontier.hokudai.ac.jp)

Uniaxial compression tests and multi-stage stress relaxation tests for specially prepared young-age tunnel shotcrete were carried out. Comparing to previous studies, clip gauges were determined to be the best to evaluate elastic moduli of young-age tunnel shotcrete. Uniaxial compressive strength and 33% secant modulus were larger than those of base concrete till 1 day, however, they became less than those of base concrete after then. Uniaxial compressive strength and 33% secant modulus till 1day showed a linear relationship. This means that 33% secant modulus could be determined from uniaxial compressive strength which is routinely determined at tunnel construction sites. In the multi-stage stress relaxation test, displacing rate significantly affected 33% secant modulus. This will result in significant change in support response to rock mass deformation. Stress decrease by yielding and stress increase with curing time even after the yielding were observed for slow loading multi-stage tests. The above findings will help to design reasonable tunnel supports through precise stress analyses around tunnel faces.

KEY WORDS: Shotcrete, Tunnel Support, NATM, Young-Age Concrete, Stress Relaxation

1. 緒 言

山岳トンネルの標準的な工法である NATM において主要な支保部材として用いられている吹付けコンクリートは、一般に用いられる生コンクリートと同様、材齢の進行とともに強度やヤング係数が変化する。また、トンネルの壁面に吹付けられた後、掘削に伴う地山の変形を受けながら硬化するという特殊な環境下にある。

鋼アーチ支保工やロックボルトといった他の支保部材と同様、吹付けコンクリートは地山の変形を受けるとその反力として支保内圧を地山に与え、トンネルを安定させるが、地山に対する支保の反力は部材の弾性係数に大きく依存する。吹付けコンクリートの場合、若材齢時にヤング係数が変化するため、支保効果を正確に評価するには、ヤング係数の変化を把握して数値解析に反映させることが重要となる。

吹付けコンクリートは他の支保部材と同様に掘削に伴う地山の変位を最も多く受ける位置に設置されるので、材齢 1 日までの最もヤング係数の変化が大きい時期に地山からの変形のほとんどを受ける場合が多い。例えば、切羽の進行と地山の変位量の関係を Panet¹⁾ の提案式に基づいて計算すると、等方弾性的な挙動を示す岩盤内に掘削された幅 10 m (断面積 78 m²) の円形トンネルの切羽から 0.5 m 離れに設置された支保は、全変位の約 7 割を僅か 4 m の切羽進行で受けることになる。地山条件や施工条件に依るものの、現在の施工技術では 1 日に 4m の進行を得ることは難しいことでは無い。

若材齢期間の吹付けコンクリートの力学特性が支保効果に与える影響に関し、熊坂²⁾ は、短時間で高い剛性が得られるコンクリートを用いると、地山の塑性化が低減され変形量が抑制されるという検討結果を示している。トンネル吹付けコンクリートの支保効果に関する数値解析を用いた検討では、材齢や応力レベルを考慮したヤング係数を設定して支保効果を検討した例³⁾ やピーク強度後のひずみ軟化特性まで考慮した例⁴⁾、トンネルの掘進速度と材齢によるヤング係数の変化を考慮した研究⁵⁾ もある。しかしながら、実務上は若材齢からのヤング係数の変化やクリープ変形までの全てを考慮した等価弾性係数^{6, 7)} を用いることが多いのである。これは、従来の二次元数値解析による検討において、

*2011 年 9 月 5 日受付 2011 年 12 月 2 日受理

1. 正会員 工修 大成建設 (株) 国際支店

2. Ph.D. 大成建設 (株) 土木技術研究所

3. 工博 大成建設 (株) 土木技術研究所

4. 正会員 工博 北海道大学教授 大学院工学研究院

[著者連絡先] FAX: 011-706-6299 (北大工)

E-mail: fujii6299@frontier.hokudai.ac.jp

キーワード: 吹き付けコンクリート, トンネル支保, NATM, 若材齢コンクリート, 応力緩和

Table 1 Experimental conditions.

Tests	Description	Displacement rate (mm/min)	Objectives
Uniaxial test	Uniaxial compression tests for $\phi 100 \times 200$ mm specimens at curing time between 1 hour and 28 days	0.1 before 24 hours and 0.05 at or after 24 hours	Effects of curing time on uniaxial compressive strength and elastic moduli
Multi-stage stress relaxation test	Multi-stage loading for $\phi 100 \times 200$ mm specimens	Case 1: 5.0×10^{-3} Case 2: 2.5×10^{-3} Case 3: 1.2×10^{-3}	Visco-elastic behavior

Table 2 Mixture proportions of concrete specimens (W: water, C: cement, s/a: sand-aggregate ratio, S: fine aggregate, G: coarse aggregate, FA: fly ash).

Type	Design strength (MPa)	Maximum aggregate diameter (mm)	Air content (%)	W/C (%)	s/a (%)	Base amount (kg/m ³)					Chemical admixture	Quick setting admixture
						W	C	S	G	FA		
Base concrete	18 (standard)	10	2.8	58	62	190	330	1102	681	-	-	-
	36 (high strength)	10	4.0	45	70	170	378	1252	541	-	0.015 C	-
Shotcrete	18	15	3.0	58	61	209	360	1001	689	89	0.015 C	0.08 C

期待される解析精度を実現するためには、等価弾性係数の使用が適切かつ十分であったためと考えられる。

しかしながら、近年、計算機の高性能化に伴って三次元解析が一般化し、切羽形状の三次元的な効果や切羽の進行速度を考慮した検討が行われ、また、種々の初期強度発現特性を有する吹付けコンクリートが用いられるようになった状況下で、吹付けコンクリートの支保効果の検討や、さらに支保設計の合理化を行うには、材齢 1 日までの力学特性の変化は無視できないと考える。既往の研究には、吹付けコンクリートの変形特性に関する詳細な検討例⁸⁾があるものの、材齢 1 日までの若材齢の供試体の一軸圧縮試験によってヤング係数を評価した例⁹⁻¹¹⁾は極めて少なく、また、ヤング係数の評価方法や評価結果に相違がある場合や、試験条件が明確に示されていないものもある。

