

若材齢時に載荷を受けた吹付けコンクリートの 力学特性について

Mechanical Properties of Shotcrete subject to Loading at Early Age

中谷篤史¹・高橋圭一¹・熊坂博夫²・岩崎昌浩³・寺島 勲³

Atsushi Nakaya, Keichi Takahashi, Hiroo Kumasaka,
Masahiro Iwazaki and Isao Terashima

1 正会員 清水建設株式会社 技術研究所 研究開発支援センター (〒135-8530 江東区越中島 3-4-17)

E-mail: nakaya@shimz.co.jp

2 正会員 工博 清水建設株式会社 技術研究所 特別プロジェクト (〒135-8530 江東区越中島 3-4-17)

3 電気化学工業株式会社無機材料研究センター (〒949-0393 糸魚川市大字青海 2209)

Shotcrete in a mountain tunnel immediately after it is sprayed is affected by stress redistribution during tunnel excavation causing considerable deformation and strain. Some scholars are of the opinion that shotcrete yields causing considerable strain and can no longer be counted on as a support against earth pressure. In this study, load exceeding the strain at the peak strength was applied to shotcrete at early age. Then, the load was removed and the shotcrete was allowed to harden for a certain period of time. The strength and the modulus of elasticity of shotcrete after reloading were examined. As a result, it was found that when strain equal to or exceeding the peak strength was applied, strength and modulus of elasticity increased with time subsequently. Thus, shotcrete, even if subjected to heavy load at early age, proved to be counted on to work as a support.

Key Words : *properties of shotcrete, small loading test equipment, stress-strain property, reloading*

1. はじめに

山岳トンネルの吹付けコンクリートは、吹き付け直後の切羽近傍において、掘削による応力再配分で大きな地圧を受け、大きな変形、ひずみを生じる。この支保に作用する地圧は、切羽近傍での増加が大きく、距離が離れるにしたがって一定となる。著者らは、大きな地圧を受けるトンネルの支保部材として、短時間に高い剛性を発現する吹付けコンクリート（本論文では“短時間高剛性吹付けコンクリート”と呼ぶこととする）の開発と現場への適用を進めている^{1) 2) 3) 4)}。吹き付け直後から大きな剛性を発現する吹付けコンクリートは、通常用いられている吹付けコンクリート（本論文では“普通吹付けコンクリート”と呼ぶこととする）に比べて荷重分担が大きく、大きな地圧を受けると考えられる。そのた

め、吹き付け直後に大きな地圧を受けることで、吹付けコンクリートが降伏、破壊し、支保が大きな変形をして、地圧に対する支保工として支保機能を期待できなくなるとの意見もある。また、一度受けた地圧は、掘削の進行に伴い、一定あるいは増減することも考えられる。そこで本論文では、前者の吹き付け直後に大きな地圧を受け、吹付けコンクリートが降伏、破壊するような状態を仮定し、若材齢時の吹付けコンクリートにピーク強度となるひずみよりも大きなひずみを与え、その後、除荷し、ある経過時間に吹付けコンクリートの硬化を進め、再載荷した際の強度と剛性（本論文では“弾性係数”とする）の発現特性について、強度増加率、弾性係数増加率、ひずみ増加率を定義し、これを算出して検討した結果を報告する。また、同時に実施した材齢試験についても併せて報告をする。

2. 試験方法と試験材料について

実現場トンネルにて吹付けコンクリートの施工試験を行なった際、JSCE-F561に準拠して吹付け箱に吹き付けてブロックを作製した。このブロックからコア抜き、カット、キャッピングをして試験体を成形し、載荷試験を実施した。載荷方法は、既報¹⁾と同様に図-1に示す小型載荷試験装置を使用した。載荷速度は、1載荷試験を10分程度とする制約から0.15mm/min（ひずみ速度0.1%/min）として変位制御の試験を実施した。ひずみの計測には、図-2に示すようにひずみゲージと同等の弾性係数を求めるための計測が可能なコンプレッソメータータイプの変位計測（CDP-10）とピーク強度以降の応力～ひずみ曲線を求めるために装置のロードセルと加圧盤間を計測する変位計（CDP-25）の2種類を用いた。

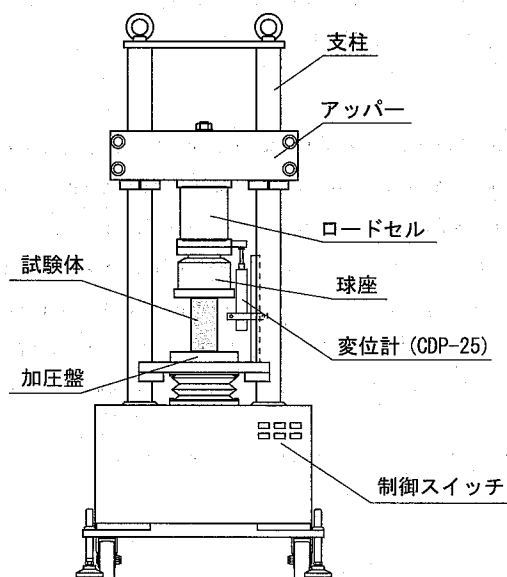


図-1 小型載荷試験装置の概要

なお、弾性係数の算出は、JIS A 1149に準拠して、コンプレッソメータータイプの変位計測の結果を用いて求めた。

試験に用いた吹付けコンクリートは、普通ポルトランドセメントをベースコンクリートとした短時間高剛性吹付けコンクリートと現場で使用している普通吹付けコンクリートを対象とした。短時間高剛性吹付けコンクリートの配合を表-1に示す。

