

博士論文

山岳トンネル覆工コンクリートの
表面気泡の定量評価と低減方法

*Quantitative Evaluation and a Reducing Method of Bugholes on
Lining Concrete of NATM Tunnels*

2017年3月

前田 智之

Tomoyuki MAEDA

山口大学大学院 理工学研究科

目 次

第1章 序論

1.1 研究背景	1
1.1.1 コンクリート構造物の品質と長期耐久性	1
1.1.2 コンクリート構造物の美観性	3
1.1.3 覆工コンクリートの美観性	5
1.1.4 覆工コンクリートの表面気泡	7
1.1.5 覆工コンクリートに求められる機能と役割	9
1.1.6 覆工の変遷	13
1.2 研究の目的	17
1.3 本論文の構成	19

第2章 既往の研究

2.1 コンクリートの表面品質	22
2.2 コンクリートの美観性	26
2.3 コンクリート表面状態の定量評価	31

第3章 室内実験による表面気泡発生特性の検討

3.1 概説	34
3.2 室内供試体作製概要	34
3.2.1 供試体作製装置	34
3.2.2 供試体作製方法	34
3.2.3 コンクリートの材料と配合	36
3.3 室内実験のパラメータ	37
3.3.1 コンクリート仕上がり面角度と表面気泡発生量	37
3.3.2 振動締固め過程における表面気泡発生機構の観察	39
3.3.3 表面気泡発生特性把握と低減実験	40

3.4	二値化による表面気泡の検出および定量評価の方法	43
3.4.1	表面気泡の検出方法	43
3.4.2	表面気泡の面積・個数および面積率の測定方法	49
3.5	実験結果と考察	50
3.5.1	コンクリート仕上がり面角度と表面気泡発生量	50
3.5.2	振動締め固め過程における表面気泡発生機構の観察	51
3.5.3	表面気泡発生特性把握と低減実験	55
3.6	まとめ	58

第4章 締め固め過程におけるコンクリート表面気泡の発生機構の実験的調査

4.1	概説	59
4.2	実験概要	59
4.2.1	実験装置	59
4.2.2	実験方法	59
4.3	カラー撮影画像を用いた表面気泡の検出・評価方法	61
4.3.1	気泡判定ソフト	61
4.3.2	気泡判定ソフトを用いた表面気泡判定方法	62
4.3.3	気泡検出精度	64
4.4	締め固め過程における表面気泡の発生機構	68
4.5	まとめ	72

第5章 コンクリート表面気泡の低減に関する実験的検討

5.1	概説	74
5.2	実験概要	75
5.2.1	実験装置	75
5.2.2	実験方法	75
5.2.3	実験のパラメータ	75
5.3	硬化したコンクリートでのカラー画像解析の検出精度	81
5.3.1	測定方法	81
5.3.2	測定精度比較の結果	84

5.4 実験結果と考察	86
5.4.1 型枠の材質・形状および被覆するシート材の種類	86
5.4.2 透気抵抗度と耐水圧が異なるシート材	90
5.5 まとめ	94

第6章 表面気泡と透気係数の関係の調査

6.1 概説	95
6.2 Torrent 法	97
6.3 室内供試体における表面気泡面積率と透気係数の関係	98
6.3.1 実験概要	98
6.3.2 結果と考察	101
6.4 トンネル覆工コンクリート側壁部における 表面気泡面積率と透気係数の関係	103
6.4.1 試験施工概要	103
6.4.2 測定方法	107
6.4.3 結果と考察	108
6.5 まとめ	111

第7章 結論

7.1 本研究のまとめ	112
7.2 今後の課題と研究展望	115

参考文献	117
------	-----

本論文に関する著者の発表論文	126
----------------	-----

謝辞	127
----	-----

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 コンクリート構造物の品質と長期耐久性

社会インフラとして、土木分野の道路、橋梁、トンネル、ダム、港湾施設など、建築分野のビルや商業施設などがある。コンクリートはこれら社会インフラの主たる材料として幅広く使用されており、100年以上前の明示以降から社会基盤およびインフラ整備で使用され続けている。

コンクリートの品質は、土木学会の2012年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕では、「2章コンクリートの品質 2.1 総則」において、“コンクリートは品質のばらつきが少なく、施工の各作業に適したワーカビリティを有するとともに、硬化後は所要の強度、耐久性、水密性、ひび割れ抵抗性を有するものでなければならない”，とされている。構造物としては、土木学会の2007年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕において、「2章要求性能 2.1 一般」において、“コンクリート構造物は設計耐用期間内において要求性能を満足させなければならない，とされており、要求性能は耐久性、安全性、使用性、復旧性、環境および景観など関して設定すること”，とされている。

コンクリートの歴史を振り返ってみると、コンクリートは、1960年代の後半から1970年代にかけての高度経済成長期に併せて、コンクリートの練り混ぜ、運搬技術や圧送技術が向上し、急激に使用量が増加している（図1.1.1参照）。この時期に建設されたコンクリート構造物が一斉に老朽化を迎えることから、「加速するインフラの老朽化」が、社会インフラが直面する課題の一つになっており、効率的な維持管理が求められているのも特徴のひとつである。また、日本コンクリート工学協会（現 日本コンクリート工学会）のコンクリート診断技術'09（2009）によると、この時代に採用されたコンクリートの大量ポンプ圧送施工によって建設された構造物群が、現在耐久性不足で大きな問題になっているといわれ、品質にもばらつきがあるといわれている。その時代で最適とされる方法で施工しても、長期的な使用に耐えうるコンクリート構造物が建設されるとは限らないことがうかがえる。したがって、よりよいコンクリート構造物を後世に残すためには、常に技術を向上させ、品質向上に努めることも重要である。コンクリート構造物は一度建設されるとやり直しに莫大なコストを要し、上述したような品質にばらつきがあり、長期的な使用に対して十分とはいえない品質のコンクリート構造物は、永く使用できないだけでなく、使用の上での維持管理コストも大きくなる。

一方でコンクリートの耐久性とは、土木学会の2012年制定コンクリート標準示方書〔設

計編]によると、想定される作用のもとで、構造物中の材料の劣化により生じる性能の経時的な低下に対して構造物が有する抵抗性とする、とされている。

コンクリート構造物が要求性能を長期間満足するためには、コンクリートの経時的な変化に対応しなければならない。現状では、要求性能に関する設計は、それぞれの性能に対してコンクリートの経時的な変化を考慮した検討をするのではなく、設計耐用期間中にコンクリートの材料劣化による不具合が生じないことを前提として検討する手法がとられている。したがって、コンクリート材料の長期耐久性は、コンクリート構造物の要求性能を設計耐用期間中に満足するために重要な位置づけを示す。

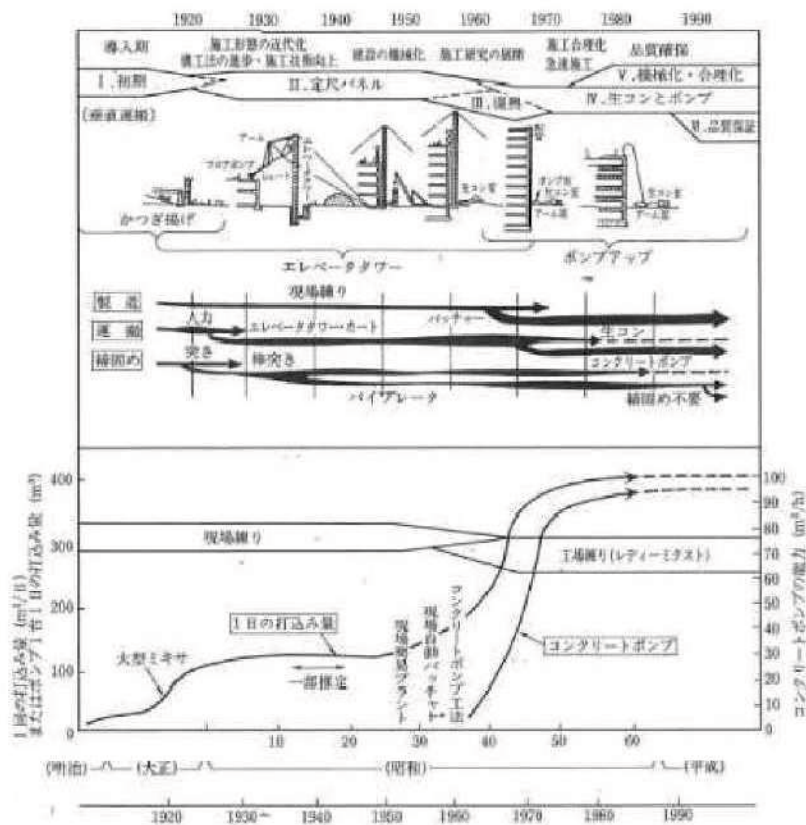


図 1.1.1 コンクリート工事の変遷概要と打設量の推移
(日本コンクリート工学協会, 'コンクリート診断技術' 09, 2009)

1.1.2 コンクリート構造物の美観性

コンクリート構造物には長期的な耐久性に加え、美観性（見栄え）の向上が求められるようになってきた。コンクリート構造物の美観性は「見た目」であり、「見た目」は目視調査としてコンクリート表層品質の評価手法の一つとされている。

近年では、目視調査を含むコンクリート構造物の表層品質は耐久性と関係があると言われる。様々な研究がなされている。例えば土木学会の構造物表層のコンクリート品質と耐久性性能検証システム研究小委員会（JSCE334 委員会）第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集（2012）では、施工後の構造物表面（表層）のコンクリートの品質を確認する技術と、その品質をふまえて構造物の耐久性を検証するシステムの調査・研究・整備を目的とした活動の報告が行われている。また、コンクリートの表層品質は耐久性と結びつけて評価する手法として、リバウンドハンマー試験や Torrent 法による表層透気試験、林ら（2013）による表面吸水試験、超音波試験、目視調査などがある。

中でも目視調査は、コンクリートの表層品質の評価手法として、再注目されている。目視調査は、美観性（見栄え）の調査ともいえる。目視調査が注目されている理由として、施工直後から評価ができ次施工へのフィードバックが可能であることが挙げられる。しかし施工中における目視調査は、調査項目や方法の統一された手法が明確に設定されておらず、各々で設定しているもしくは設定が明確でないのが現状である。例えば、日本非破壊検査協会のコンクリート構造物の目視試験方法（2012）では、初期不良（打込みから竣工時まで）の目視試験項目として、「ひび割れ」、「コールドジョイント」、「豆板」、「砂すじ」、「表面気泡」、「型枠のはらみや支保工の沈下による変形」などが挙げられており、その試験方法が示されている。

一方で、これまで施工中のコンクリートの品質は、フレッシュコンクリートのワーカビリティ、塩化物濃度試験、発注者によって単位水量測定試験、硬化後のコンクリートで圧縮強度試験やひび割れ調査によって評価されてきたが、施工中の目視調査も品質管理の一つとして取り入れられ始めた。例えば国土交通省東北地方整備局などでは、2014 年ころからコンクリート表面の状態を目視調査によって評価する手法が特記仕様書（2014）に示されており（図 1.1.2）、その項目は「沈みひび割れ」、「表面気泡」、「打ち重ね線」、「型枠継ぎ目の砂すじ」、「面的な砂すじ」が挙げられている。その他に、目視調査を用いて品質を評価する手法として、坂田ら（2012）がコンクリートの表層品質を目視調査でグレーディングする手法を提案している。













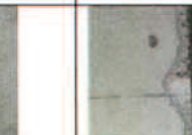


	一般的に「良」とされる範囲				不適合 E
	AAA	AA	A	B	
	4点	3点	2点	1点	
①沈みひび割れ	 ・ビーコン近傍にも沈みひび割れがない	 ・目視調査範囲のビーコンの概ね 1/5 以上に沈みひび割れが発生 ・ビーコン直径の 3 倍以上の長さの沈みひび割れが発生	 ・目視調査範囲のビーコンの概ね 1/2 以上に沈みひび割れが発生 ・ビーコン直径の 5 倍以上の長さの沈みひび割れが発生	 A よりも劣る	構造物のオーナーから不具合と判定される状況で、補修を要するもの
②表面気泡	 ・5 mm以下の気泡がほとんどない (目安:概ね50個以下/m ²)	 ・5 mm以下の気泡が認められる (目安:概ね 50 個以上/m ²)	 ・10 mm以上の気泡が認められる (目安:概ね 50 個以上/m ²)	 A よりも劣る	
③打重ね線	 ・近接では打重ね線が認められるものの、約 10m 離れた遠方からは認められない	 ・約 10m 離れた遠方から、打重ね線が認められる	 ・約 10m 離れた遠方から、打重ね線がはっきりと認められる	 A よりも劣る	
④型枠継ぎ目の砂すじ	 ・調査対象範囲に砂すじがほとんど認められない	 ・調査対象範囲の概ね 1/10 以上に砂すじが認められる	 ・調査対象範囲の概ね 1/3 以上に砂すじが認められる	 A よりも劣る	
⑤面的な砂すじ	 ・調査対象範囲に砂すじがほとんど認められない	 ・調査対象範囲の概ね 1/10 以上に砂すじが認められる	 ・調査対象範囲の概ね 1/3 以上に砂すじが認められる	 A よりも劣る	

図 1.1.2 表層目視判定における表層品質例

(東北地方整備局, 平成 26~28 年小々汐地区下部工工事特記仕様書, 2014)

1.1.3 覆工コンクリートの美観性

山岳トンネルの覆工コンクリートは、一般的に坑口部や外力の作用が想定される区間を除いて、無筋コンクリート構造であり、設計圧縮強度は $18\sim 24\text{N/mm}^2$ が一般的である。鉄筋コンクリート区間は主に坑口部であるが、鉄筋コンクリート構造とはいえ鉄筋の目的は補強鉄筋であり、構造計算によって配置を決めるのではなくパターンとして鉄筋の配置が決定されているのが現状である。このようにコンクリート構造物として構造検討がなされていない覆工コンクリートにおいても、耐久性、表層品質や美観性が着目されている。1999年、福岡トンネルを最初に連続して発生したコンクリート片のはく落事故を契機に、これまで安全とされてきた覆工コンクリートの安全性が疑問視され、覆工コンクリートの品質や耐久性に注目が集まったことが要因の一つである。さらに平成17(2009)年4月に施行された「公共工事の品質確保の促進に関する法律」によって入札制度に総合評価方式が広まることで、覆工コンクリートの品質や耐久性に対する技術が向上したことも、覆工コンクリートの品質や耐久性の確保が加速度的に広まったことを後押ししている。

トンネル覆工コンクリートにおいても、他のコンクリート構造物と同様に、耐久性に加えて美観性(見栄え)が求められている。既往の研究において、平岡ら(2013)がトンネル工事に従事するあらゆる職種の技術者へのアンケートを基にした調査・研究で、覆工コンクリートは、表層の品質である美観性への関心が高いことを示している(図1.1.3)。また、東北地方整備局では覆工コンクリートにおいても施工中の目視調査が求められている。「コンクリート構造物の品質確保の手引き(案)ートンネル覆工コンクリート編ー」(2016)では、脱型後の「表層目視評価シート」によるコンクリート表層の品質評価と結果の次施工への反映を示している。その項目には、覆工コンクリートの形状および施工の特殊性を加味して、「はく離」、「気泡」、「水はしり・砂すじ」、「色むら・打ち重ね線」、「施工目地不良」、「検査窓枠段差」が挙げられている。その他に同手引きでは、坑口部の凍害や塩害による劣化、施工目地の周辺に部分的に発生するうき・はく離・はく落、側壁の気泡、色むら・打ち重ね線などの施工中に生じる不具合および天端のコンクリート充填不良や背面空洞、インバート拘束による側壁横断方向のひび割れ、コンクリートの乾燥収縮や天端コンクリートの厚さ不足などによる縦断方向ひび割れなどの不具合に対して、設計、施工、維持管理の各段階で、十分な耐久性を持つ覆工コンクリートにしなければならないことを示している(図1.1.4)。