著者らは、これまで詳細に検討されてこなかった、材齢が 1 日までの若材齢吹付けコンクリートの力学特性の変化を把握し数値解析に反映させることによる、地山の特性に応じた合理的なトンネル支保の設計を目指している。本論文では、その第一段階として実施してきた、材齢 1 日までの若材齢コンクリートの強度・剛性の発現特性およびクリープ特性を把握するための試験について、供試体の作成方法と試験方法を明示する他、試験で得られた応力～ひずみ関係から得られた知見について述べる。

2. 若材齢コンクリートの試験

2・1 概要

若材齢の供試体を用いて、Table 1 に示すような一軸圧縮試験と応力緩和試験を実施した。一軸圧縮試験は、若材齢（注水後約 24 時間程度まで）時の強度およびヤング係数の発現特性を、応力緩和試験は粘弾性挙動を調べる目的で実施した。本研究では、一定速度の荷重と一定時間の変位保持を繰り返す応力緩和試験を「多段階応力緩和試験（表中では multi-stage stress relaxation test）」と称する。

供試体の種類としては、吹付けコンクリートとベースコンクリートの二種の供試体を採用した。試験に用いた供試体の配合を Table 2 に示す。ベースコンクリートは吹付けコンクリートと比較して品質が安定しており、試験方法を確立する際に有利である。また、ベースコンクリートの力学特性から吹付けコンクリートの力学特性を求めることができれば、吹付けコンクリートの設計や施工への反映が容易になると考え、ベースコンクリートも試験材料として採用した。なお、本論文では、「ベースコンクリート」

という呼称を、吹付けコンクリートと同じ配合で急結剤を含まず、かつ吹付けないコンクリートの意で用いる。

ベースコンクリートの試験では、設計基準強度の違いによるヤング係数やクリープ特性の差異を確認するため、トンネルの施工で標準的に採用されている設計基準強度の異なる二種の配合で試験を実施した。以降、設計基準強度が 18 MPa の供試体を「普通」、36 MPa の供試体を「高強度」と称する。

2・2 試験体の作成方法と養生

a) ベースコンクリート供試体 供試体は、直径 100mm、高さ 200mm の円柱形とし、鋼製モールドを用いて作成した。供試体は温度 20℃、湿度 80% の恒温・恒湿室で打設し、型枠が脱型可能となる注水後 5～6 時間後まで静置した。その後、温度 21 ± 2℃、湿度 60 ± 30% の試験室内で脱型し、試験に供するまで気乾養生した。

供試体の作成方法について述べる。始めに生コンクリートをモールドに流し込み、表面を均した後、上部に鋼製蓋を設置する。この上蓋は下蓋と平行になるように供試体と密着する構造となっており、脱型後はそのまま供試体とともに載荷できる強度と剛性を有している (Fig. 1a)。

供試体は、1 バッチ当たり 20 本程度を作成した。品質のばらつきが生じないように、スランプ、空気量、単位重量による打設時の管理を行った。また、各バッチ毎に凝結時間の確認と、封緘養生した供試体 3 本による 28 日強度試験を実施し、供試体の同等性を確認した。

b) 吹付けコンクリート供試体 供試体の形状は、ベースコンクリートの供試体と同様に、直径 100mm、高さ 200mm の円柱形とした。

若材齢の吹付けコンクリートの供試体は、吹付け後のトンネル壁面から採取して得るのが理想である。しかしながら、特に初期に強度を発現する材料を用いない限り、コア抜きによる成形は難しい。実際、急結剤の添加により自立性は確保されるものの、試料の強度はコア抜きに対しては十分ではない。また、供試体作成の作業時間を考えると、数時間の材齢で試験を実施する場合、一度に多くの供試体を得ることも困難である。

以上の理由から、以下に述べるような工夫を施したプラスチック製の型枠を用いて、供試体を作成することとした。吹付けは湿式で、ノズルを型枠から 1～1.5m の離間で吹き付けた。型枠は、吹付け時に空気が溜まらないよう底面を金網とし、側面にも $\phi 10$ mm の穴を約 25mm の間隔で多数設けた。また、金網の目を



(a) Base concrete (normal strength) (b) Shotcrete
Fig.1 Examples of the specimens before compression.

骨材の最大径程度とし、跳ね返った骨材が型枠の底に溜まらないようにした。さらに、型枠は供試体の長さに対して底部を約2cm程度延長し、跳ね返った骨材が溜まった場合でも除去できるようにした。打設後は、早い時期に供試体の両端部から約5mm程度吹付けコンクリートを取り除き、混練後約10分で30MPa以上の圧縮強さとなる歯科用の印象材を用い、平行の出ている型枠の端部を利用して厚さ15mmのガラス板で仕上げた。型枠の脱型は、打設後約3時間で型枠にカッターで切り込みを入れて半割にし、供試体に衝撃や変形を与えないように取り除いた。

供試体は、型枠をユニット化して1回に30個作成した。上述の穴や金網の目に関わる工夫をしてもなお、型枠の有限性に起因して、原位置で吹き付けられた場合には表面にしか生じ得ないはずの空隙が供試体側面や底面付近に生じる場合があった。そこで、実験結果が原位置で吹き付けられたコンクリートと少しでも近くなるよう、脱型後、表面に10mm以上の顕著な空隙が認められるものについては除去し、残りの全ての供試体は試験前に密度を計測し、平均値の95%以下のものを除いた。

吹付け後の供試体の整形は、温度が20℃の環境下で行った。供試体の表面は濡れたウエスで覆い、乾燥を防いだ。脱型後の供試体は、温度20℃、湿度80%±10%に保持した養生容器内に保管した。試験前の供試体の例をFig.1bに示す。