3. 材齢による吹付けコンクリートの力学特性

(1) 一軸圧縮試験ケースについて

試験実施ケースを表-2に示す。試験は、短時間高剛性吹付けコンクリートと普通吹付けコンクリートの2種類で実施した。なお、普通吹付けコンクリート

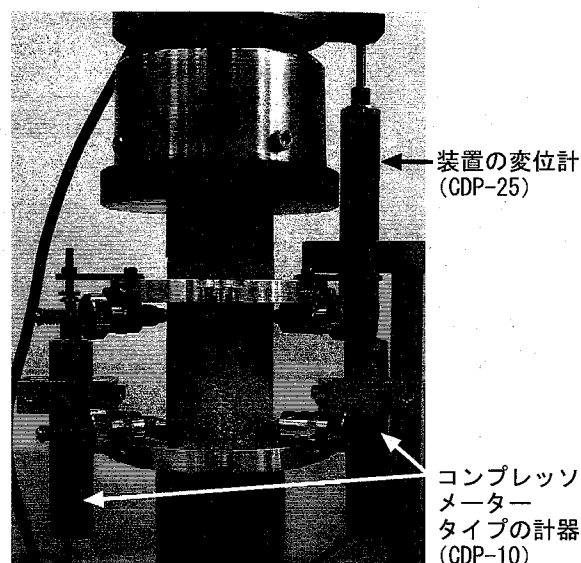


図-2 変位計の概要

表-1 短時間高剛性吹付けコンクリートの配合

スランブ (cm)	細骨材率 s/a (%)	水セメント比 W/(C+Σ) (%)	単用量 (kg/m ³)						急結剤 C× (%)
			水 W	セメント C	短時間強度 促進用混和材 Σ	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 減水剤 SP	
20~25	60	28.5	185	550	100	945	639	13.75	12

表-2 材齢試験ケース

種類 \ 材齢	3Hr	6~7Hr	9Hr	12Hr	1Day	7Day	14Day	28Day	50Day	100Day
短時間高剛性吹付け コンクリート	○	○	○		○	○	○	○	○	○
普通吹付け コンクリート	※	○		○	○	○	○	○	○	○

載荷条件：変位制御 0.15mm/min ※：試験体採取不可

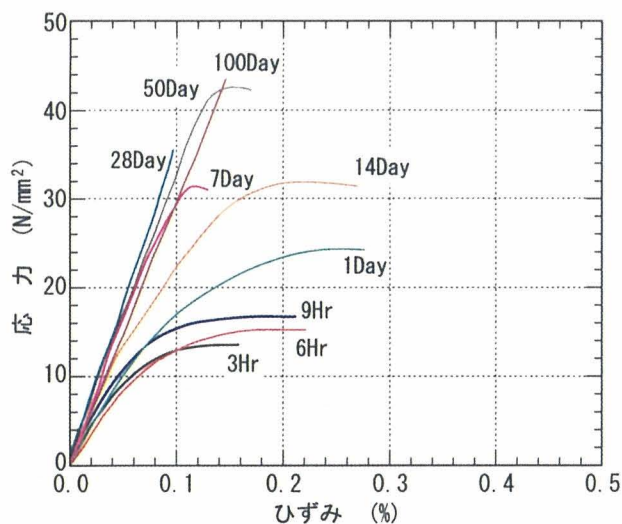


図-3 コンプレッションメータータイプ (CDP-10) による
応力～ひずみ曲線
(短時間高剛性吹付けコンクリート)

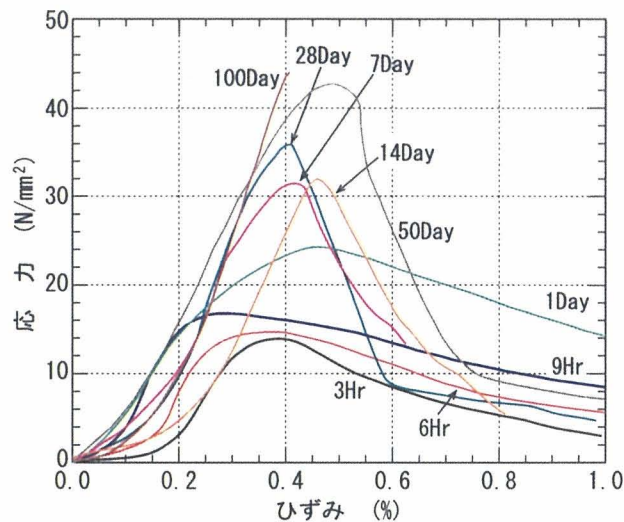


図-4 装置の変位計 (CDP-25) による
応力～ひずみ曲線
(短時間高剛性吹付けコンクリート)

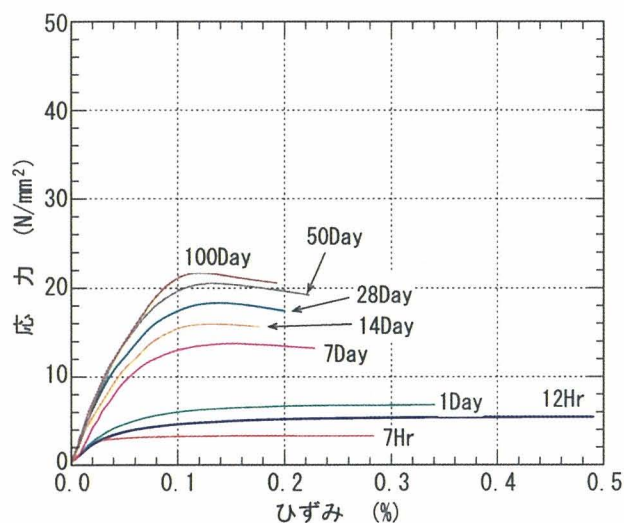


図-5 コンプレッションメータータイプ (CDP-10) による
応力～ひずみ曲線
(普通吹付けコンクリート)

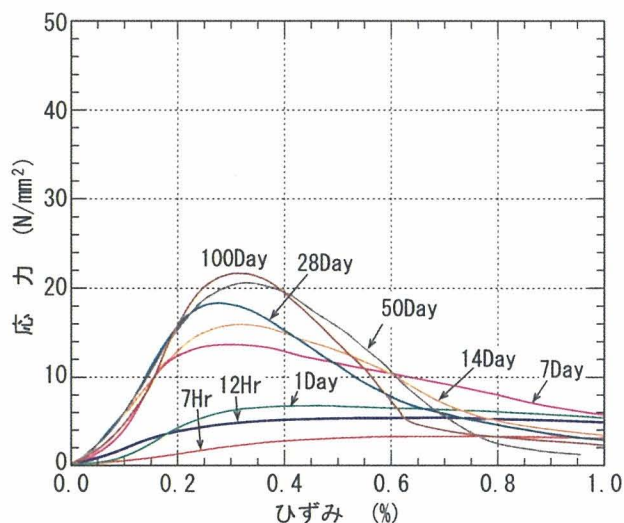


図-6 装置の変位計 (CDP-25) による
応力～ひずみ曲線
(普通吹付けコンクリート)