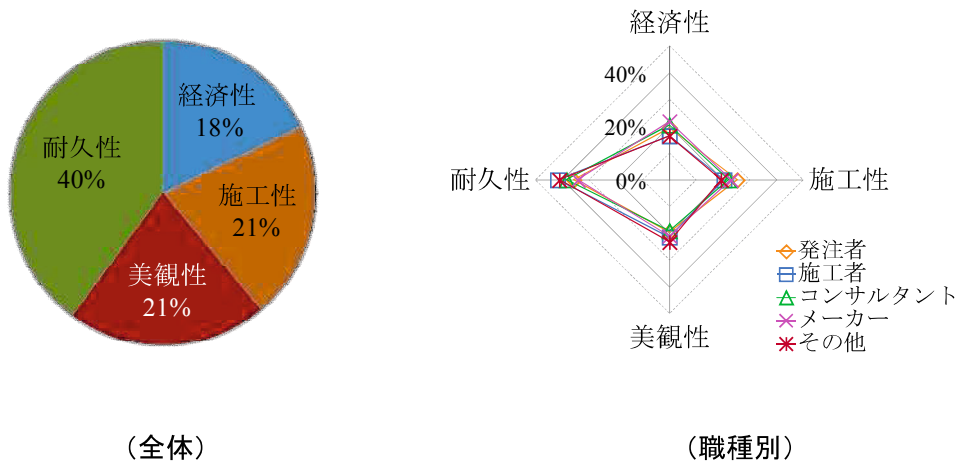


図 1.1.3 アンケート調査による覆工コンクリートに要求される各項目の重要度
 (平岡ら, トンネル覆工コンクリートの仕上がり面における
 美観性(見栄え)の重みについて, 2013)

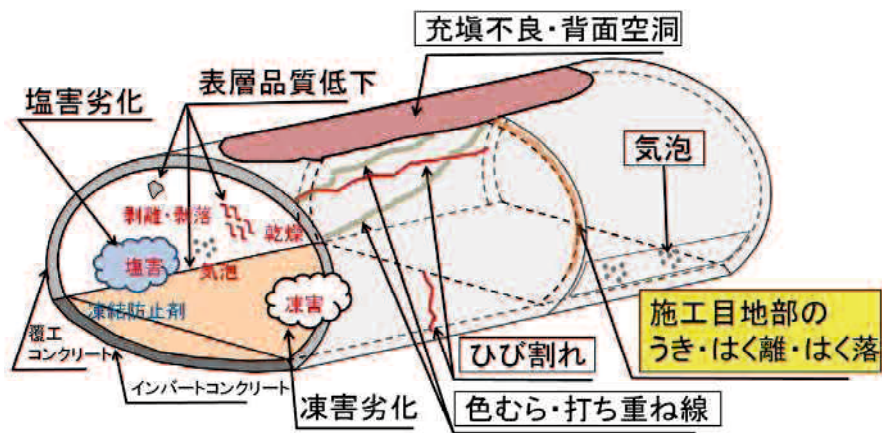
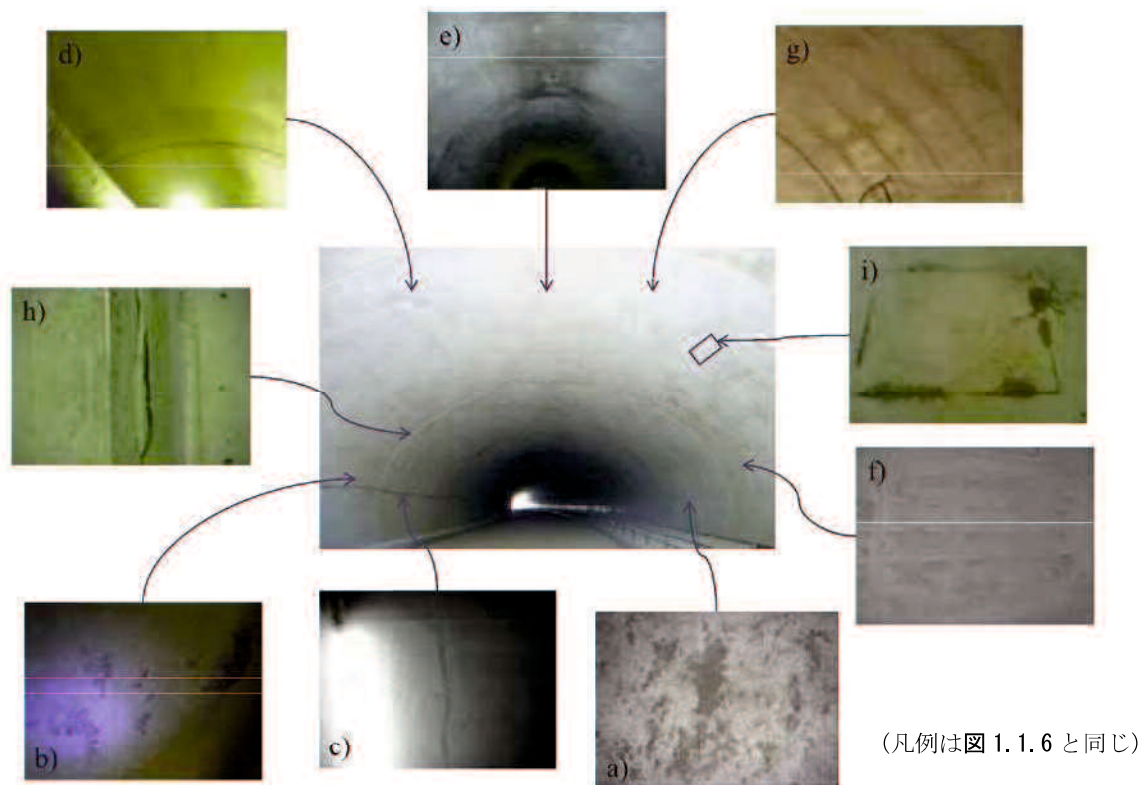


図 1.1.4 トンネル覆工コンクリートの劣化しやすい部位と不具合の発生部位
 (東北地方整備局, コンクリート構造物の品質確保の手引き(案)
 (トンネル覆工コンクリート編)平成 28 年 5 月)

1.1.4 覆工コンクリートの表面気泡

掛樋ら（2011）や Yoshitake ら（2012）が、覆工コンクリートの美観性への影響の重要度を定量評価している。覆工コンクリートの表層品質のうち「アバタ（表面気泡）」、「表面付着・剥離」、「水走り」、「打設ヒゲ」、「打設縞」、「溶接痕」、「フォームジョイント」、「打継目地」、「窓枠目地」の9項目を挙げ、職種や経験等を問わずに実施したアンケート調査結果から、覆工コンクリートの美観性への影響を与える項目として、「表面付着・剥離」および「打継目地」の重要性が高く、次いで「アバタ（表面気泡）」と「水走り」の重要性が高いことを示している（図 1.1.5, 1.1.6）。

また稲川ら（2011）は、見栄えの良い覆工コンクリートをアンケートによって定量評価しており、その中で見栄えコンクリートは側壁部の表面気泡が重要課題で、コンクリートの見栄えを良くするためには、第一に表面気泡の解決が必要としている。しかし、覆工コンクリート側壁部は仕上がり面が負の勾配に傾斜している（上方を向いている）ため表面気泡が発生しやすく、除去するための手法はいくつかあるが確立されていない（図 1.1.7）。側壁部の表面気泡の発生をコントロールし、確実に除去することは困難なのが現状である。



（凡例は図 1.1.6 と同じ）

図 1.1.5 覆工コンクリートの美観性を損なう現象

（Yoshitake ら, Questionnaire investigation of surface deterioration of lining-concrete in NATM TUNNEL, 2012）

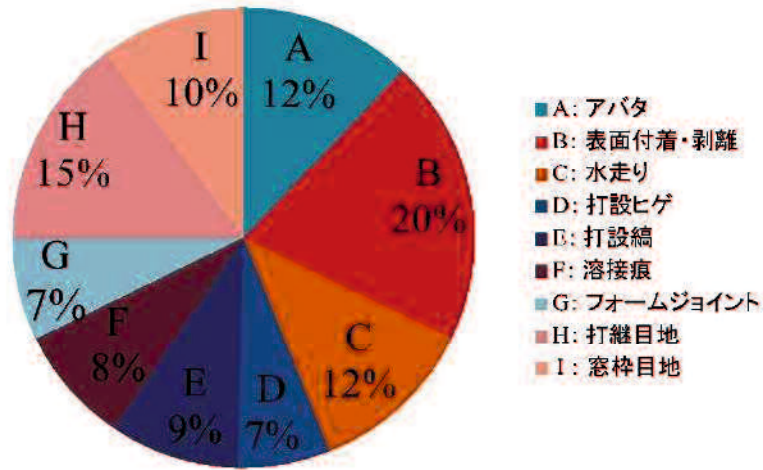


図 1.1.6 覆エコンクリートの美観性を損なう 9 項目の重みづけ
 (掛樋ら, AHP を用いたアンケートによるトンネル覆エコンクリートの美観性調査, 2012)

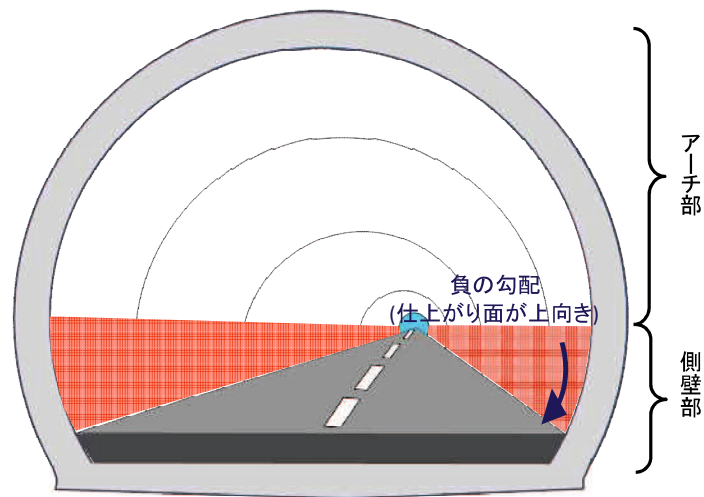


図 1.1.7 覆エコンクリート側壁部の形状イメージ図

1.1.5 覆工コンクリートに求められる機能と役割

2007年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕では、コンクリート構造物の要求性能を以下のように位置付けている。

2章 要求性能

2.1 一般

(1) 構造物の設計耐用期間は、構造物に要求される供用期間と維持管理の方法、環境条件、経済性を考慮して定めるものとする。

(2) 構造物には、施工中および設計耐用期間内において、構造物の使用目的に適合するために要求されるすべての性能を設定することとする。一般に、耐久性、安全性、使用性、復旧性、環境および景観などに関する要求性能を設定することとする。

その中で、山岳トンネル覆工コンクリートに関する要求性能は明確に定義されていないが、事業者や各機関等で覆工コンクリートに求める機能や役割を定義している。土木学会のトンネル標準示方書〔山岳トンネル編〕(2007)では山岳トンネルの覆工コンクリートの設計を以下のように位置付けている。

第4章 覆工の設計

第1節 通則

第60条

覆工は、トンネルの使用目的に適合し、安全で長く使用に耐えうるものでなければならない。

第61条

覆工は、そのトンネルの使用目的と使用形態に応じて求められている機能と品質を満たすように設計しなければならない。

この解説の中で、“トンネルの覆工は、道路、鉄道および水路などの使用目的、仕様の条件などに適合した機能を発揮するように設計しなければならず、また長期にわたり使用目的に応じて亀裂、変形、崩壊などを起こさないもので、漏水などによる侵食や強度の減少などの少ない耐久性のあるものでなければならない”，と記されている。必要な機能として供用性と力学的特性に関して以下のように詳述されている。

供用性については、

- ① 地下水等の漏水の少ない、水密性のよい構造物にする。
- ② 供用中の点検、保守等の作業性を高める。
- ③ 水路トンネルの場合、粗度係数を向上させ通水効率を高める。
- ④ トンネル内の架線、照明、換気等の施設を保持する。

力学的特性については、

- ① 掘削後、支保工により地山の変形が収束した後、覆工をすることが一般的であり、覆工には、基本的には荷重が作用しないものとする。したがって、地質の不均一性、支保工の品質のばらつき等の不確定要素を考慮し、構造物全体としての安全率を増加させる。
- ② 地山の変形が収束しない状態で覆工を施工する場合には、トンネルの安定に必要な拘束力を地山に与える。
- ③ 覆工を施工後、水圧、上載荷重等によって外力が発生した場合、これを支保する。
- ④ 使用開始後の外力の変化や支保材料の劣化に対し、構造物としての耐久性を向上させる。

覆工コンクリートは、掘削とあわせてトンネルの構成要素であり、トンネルはその使用目的に応じて要求性能が異なる。例えば、道路トンネルや鉄道トンネルは、第三者、自動車や列車などが坑内を通行するため、建築限界すなわち内空断面の確保に加え、コンクリートやモルタル片のはく落によることによる事故の発生がないことが求められる。特に、高速道路や新幹線など坑内を高速で車両が通行する場合はより要求が厳しい。一方で、水路トンネルはコンクリートやモルタル片のはく落防止は、道路、鉄道ほど求められない。代わりに漏水防止や粗度係数の確保が求められる。経済性を優先させるケースもある。ジェオフロンテ研究会の「最近の覆工技術に関する調査報告書」(2004)では、道路、鉄道、水路について代表的な基準類を示し、トンネルの用途使用条件に応じた覆工コンクリートの役割・機能について記載されている。ここで、道路、鉄道、水路の代表的な基準類の覆工コンクリートに求められる機能等に関する記述の抜粋およびトンネルの用途、使用条件に応じた覆工コンクリートの役割、機能の一覧を示す(表 1.1.1)。表 1.1.1 より、覆工の機能を、供用性、不確定要素、力学的機能の 3 つに区分されているが、不確定要素に関する機能、力学的機能は使用目的によって必要性に差はなく、供用性で差が出ている。供用性に関する機能は、「内空断面保持機能」が三者とも重要度が高く、その他の機能は使用目的が車両の通行と同じである道路と鉄道が似ていることを示している。防水機能、保守管理機能、トンネル内施設の保持機能が重要視されている。

・道路

4-6 覆工

1. 覆工はその目的、作用荷重に対して合理的な構造でなければならない。
2. 覆工コンクリートの配合は、耐久性、施工性および強度を考慮して定めなければならない。
3. ひび割れの発生が予測される場合には、原則としてひび割れ防止対策と設計するものとする。

(日本道路協会、道路トンネル技術基準(構造編)・同解説, 2003)

・鉄道

第6章

第34条

覆工は、立地条件、地山条件、荷重条件、周辺環境、支保工の機能などを考慮して、所要の機能、安全性、水密性、耐久性が得られるものでなければならない。

(鉄道建設・運輸施設設備支援機構，山岳トンネル設計施工標準・同解説，2008)

・水路

第5章 無圧トンネル

5.5 ライニングの設計

5.5.1 ライニングの機能と種類

(1) ライニングの機能

ライニングは、トンネルの内空断面と地山間または支保工間を充填する無筋または鉄筋コンクリート、あるいは直接地山に吹付けられたコンクリートなどをいい、次の機能を備えたものとする。

- ① 矢板工法では、それ自身または支保工などと共同して地圧、水圧、その他の外力を支えて長く所定の内空断面の形状を維持する。
- ② 地山の物理的、化学的風化作用を阻止または低減する。
- ③ トンネル内外面間の水の流通を防止する。
- ④ トンネル内周面の粗度を減少し、可能な限り内空断面の縮小または水頭損失の軽減を図れる。
- ⑤ トンネルの維持管理を容易にする。

(2) ライニングの種類

トンネルライニングは、地質条件、施工方法、経済性および将来の維持管理などを総合判断して、次の種類から選定するが、一般の場合は無筋コンクリートが多く用いられる。

- ① 吹付けコンクリート
- ② 無筋コンクリート
- ③ 鉄筋コンクリート

覆工は、立地条件、地山条件、荷重条件、周辺環境、支保工の機能などを考慮して、所要の機能、安全性、水密性、耐久性が得られるものでなければならない。

第6章 無圧トンネルⅡ（吹付け・ロックボルト工法）

6.3 ライニングの設計

6.3.1 ライニングの機能と種類

基本的には矢板工法による場合と同じとなるが、吹付け・ロックボルト工法では地質の不均一性、支保工の品質のばらつき、ロックボルトの腐食などの不確定要素を考慮し、構造物の安定性を高める機能を備えたものとする。

(農林水産省構造改造局，土地改良事業計画設計基準，1996)