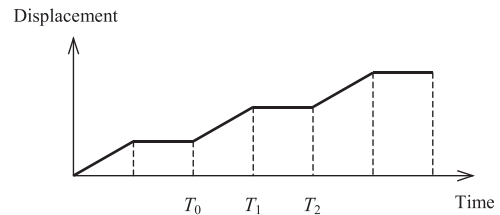
2・3 一軸圧縮試験

ベースコンクリートの一軸圧縮試験では、材齢1日未満の供試体については材料試験機(Instron社製1185,機械式,容量100kN)を、材齢が1日以上経過した供試体の材齢試験にはアムスラ型材料試験機(東京衡機製造所社製,油圧式,容量1000kN)を使用した。載荷速度は、材齢1日未満の試験では0.10mm/min,1日以上の試験では0.05mm/minとした。

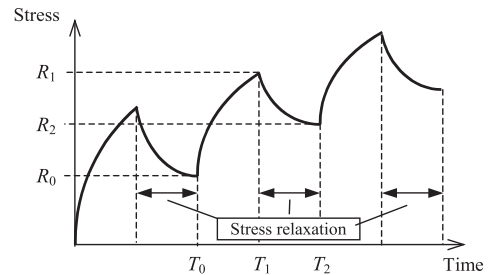
一軸圧縮試験を実施する供試体の材齢は、注水後8,12,24時間および2,3,28日とした。材齢1日未満における試験では、載荷速度を材齢1日以上の試験の2倍としたが、これは1つの載荷試験機で3つの供試体の試験を1時間以内で終了できるようにしたためである。

試験時の載荷荷重は材料試験機に取り付けたロードセルで、載荷軸方向の変位はコンプレッションメータで計測した。コンプレッションメータの計測点間隔は100mmである。

吹付けコンクリートの一軸圧縮試験では、材料試験機(Instron社製5586,機械式,容量300kN)を使用し、載荷速度は0.10mm/minとした(載荷速度の制御は、クロスヘッドの変位量を基準とした)。一軸圧縮試験を実施する供試体の材齢は、吹付け後4時間から24時間まで4時間間隔とし、以降2,3,28日とした。試験の開始材齢は、吹付けコンクリートをトンネル現場で打設して



(a) Platen displacement



(b) Stress response

Fig.2 Loading pattern in multi-stage stress relaxation test.

試料を採取し、実験室まで運搬、試験準備に要した時間による。

2・4 多段階応力緩和試験

多段階応力緩和試験は、Fig.2aに示すように一定速度の載荷と載荷変位の保持を繰り返す試験である。この載荷パターンはトンネル掘削を模擬している。コンクリートの粘性な特性に応じて、変位保持時にはFig.2bに示すような応力緩和の応答が得られ、この様な載荷を繰り返すことから、多段階応力緩和試験と称する。なお、単にいくつかの載荷速度での圧縮試験を行わず、わざわざ多段階応力緩和試験を実施した理由は、まず、間欠的に切羽が進行するトンネル掘削を模擬するためであり、次に、将来的に、より正確な応力解析のための粘性変形を含めた構成方程式を導出する際のデータとするためである。

一定速度載荷時の載荷速度はTable1に示す 5.0×10^{-3} , 2.5×10^{-3} , 1.2×10^{-3} mm/minの3種に設定した。以下、コンクリート種別毎に試験方法を述べる。

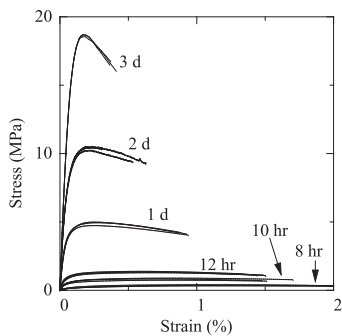
ベースコンクリートの試験には、サーボ型材料試験機(サム電子機械社製,油圧式,容量500kN)を用いた。供試体は凝結時間を目安に脱型し、載荷を開始した。一定速度の載荷と変位の保持はそれぞれ2時間とした。最初の応力緩和開始時刻を材齢10時間の一軸圧縮試験の時間と一致させた。載荷速度の制御は、載荷板間に設置した変位計の変位量を基準とした。

吹付けコンクリートの試験には、材料試験機(Instron社製5500R,機械式,容量250kN)を用いた。載荷パターンはベースコンクリートと同様に、2時間毎に載荷と変位保持を繰り返した。載荷軸方向の変位は、クロスヘッドの変位量の他、供試体の対向する側面に装着した2個のクリップゲージ(Instron社製,定格±1mm)によっても計測した。荷重は試験機に付属するロードセルで計測した。載荷速度の制御は、クロスヘッドの変位量を基準とした。

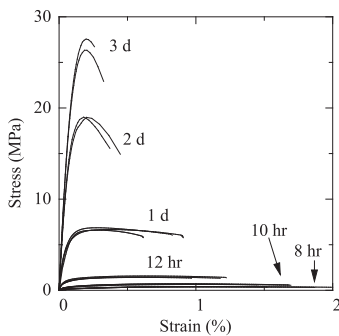
3. 試験結果

3・1 一軸圧縮試験

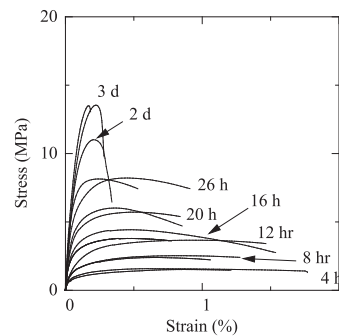
ベースコンクリートでは、試験を各材齢で3回(高強度の材齢2日は2回)実施した。吹付けコンクリートでは、各材齢で2回実施したが、試験に必要な試験体が1個不足したため、48時間