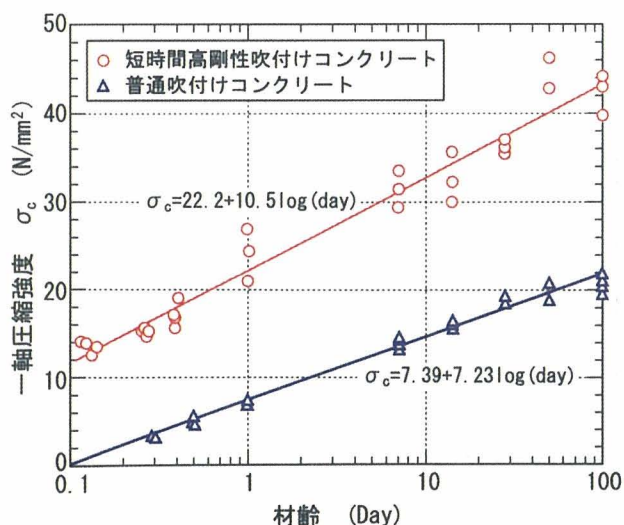


図-7 一軸圧縮強度と材齢の関係

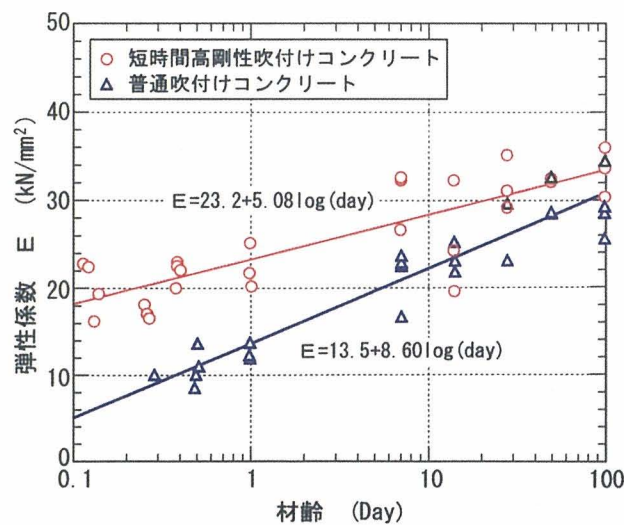


図-8 弾性係数と材齢の関係

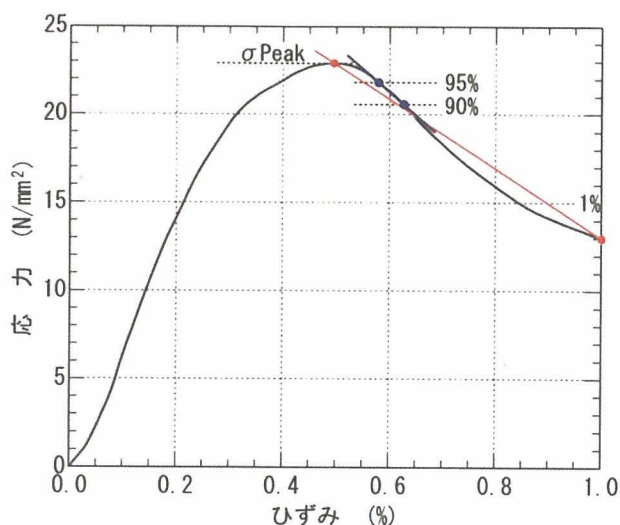


図-9 ひずみ軟化勾配の求め方

トの材齢3時間は、吹付けコンクリートが十分に硬化していないため、試験体を採取できず、試験は行えなかった。

(2) 試験結果と考察

各材齢において、短時間高剛性吹付けコンクリートと普通吹付けコンクリートの代表的な応力～ひずみ曲線を図-3～図-6に示す。これらの図より、若材齢の吹付けコンクリートのピーク強度以降の挙動は、例えば、材齢3時間で約14N/mm²、材齢1日で約24N/mm²と大きな圧縮強度を示すにもかかわらず、脆性的な破壊現象を生じず、高いじん性を示すことがわかる。

一軸圧縮強度と材齢の関係を図-7に、また、図-3と図-5をから求まる弾性係数と材齢の関係を図-8に示す。これらの図より、一軸圧縮強度と弾性係数は材齢とともに増加し、その関係は材齢を対数軸とした直線関係があることがわかる。また、短時間高剛性吹付けコンクリートと普通吹付けコンクリートの強度、弾性係数は、発現に要する時間が異なるため勾配は異なるが、材齢にともなって増加し、両者はともに、材齢を対数軸とした直線関係があることがわかる。

次に、図-9に示すように各載荷試験結果の応力～ひずみ曲線を用いて、ピーク強度の95%～90%の割線勾配とピーク強度とひずみ1%の割線勾配からひずみ軟化勾配を求めた。