表 1.1.1 トンネルの用途、使用条件に応じた覆工コンクリートの役割・機能
 (ジェオフロンテ研究会, 最近の覆工技術に関する調査報告書, 2013)

覆工の機能		概要	主な用途		
			道路	鉄道	水路
供用性に関する機能	①内空断面保持機能	建築限界・通水量などに必要な内空断面を確保する。	◎	◎	◎
	②防水機能	防水性能を確保することで漏水落下による視覚障害、路面摩擦抵抗の急激な変化、寒冷地におけるつらら・結氷・路面凍結、側壁の汚れによる快適性の低下、坑内結設備の絶縁不良・腐食、などを防止する。水路トンネルの場合は、内外の水の流通を防止する。	◎	◎	○
	③耐火機能	火災中の高温による地山や支保の著しい損傷を防ぎ、トンネル崩壊を起こさない。また、火災終了後にわずかな補修補強によって再使用できる。	◎	△	
	④保守管理機能	覆工表面を目視観察しやすく保つことで、供用中のトンネル変状の兆候を早期に発見する。水路の場合、維持管理を容易にする。	◎	◎	○
	⑤内装機能	内装工を設置し側壁の輝度を高く保つことで、前方の障害物の視認性向上、心理的圧迫の軽減を図る。また、換気においては、通気抵抗を小さく抑え効率を上げる。	◎	△	
	⑥トンネル内施設保持機能	照明・換気・非常用などの諸設備、およびこれらを機能させるための電力・信号ケーブル類の取り付け性を確保する。	◎	◎	
不確定要素に関する機能	①余力保持機能	支保工の品質の不均一性や経時劣化やゆらみ、あるいは異常降雨に起因する水圧上昇などの将来の不確定な要因により覆工に追加の荷重が作用することを想定して、荷重に耐えうる余力を保持する。また、あらかじめ想定することが難しい地震などの荷重に対しても余力を保持する機能を有する。	○	○	○
	②変形性能保持機能	破壊に至るまでの変形が大きく、覆工構造の崩壊が一気に進展しない。また、あらかじめ想定することが難しい地震などの荷重が作用した場合についても変形保持機能を有する。	○	○	○
	③構造的安定機能	インバートや梁盤コンクリートを設置することで、側圧の増大、偏圧の作用、覆工脚部の支持力不足に対する構造的安定性を確保する。	○	○	○
力学的機能	①付加外力支持機能	覆工施工後の水圧の回復、切土・盛土・双設トンネル・近接施工などの予め判明している要因により土圧や水圧が変化し、外力が作用する場合に、これを支持する。内水圧・外水圧・グラウト注入圧について構造物としての安定性を保持する。地震荷重を載荷して検討する場合に地震時の安定性を保持する。	○	○	○
	②支保工補完機能	トンネルの変形が収束しない状態で覆工を施工し、支保工に追加してトンネルの安定に必要な拘束力を与える。	○	○	○

◎：重要度の高い役割・機能

○：一般的に必要な役割・機能

△：場合により必要な役割・機能

1.1.6 覆工の変遷

・覆工の変遷

覆工は、掘削と合わせてトンネル工事をなし、材料にはコンクリートに限らず古くはレンガや石材が使用されていた。コンクリートブロックが明治後半から大正初期にかけて使用され始め、場所打ちコンクリートによる覆工が、鉄道山岳トンネルでは大正初期の鋸山トンネルで初めて採用されている。その後、覆工の変遷は、覆工に関する技術変遷だけでなく、トンネル掘削に関する技術の変遷の影響を大きく受けている（表 1.1.2）。

現在は場所打ちコンクリートによる全断面施工が大半であるが、場所打ちコンクリートの採用当初は、側壁部のみで頂部には塊積みを採用するのが主流であった。頂部に塊積みを採用することが主流だったのは、この頃のトンネル掘削の技術の影響を受けているためである。この頃のトンネル掘削の支保方式は、木製支柱式支保工である。頂部では側壁部に比べ土圧を支保工で受けていることから、木外ししながら覆工を施工するには場所打ちよりも塊積みの方が安全であったためである（図 1.1.7）。その後、トンネル掘削の支保方式が木製支柱式支保工から鋼アーチ支保工へ、さらに吹付けコンクリートによって地山と支保工を一体化する NATM に変わり、コンクリートに関する技術向上と併せて、覆工コンクリートの施工方法が変わっている。

・現在の覆工の施工方法

現在の覆工は場所打ちコンクリートが一般的であり、材料、型枠、打込み・締固め、養生からなる。トンネル掘削完了後、トンネル掘削に伴う応力解放によって発生する地山変位が収束したことを確認してから施工することが多い。一般的な覆工コンクリートの施工手順を図 1.1.8、図 1.1.9 に示す。

覆工コンクリートは、配合が設計強度 18N/mm^2 （W/C 60%以下、単位セメント量 270kg/m^3 以上）、スランプ 15cm、空気量 4.5%のコンクリートを用いることが多い。最近では、充填性向上および締固め不足の防止を主目的とした中流動コンクリートの事例も増えている。型枠には、一般的に長さ 9~12m（10.5m の事例が多い）のセントルと呼ばれる移動式鋼製型枠が使用され、既設コンクリートとラップさせて据付ける。セントルと地山との間の 30~40cm 程度の狭い空間にコンクリートを打込む。打込みは、セントルに設けた $45\times 60\text{cm}$ 程度の検査窓と呼ばれる窓からコンクリートを投入し、高周波の棒状バイブレータや型枠バイブレータで締固める。側壁部分から打込みを開始して、打込みをしている検査窓の高さ付近までコンクリートが打ち上がって次の窓に移動、繰り返し打込み・締固めを行う。側壁および肩部の打設完了後、天端部に移動する。天端部はセントルの既設コンクリート側に設けた吹上げ口と呼ばれる打設口から打込みを行い、バイブレータで締固める。

表 1.1.2 トンネル覆工技術の変遷
 (日本トンネル技術協会, トンネル技術白書, 2006
 鉄道総合研究所, RRR Vol170 No. 10, 2013, 一部加筆・修正)

年 代	覆工に関する記事	トンネル名	備 考		
			掘削	支保	覆工
1871 M 4	わが国最初の(開削)鉄道トンネル 煉瓦積み覆工の時代が続く	石屋川トンネル	1880年代		煉瓦・石積覆工
1903 M36	オランダ人技師の設計施工 大正期, コンクリート材料の普及	旧国道3号線 佐敷 TN, 津奈木 TN	手掘り	木製支柱式支保工	コンクリート ブロック覆工
1917 T 6	アーチ部場所打ちコンクリート覆工	北条線鋸山トンネル	発破掘削		
1924 T13	コンクリートブロックアーチ, 場所打ちコンクリート側壁覆工 最晩年期の煉瓦積み覆工	国道2号線鈴鹿 TN			
1928	当時最大断面の道路トンネル (アーチ煉瓦巻き, 側壁場所打ちコンクリート覆工)	横浜市覆工街路 山手トンネル		鋼アーチ 支保工	場所打ちコンクリート覆工
1931 S6	鉄筋コンクリート覆工の採用 (場所打ちコンクリート覆工全面採用)	伊東線宇佐美トンネル			
1953 S28	打設にコンクリートポンプの採用 以後, コンクリートポンプが広範囲に採用	俱利伽羅トンネル	1960年代		吹付け ロックボルト
1976 S51	NATM の試験導入 以後, 大断面掘削, 機械化工法, タイヤ方式発達 1980年代全断面場所打ちコンクリート方式が定着 プレミキストコンクリートの採用, コンクリートポンプ打設	上越新幹線中山 TN	機械掘削		
1986 S61	NATM が標準工法 1986年版トンネル標準示方書改訂				

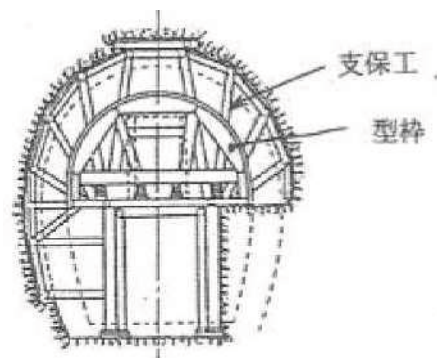


図 1.1.7 木製支保工と木製型枠の関係

(日本トンネル技術協会, トンネル工専用機械・基材の変遷史, 1986)

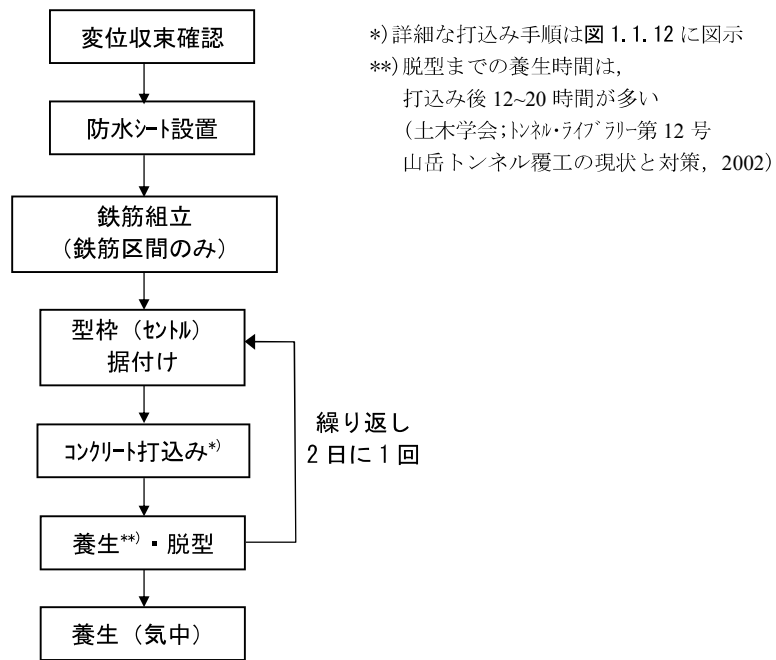


図 1.1.8 覆工コンクリート施工手順

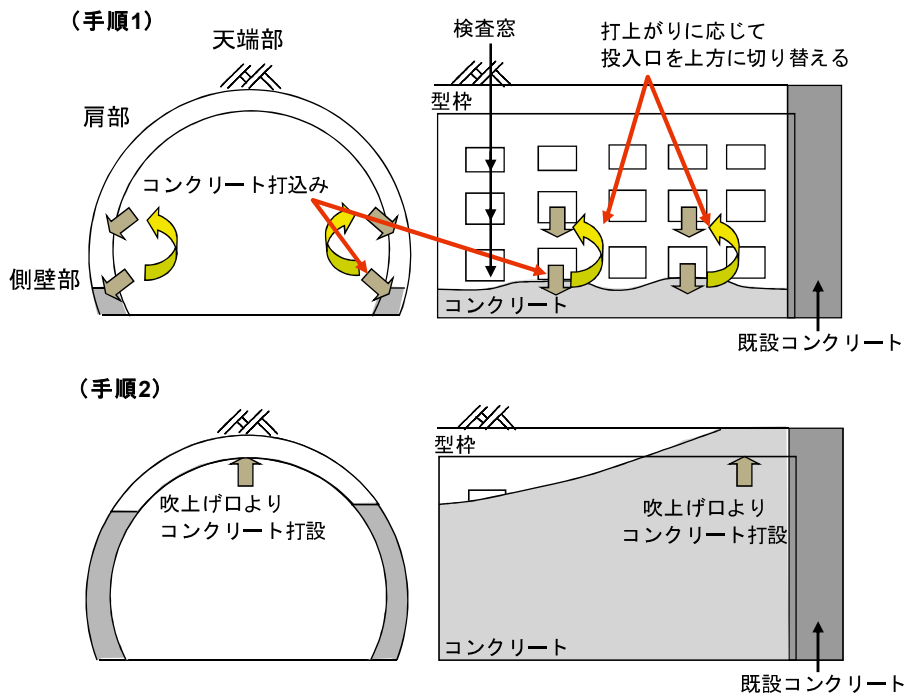


図 1.1.9 一般的なコンクリート打設手順

(土木学会, 2006 年制定 トンネル標準示方書・同解説 [山岳トンネル編], 2006 一部加筆・修正)

近年、コンクリート構造物の高い品質の要求や総合評価落札方式への対応に伴い、覆工コンクリートの施工方法も様々な改良・改善がなされている。例えば、打込み時の配管の切替えの自動化により打ち重ね時間を短縮する「自動配管切替装置」、天端部における打込み完了後の確実な締固めに「引抜きパイプレータ」、天端部締固め後の沈下防止対策として「圧入打設による密充填」、脱型までの養生環境を確保する「セントルバルーン」、加温装置もしくは脱型までの時間を工程に影響を与えることなく66時間確保できる「ツインアーチセントル」、その他脱型後の給水、保水、加温、保温装置による各種養生方法がある。これらの施工方法を組み合わせることで、土木学会の2006年制定トンネル標準示方書・同解説〔山岳トンネル編〕(2006)で示されている標準的な覆工コンクリートの施工方法に比べ、圧縮強度の向上、ひび割れの低減、耐久性向上などのような効果が確認されている。

1.2 研究の目的

コンクリートは社会資本の整備になくてはならない主たる建設材料の一つであり、本来、コンクリート構造物には効率的な維持管理と長期耐久性の確保が求められている。したがって、新設するコンクリート構造物は、長期的な使用に耐え、維持管理コストが極力発生しないもの、いわゆるライフサイクルコストが少なく使用目的を持続するものが求められている。このようにコンクリート構造物の要求性能の一つに耐久性があるが、最近では耐久性に加え美観性の向上が求められている。コンクリート構造物の美観性とはコンクリート仕上がり面の見た目のことである。

一方で、コンクリート構造物の耐久性とコンクリートの表層品質には関連性があるといわれており、近年、表層品質の評価手法として、施工中に容易に調査が可能なコンクリートの仕上がり面の見た目を判定する目視調査が注目されている。目視調査の項目には、「沈みひび割れ」、「表面気泡」、「打ち重ね線」、「型枠継ぎ目の砂すじ」、「面的な砂すじ」等があり、これらの項目はコンクリートの美観性（見た目）に影響を与える。

コンクリート構造物の一つであるトンネル覆工コンクリートについても同様に、耐久性とあわせて美観性への関心が高まっている。トンネル覆工コンクリートの美観性に与える影響が大きいものとして、側壁部に発生する「表面気泡」がいられている。トンネル覆工コンクリート側壁部に発生する表面気泡は、美観性に影響を与える影響が大きいと言われているにも関わらず、現状では低減のための確立された手法がない。筆者も、これまで8現場の山岳トンネルの覆工コンクリート打設の業務に従事する中で、覆工コンクリート側壁部の表面気泡の発生をなくそうと努めたが、コンクリートの打ち重ね高さを極力低くし、丁寧に締固めを行うということ以外に、気泡低減のための確固たる施工方法をもっていない。

そこで本研究では、トンネル覆工コンクリートの美観性向上を目的に側壁部の表面気泡を効率良く低減することに着目し、表面気泡の定量的な評価および低減に関する実験的検討を行った。表面気泡の発生は打込み時の締固め不足が要因といわれているが、その発生特性や機構は明らかでない。作製条件を変えた室内供試体を作製し、その作製条件と発生した表面気泡の関係を定量的に評価することで、表面気泡の発生特性および機構の調査を試みた。さらに、作製過程が可視化可能な型枠を用いて、振動締固め過程における表面気泡の発生状態を定量的に評価することで、発生機構を調べた。続いて、得られた知見を元に、表面気泡発生低減に関する実験的検討を試みた。覆工コンクリート側壁部を想定するため、使用した型枠は覆工コンクリート側壁部を模擬した形状および実施工の覆工コンクリートで使用される移動式鋼製型枠（通称、セントル）と同じ材質とし、使用するコンクリートは実際に使用した覆工コンクリート配合をベースにした配合とした。なお、研究を