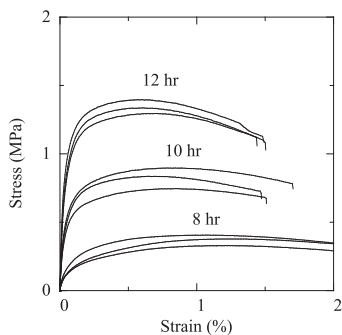
(a) All results



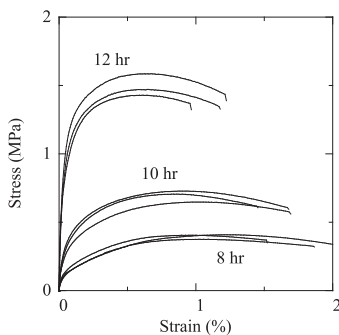
(a) All results



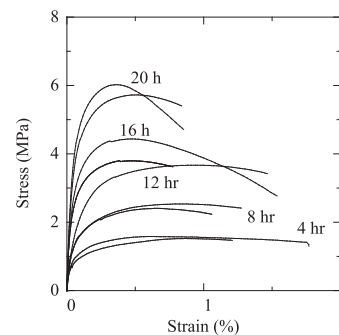
(a) All results



(b) 8 hours to 12 hours



(b) 8 hours to 12 hours



(b) 4 hours to 20 hours

Fig. 3 Stress-strain curves of uniaxial compression tests for base concrete specimens (standard).

Fig. 4 Stress-strain curves of uniaxial compression tests for base concrete specimens (high strength).

Fig. 5 Stress-strain curves of uniaxial compression tests for shotcrete specimens.

の試験は1回のみとした。材齢8, 10, 12時間, 1, 2, 3日の一軸圧縮試験結果から得られた応力-ひずみ線図を, Figs. 3-5に示す。Fig. 3はベースコンクリート(普通), Fig. 4はベースコンクリート(高強度), Fig. 5は吹付けコンクリートの結果である。

一軸圧縮強度は最大荷重点の応力で評価した。ヤング係数については, ピーク荷重時の応力を100%としたときの応力レベル50%における応力-ひずみ線図の接線の傾きとしたヤング係数(50%接線ヤング係数)とJIS A 1149に規定される静弾性係数(33%割線ヤング係数)の二つを算定した。33%割線ヤング係数 E_S は, 次式を用いて算定した。

$$E_S = \frac{S_1 - S_2}{\epsilon_1 - \epsilon_2} \dots\dots\dots (1)$$

ここに, S_1 : 最大荷重の1/3に相当する応力, S_2 : 供試体の縦ひずみ 50×10^{-6} のときの応力, ϵ_1 : 応力 S_1 によって生じる供試体の縦ひずみ, ϵ_2 : 50×10^{-6} である。材齢と一軸圧縮強度の平均値との関係をFig. 6aに, 同じく50%接線ヤング係数, 33%割線ヤング係数の平均値との関係をそれぞれFigs. 6b, 6cに示す。

Figs. 3, 4に示したベースコンクリートの試験結果については, ばらつきが少ないデータが得られている。材齢12時間までは, 一見ばらつきがあるように見えるが, これは試験時の僅かな材齢の差が, 試験結果に影響を与えているためと思われる。

3・2 多段階応力緩和試験

試験時間と載荷板の変位量および試験時間と載荷に伴って生じた応力との関係をFig. 7に示す。また, 応力とひずみの関係をFig. 8に示す。Figs. 7, 8の図中, Table 1に示す様に載荷時の載荷速度が $5.0 \times 10^{-3} \text{mm/min}$ と最も大きい試験をCase1, 順に 2.5×10^{-3} , $1.2 \times 10^{-3} \text{mm/min}$ をCase2, Case3とした。

なお, ベースコンクリートの試験開始時間は凝結時間により設

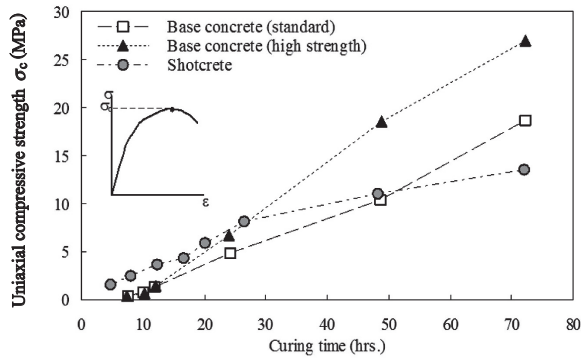
定したが, 吹付けコンクリートについては, 打設から供試体の運搬, 試験準備に要した時間で決まっている。試験開始材齢は, ベースコンクリート(普通)で7.1~7.6時間, ベースコンクリート(高強度)で7.4~8.4時間, 吹付けコンクリートでは4.2~5.4時間であった。また, 吹付けのCase2については, 停電により20時間で試験を終了している。

Fig. 7からは, 試験時間の経過に伴う応力値の変化が分かる。載荷速度はCase1 > Case2 > Case3であるから, 同じ試験時間で比較するとCase1が最も大きなひずみを供試体に与えることになる。普通では12時間, 高強度では16時間まで, 載荷速度の大きいケースの方が応力値が高いという, 一般的な粘性挙動を示しているが, その後はCase1の応力値が低くなっている。吹付けでは16時間を超えても20時間まで応力の値はCase1 > Case2 > Case3の順となっている。