ひずみ軟化勾配と材齢の関係を図-10に示す。この図より、ピーク強度以降のひずみ軟化勾配は材齢にともなって、勾配が大きくなる傾向を示すことがわかる。

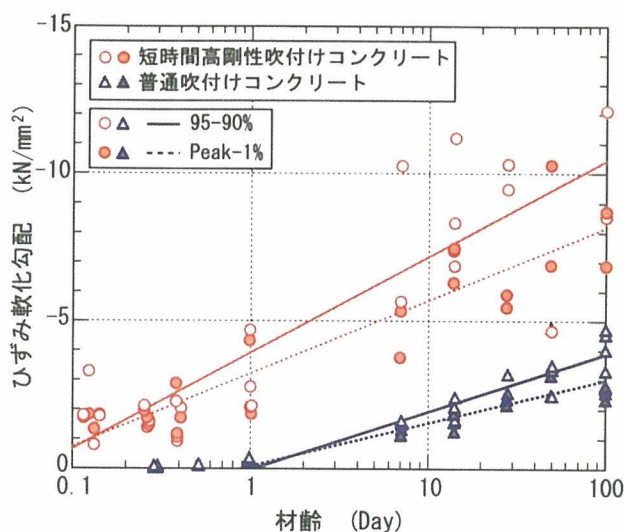


図-10 ひずみ軟化勾配と材齢の関係

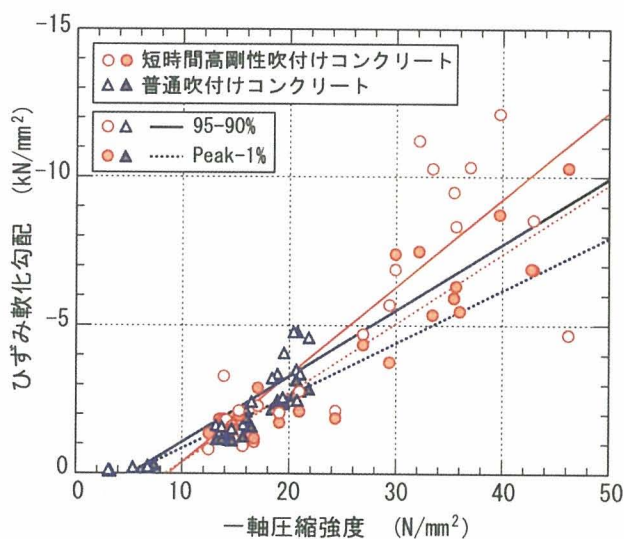


図-11 ひずみ軟化勾配と一軸圧縮強度の関係

ひずみ軟化勾配と一軸圧縮強度の関係を図-11に示す。この図より、短時間高剛性吹付けコンクリートと普通吹付けコンクリートの一軸圧縮強度が同じ場合（材齢は異なる）、ほぼ同じひずみ軟化勾配となることがわかる。

4. 再載荷試験の実施

(1) 再載荷試験の概要

短時間高剛性吹付けコンクリートは、第1章の「はじめに」において述べたように、大きな地圧を受けるトンネルの支保部材に利用することを目的として開発した材料である。吹き付け直後の吹付けコンクリート支保には切羽進行に伴い、大きな地圧が

表-3 再載荷試験ケース

種類		再載荷	初期載荷後 3Hr	初期載荷後 6Hr	初期載荷後 21Hr	初期載荷後 12Hr	初期載荷後 3Day	初期載荷後 28Day
短時間高剛性吹付け コンクリート	ピーク強度まで初期載荷 して除荷		○	○	○			
	ピーク強度のひずみ +0.2% のひずみまで載荷		○	○	○			
普通吹付けコンクリート						○	○	○

載荷条件：変位制御 0.15mm/min

作用し、周辺地山とともに大きなひずみを生じることが考えられ、吹付けコンクリートが破壊、降伏し、支保としての機能を保持できなくなるとの意見もある。また、一度受けた地圧は、掘削の進行に伴い、一定あるいは増減することもあると考えられる。そのため、この吹付けコンクリート支保の安定性を評価する上で、吹付け直後のピーク強度の載荷や大きなひずみを生じた後の硬化特性として強度と弾性係数の発現性を把握することが重要と考えている。

そこで、若材齢の吹付けコンクリートの試験体にピーク強度のひずみより大きなひずみとなる載荷を行い、その後、除荷し、表-3に示す経過時間後に再載荷した際の強度と弾性係数の特性について検討した。短時間高剛性吹付けコンクリートについては、降伏後のひずみの大きさの大小による強度、弾性係数の違いを把握する目的で、初期載荷の際にピーク強度まで載荷して除荷した場合とピーク強度のひずみプラス0.2%のひずみまで載荷した場合の2ケースで実施した。なお、一度除荷を行ったのは、表-2、表-3に示したように、複数の試験体に対して載荷試験を行うことを目的にしているためである。

再載荷を行う試験体は、初期載荷後、箱吹きブロックの温度と同程度となるように保温室に入れ、温度と乾燥に注意して養生した。

各試験において初期載荷の材齢は、短時間高剛性吹付けコンクリートは材齢3時間、普通吹付けコンクリートは材齢12時間の各試験体を用いて試験を実施した。なお、試験の本数は、短時間高剛性吹付けコンクリートは、各材齢で2～3本、普通吹付けコンクリートは、各材齢1本となっている。

(2) 再載荷試験結果と考察

各再載荷試験から得られた短時間高剛性吹付けコンクリートと普通吹付けコンクリートの代表的な応力～ひずみ曲線を図-12～図-14に示す。図は、各吹付けコンクリートの材齢3時間および材齢12時間の初期載荷、除荷過程と再載荷による応力～ひ

ずみ曲線を表している。なお、図-12と図-13の初期載荷のピーク強度が低いのは、試験体を採取する際に、吹付けが定常になる前に吹付け箱へ吹き付けをおこなったことにより、強度発現が小さくなったためと考えられる。

各試験の一軸圧縮強度の結果から求めた強度増加率と初期載荷後の経過時間の関係を図-15に示す。

ここに、強度増加率を次式と定義した。

$$\text{強度増加率 (\%)} = \frac{\text{再載荷の強度}}{\text{初期載荷の強度}} \times 100 \quad (1)$$

なお、式(1)の再載荷の強度とは、表-3で示した経過時間後に再載荷したときのピーク強度である。

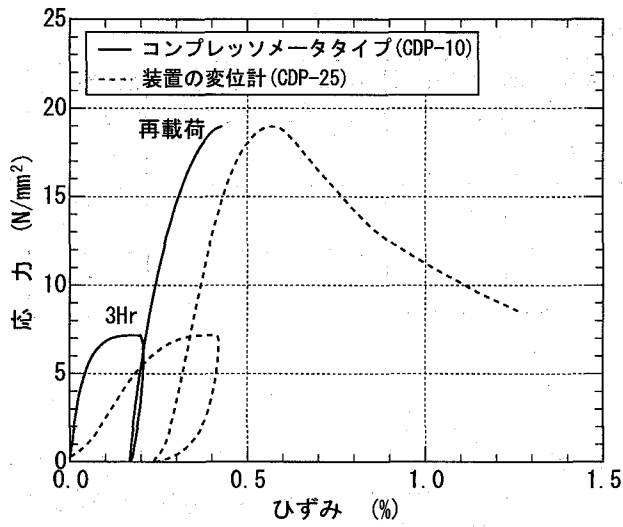
この図より、全試験ケースにおいて、再載荷後の強度は増加していることがわかる。

短時間高剛性吹付けコンクリートのピーク強度まで初期載荷して除荷した場合の強度増加率は、初期載荷後3時間は平均で約2倍、初期載荷後6時間は平均で約2.3倍、初期載荷後21時間は平均で約3.4倍となる。