行うにあたり，発生した表面気泡量の定量的な評価のため，画像解析処理を用いた表面気泡判定手法を考案した．

さらに発生した表面気泡を美観性とは異なる指標で定量的に評価するために，表面気泡発生量が耐久性の評価指標の一つである透気係数に与える影響を調査した．

1.3 本論文の構成

本論文は、計7章で構成されている。以下、各章の概説と図1.3.1に本論文の構成フローを示す。

第1章 序論

本研究の背景と目的および論文の構成について記述している。

重要な社会インフラの一つであるコンクリート構造物に求められる品質と長期耐久性について述べ、コンクリート構造物には耐久性に加え美観性が求められていることを述べている。コンクリートの美観性に影響をおよぼす項目はいくつかあるが、美観性への影響が大きく、確固たる低減方法が確立されていないトンネル覆工コンクリート側壁部の表面気泡の発生に着目した背景についてまとめている。さらに、トンネル覆工コンクリートの変遷、要求性能や施工方法を整理することで、トンネル覆工コンクリートの現状をまとめている。このような背景をもとに本研究の目的を明確にしている。

第2章 既往の研究

コンクリートの表層品質、表面気泡を含む美観性に関する既往の研究を調査・整理した。既往の研究を整理することで、本研究の位置付けを明確にした。また、コンクリート表面状態の評価を中心とした画像処理に関する既往の研究を調査することで、表面気泡を定量評価するための画像処理方法考案の参考とした。

第3章 室内供試体による表面気泡発生特性の検討

コンクリートの仕上がり面の向きが表面気泡の発生に影響するといわれており、上向きの状態（以下、負の勾配と称す）であると表面気泡が発生しやすい。トンネル覆工コンクリート側壁部も仕上がり面が負の傾斜になっており、表面気泡が発生しやすい要因の一つである。しかしながら、仕上がり面の角度と表面気泡発生との関係は明らかでない。そこで、トンネル覆工コンクリートの側壁部を模擬した型枠を用いて、コンクリート仕上がり面の角度と表面気泡の発生量の関係を調査することで、型枠の傾斜が表面気泡の発生に及ぼす影響について評価した。さらに、振動締固めが表面気泡の発生に影響を及ぼすといわれていることから、振動締固め過程における表面気泡の発生状況を観察した。さらに表面気泡の発生に影響を与える要素といわれている剥離剤の種類、振動締固め時間、型枠表面の性状をパラメータとした室内供試体を作製し、表面気泡の発生量を調査、分析することで、表面気泡の発生特性を評価した。

第4章 締固め過程におけるコンクリート表面気泡の発生機構の実験的調査

第3章の振動締固め過程の表面気泡発生状況の観察で得られた知見を定量的に評価することで、表面気泡の発生機構を明らかにすることを試みた。なお、表面気泡を定量的に評価するにあたり、既往の方法では表面気泡を精度良く測定できなかったため、デジタル撮影画像を自動処理することで表面気泡量を計測する手法を考案した。

第5章 コンクリートの表面気泡の低減に関する実験的検討

トンネル覆工コンクリートの側壁部は、型枠が負の傾斜をしていることに加え、限られた作業空間であることから振動締固め作業が困難であること、打設空間が30～40cm程度と狭いため打上り速度が速いことから、型枠上方から表面気泡が抜けにいため、表面気泡が発生しやすい。そこで、第3章、第4章で得られた知見をもとにコンクリート仕上がり面から余剰水や気泡を排出することで表面気泡を低減することを試みた。仕上がり面からの余剰水、気泡の排出は、余剰水および気泡の透過性があるシート材で型枠を被覆することで仕上がり面に物質透過性を付与することで行った。被覆するシート材は、水を通しにくく、空気を通す程度の物質透過性を有するシート材（以下、透湿防水シートと称す）および水も空気も良く通すシート材（以下、透水シート）を採用した。型枠に被覆するシート材の性状と表面気泡の発生量の関係を調査することで、表面気泡の低減特性を評価した。

第6章 表面気泡と透気係数の実験的調査

コンクリート表面気泡は表層品質の一つであり、コンクリートの表層品質は耐久性と関連性があるといわれている。表面気泡を美観性とは異なる他の表層品質の測定方法で定量的に評価するために、耐久性の評価指標の一つである透気係数との関係を調査した。ここでは作製した供試体および実際のトンネル覆工コンクリートの仕上がり面に発生した表面気泡量と透気係数性の関係を調査、評価した。

第7章 まとめ

本論文で得られた知見をまとめ、今後の課題および展望についてまとめた。

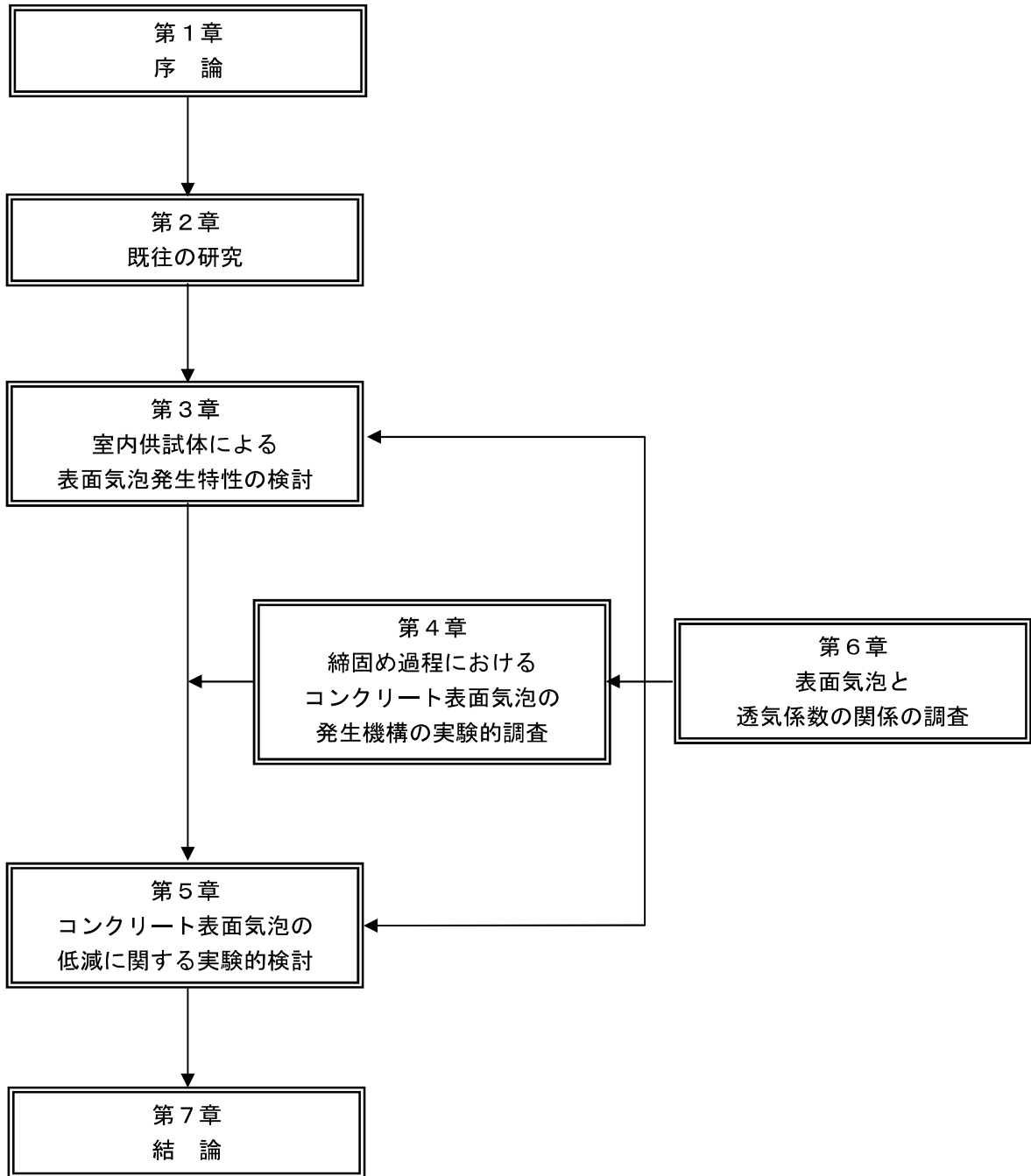


図 1.3.1 本論文の構成フロー

第2章

既往の研究

第2章 既往の研究

2.1 コンクリートの表層品質

コンクリートの表層品質に関する既往の研究では、表層品質の評価手法と表層品質の向上に関する事例が多い。表層品質の評価は、近年、非破壊で評価対することが求められているが統一された手法が確立されていないことから、表層品質の評価手法に関する研究では、非破壊による様々な評価手法をコンクリートの耐久性と関連付け、その有効性を示した事例が多い。中でも、Torrent 法による透気試験で得られた結果の有効性を調査した事例がしばしばみられる。一方、コンクリートの表層品質向上に関する研究では、材料から型枠、打込み・締固め、養生方法などコンクリート構造物を構築する一連の流れの中で、表層品質に影響をおよぼす方法の効果の調査、評価およびその機構の分析を示した事例が多い。

はじめに、コンクリートの表層品質の評価手法に関する既往の研究を以下にまとめる。

Torrent (1992) は、コンクリートかぶり部の透過性について、2つのチャンバーを使用して測定する方法を考案した。コンクリート面に設置したチャンバー内に負圧をかけ、その圧力が大気に戻る率を測定する。その結果、新しい測定値は、従来から手法である Cembureau 法の測定結果と相関性が高いことを報告している。

Sanjuan ら (1995) は、コンクリートの透気性の時間変化について研究している。配合、打設方法や補修方法が同じコンクリート床版の透気性を 20 年にわたり測定した結果、透気係数は、時間とともに増加し、20 年ではほぼ安定した値となり、実構造物と実験室内の供試体には大きな差異があることを報告している。

Long ら (2001) は、新設および既設のコンクリート構造物の耐用年数を予測する方法を調査しており、コンクリート強度、コンクリート内の物質移動特性および腐食の範囲を測定する試験方法について、それらの有効性を報告している。

早川ら (2012) は、物質移動抵抗性の一つである透気性をダブルチャンバー法である Torrent 法 (1992) による表面透気試験の有効性を検討している。作製した供試体を削孔して反対方向から透気試験を行うことで評価可能な表層深さを調査している。その結果、透気試験によって評価している表面からの深さは 15~30mm であることを示している。さらに材齢、緻密度や部材厚、配合条件などがコンクリート内の物質移動抵抗性に及ぼす影響を調べている。さらに透気係数と直接的な耐久性の指標である中性化深さとが相関関係にあることを述べている。

温品ら (2012) は、同じく Torrent 法 (1992) による表面透気試験の有効性に関して検討

している。Torrent 法は、透気試験は内部から表面側へ空気を吸入して測定するのに対して、実際の劣化因子は表面側から内部で移動する。そこで、極表層部分のコンクリートが脆弱である場合、その脆弱部が透気試験結果に影響をおよぼすことを、密実なコンクリート表面に 5mm の脆弱なモルタルを打ち継いだ供試体で検証している。その結果、Torrent 法による評価は表層の脆弱部の影響を受けることを示している。さらにコンクリート表面部位の締め固め状態によって水セメント比が異なるコンクリートでも締め固めの程度によって、透気係数が同程度になることを確認している。

林ら（2013）は、コンクリート評価対象面の吸水量を注入初期から連続的に精度よく測定することで、コンクリートの表層品質を精度よく評価する手法を考案している。材料、養生方法および暴露環境を変えた供試体を作製し、その有効性を評価している。その結果、表面吸水試験によって、水セメント比、型枠の残置期間を評価できることを示している。さらに、表面吸水率試験で得られる指標によって、構造物に対する日射・降雨、材料分離の異なる違いが表面吸水率吸水試験に反映されることを示している。

Azari ら（2014）は、コンクリート構造物の非破壊試験施工として、インパクトエコー法と超音波法を用いて、あらかじめ欠陥を設けたコンクリート床版において、床版の寸法、厚さ、欠陥の深さおよび大きさを測定し、それぞれの有効性を評価している。

西尾ら（2011）は、評価対象面の表面色で、コンクリート表層部の物質移動抵抗性の評価方法を調査している。供試体となるモルタルの色は配合、養生、脱型時期の影響が反映されることを明らかにし、測色機器で水分逸散時の表面色の経時変化を定量化することで、表層部の物質移動抵抗性を評価できる可能性があることを示している。

渡邊ら（2012）は、コンクリート表層品質を評価する新しい手法として目視調査による評価を検討、報告している。この目視調査の方法は、調査項目を定めた表面状態について標本ブロックを参考にグレーディングする手法で、実施者によって生じやすい目視調査結果の誤差を少なくできることを示している。さらにこの手法を用いて PDCA サイクルを構築することが品質向上につながることを確認し、本手法の有効性を述べている。

続いて、表層品質向上に関する既往の研究をまとめる。表層品質向上の研究はここ 10 年程度前から事例が増えているが、透水性型枠に関してはそれ以前の 30 年程度前から行われており、その事例も多い。近年では使用方法やその効果に加え、耐久性との関係の調査など継続された研究が行われている。そこで、はじめに表層品質向上のうち透水性型枠に関する研究を以下にまとめる。

出頭ら（1988）は、微細なスリットを施し表面をセラミック溶射した鋼製型枠を使用することで、スリットからコンクリート中の余剰水や気泡の強制的な排出が可能となり、コンクリートの表層品質の改善すること調査している。圧縮強度および表面硬度の増加、中

性化深さや塩化物イオンの浸透深さの改善を報告している。

小柳ら（1988）は、透水性の脱水型枠を使用した供試体を作製し、打込み中の排水量およびコア圧縮強度、表面硬度、摩耗抵抗性を調査することで、その有用性を報告している。

前田ら（2002）は、透水性型枠を使用することで、表層強度が向上することを報告している。さらに試験体上部でその向上効果が小さくなることの対策として、再振動締固めをすることが有効な手段の一つである可能性があることを示している。

浅井ら（2004）は、透水性型枠の排水性能の調査、表層の高度および強度を調査し、ひっかき試験で透水性型枠の表面硬度向上効果を示している。

竹中ら（2009）は、透水型枠がコンクリートの品質におよぼす影響の定量評価を、コンクリート表面の美観、硬化性状、耐久性を調査することで報告している。美観はアバタ（表面気泡）率、硬化性状は圧縮強度、耐久性は透気係数と中性化深さを測定している。

内田ら（2011）は、表面気泡が常に問題となっているトンネル覆工コンクリート側壁部を模擬した型枠を用いて、耐久性向上に対する透水性シートの有用性をアバタ（表面気泡）率と透気係数の測定結果を用いて報告している。

小林ら（2016）は、東北地方の実際の現場において、トンネル覆工コンクリートの側壁部に透水性シートを適用し、表面気泡の低減効果の確認と透気係数および表面吸水速度の改善効果について調査して、報告している。

次にコンクリートの表層品質向上に関する研究のうち、透水型枠以外の事例についてまとめる。

白根ら（2010）は、締固めおよび養生条件といった施工条件の差異が、コンクリート表層部の品質におよぼす影響を調査している。締固めの有無の差による影響は、締固めない場合、ある場合に比べ、圧縮強度が1/2以下、透気係数が約20倍になり、振動条件がコンクリートの表層品質に影響を与えることを報告している。また養生環境として相対湿度が異なる供試体を作製し、養生環境が湿度60%以下では湿度95%以上に比べ材齢28日の圧縮強度が約50%、透気係数が13倍、中性化深さが3倍になり、養生時の湿度がコンクリート表層品質に影響を与えることを報告している。

秋山ら（2012）は、フィルム材を用いた型枠が表層品質に与える影響を調査しており、型枠表面の粗度が小さい型枠や透水性のある型枠を使用することで、表面気泡および透気係数の低減、接触時間測定によるコンクリート表面の弾性率の向上および塩化物イオン濃度の分布測定結果が向上することを報告している。

渋谷ら（2014）は、型枠面に熱可塑性樹脂シートをあらかじめ貼付し、コンクリート打込み後も長期間存置することで、コンクリート仕上がり面の透気係数および吸水速度が低減することを報告している。

井上ら（2015）は、水セメント比が70~31%のコンクリートの配合、脱型時期および養生方法がコンクリートの表層品質に及ぼす影響を調査している。コンクリートの圧縮強度が大きくなると透気係数が小さくなる傾向があり、水セメント比を小さくすることで得られる強度増加より、養生環境の影響の方が大きいことを報告している。