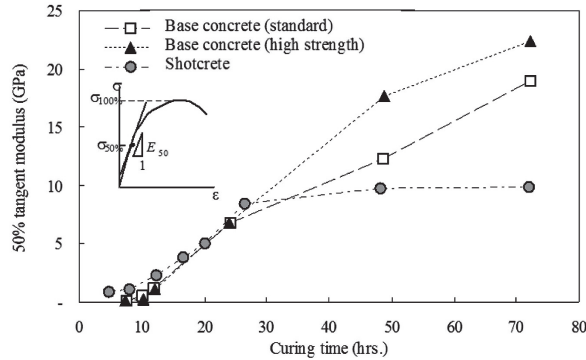
Fig. 8で示された応力とひずみの関係については, 載荷速度が大きい試験ほど, 応力~ひずみ関係の傾きが小さく, ヤング係数が小さい結果となった。また, コンクリート種別で傾きの違いを見ると, 高強度コンクリートの応力とひずみの傾きが他と比較して明らかに大きい。同じ載荷速度の試験結果において傾きを比較すると, その値は水セメント比に対応している。

3・3 試験結果の考察

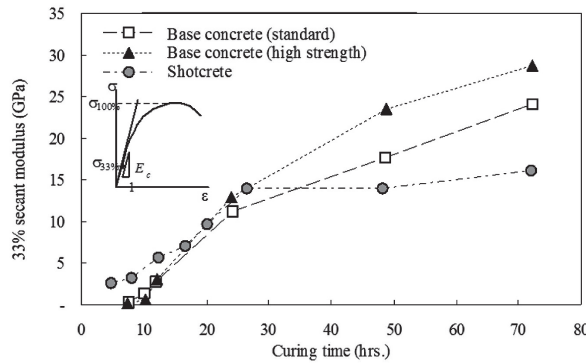
a) 一軸圧縮強度とヤング係数の発現特性 吹き付けコンクリートの一軸圧縮強度やヤング係数の発現特性は, およそ材齢1日までとそれ以降では発現速度の傾向が異なっている(Fig. 6)。材齢1日以降の発現特性については, 対数関数による近似¹²⁾や一般のコンクリートに適用される双曲線関数による近似¹³⁾が適用できると考えられる。それ以前の若い材齢では, 一軸圧縮強度やヤング係数は時間の経過とともに増加率が大きくなっている。



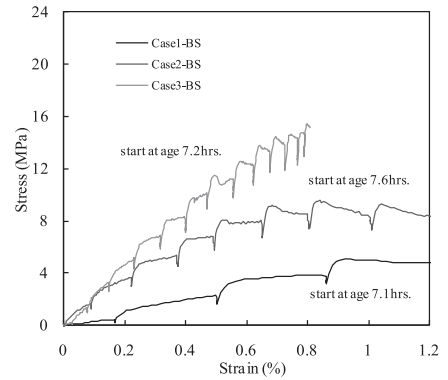
(a) Uniaxial compressive strength



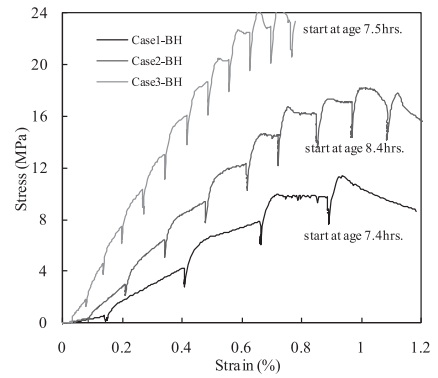
(b) 50% tangent modulus



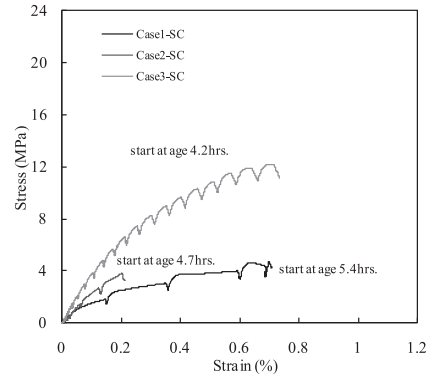
(c) 33% secant modulus



(a) Base concrete (standard)



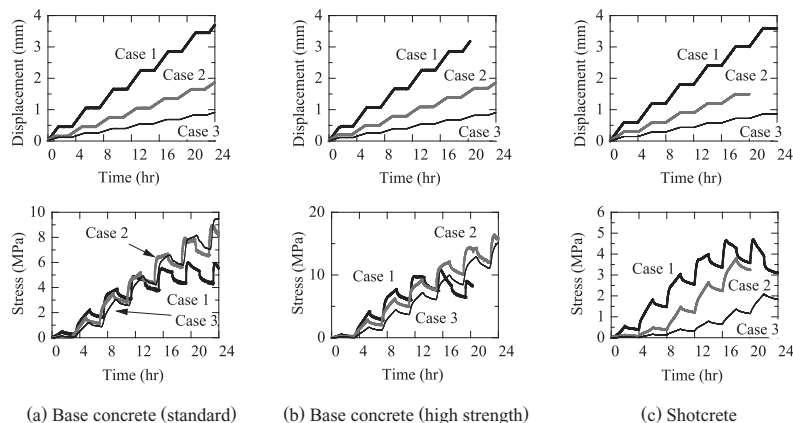
(b) Base concrete (high strength)



(c) Shotcrete

Fig.6 Effects of specimen age to mechanical properties.

Fig.8 Stress-strain curves in multi-stage stress relief tests.



(a) Base concrete (standard)

(b) Base concrete (high strength)

(c) Shotcrete

Fig.7 Displacement and stress in multi-stage stress relief tests.