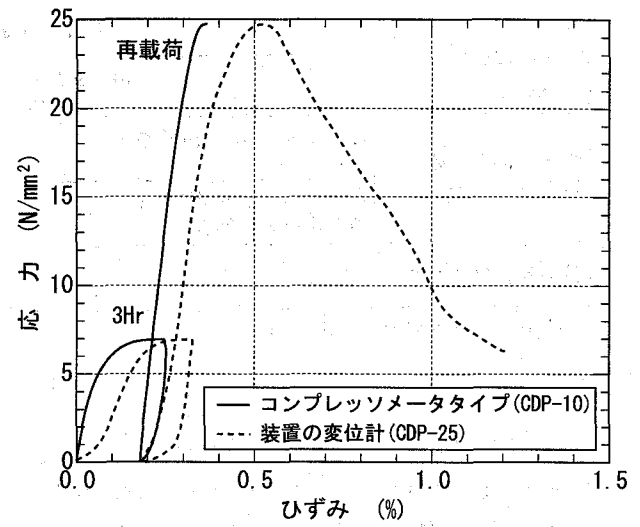
短時間高剛性吹付けコンクリートのピーク強度のひずみプラス0.2%のひずみまで載荷した場合の強度増加率は、ピーク時のひずみ値からさらにプラス0.2%のひずみとなるように載荷しているため、初期載荷後3時間は平均で約1.1倍、初期載荷後6時間は平均で約1.4倍、初期載荷後21時間は平均で約1.9倍とピーク強度まで初期載荷して除荷した場合よりも強度増加率が小さくなる。

普通吹付けコンクリートの強度増加率は、初期載荷後12時間は平均で約1.7倍、初期載荷後3日は平均で約2.2倍、初期載荷後28日は平均で約3.4倍となる。

図-7に示した材齢試験の結果から得られた通常載荷の近似曲線と再載荷試験の結果の比較を図-16に示す。この図より、短時間高剛性吹付けコンクリートのピーク強度まで初期載荷して除荷した場