2.2 コンクリートの美観性

コンクリート仕上がり面の美観性、すなわち「見た目」や「見栄え」は、近年、表層品質や耐久性との関連性があるといわれており、表層品質や耐久性と同様、注目が集まっている。しかし、表層品質や耐久性に関する研究は海外でも事例が多いものの、美観性に関する研究は海外の事例は少なく、国内の事例が大半である。また、美観性に対する意識調査といった美観性を定量的に評価する研究は、海外での事例が見当たらない。ここでは、コンクリートの美観性に対する調査、美観性の改善と美観性に影響を及ぼすといわれている表面気泡および色むらの改善に関する研究についてまとめた。

以下にコンクリートの美観性に対する調査および評価に関する既往の研究をまとめる。

岡島ら（1994）は、コンクリートの仕上がり、コンクリート素地仕上げが異なる写真やサンプル供試体を用いたアンケート調査をよって視覚心理的に考察しており、素地仕上げの方法によってコンクリートが人に与える印象評価が異なることを述べている。

大塚ら（2009）は、プレキャストコンクリート製品の表面仕上がり状態の美観性について、コンクリート表面のサンプル画像を用いた社内アンケートによって調査している。表面仕上がり状態における色の濃淡や色むら判定に対する社内基準がなく、評価者の潜在的な意識に左右される中で、仕上がり面の色の濃淡や色むらは、明度が高くなるほど鈍感になることを示している。表面気泡は社内基準を定めていることが多く、表面気泡表面気泡の面積率が0.5%以上となると、回答者の30%程度が表面気泡に対して補修の必要性を感じていることを報告している。

荒巻ら（2014）は、コンクリート表面の視覚的な仕上がり状態の評価要素の一つである色むらを対象として、色むらの程度を明度の標準偏差で表現し、検査条件の相違が観察の色むらの認識に及ぼす影響を検討している。色むらの観察距離、観察時の光源の色温度および照度は、色むらの認識に影響を及ぼさないこと示唆していると述べている。一方、対象に対する視角が狭いほど、またコンクリート表面の平均明度が高いほど（白色に近づく）色むらと認識しがたくなる傾向にあることを報告している。

稲川ら（2011）は、トンネル覆工コンクリートの品質評価の一つとして、様々な業種のトンネル技術者への写真を用いたアンケート調査をすることで、見た目から覆工コンクリートのあり方について検討することを試みており、トンネル覆工コンクリートにおける見栄えの重要性を示している。また、トンネル覆工コンクリートの見栄えには側壁部のアバタが最重要課題であることを報告している。

平岡ら（2012）は、職種が異なるトンネル技術者に対するアンケート調査によって、トンネル覆工コンクリートに要求される項目の重み付けは、耐久性>美観性>施工性>経済性の順になることを述べている。

掛樋ら（2012）は、AHP を用いたアンケート調査によって、トンネル覆工コンクリートにおける美観性に影響を与える項目の重み付けを行っており、表面付着・剥離および打継目地を重視しており、次いでアバタの順であることを報告している。

次に、コンクリート仕上がり面の美観性の改善に関する既往の研究について、はじめに美観性全体に関する研究についてまとめる。

藤本ら（2000）は、コンクリート構造物の表面美観におよぼす影響について、型枠剥離剤に着目して、その種類がコンクリート仕上がり面の色むらおよび気泡の多少に与える影響を調査している。その結果、水性のカオチン系剥離剤が油性の脂肪酸系剥離剤および軽油に比べ、色の均一性、気泡の発生率の低減に有効であることを報告している。

一宮ら（2004）は、透水型枠工法適用時の表面気泡の低減および色むら発生メカニズムについて、コンクリートフレッシュ性状との関係より報告している。表面気泡低減効果は、表面気泡に作用する力のつり合いから説明し、実験で理論の検証をしている。色むらの発生原因は、高さの異なる供試体を作製し、供試体高さと色むらの発生状況を比較することで、余剰水が透水シートを通して外部に排出されることが色むら発生の要因と推察している。

北ら（2009）は、傾斜コンクリート面への表面気泡抑制剤（材）の塗布や型枠透水シートの使用によって、表面気泡の低減を図るとともに、中性化深さを測定することで耐久性の向上について調査している。その結果、表面気泡抑制効果があるとされている剥離剤の使用のみでは十分な表面気泡低減効果が確認できず、型枠透水性シートの使用によって表面気泡低減効果が向上し、中性化深さも小さくなったことを報告している。

片野ら（2012）は、コンクリートの美観性に影響を与える事象として、「砂すじ」、「あばた」および「打ち重ね線」を挙げ、砂すじに対して配合、あばたに対して配合と型枠の傾斜およびスペーディングの有無や型枠振動機などの施工条件、透水性シートの使用、打ち重ね線に対して打ち重ね箇所での突き固めの有無や打込み方法をパラメータとして供試体を作製し、その効果の検証と発生機構を調査している。その結果、砂すじ除去にはブリーディング水の除去と型枠の継ぎ目処理、あばた発生には型枠面でのスペーディングや振動締固めおよび透水シートの型枠への添付、打ち重ね線には突き固めと打込み面を水平にすることが有効であることを報告している。

瀧聞ら（2012）は、中流動コンクリートを使用したトンネル覆工コンクリートの美観性について報告している。中流動コンクリートは、アバタの発生量が少なくなるが、側壁部では型枠バイブレータのみの締固めではアバタ発生が多く、挿入式バイブレータを併用することでアバタ発生が低減することを述べている。

続いて、コンクリート仕上がり面の美観性の改善に関する既往の研究について、主に表

面気泡に関する研究についてまとめる。

Reading (1972) は、表面気泡はコンクリートの仕上がり面において最も困難な欠陥であると述べている。表面気泡は、定量的な評価の基準もなく、その発生を制御することも困難であり、今後、評価の尺度および表面気泡の制御方法を早急に研究する必要があることを述べている。

倭ら (1986) は、界面活性剤によって混和剤の表面張力を抑えることでコンクリートと剥離剤との親水性が増し、仕上がり表面がセメントペーストで覆われるため、気泡が内部に留まり表面気泡が低減することを述べている。表面気泡を低減するためには、界面張力を 10dyne/cm 以下にしなければならないことを報告している。

一宮ら (1997, 1998, 1999) は、高流動コンクリートにおける表面気泡の発生特性を、打設条件、加振、配合に関して調査している。表面気泡の評価は、画像解析による面積および座標による分布、レーザー変位計で測定する深さをを用いて行っている。打設条件として、スランプフロー、打設速度、離型剤の特性をパラメータに実験を行い、表面気泡との関連性を調査することで、表面気泡発生メカニズムを言及している。その結果、スランプフローが大きいほど、また打設速度を遅くすると、表面気泡の面積比、最大表面気泡径が小さくなり、離型剤は油性に比べ水性剥離剤の方が、表面気泡抑制効果があるが気泡深さが深くなることを報告している。そして表面気泡径と深さには相関関係があることを述べている。加振については、微振動によりコンクリートのみかけの粘性が低下し、大きな気泡は除去され小さな気泡が多数残存することを示している。配合は、同一の流動性を有する粉体と増粘剤系の高流動コンクリートに、パターンを変えた微振動を加え表面気泡の性状を調べている。その結果、同一流動性でも粘性は増粘剤系のほうが大きく、粉体系と増粘系では表面気泡性状は異なり、粉体系は微振動を長くかける方法が、増粘系は無振動が気泡低減に効果的であることを述べている。

三田ら (2009) は、鉛直面に発生するコンクリートの表面気泡について、1.5 リットルのペットボトルを高さ 20cm に加工して型枠とし、水セメント比 (W/C) と混和剤の種類をパラメータとしてコンクリートを打込み、脱型後の表面気泡面積率測定と打込み時の気泡の挙動観察をすることで、表面気泡発生機構の検討を行っている。その結果、表面気泡には打込み直後から存在し締固め中に抜けきらず残存するもの、締固め中にコンクリート内部から析出するもの、締固め後のブリーディング現象と析出するものがあること、さらに粘性の高いコンクリートほど気泡の上昇速度が遅く、表面気泡が増加することを示している。

平野ら (2014) は、圧力測定フィルムを用いた画像解析による表面気泡の面積および個数を定量的に評価する手法を考案し、覆工型枠の側壁部を模擬した型枠内に発生する表面気泡の発生状況を調査している。型枠の傾斜が 0~45° の範囲内で型枠の傾斜が大きくなると

表面気泡発生量も多くなること、直径 10mm 以上の気泡が発生する最小の型枠角度はセラミック溶射型枠では 30~45°、鋼製型枠では 15~30°であったことを報告している。

陳ら (2007) は、プレキャストコンクリートの表面状態を把握するために、仕上がり面の表面気泡の面積率と気泡の個数を判定基準に、水平振動装置の振動加速度、振動時間、コンクリートのスランプ、打込み高さおよび型枠の高さ、長さ、幅をパラメータに実験を行っている。振動加速度、振動時間の増加とともに表面状態が良好になり、スランプが大きいほど、打込み高さが低いほど、型枠の高さが低く、長さが長いほど、コンクリートの表面状態が良好になったことを報告している。

平田ら (2014)、海老ら (2014)、石井ら (2014) は、型枠に添付した熱可塑性樹脂シートがコンクリート仕上がり面に発生する表面気泡に及ぼす影響について、表面気泡面積率を測定することで実験的に調査している。熱可塑性樹脂シートを型枠に添付することで表面気泡発生量と透気係数が低減することを報告しているが、そのメカニズムは今後の課題としている。さらに熱可塑性樹脂シートを接着剤や両面テープなど貼付方法をパラメータとした実験では、貼付方法の差によって表面気泡の低減および気泡発生のおぼつきに差が生じることを報告している。また、トンネル覆工の下げねこ部を検討箇所として実寸大の供試体を作製した実験では、シートを貼付することで表面気泡、透気係数および吸水速度が低減すること、その減少率は曲線部で顕著であるが型枠上部では十分な効果が得られないことを報告している。

御領園ら (2015)、依田ら (2015)、黒田ら (2016) は、型枠に超撥水機構を付与し、界面での水の接触角を 170°以上確保することで、超撥水機構がコンクリート仕上がり面に発生する表面気泡に影響を及ぼすことを示している。アクリル製の型枠とその表面に超撥水性の機構を有する型枠を設置して水で満たし、底面から連続的に気泡を発生させその挙動を観察することで、超撥水型枠の気泡の挙動を調査している。その結果、超撥水性型枠がない場合は気泡がアクリル板と水の界面に密集して気泡が多数確認されるのに対して、超撥水性型枠がある場合は微細な気泡は界面に確認されるものの、気泡は滞留することなく空気中に放出されることを報告している。また、ブリーディング試験用の容器に超撥水型枠を使用することで、ブリーディング率は幾分大きくなったものの、容器近傍の撥水性が高いことによって水が型枠の周囲に集まりやすくなったためであり、コンクリート表面の気泡は抑制されていることを報告している。超撥水型枠の気泡抑制効果を型枠の角度を変えて検証しており、水平面に対して角度が小さいほど表面気泡の抑制に効果的であったことを述べている。

最後に、コンクリート仕上がり面の美観性の改善に関する既往の研究について、色むらに関する研究についてまとめる。

大塚ら（2007）は、調合（配合）および施工要因の違いがコンクリート表面の色むらに及ぼす影響について、デジタルカメラの撮影画像の画像解析を用いて定量化し、実験的に検討している。その結果、水セメント比が大きいほど色むらが大きくなる傾向があり、材齢経過に伴った色むらの変化も大きいこと、またバイブレータの加振により水セメント比50%および75%では色むらが少なくなることを述べている。

児玉ら（2009）は、打込み、締固めおよび凝結速度を変化させてコンクリート表面に発生する色むらについて、表面観察により調べており、適切な締固めのほか、ブリーディング水の適切な処理が色むらの抑制に効果的であることを報告している。

2.3 コンクリート表面状態の定量評価

コンクリートの表面状態の評価には、施工中のコンクリート出来栄の評価や供用後の維持管理を目的にしたコンクリートの健全性の評価などがあり、手法に関して多くの研究事例がみられる。ここでいうコンクリートの表面状態の評価とは、コンクリート表面の性状を視覚的に評価する手法のことであり、コンクリート表層の物質移動抵抗性の測定などの手法とは異なる。また、調査対象としているコンクリートの表面状態も異なり、コンクリートの表面気泡だけでなく、色むら、ひび割れおよび浮き・はく離など様々である。コンクリートの表面状態の定量評価に関する研究は海外でも事例が多く、特に画像解析による評価手法に関する研究事例が多い。本節では、コンクリート表面状態の定量評価の中で、表面気泡に関する内容を中心に研究事例をまとめた。

以下、コンクリート表面状態の定量評価に関する既往の研究事例のうち、はじめに表面気泡の定量評価に関する既往の研究事例を列挙する。

Lemaire ら (2005) は、表面気泡の大きさと分布状況を調査するために、表面気泡の分類に CIB (1973) に示された表面気泡の分類を引用した画像解析について研究している。照明の異なる条件下で撮影されたコンクリート表面の画像は比較困難であるため、標準光源である D65 光源を模擬した輝度の画像取得方法を提案している。この方法により、コンクリート表面の色合いの均一性と表面気泡分布を判定することができる。結果として、開発された評価方法は従来の方法と相関性があり、表面気泡の分布や寸法値を測定可能である。

Zhenhua ら (2008, 2010) は、表面気泡には中央部が暗く周囲が明るくなる特徴があることを見出し、この特徴を画像処理で判別することにより、表面気泡を自動で検出する手法を報告している。さらに、既往のプログラム言語を使用し、手動で設定したしきい値を元に欠陥視覚への影響比率を比較することによって、表面気泡と色むらの検出精度が改善することを示している。

Peterson ら (2009) は、気泡判定のしきい値を手動で設定するのではなく、多くのサンプルから解析した値を使用して、フラッドベッドスキャナーでコンクリート表面の画像を分析して表面気泡を検出する手法を研究している。

Ozkul ら (2010) は、表面気泡面積率の測定のための新しい装置を開発することを目的とした研究を行なっている。開発された方法は、Pressure differential method と呼ばれ、薄いコンテナとコンクリートを接触させ、コンテナ内に加圧ガスを注入すると、表面気泡部分ではガスが通過するため、その部分の寸法（表面気泡の寸法）を測定する方法であることを述べている。この開発された表面気泡測定装置でコンクリートを評価した結果、表面気泡評価に関して従来法[Lemaire ら (2005)]との相関性がみられたと報告している。

Silva ら (2013) は、自己充填コンクリート (SCC) プレキャスト要素の表面仕上げ (主

に表面気泡)を分類するエキスパートシステムを開発している。コンクリート表面の評価は、デジタル画像を使用し、ファジィ論理により評価されたパラメータを定義した画像解析ツールによって解析されている。実験結果から、エキスパートシステムにより、コンクリート表面評価の分類が可能であることを報告している。

Valenca ら (2013) は、コンクリート表面の汚れ、露出した骨材、補修したモルタルやひび割れを、青、緑、赤、赤外線 の 4 つのマルチスペクトルバンドを用いたマルチスペクトル画像を解析することで検出する方法を報告している。

Cotic ら (2015) は、赤外線サーモグラフィの結果に基づき、サーマルコントラスト方式を用いて気泡径と深さが検出する方法を示している。

一宮ら (1997) は、表面気泡の検出に関して面積に加え、レーザー変位計で気泡の最大深さを検出する方法を考案し、径が 2mm 以上の気泡の最大深さを測定したことを報告している。

平野ら (2014) は、写真の画像解析に加え、圧力測定シートを使用したコンクリートの表面気泡検出方法について研究している。加圧によって発色するシートをコンクリート表面に設置して、加圧することで凹部の表面気泡以外が発色するため、表面気泡が検出できるとしている。発色したシートの気泡をフラットヘッドスキャナで検出することで、表面気泡を定量評価できると報告している。

ここから表面気泡以外のコンクリート表面状態の定量評価に関する研究事例を列挙する。

奥野ら (2005) は、レーザー光線を ϕ は、レー程度 of 細かいビームスポットとしてポリゴンスキャナ等を用いて走査し、計測対象物からの反射光量の強弱を検出するフライングスポット法でひび割れを抽出し、幅と長さを測定する手法を考案し、その有効性について近接目視詳細調査結果、従来車両による結果と比較することで調査している。その結果、開発した手法の方が従来車両のひび割れ調査結果より、近接目視調査結果に近く、検出精度が向上していることを報告している。また、覆工コンクリートの同一箇所を再度計測して、その再現性を確認し、誤差が 1%以下になることを示している。