この時期の発現特性は、瀬崎ら¹⁰⁾が適用した指数関数で表現できると考える。

ベースコンクリートの結果について、普通と高強度の違いについて述べる。ベースコンクリート（普通）とベースコンクリート（高強度）の一軸圧縮試験結果を比較すると、24時間以降については、単位セメント量（1 m³のコンクリートを作るために必要なセメントの質量、Table 2のC）が多いベースコンクリート（高強度）の方が一軸圧縮強度、ヤング係数ともに大きい値を示している。しかし、24時間未満の材齢では、ほぼ同等かベースコンクリート（普通）の方が値が大きい結果となっている。これは、ベースコンクリート（高強度）には高性能 AE 減水剤が添加されており、凝結が遅延した影響と考えられる。

ベースコンクリートと吹付けコンクリートを比較すると、初期の硬化特性が明らかに異なる。特に、材齢1日までは、概ね吹付けコンクリートの方が一軸圧縮強度およびヤング係数とも大きく、これは、吹付け時に添加された急結剤の効果であると考えられる。しかしながら、以降の強度の伸びはベースコンクリート（普通）と比較しても鈍く、急結剤の添加により長期強度が低下するという一般的な傾向と整合的である。また、Fig. 5に示した吹付けコンクリートの材齢12時間や20時間の応力-ひずみ線図のように、最大荷重点付近でのひずみの大きさが異なるといった点が特徴として挙げられる。これは、急結剤をノズル付近で添加する吹付け方式のため、添加される急結剤量が局所的にばらつき、強度特性や変形特性の差異となって現れたものと推察される。

b) 一軸圧縮強度とヤング係数の関係 3種の材料の一軸圧縮試験から評価した一軸圧縮強度と33%割線ヤング係数との関係をFig. 9に示す。図から、一軸圧縮強度10 MPaまでは、コン

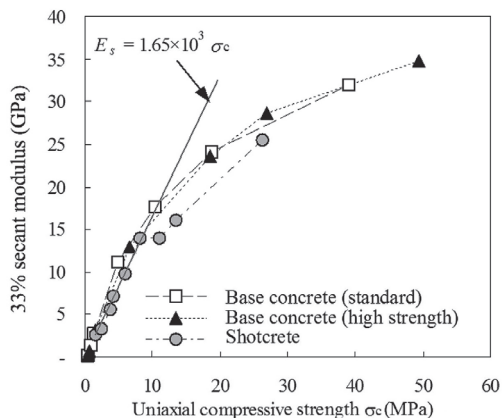


Fig.9 Uniaxial compression strength and 33% secant modulus.

Table 3 Uniaxial compressive strength and tangent modulus for 1 day age concrete in various studies.

	Uniaxial compressive strength (MPa)	33% secant modulus (GPa)	Cement (kg/m ³)	Quick setting admixture/cement (w%)	Preparation method and size (mm) of specimens
Tsuchiya et al. ⁵⁾	12	13	350-380	3-5	Cylindrical specimens drilled out from shotcrete on tunnel wall or wood box (φ68 x 136, φ100 x 200)
Katase et al. ¹⁴⁾	12	3.3	350	5-6	Cylindrical specimens drilled out from shotcrete on tunnel wall (φ68 x 136)
Yoshida et al. ⁹⁾	11	3.5	380	5-7	Cylindrical mortar specimens (φ50 x 100)
Sezaki et al. ¹⁰⁾	6.5	1	380	6, 8, 10	Shotcrete to mold, cubic specimens (100 x 100 x 100)
This study	8.2	14	360	8	Shotcrete to mold, cylindrical specimens (φ100 x 200)

クリート種別に関わらずほぼ1本の直線上にデータが位置するが、それ以降は、ベースコンクリートと吹き付けコンクリートとでそれぞれ10 MPa未滿とは異なる関係がみられる。

吹き付けコンクリートについては、一軸圧縮強度10 MPaがほぼ材齢1日に対応し、それまでの33%割線ヤング率と一軸圧縮強度σ_cとは次の回帰直線で近似できる(相関係数r=0.99)。

$$E_s = 1.65 \times 10^3 \sigma_c (\sigma_c < 10 \text{MPa}) \dots \dots \dots (2)$$

つまり、本研究で用いた条件における材齢1日未滿の若材齢の吹き付けコンクリートのヤング係数は、(2)式を用いて一軸圧縮強度から換算できる。他の条件においても、あらかじめ(2)式における係数を求めることができれば、施工現場で実施される若材齢時の品質管理用の強度試験から、変形特性の一つであるヤング係数を推定できる可能性がある。

c) ヤング係数に関する既往の研究例との比較 本研究で評価した材齢1日におけるヤング係数について、Table 3に示す既往の研究結果と比較し、試験方法および評価方法の妥当性について検証する。

土屋ら⁸⁾は、材齢1日以降の吹き付けコンクリートについて、円柱形供試体を用いた6箇所の現場の試験結果をまとめている。材齢1日では一軸圧縮強度を12 MPa、ヤング係数を13 GPaと評価している。供試体はトンネル壁面もしくは木箱に吹付けたコンクリートからコアを抜いて作成し、ひずみの値はコンプレッソメータの変位量もしくはひずみゲージから得ている。

片瀬ら¹⁴⁾は、トンネル壁面の吹き付けコンクリートからコアを抜き、円柱形の供試体を用いて材齢1日からの一軸圧縮試験を実施している。材齢1日では一軸圧縮強度を11.8 MPa、ヤング係数を3.3 GPaと評価している。変位は変位計を2個を用いて計測していると記述されているが、どの位置の変位を計測したかは不明である。

吉田ら⁹⁾は、急結剤を添加した吹き付けないコンクリートで、材齢1時間から28日までの円柱形供試体について一軸圧縮試験を実施している。原著から値を読み取ると、材齢1日では一軸圧縮強度11 MPa、ヤング係数を3.5 GPaと評価できる。

瀬崎ら¹⁰⁾は型枠に吹付けた立方体の供試体で試験を実施し、材齢1日では一軸圧縮強度6.5 MPa、ヤング係数を1 GPaと評価している。

Table 3からは、一軸圧縮強度と比較してヤング係数の評価結果に大きなバラツキが認められる。諸条件は異なるものの、Fig. 9に示したように一軸圧縮強度とヤング係数には高い相関がある。瀬崎ら¹⁰⁾では、他の試験結果と比較して一軸圧縮強度が小さい点を考慮しても、ヤング係数の値は特に低く評価されている。