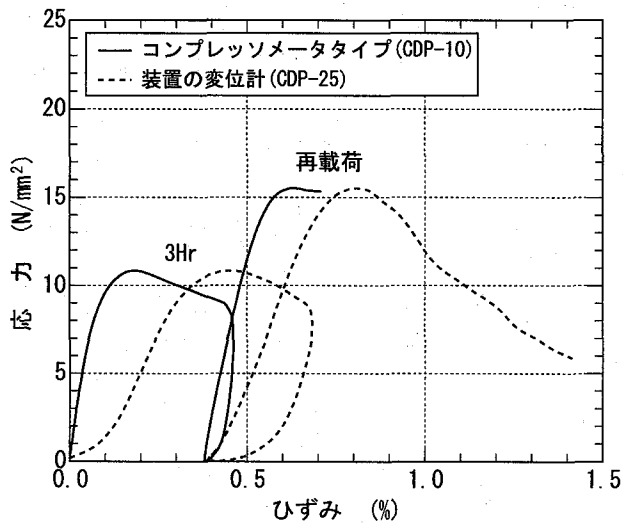


(a) 再載荷：初期載荷後 6Hr

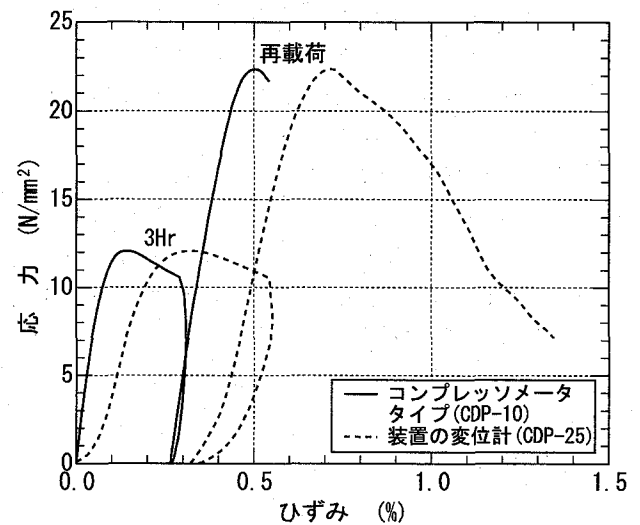


(b) 再載荷：初期載荷後 21Hr

図-12 再載荷試験による応力～ひずみ曲線（ピークまで初期載荷して除荷した場合）

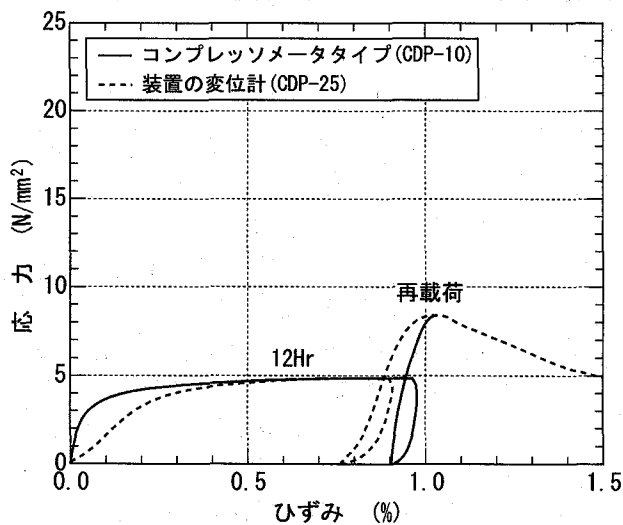


(a) 再載荷：初期載荷後 6Hr

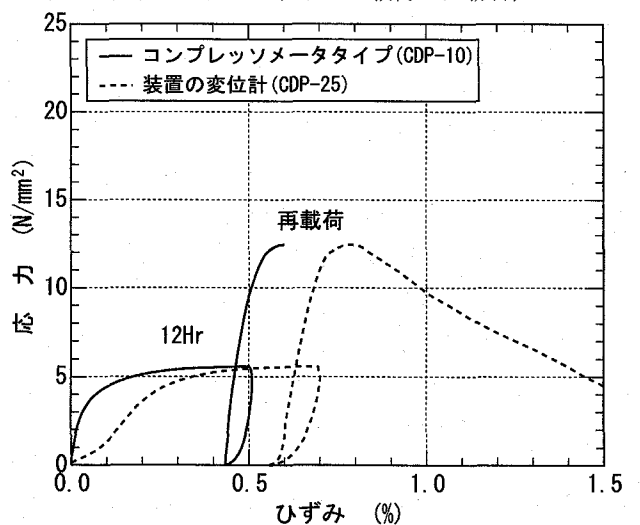


(b) 再載荷：初期載荷後 21Hr

図-13 再載荷試験による応力～ひずみ曲線（ピーク時のひずみ+0.2%のひずみまで載荷した場合）

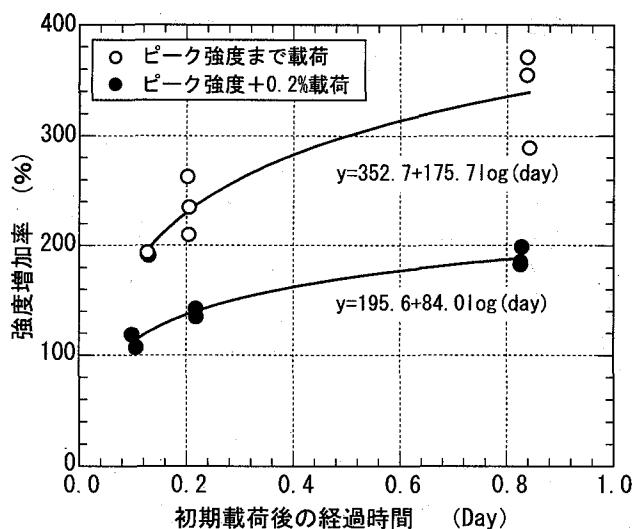


(a) 再載荷：初期載荷後 12Hr

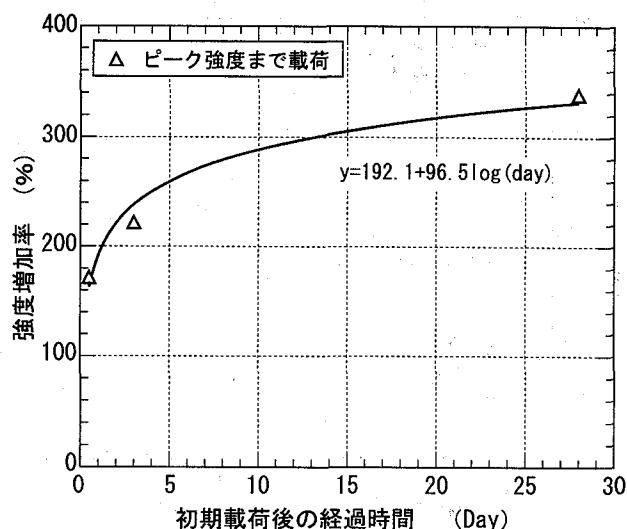


(b) 再載荷：初期載荷後 3Day

図-14 再載荷試験による応力～ひずみ曲線（普通吹付けコンクリート）

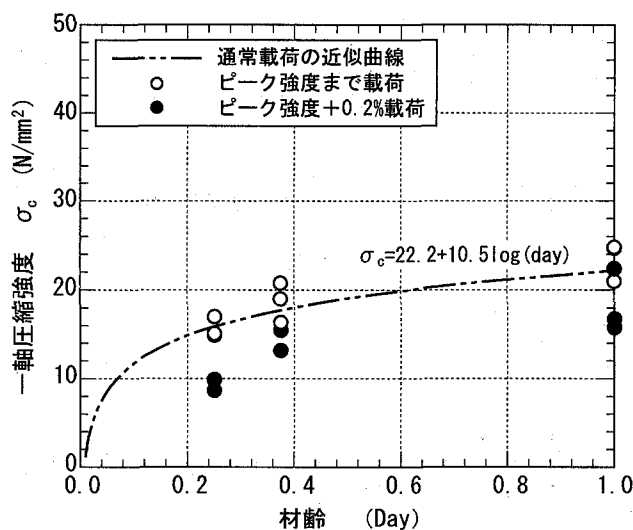


(a) 短時間高剛性吹付けコンクリート

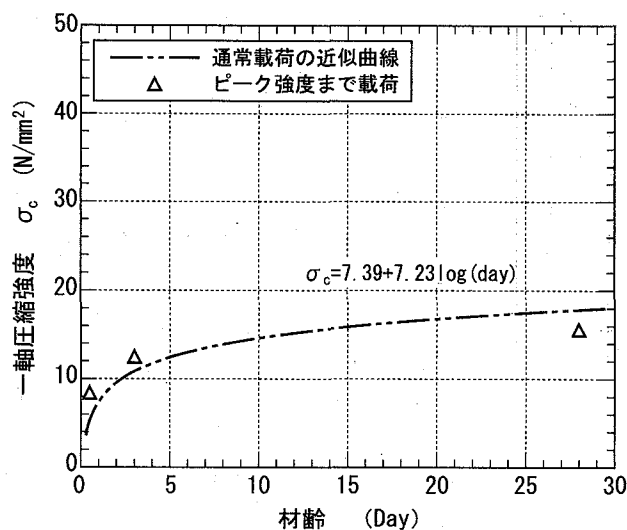


(b) 普通吹付けコンクリート

図-15 強度増加率と初期載荷後の経過時間の関係



(a) 短時間高剛性吹付けコンクリート



(b) 普通吹付けコンクリート

図-16 通常載荷と再載荷の比較（一軸圧縮強度）

合の通常載荷と再載荷の一軸圧縮強度の比較は、一端ピーク強度まで載荷したにもかかわらず、通常載荷の近似曲線上に乗る結果となる。これは、初期載荷時に与えたひずみの大きさが異なることにより、試験体内の損傷の大きさが異なることと、初期載荷後の養生によりコンクリートの硬化と強度発現が進んだことによるものと考えられる。

次に弾性係数の結果から求めた弾性係数増加率と初期載荷後の経過時間の関係を図-17に示す。

ここに、弾性係数増加率を次式と定義した。

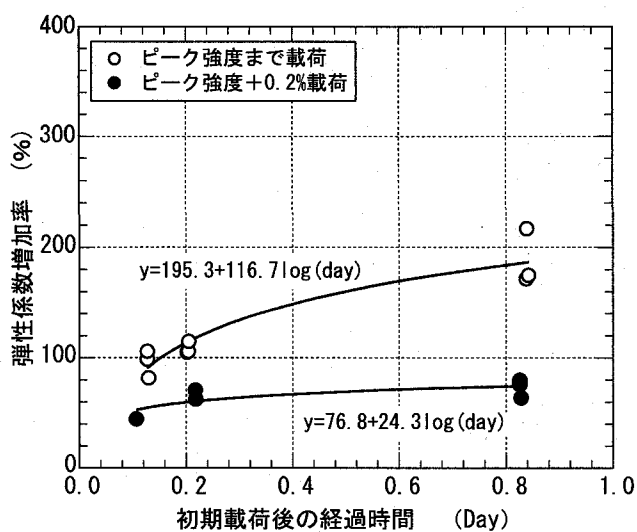
弾性係数増加率 (%)