岡本ら (2006) は、コンクリート表面の色むらをデジタルカメラで撮影した画像解析によって評価する手法を研究しており、明度と色むらに相関があることから明度分布の標準偏差の大小によって評価できることを述べている。

丸屋ら (2007) は、ウェーブレット変換技術を用いたデジタルカメラ撮影画像の画像解析によって、コンクリートのひび割れの分布状態や幅、長さを定量的に評価する手法を研究している。その結果、分解能 0.8mm/pixel の撮影画像で幅 0.2mm、分解能 0.3mm/pixel の撮影画像で幅 0.1mm 以上のひび割れ検出が可能であることを報告している。

久保ら (2011) は、赤外線画像と可視画像を重畳させ、この画像を解析することでコンク

リート構造物のひび割れやはく離等の表面劣化を診断する手法を研究している。赤外線画像から温度差を基準に浮き，はく離を，画像解析からひび割れ幅と長さを抽出して判定し，移動を伴った撮影でも判定できることを報告している。判定は温度変化の少ないトンネル坑内でも浮き，はく落の判定が可能であり，ひび割れは幅 0.2mm 以上のものの抽出が可能であることを示している。

第3章

室内実験による 表面気泡発生特性の検討

第3章 室内実験による表面気泡発生特性の検討

3.1 概説

トンネル覆工コンクリートの側壁部で仕上がり面に表面気泡が発生しやすい要因の一つは、負の勾配に傾斜していることである。このような形状は、覆工コンクリートのほかに、もたれ擁壁、ボックスカルバートや高欄のハンチ部などがあり、同様に仕上がり面に表面気泡が発生しやすい。しかし、仕上り面の角度と表面気泡発生量は明確ではなく、その発生特性も知られていない。そこで覆工コンクリートで使用する移動式鋼製型枠（以下、セントルと称す）と同じ材質で仕上がり面の角度が調整可能な型枠を用いて、仕上がり面の角度と表面気泡の発生量の関係を調べ、型枠の角度が表面気泡の発生に与える影響を評価した（平野ら、2013）。また表面気泡を効率よく低減させるためには、その発生機構や特性を調査することは重要である。そこで、振動締め固め過程の気泡の発生状況を観察することで、表面気泡の発生特性、機構の評価を試みた。振動締め固め過程の表面気泡の状況を観察するため、仕上がり面を可視化した型枠で供試体を作製した。さらに仕上がり面を負の勾配に傾斜させた型枠を用いて、表面気泡の発生に影響を与える可能性がある型枠の剥離剤、振動締め固め時間、型枠の性状を変化させ、表面気泡の発生量と関係性を調べ、発生特性を評価した。

3.2 室内供試体作製概要

3.2.1 供試体作製装置

本研究で使用した型枠を図 3.2.1 に示す。トンネル覆工コンクリート側壁部を模擬するため、型枠は材質に実際の覆工コンクリートで使用する厚さ 6mm の鋼板を使用し、寸法を幅 300mm、高さ 750mm、奥行きを標準的な覆工コンクリートの設計厚さ 300mm とした。型枠の評価対象面は付け替えが容易な構造とし、実験の目的に応じて、材質、形状を変化させた。さらに型枠の設置角度を可変式とし、コンクリート仕上がり面の鉛直方向に対し 0°、15°、30°、45°の傾斜になるような構造とした。

3.2.2 供試体作製方法

この型枠の上方から、コンクリートを打ち込み、棒状バイブレータで振動締め固めを行い、供試体を作製した。コンクリートは打ち込み時の分離がないようにバケツを用いて人力で静かに投入した。打ち込み高さは実験内容に合わせて変え、打ち込み高さは高さ約 40cm の 2 層打ちを標準とし、その他に高さ 75cm の 1 層打ちとした。振動締め固めで使用した棒状バイブレ

一タは径 28mm，周波数 220～280Hz で，振動締固め時間は各層 5 点，3 秒/点，計 15 秒を標準とし，実験内容に合わせて変更した．打込み完了後から脱型までは気中養生とし，一般的な覆工コンクリートの脱型時間と同様，18～20 時間で評価対象面の型枠を取り外した．

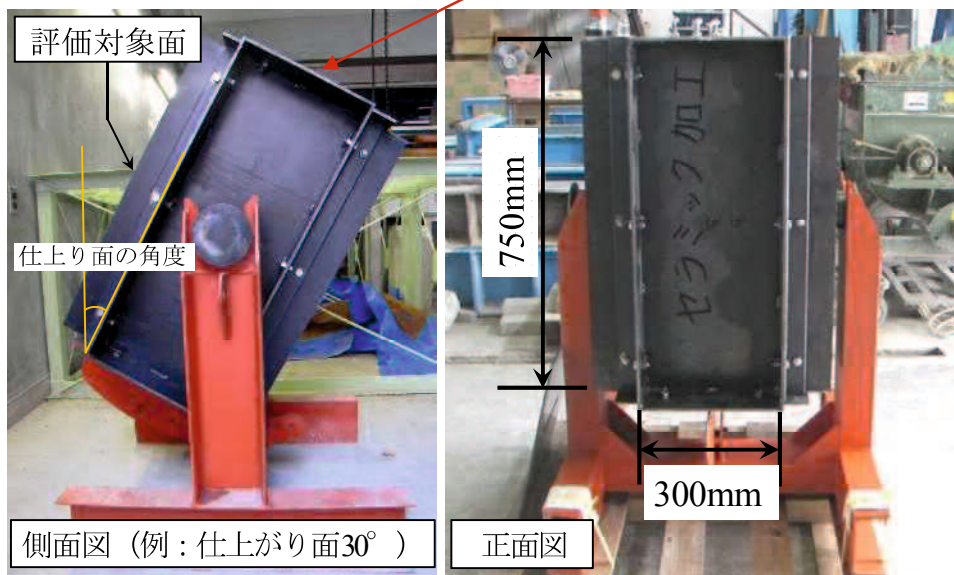


図 3. 2. 1 トンネル覆工コンクリート側壁部を模擬した可傾式型枠

3.2.3 コンクリートの材料と配合

使用したコンクリートの配合は、覆工コンクリートを想定するため、実際に覆工コンクリートで使用した配合を参考に、W/C=60%以下、セメント量 270kg/m³ 以上、目標強度 21N/mm² (材齢 28 日)、目標スランプ 15cm、目標空気量 4.5%で設定した。これは一般的な覆工コンクリートの配合である。配合と使用材料の物性値を表 3.2.1、表 3.2.2 に示す。粗骨材の配合比は G1:G2:G3=4:3:3 である。練混ぜには容量 50 リットルの二軸強制練りミキサーを使用した。練混ぜ手順は、細骨材とセメントを 30 秒空練りした後、水を加えてモルタルとして 60 秒、その後粗骨材を加えて 120 秒、計 240 秒練り混ぜの順である。

表 3.2.1 コンクリート配合

配合記号	W/C	単位量 (kg/m ³)							
		W	C	S1	S2	G1	G2	G3	WRA
A	0.59	165	280	366	366	454	341	341	2.80
B	0.59	165	280	726	-	455	342	342	0.42~3.36
C	0.59	165	280	726	-	454	341	341	2.24

表 3.2.2 使用材料

種類	記号	物性値
セメント	C	高炉セメント B 種, 密度 3.04g/cm ³
細骨材	S1	海砂, 表乾密度 2.60g/cm ³
	S2	海砂, 表乾密度 2.64g/cm ³
粗骨材	G1	碎石 4020, 表乾密度 2.70g/cm ³ , (配合 B は 2.72g/cm ³)
	G2	碎石 2015, 表乾密度 2.72g/cm ³ , (配合 B は 2.72g/cm ³)
	G3	碎石 1505, 表乾密度 2.70g/cm ³ , (配合 B は 2.72g/cm ³)
混和剤	WRA	AE 減水剤標準型 (リグニンスルホン酸塩系化合物)

3.3 室内実験のパラメータ

本章の実験では、コンクリート仕上がり面の角度と表面気泡発生量の関係の調査、振動締固め過程における表面気泡発生状況の観察および表面気泡の発生特性把握と低減を目的に室内供試体を作製した。以下、それぞれの実験概要を記す。

3.3.1 コンクリート仕上がり面角度と表面気泡発生量

コンクリート仕上がり面に負の勾配の傾斜がある場合、仕上がり面に表面気泡が発生しやすい。しかし、仕上がり面の角度と表面気泡の発生量の関係は明らかにされておらず、トンネル覆工コンクリート側壁部も同様である。そこでトンネル覆工コンクリート側壁部を模擬した型枠の仕上がり面の角度を変化させ、仕上がり面の角度と発生する表面気泡量の関係を調査、評価することで表面気泡の発生特性を検討した。表面気泡発生量の測定は、圧力測定フィルムを用いた方法と撮影画像の二値化処理による方法で行った。詳細については後述する。仕上がり面の角度は0°、15°、30°、45°とした（表 3.3.1）。0°とは仕上がり面が垂直の状態である。

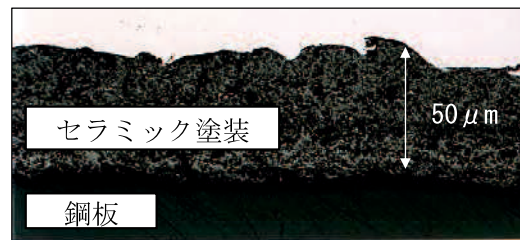
評価対象面の型枠の材質は鋼板で、鋼板の表面状態は実施工でも多く採用される「処理なし」と「セラミック溶射」の2種類とした。セラミック溶射とは、鋼板表面に高温で平滑かつ均一にセラミックを厚さ50 μm 程度で溶射したものである（図 3.3.1）。セラミック溶射した部分は、粗度が大きく連続した多孔質であることから、処理なしに比べ剥離剤が流れにくく均一に保持でき、脱型時の離型性が良いという特徴を持つ。なお、覆工コンクリートは12～20時間の若剤齢で脱型するため、強度発現が十分でないとき型枠側にモルタル分が付着することがある。これが第1章で述べた「はく離」となる。特に施工の最後までコンクリート打込む天端部の吹上げ口周辺ではく離することが多く、はく離は美観性に影響を与えるだけでなく、耐久性にも影響を与える。そのため、離型性の良さは覆工コンクリートの施工において重要な要素の一つである。

表 3.3.1 仕上がり面角度と表面気泡発生量に関する実験

No.	型枠性状	型枠角度	配合記号	剥離剤	締固めの条件 (2層打設)
1	鋼 (FS)	0°	A	標準	各層 5 点 3 秒/点 計 15 秒 振動位置  評価対象面
2		15°			
3		30°			
4		45°			
5	セラミック 溶射 (FC)	0°			
6		15°			
7		30°			
8		45°			



(表面状態)



(セラミック塗装拡大イメージ, 断面図)

図 3.3.1 セラミック塗装

3.3.2 振動締め固め過程における表面気泡発生機構の観察

供試体作製の型枠はこれまでと同じものであるが、評価面の材質を透明なアクリル板とすることで、コンクリートの打込み・締め固め過程を可視化した（図 3.3.2）。この型枠を用いて供試体を作製することで、打込み～振動締め固め～打込み完了までの一連の過程における表面気泡の発生状況、移動・挙動状況を観察することが可能となった。一連の過程を観察することで表面気泡の発生機構の把握を試みた。コンクリートの打込みは1層打ち（高さ75cm程度）、振動締め固め過程の表面気泡発生状況を長時間観察するため、振動締め固めは位置を供試体中央、時間を60秒1サイクルで7回、計420秒間とした。表 3.3.2 に、この表面気泡発生機構調査の実験条件を示す。評価対象面となるコンクリート仕上がり面の角度は、表面気泡と仕上がり面の角度の調査実験結果から得られた知見を基に、気泡発生量が急激に多くなった角度の30°とした。振動締め固め中は、デジタルカメラを用いた動画撮影と10秒ごとの静止画撮影を行った。

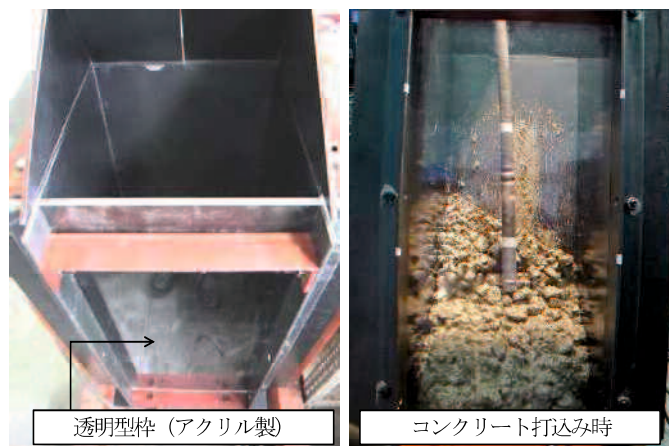


図 3.3.2 アクリル製の透明型枠

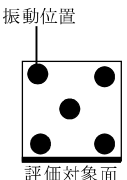
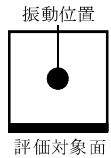
表 3.3.2 表面気泡の発生機構の調査を目的とした実験

No.	型枠 素材	型枠 角度	配合 記号	剥離剤	締め固め条件 (1層打設)
9	アクリル	30°	B	標準	中央1点 60秒×7回 振動位置  評価対象面

3.3.3 表面気泡発生特性把握と低減実験

表面気泡の発生低減に影響があると考えられる方法はいくつかある。既往の研究では、河辺ら（1999）による水平振動時間と表面気泡の発生の関係調査，藤本ら（2000）による型枠剥離剤と表面美観の調査，片野ら（2012）によるスペーディングや透水シートによる表面気泡低減効果の確認などがある。しかし，トンネル覆工コンクリート側壁部を想定したものはなく，また気泡低減の効果を確認しているにとどまり，効果と表面気泡発生の機構や特性を結びつけた研究はない。表面気泡の発生特性に関する基礎的な研究結果もない。そこで，表面気泡の発生に影響があると考えられる項目を実験パラメータとして，表面気泡の発生状況を定量的に評価することで，表面気泡の発生特性の把握を試みた。実験パラメータは，評価対象面に塗布する（1）剥離剤の種類，（2）振動締固め時間，（3）型枠の性状（シート材による型枠面の被覆，型枠の形状と表面処理）とした（表 3.3.3）。コンクリート仕上がり面の角度は，「3.3.2 振動締め固め過程における表面気泡発生機構の観察」と同様に 30°，打込みは 2 層打設（30～40cm/層）とした。振動締固め方法は，実験に応じて異なる。配合 A，B は材料供給の関係で分けており，練り上がりのフレッシュ性状に有意な差異はなかった。

表 3.3.3 表面気泡の特性把握および低減を目的とした実験

No.	型枠性状 表面処理/加工/シート材 (記号)	型枠 角度	配合 記号	剥離剤	締固め条件 (2層打設)
3	なし/なし/なし (FS)	30°	A	標準	*1 
7	セラミック溶射/なし/なし (FC)				
10	なし/なし/なし (FS)				
11	セラミック溶射/なし/なし (FC)			整泡性	*2 
12					
13	なし/なし/透水シート (FS・PS)				
14	セラミック溶射/溝/ 透水シート (Gr-FC・PS)	B		*3	

*1：各層 5 点，3 秒/点 計 15 秒/層 *2：各層中央 1 点，60 秒/層 *3：各層中央 1 点，30 秒/層

(1) 剥離剤の種類

剥離剤は、含まれる成分の消泡効果によって表面気泡低減があるといわれている種類がある。そこで、剥離剤の種類を変えて供試体を作製し、コンクリート仕上がり面における剥離剤の種類と表面気泡の発生量を調査・評価した。

使用した剥離剤は、一般的に使用される標準と整泡効果がある2種類のタイプで、両者とも油性である。整泡性剥離剤はシリコン系で、シリコン系の剥離剤には界面活性効果によって型枠接触面の表面張力を小さくする性質がある。供試体作製の型枠には、表面処理のない鋼板（FS）と表面をセラミック溶射した鋼板（FC）の2種類を採用して、比較、検討した。配合はA配合、打込みは2層打ち、振動締固め時間は各層5点、3秒/点、計15秒/層とした。