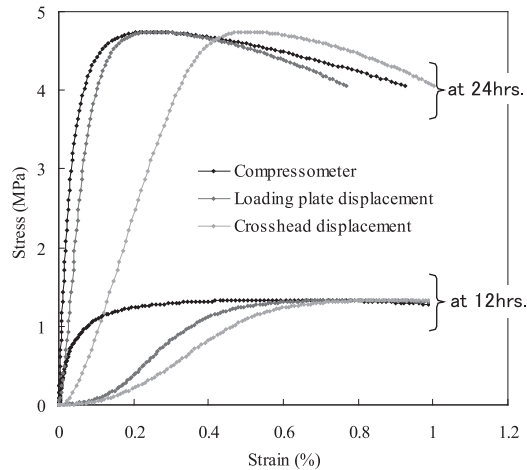


Fig.10 Stress-strain curves by different measuring methods.

若材齢での試験では、単位セメント量や急結剤量の他、養生条件の一つである温度が、特に強度やヤング係数の発現特性に大きく影響すると考えられる。しかしながら、一軸圧縮強度の評価結果を見る限りでは、配合や養生条件の違い以外の要因で、ヤング係数に差異が生じている可能性があると考えられる。

ヤング係数のばらつきについては、片瀬ら¹⁴⁾が指摘しているように、載荷板に接する端面の乱れが要因として挙げられる。また、施工現場等で簡易な試験機を用いて試験した場合、試験機の剛性が変位量の計測に影響する可能性もある。Figs. 6b, 6cの50%接線ヤング係数と33%割線ヤング係数のように、その評価方法でも値に明らかな差異が生じる場合もあるが、Table 3で見られる程の大きな差異はない。大きめにヤング係数を評価している土屋ら⁸⁾と本研究において、変位の計測方法をコンプレッソメータで行っている点が共通していることを考えると、変位の計測方法がヤング係数の評価に大きく影響した可能性が高い。

そこで、コンプレッソメータによる供試体中央部100mm区間の変位、供試体の上下の載荷板間の変位、材料試験機のクロスヘッドの変位から換算したひずみによる応力-ひずみ線図によりその差を確認した。Fig. 10に材齢12時間と24時間で行った普通コンクリートの試験結果について示す。同図からは、変位の計測方法の違いによりひずみ量の大きさが、「コンプレッソメータ」<「供試体上下載荷板間変位」<「クロスヘッドの変位」の順となっている。これは、供試体上下載荷板間の変位には、供試体の変形の他に、載荷板に接する端面の乱れによる変位、クロスヘッド変位にはさらに、試験機のたわみが含まれているためである。供試体上下載荷板間変位によるひずみは、材齢24hの場合には、クロスヘッド変位によるひずみよりはるかに小さくコンプレッソメータによるひずみに近いが、材齢が12hの場合には、コンプレッソメータによるひずみよりもクロスヘッド変位によるひずみに近くなっている。これは、材齢が若い場合に供試体が軟弱であり、載荷板に接する端面の乱れによる変位が大きかったためと思われる。いずれにしても、供試体の変形以外の余計な変位が含まれない、コンプレッソメータ（もしくはクリップゲージ）による計測で評価したヤング係数が吹付けコンクリートの変形特性を一番正確に現していると判断した。

d) 多段階応力緩和試験において載荷速度の差異が応力応答に与える影響 Figs. 7a, 7bでは、高強度、普通ともに試験の経過時間が12時間までは、与えられるひずみの量に応じて応力も大きくなる傾向を示したが、12時間以降のCase1では、ひずみが

増加しても応力の値は上がらず減少傾向を示している。これは供試体が破壊した影響によるものと考えられる。ベースコンクリート（普通）のCase1の供試体は、載荷開始時材齢7.1時間、試験開始後12時間で材齢は約19時間となる。Fig. 6の一軸圧縮強度によれば、材齢19時間の一軸圧縮強度は約3.5MPaとなる。12時間以降の載荷では応力応答値が約5MPaをピークに変位を与えても減少しているが、供試体が破壊し、残留強度状態での応力応答になっているものと考えられる。試験時間が16時間、20時間と載荷速度を0とした後に再び変位を与えた時点で、応力応答のピーク値が12時間の値よりも大きくなっていることから、破壊後の残留強度も材齢の進行に伴う剛性の変化の影響を受けていると推察される。高強度コンクリートでも同様な現象が確認された。Fig. 7cの吹付けコンクリートの結果では、試験開始後16時間からの載荷で、変位が増加しても応力が減少している。

e) 載荷速度が応力とひずみの関係に与える影響 Fig. 8では、載荷速度が大きい試験ほど、ヤング係数が小さい結果となったが、これは同じひずみに達した時点での材齢が若いためである。この差異は顕著であり、若材齢時の吹付けコンクリートのヤング係数の違いは、地山から受ける変形に対して生じる反力に大きな影響を与える。また、同じ水セメント比のベースコンクリート（普通）と吹付けコンクリートの試験結果は同様な応力とひずみの関係を示している（Figs. 8a, 8c）ことから、変形特性の一つであるヤング係数については、同じ載荷条件による急結剤を混ぜないベースコンクリートの試験から評価できる可能性が示された。

なお、Figs. 7b, 8bに見られるように、載荷直後の低応力レベルにおいて、応力応答による応力値が小さいが、これはベースコンクリート（高強度）に添加された混和材の遅延効果によるものであり、急結剤が加えられていないベースコンクリート（高強度）の試験で影響が顕著に現れたと考える。影響の程度については別途検討が必要であり、今後の課題としたい。