$$= \frac{\text{再載荷の弾性係数}}{\text{初期載荷の弾性係数}} \times 100 \quad (2)$$

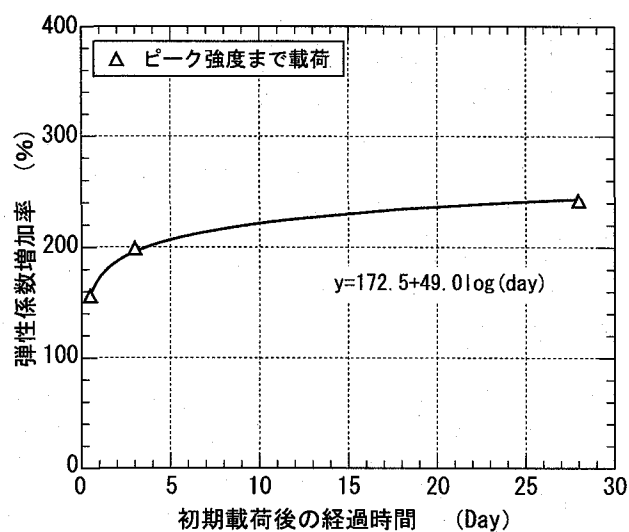
なお、式(2)の再載荷の弾性係数は、表-3で示した経過時間後に再載荷したときの弾性係数である。

この図より、短時間高剛性吹付けコンクリートのピーク強度まで初期載荷して除荷した場合の弾性係数増加率は、初期載荷後3時間は平均で約1倍、初期載荷後6時間は平均で約1.1倍、初期載荷後21時間は平均で約1.9倍となる。

短時間高剛性吹付けコンクリートのピーク強度のひずみプラス0.2%のひずみまで載荷した場合の弾性係数増加率は、ピーク時のひずみ値からさらに0.2%のひずみとなるように載荷しているため、小さくなる傾向となり、初期載荷後3時間は平均で約0.5倍、初期載荷後6時間は平均で約0.65倍、初期載荷後21時間は平均で約0.7倍となる。

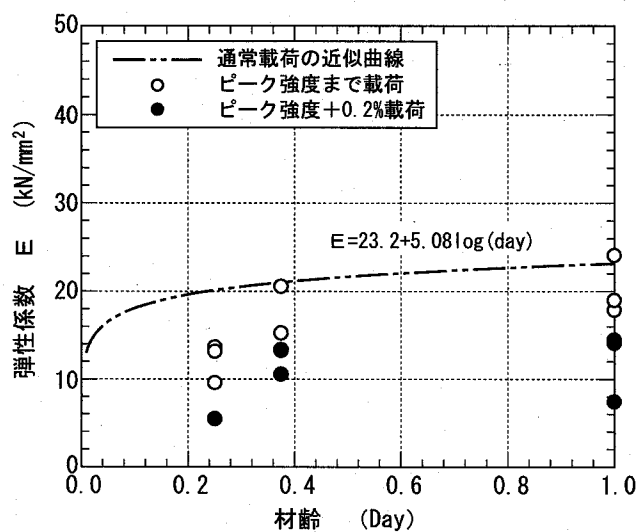


(a) 短時間高剛性吹付けコンクリート

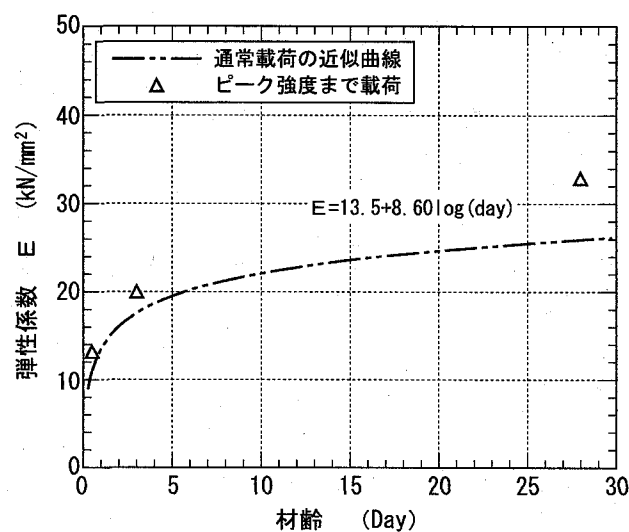


(b) 普通吹付けコンクリート

図-17 弾性係数増加率と初期載荷後の経過時間の関係



(a) 短時間高剛性吹付けコンクリート



(b) 普通吹付けコンクリート

図-18 通常載荷と再載荷の比較 (弾性係数)

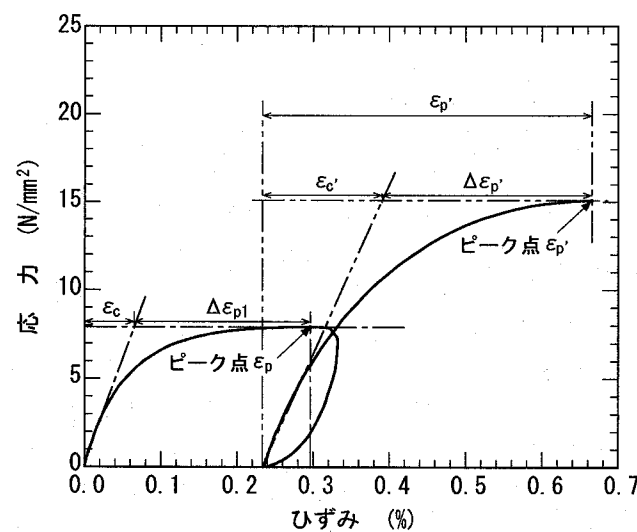


図-19 ひずみ増加率の算出 (ひずみ成分の定義)