(2) 振動締固め時間

振動締固め不足は表面気泡の発生に影響があるといわれており、実施工においても表面気泡が発生しやすい負の勾配に傾斜している仕上がり面の施工では、バイブレータによる丁寧な振動締固め、木槌による型枠のたたきや型枠バイブレータによる再振動などを行い、型枠面の気泡除去に努めている。しかしながらその効果の程度は不明瞭で、振動締固め時間と表面気泡の発生量を定量的に評価した事例がない。そこで振動締固め時間と表面気泡の発生量を調査・評価した。

一連の実験の中で、振動締固め時間が15秒と60秒のパターンの結果を比較した。型枠はセラミック溶射の鋼板（FC）、剥離剤は整泡タイプである。

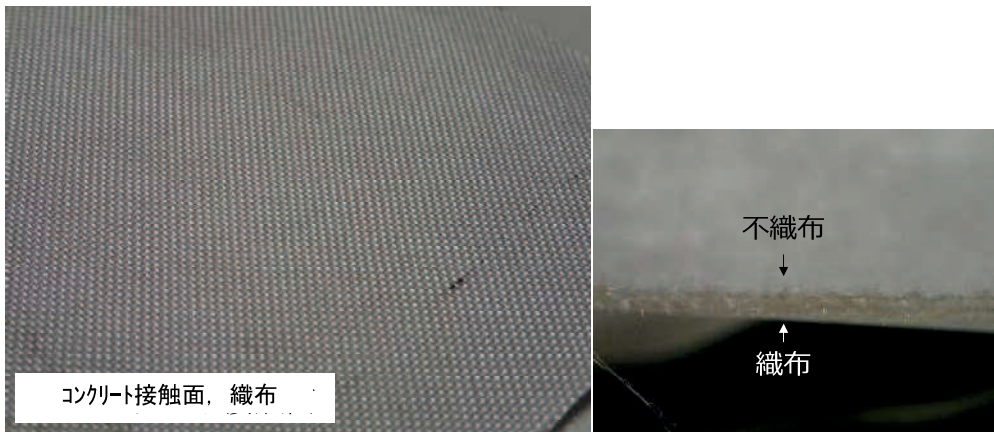
(3) シート材による型枠面の被覆と型枠形状

型枠の表面気泡に透過性があるシートを設置することは、気泡・余剰水の排出が促進されるため、表面気泡の発生低減に効果的であるといわれている。内田ら（2011）は透水シートと表面気泡の発生量および透気係数との関係性、出頭ら（1988）は型枠にスリットを設けることで、コンクリート表面からの余剰水の排出を試み、表面気泡の発生率、型枠からの脱水量および中性化深さなどを実験的に調査している。

使用したシートは、透水、透気性がある2層構造のシートで、コンクリート仕上がり面に接触する側は織布、背面が不織布で構成されている（図3.3.3）。シートの性能は、透気抵抗度をJIS L 1096 8.26.1（フラジール形法）およびJIS L 1096 8.26.2 B法（ガーレー形法）、耐水圧をJIS L 1092 耐水度試験A法（低水圧法）で測定した結果、透気抵抗度がガーレー通気係数で1.7sec/100cc、透水性が耐水圧で約2.5kPaであった。

実験ケースは、透水性シートを設置、型枠の表面処理や溝加工があるケースとないケー

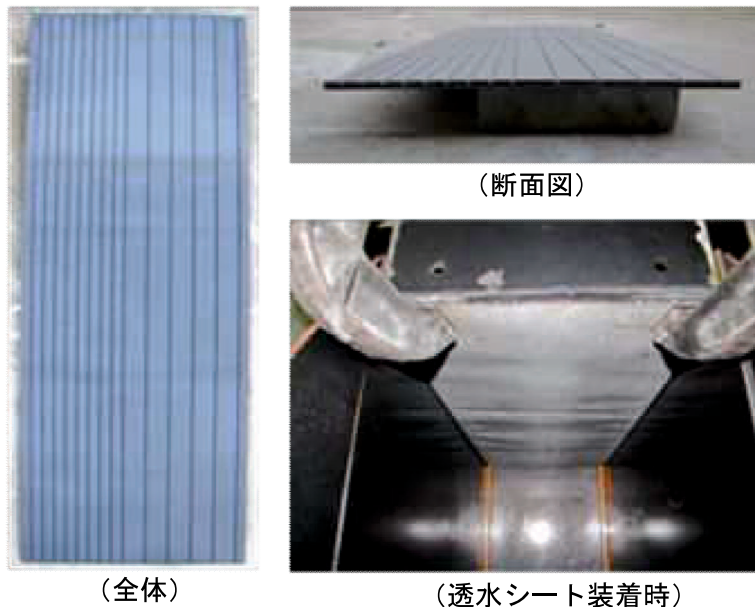
スの供試体を作製した（図 3.3.4）。表面に設けた溝加工は、幅 2mm、深さ 2mm の四角形状である。溝の設置間隔による表面気泡発生状況を比較するため、溝の設置間隔は 15mm と 30mm の 2 種類とした。溝の設置は、透水シートの余剰水・気泡の排出効果向上を期待している。透水性シートを設置した供試体での表面気泡発生量と他のパターンでの表面気泡発生量を比較、検討することで、表面気泡の低減効果の確認と発生特性を評価した。



(全体)

(拡大)

図 3.3.3 透水シート



(全体)

(透水シート装着時)

図 3.3.4 溝加工型枠と透水シート設置状況

3.4 二値化による表面気泡の検出および定量評価の方法

本実験では、表面気泡検出方法として従来から使用されている撮影画像と圧力測定フィルムデータの二値化処理によって表面気泡を検出・測定する方法で、表面気泡の発生量を定量化した。以下に検出方法について詳述する。

3.4.1 表面気泡の検出方法

(1) 圧力フィルムを用いた検出方法

圧力測定フィルムを用いた検出方法は、感圧紙をコンクリート表面に押し当てて凹部となる表面気泡を検出する方法である。そのため凸部がなく表面気泡部以外のコンクリート面が平滑な供試体（No.1~8, 10~12）に用いた。以下、圧力測定フィルムを用いた検出方法を詳述する。

本研究で使用した圧力測定フィルムは、富士フィルム製プレスケールのツーシートタイプ（高感度）である。シートは発色剤が塗布された A シートと顕色剤が塗布された C シートを重ね合わせて使用する。評価対象面に圧力測定フィルム（顕色剤が塗布された C シート、その上に発色剤のカプセルが塗布された A シートの順）を粘着テープで設置する。その上から加圧すると、加圧された部分は A シートの発色剤カプセルがつぶれ、C シートの顕色剤と反応して赤色に発色する構造である（図 3.4.1）。圧力測定フィルムへの加圧は、金属製のハンドローラで転圧することで行った（図 3.4.2）。表面気泡部は凹部のため、ローラで転圧しても発色剤がつぶれないため発色せず、C シートでは表面気泡以外のコンクリート面で発色剤がつぶれ赤く発色する仕組みである（図 3.4.3, 図 3.4.4）。

検出は脱型後、評価対象面が湿潤状態でない状態で行った。圧力測定フィルムを用いた手法による表面気泡の検出方法のフローを図 3.4.5 に示す。まず加圧によって表面気泡部以外が赤く発色したシートをフラットスキャナで取り込んだ。スキャナ画像のサイズは約 1200×1700 ピクセル（約 27×20cm）である。金属ローラで圧力測定フィルムを転圧して発色させるため、フィルムの端部は適切な加圧ができず発色ムラが生じた。そのため端部をトリミングし、表面気泡の判別に使用する画像サイズを 1000×1300（約 22×16cm）とした。トリミングした画像は JPEG 画像データである。解析の簡素化のため JPEG 画像（約 1678 万色）を 8bitBMP 画像（256 色）に変換した。トリミングした BMP 画像データを画像変換ソフトでコントラストを強調したのち、平野ら（2013）が MS Visual Basic Application（VBA）で作成したプログラムを用いてモノクロ化した。加圧部が赤く発色したシートはモノクロ化によって、表面気泡部が白色となる（図 3.4.6, 図 3.4.7）。

上述した手法において、8bitBMP ファイルでは白色が色番号 255 番、黒色が色番号 0 番と定義されている。表面気泡部は凹部となるため、圧力測定フィルムは赤く発色せず本来なら白色になるのであるが、サンプル採取時に気泡部でもわずかな圧力が作用することで発

色剤がつぶれわずかに赤くなり、表面気泡部が 255 番以外のピクセルになる部分が見られた。このような誤検出を防止するため、表面気泡を判定するしきい値を中央付近の色番号である 130 番とし、この値以上のピクセルを表面気泡と判定した。ただし、本実験において大半のピクセルが 0 番（黒色、表面気泡部以外）または 255 番（白色、表面気泡部）近傍にあり、130 番近傍のピクセルはあまり見られなかった。

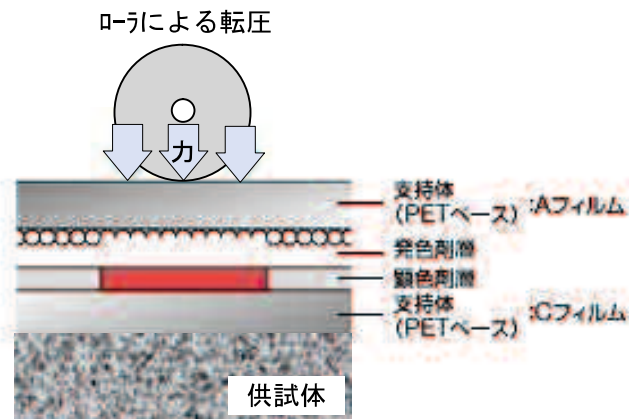


図 3. 4. 1 圧力測定フィルムの発色原理

(富士フィルム株式会社ホームページ, プレスケールの種類と発色原理, 2016 一部加筆)

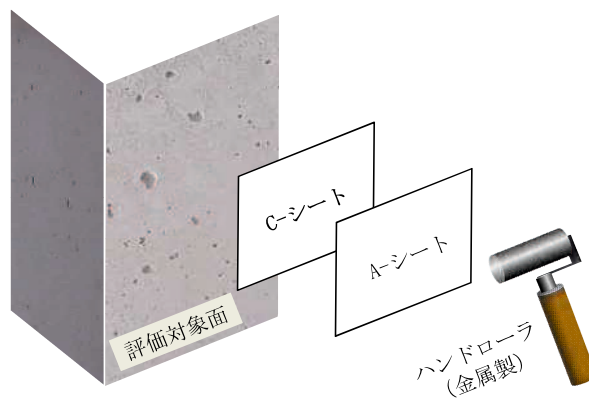


図 3. 4. 2 圧力測定フィルムを用いた表面気泡の採取方法



図 3. 4. 3 評価画像

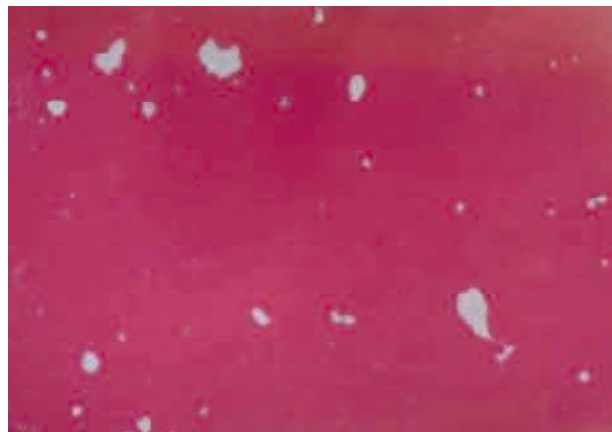


図 3. 4. 4 赤く発色した感圧紙

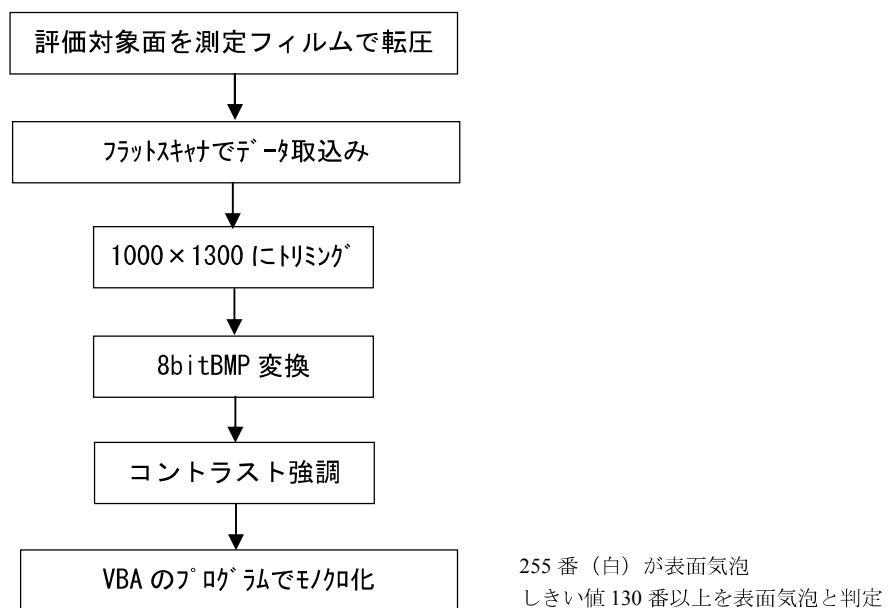


図 3. 4. 5 撮影画像を用いた表面気泡検出方法のフロー



図 3.4.6 モノクロ化した圧力測定フィルム



図 3.4.7 モノクロ化した撮影画像

(2) 撮影画像を用いた検出方法

透水シートを使用して作製した No.13, 14 の供試体は、評価対象面に透水シートの繊維の織目が転写され細かな凹凸が生じているため、圧力測定フィルムで表面気泡の検出を正確にできなかった。そのため No.13, 14 の供試体の表面気泡測定には撮影画像を用いた検出方法を採用した。撮影画像を用いた検出方法は、デジタルカメラで撮影した画像を処理して表面気泡を検出する方法である。

検出方法の順序を図 3.4.8 のフローに示す。デジタルカメラの解像度は 4000×3000 ピクセル、撮影は屋内で行い、評価対象面からカメラレンズまでの距離が約 30cm、レンズが評価対象面に直角になるように三脚で固定し、供試体の中央下部付近を撮影した (図 3.4.9)。照明は自然光と日常生活用の蛍光灯とした。撮影画像を 3500×2400 ピクセル (約 23×16cm) にトリミングし、圧力測定フィルムを用いた測定方法と同様に 8bitBMP 画像に変換した後、画像編集ソフトを用いてトリミングした画像のコントラストを強調した (図 3.4.10)。加工された画像をモノクロ化した (図 3.4.11)。モノクロ化した画像は、大半のピクセルが 0 番もしくは 255 番近傍にあるが、一部、中間値近傍のピクセルがみられた。表面気泡は黒く示されることから、白色を表す 255 番のピクセルは表面気泡と異なる。そこで本研究における撮影画像を用いた表面気泡の検出方法では、判定のしきい値を 254 番に設定し、これ以下のピクセルを表面気泡とした。

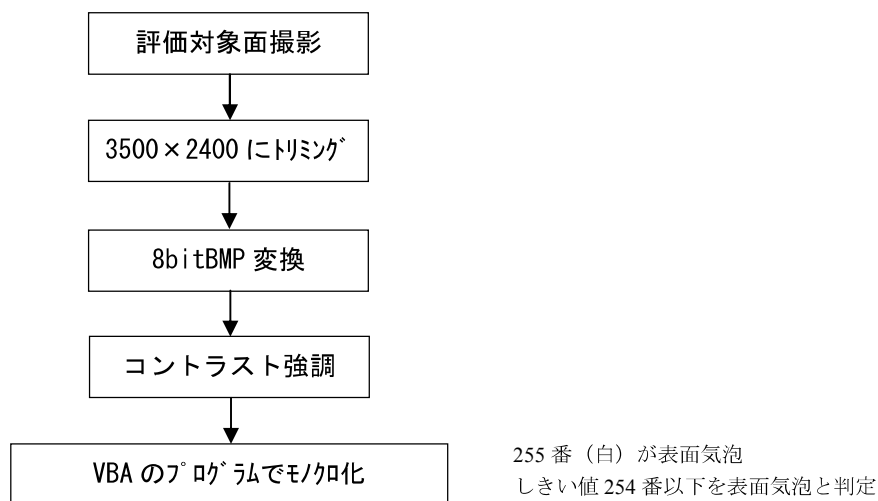


図 3.4.8 撮影画像を用いた表面気泡検出方法のフロー



写真 3.4.9 撮影画像 (JPEG データ)