4. 結 論

4・1 ヤング係数の評価

ヤング係数は、変位（ひずみ）の計測方法の差異により評価結果が大きく変わり、その傾向は材齢が若い程顕著であった。現場で吹付けた供試体を用いた一軸圧縮試験を実施し、供試体の変位をコンプレッソメータを用いて計測したときの応力-ひずみ関係から評価したヤング係数が、吹付けコンクリートの変形特性を比較的正確に現していると思われる。

一方、ベースコンクリートと吹付けコンクリートの試験結果の比較からは、円柱形供試体の直径が100mm程度では、急結剤の添加量の変化により強度および変形特性の評価がばらつき可能性も明らかになった。この影響は、若材齢ほど顕著にみえ、必要とする評価精度と材齢に応じて、試験数量および供試体サイズについて検討する必要がある。

4・2 一軸圧縮強度とヤング係数の関係

材齢の進行に伴う吹付けコンクリートの一軸圧縮強度とヤング係数の変化を評価した結果、材齢1日を境界として発現特性が異なることが確認できた。また、一軸圧縮強度とヤング係数の関係については、一軸圧縮強度が10MPa（材齢約1日）以下では、コンクリートの配合、急結剤の有無に関係無く両者の関係が類似しており、(2)式で示した近似式が適用できる。このことは、若材齢時では一軸圧縮強度からヤング係数が間接的に評価できる可能性を示している。

4・3 ベースコンクリートと吹付けコンクリート

ベースコンクリートと吹付けコンクリートを比較すると、急結

剤の効果で初期の剛性発現特性が明らかに異なる。特に、材齢 1 日までは、概ね吹付けコンクリートの方が一軸圧縮強度、ヤング係数とも大きい。ただし、材齢 28 日で比較すると吹付けコンクリートの一軸圧縮強度、ヤング係数はともに小さいという急結剤使用時の一般的な傾向を確認した。

4・4 吹付けコンクリートの支保効果の検討に対する提言

近年、良好な地山条件においてトンネルの急速施工を目的として、材齢 10 分で 3 MPa 以上の強度を発現する吹付けコンクリートが開発され、施工が行われるようになってきている¹⁵⁾。また、膨張性の地山特性を有する変形の大きい不良地山におけるトンネル施工では、二重支保（一次支保における二度目の支保工および吹付けコンクリート）が採用され、最適な施工時期について解析的に検討されている^{16, 17)}。いずれの研究においても、打設直後の若材齢時に変形を受ける吹付けコンクリートが解析結果に影響すると考えられるため、その強度および剛性の発現特性を把握することの重要性が示されていると言えよう。

これまで、低減された一定のヤング係数を用いる検討が多く行われてきたが、今後は、実際のトンネル吹付けコンクリートを用いた試験により材齢 1 日未満のヤング係数の発現特性を明らかにし、数値解析に適用することが重要であると考えられる。また、応力緩和挙動から粘性変形についても評価して数値解析に反映させることにより、様々な変形挙動を呈する地山について、その地山特性に適した吹付け材料の力学特性や適用性を示すことができると考えている。

今後は、粘性変形も含めて材齢の変化に伴う変形特性の変化を

表現できる力学モデルと、簡易な一軸試験による粘性係数の評価方法について検討を進めていきたい。

謝辞 大成・奥村組特定建設工事共同企業体 北海道横断自動車道東占冠トンネル工事作業所には、吹付けコンクリート材料の提供等、本研究に対し多大なるご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

References

- 1) M. Panet: Proc. 4th ISRM Congress, (Balkema, Rotterdam, 1979), Vol. 3, pp. 279-289.
- 2) H. Kumasaka: Tonneru Kogaku Ronbunshu, **16** (2006), 23-34.
- 3) K. Tsuchiya: Doboku Gakkai Ronbunshu, **III-4** (1985), 31-40.
- 4) K. Kubo: Doboku Gakkai Ronbunshu, **III-58** (2002), 99-106.
- 5) H. Kumasaka: Tonneru Kogaku Ronbunshu, **14** (2004), 35-59.
- 6) T. Kondo, H. Tsuchiya, M. Abe: 27th. Doshitsu Kogaku Symposium (1982), pp. 41-46.
- 7) K. Tsuchiya, N. Miyata, H. Inoue et al.: Tetsudo Gijutu Kenkyujo Sokuho (1983), No. A-83-134.
- 8) K. Tsuchiya, H. Inoue, N. Yasuda: Tetsudo Gijutu Kenkyujo Sokuho (1982), No. 82-36.
- 9) H. Yoshida, M. Shibata, H. Sudo: Doboku Gakkai 39th Nenji Gakujutsu Koenkai (1984), V-46, pp.91-92.
- 10) M. Sezaki, T. Kibe, Y. Ichikawa, T. Kawamoto: Zairyo, **38** (1991), 1336-1340.
- 11) J. Golser, R. Galler, P. Schubert, K. Rabensteiner: ECI Conference Shotcrete for Underground Support VII (1985), pp.180-188.
- 12) K. Okada, H. Muguruma: *Kaitei Sinban Konkurito Kogaku Handbook* (Asakura Shoten, 1891), pp. 363-364.
- 13) Doboku Gakkai: *2002 nen Seitei Konkurito Hyoujun Shihoucho, Sekohen* (2002), pp.52-53.
- 14) T. Katase, C. Tanimoto, Y. Ishikura: Tonneru to Chika, **5** (1984), 91-98.
- 15) K. Tanaka, N. Mori: Tonneru to Chika, **34** (2003), 779-788.
- 16) S. Kenmochi, E. Taketsu, T. Aoki, K. Kamemura, R. Morita: 33rd Ganban Rikigaku ni Kansuru Symposium (2004), No.2, pp.9-16.
- 17) S. Kenmochi, E. Taketsu, T. Aoki, R. Morita, H. Shirahata: Doboku Gakkai Ronbunshu F, **62** (2006), 312-325.