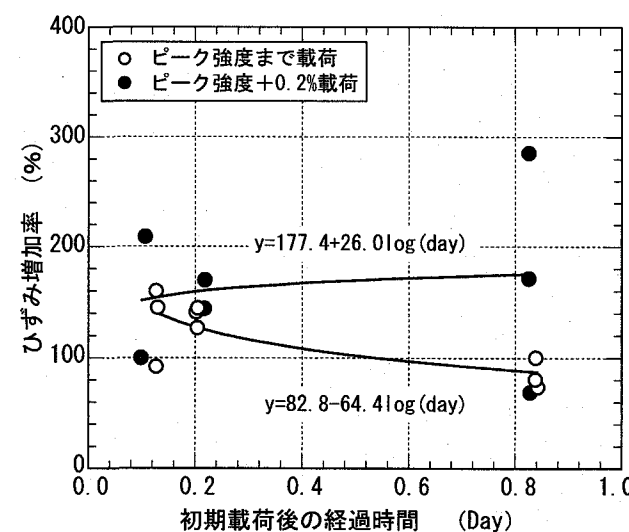


図-20 ひずみ増加率と初期載荷後の経過時間の関係

普通吹付けコンクリートの弾性係数増加率は、初期載荷後 12 時間は平均で約 1.5 倍、初期載荷後 3 日は平均で約 2 倍、初期載荷後 28 日は平均で約 2.4 倍となることがわかる。

図-8 に示した材齢試験の結果から得られた通常載荷の近似曲線と再載荷試験の結果の比較を 図-18 に示す。この図より、短時間高剛性吹付けコンクリートの通常載荷と再載荷の弾性係数の比較は、ピーク強度まで初期載荷して除荷した場合、ピーク強度のひずみプラス 0.2% のひずみまで載荷した場合ともに、通常載荷の近似曲線より小さい値となる。

次に、前述の強度増加率、弾性係数増加率と同様に、ひずみ増加率をひずみ増加率 $\Delta \varepsilon$ を次式に定義した。

$$\begin{aligned}\Delta \varepsilon &= \frac{\varepsilon_p'}{\varepsilon_p} \times 100 \\ &= \frac{\varepsilon_c' + \Delta \varepsilon_p'}{\varepsilon_c + \Delta \varepsilon_{pl}} \times 100\end{aligned}\quad (3)$$

ここに、各ひずみ成分を図-19 に示す。これらのひずみから得られるひずみ増加率と初期載荷後の経過時間の関係を図-20 に示す。

この図より、初期載荷後の経過時間が短い場合、再載荷時のピーク強度までのひずみは、初期載荷で生じるひずみの大きさとほぼ同程度か 50% ほど大きな値となるが、ピーク強度まで初期載荷して除荷した場合とピーク強度のひずみプラス 0.2% のひずみまで載荷した場合の両者には明瞭な差は見られない。

一方、初期載荷後 21 時間（吹付け後約 1 日）経過した後の再載荷試験では、データが少なくばらつきがあるが、両試験条件でひずみ増加率の傾向が異なることがわかる。すなわち、ピーク強度まで初期載荷して除荷した場合では、ほぼ同程度か若干小さくなる傾向が見られるのに対して、ピーク強度のひずみプラス 0.2% のひずみまで載荷した場合では、ひずみの大きさは初期載荷後の経過時間が短い場合と同様にほぼ同程度か 50% ほど大きな値となる。

これらのことは、ピーク強度以降のひずみの大きさは若材齢の吹付けコンクリートの内部構造に大きな影響を及ぼしており、若材齢時の吹付けコンクリートの損傷の大きさを示すパラメータとなる可能性を示していると考えられる。また、載荷直後は、この損傷の影響は小さいが、経過時間が長くなり水和反応等による硬化が進むとその影響が明瞭となってくると考えられる。

以上により、ひずみ増加率は、初期載荷で生じたひずみの大きさに対して、硬化が載荷後も進むこと

により、どの程度増減するかを示す指標と考えられる。

また、図-20 は図-15(a) および図-18(a) と関連しており、これらの図よりこの損傷は強度の低減よりも弾性係数の低減に大きな影響を与えていると推察される。

5. おわりに

若材齢時の吹付けコンクリートにピーク強度となるひずみよりも大きなひずみを与え、その後、除荷し、ある経過時間に吹付けコンクリートの硬化を進め、再載荷した際の強度と弾性係数の発現特性について試験、検討を実施した。

その結果、ピーク強度あるいはピーク強度となるひずみよりも大きなひずみを与えても、その後の時間の経過にともなって強度、弾性係数の増加が認められる。このことより、若材齢で大きな荷重を受けた吹付けコンクリートは、支保としての機能を期待することができる。

ただし、初期載荷により受けた損傷の程度により、硬化後の強度と弾性係数に影響を受けることも今回の試験で確認できている。

したがって、若材齢時で十分に硬化していない吹付けコンクリートへの繰り返し・段階載荷等による影響やその損傷程度を定量的に把握することが今後の課題の一つとしてあげられる。例えば、図-19 および式 (3) に示されるように、ピーク強度までのひずみは、弾性ひずみ成分 ε_e と非弾性ひずみ成分 $\Delta \varepsilon_p$ に分解することができ、この非弾性ひずみ成分も材料内の損傷の程度を示すパラメータの一つと考えられ、今後は、これらを用いてさらにデータを分析したい。

謝辞：短時間高剛性吹付けコンクリートの開発には多くのメンバーが携わった。著者ら以外に清水建設 石井卓氏、栗田守朗氏、斉藤亮氏、電気化学工業 石田積氏らも主要メンバーとして開発を行なったことをここに記す。

参考文献

- 1) 中谷篤史, 高橋圭一, 熊坂博夫, 石田積, 岩崎昌浩: 小型載荷試験装置を用いた吹付けコンクリートの若材齢における応力～ひずみ特性に関する検討, トンネル工学報告集, 第 15 巻, pp23-27, 2005. 12

- 2) 石井卓, 熊坂博夫, 栗田守朗, 石田積, 岩崎昌浩 :
材齢 3 時間で 18kN/mm^2 の剛性を発揮する吹付け
コンクリート, 土木学会第 61 回年次学術講演会,
CS05-037, pp. 279-280, 2006. 9
- 3) 栗田守朗, 石田積, 岩崎昌浩, 藤野晃 : 短時間高
強度吹付けコンクリートの基礎的性状, コンクリー
ト工学年次論文集, vol. 28, No. 1, pp. 1333-1342,
2006.
- 4) 中谷篤史, 熊坂博夫, 高橋圭一, 石井卓, 岩崎昌
浩, 寺島勲 : 短時間に高い剛性が得られる吹付
けコンクリートの応力～ひずみ特性に関する検
討, 土木学会第 62 回年次学術講演会, VI-153,
pp. 305-306, 2007. 9