写真 3.4.10 撮影画像 (BMP データ)

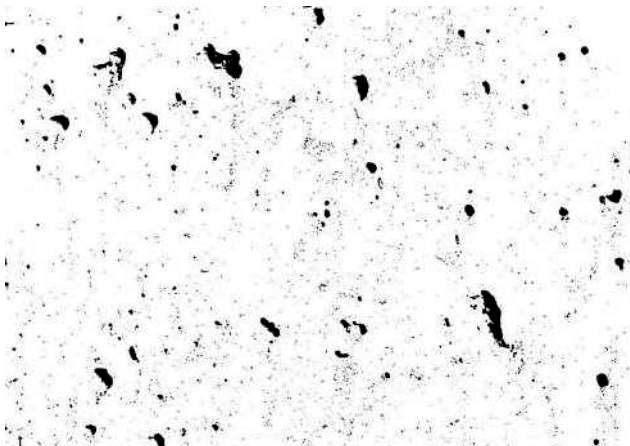


図 3.4.11 二値化データ

3.4.2 表面気泡の面積・個数および面積率の測定方法

表面気泡発生状況の定量的な把握を目的に、前述した方法によって検出された表面気泡の面積を評価対象面の面積で除した値を表面気泡面積率(%)とした。ここでは、表面気泡と判定されたピクセル数を評価対象範囲の全ピクセル数で除した。さらに表面気泡の大きさに着目し、面積が 1mm^2 以上となる表面気泡の個数を求めた。

前項の「3.4.1 表面気泡の検出方法」で、モノクロ化した8bitBMP画像をCSVファイルに変換した。これを市販の表計算ソフトウェアMS Excelで読み込み、画像データ中の数値化された色情報を各セルにピクセル単位で代入した。既知である評価対象範囲の面積から1セルあたりの面積を求め、各気泡を形成するセルの個数を数えることで気泡面積(mm^2)に換算した。

3.5 実験結果と考察

3.5.1 コンクリート仕上がり面の角度と表面気泡の発生量

供試体No.1~8の結果を用いてコンクリート仕上がり面の角度と表面気泡の関係をグラフにした。表面気泡面積率との関係を図3.5.1、表面気泡の大きさ別の発生個数との関係を図3.5.2に示す。

図3.5.1において、コンクリート仕上がり面の角度が大きくなるにつれ、表面気泡面積率が大きくなる傾向がある。表面角度が 15° から 30° に変化するところでの増加量が著しい。仕上がり面の角度と表面気泡面積率は比例関係になく、一定の角度を超過すると表面気泡量が急増することがわかる。仕上がり面の角度 $15^\circ\sim 30^\circ$ は、トンネルの断面形状によっても異なるが、一般的な2車線道路トンネルにおいて、トンネル断面下端から $0.5\sim 1.0\text{m}$ の範囲であり、トンネル覆工コンクリート側壁部で特に気泡が発生しやすい範囲といえ、覆工コンクリート側壁部で表面気泡が発生しやすいことを示しているといえよう。続いて型枠の表面処理(処理なしとセラミック溶射)を比較すると、表面角度が 15° までは、表面処理なしとセラミック溶射の表面気泡面積率に差はないが、表面気泡面積率が急激に上昇する表面角度 30° 以降は、表面処理なしに比べセラミック溶射のほうが、表面気泡面積率が $20\sim 30\%$ 程度小さい。

図3.5.2において、表面角度ごとの表面気泡面積の範囲は、 0° で $1\sim 50\text{mm}^2$ 、 15° で $1\sim 50\text{mm}^2$ 、 30° で $1\sim 100\text{mm}^2$ 、 45° で $1\sim 200\text{mm}^2$ となった。仕上がり面の角度が大きくなるほど、発生する表面気泡のサイズも大きくなることがいえる。型枠の表面処理の違いでは、表面角度が 0° と 15° では両者にほとんど差がないものの、 30° と 45° ではセラミック溶射処理に比べ、処理なしのほうが発生した気泡の径が大きい。次に表面角度ごとの気泡個数に着目すると、表面角度 0° と 15° では個数に差がほとんどなく、表面角度 30° で約4倍に個数が急増する。し

かし、表面角度 30°と 45°では個数に差がみられない。型枠の表面処理の違いによる差の傾向もみられない。

以上より、セトルに使用される素材を用いたトンネル覆工コンクリートを模擬した型枠において、仕上がり面に発生する表面気泡は、発生量（個数，面積），大きさともに仕上がり面の角度の影響を受けることが確認できた。本実験より，少なくとも表面角度 30°以上では，表面気泡の発生量が増加し，気泡径も大きくなることが分かった。この結果を基に，表面気泡発生機構の観察および発生特性把握と低減実験のための供試体仕上がり面の角度を 30°に設定した。また，表面角度が 30°以上では，表面処理の違いによって，表面気泡の個数に差はないものの，表面気泡面積率と気泡径は，処理なしに比べセラミック溶射処理の方が小さくなった。このことは，機構は明らかでないが，セトル表面をセラミック溶射処理した方が表面気泡を低減できる可能性があることを示しており，仕上がり面に接する型枠の性状によって表面気泡の発生量が増加することを示唆している。

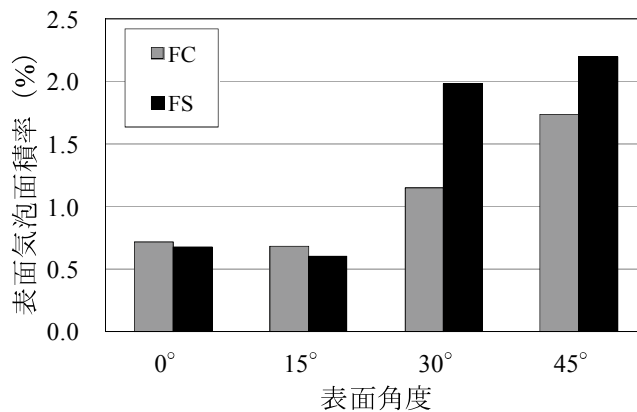


図 3.5.1 仕上がり面の角度と表面気泡面積率の関係

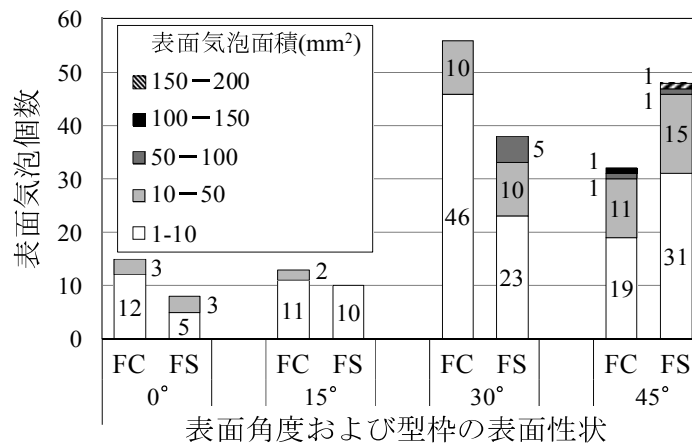


図 3.5.2 大きさ別の表面気泡の発生個数

3.5.2 振動締め固め過程における表面気泡発生機構の観察

コンクリート仕上がり面に発生する表面気泡の発生機構は明確ではなく、実施工においては振動締め固め不足が要因のひとつといわれている。表面気泡の根本的な低減には発生機構の観察が重要であると考えた。本実験では、振動締め固め過程における表面気泡の発生状況を把握するため、評価対象面の材質に透明なアクリル板（厚さ2cm）を用いて振動締め固め過程を可視化した型枠で供試体を作製した。60秒間の締め固めを1サイクルとし、仕上がり面に表面気泡がなくなるまでを目標に振動締め固めを行ったが、7サイクル（計420秒）振動締め固めを行っても表面気泡はなくならなかった。振動締め固め過程の評価対象面のデジタルカメラ撮影画像を図3.5.3に示す。

発生した表面気泡は振動締め固めによって上部に排出されるものの、仕上がり面に新しい気泡が断続的に出現することがわかった。そのため合計で420秒間の長時間の振動締め固めを行ったにもかかわらず、気泡を完全に除去することができなかったと考える。しかし、振動締め固め時間が長いほど仕上がり面に見える気泡が小さくなる傾向が観察された。締め固め時間ごとの最大気泡径を表3.5.1に示す。振動締め固め時間30秒が最大気泡径30mmと最も大きく、60秒後では16mm、180秒では6mmとなり、それ以降では最大径に変化はなかった。したがって、表面気泡は振動締め固めによって完全に除去することは困難であるが、気泡径を小さくする効果があることが確認でき、振動締め固めは気泡低減に完全ではないが一定の効果があることが示唆された。

加振中の気泡の挙動を観察すると、締め固め初期の段階において10mm程度の大きな気泡は数mm程度の小さな気泡が連結して形成されることが分かった。また大きな気泡ほど移動速度が速くなる傾向にあることが分かった。締め固め開始30秒後における気泡の連結過程を図3.5.4に示す。ここで、振動締め固め開始から60秒間に発生した気泡の大きさごとの上昇速度を表3.5.2に示す。表中の上昇速度は各径10個の平均値である。上昇速度は、気泡径が大きくなるほど速くなる傾向がみられた。気泡径5mm以下では6.0mm/sec、10~20mmで31.6mm/secと約5倍になっており、このことは気泡径が小さいほど加振中の移動が小さいことを示唆している。さらに観察続けると、表3.5.1において比較的大きな径の表面気泡がみられた振動締め固め開始から180秒間は、全体的に気泡の発生や移動が多く、180秒以降は型枠表面に発生した気泡の移動が緩やかになることが観察された。また振動締め固めを中断すると気泡の移動がなくなることが観察された。さらに図3.5.5に示すように長時間締め固めた後(400秒後)では、気泡径1mm以下の気泡は加振中も移動がほとんどないことが観察された。3枚の写真は5秒ごとの仕上がり面の状況であるが、例えば、丸で囲った範囲の小さな気泡は10秒間にほとんど動いていないことが分かる。

上述した締め固め過程における一連の現象は、長時間の振動締め固めでも表面気泡の最大径

を小さくできるものの、完全に気泡を除去することができなかった要因の一つと考える。



締固め開始 0 秒

30 秒経過

60 秒経過

180 秒経過



300 秒経過

420 秒経過

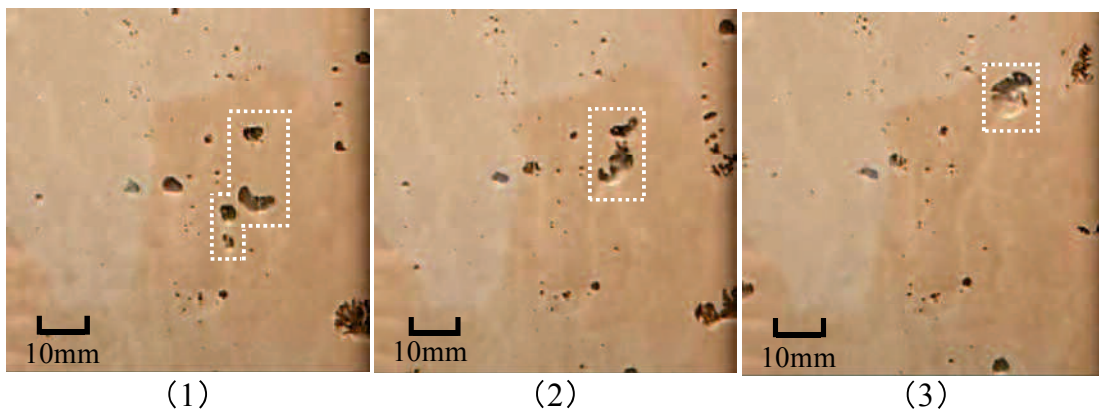
締固め完了

脱型時

図 3.5.3 振動締固め時間ごとの表面気泡発生状況

表 3.5.1 振動締固め過程における表面気泡の最大径

経過時間 (sec)	最大気泡径 (mm)
30	30
60	16
180	6
300	6
420	6



時間経過：(1)→(2)→(3)，振動締固め開始後 30 秒程度

図 3.5.4 気泡の結合過程

表 3.5.2 振動締固め開始後 60 秒間における表面気泡の平均上昇速度

(仕上がり面角度 30°)

気泡径	～5mm	5～10mm	10～20mm
平均速度 (mm/sec)	6.0	18.9	31.6

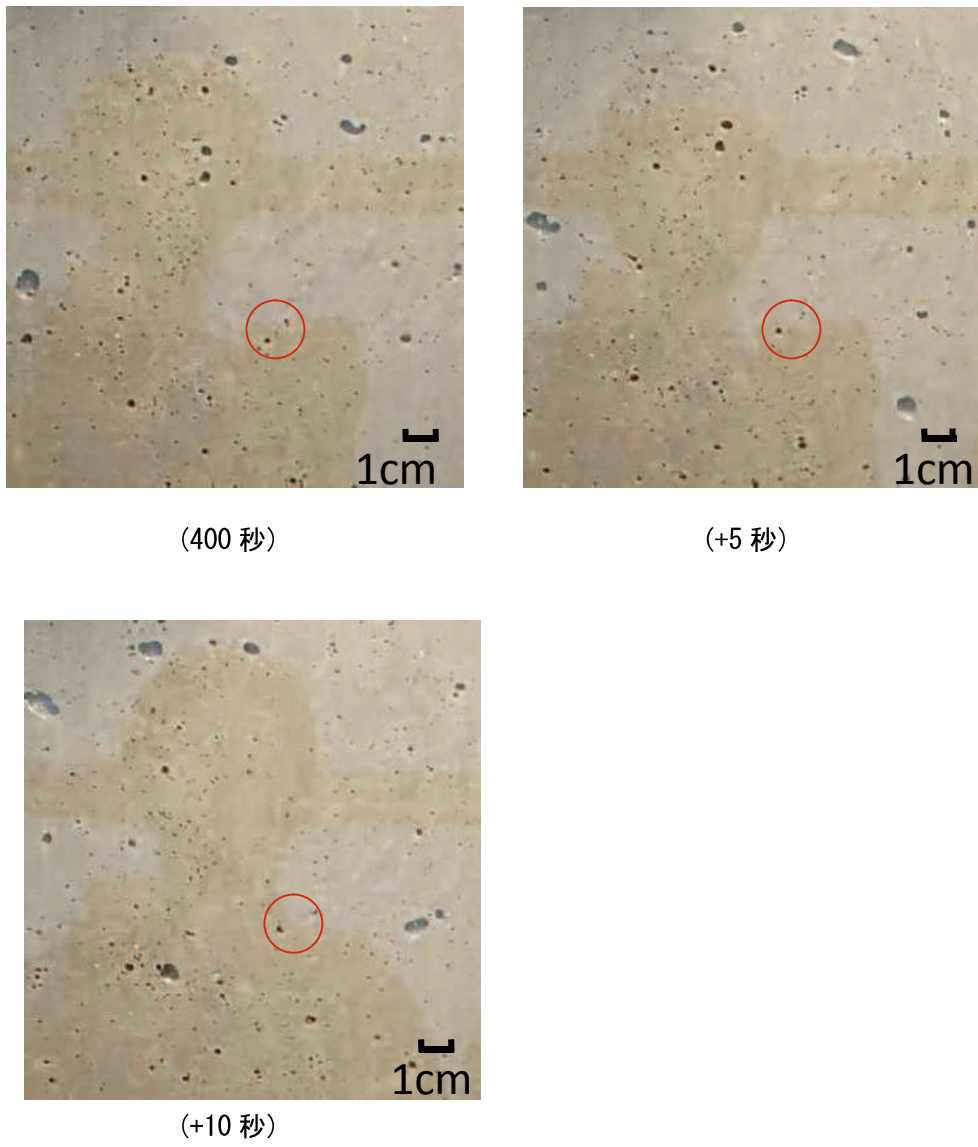


図 3.5.5 長時間締固め時（開始 400 秒後）の気泡移動状況

3.5.3 表面気泡発生特性把握と低減実験

ここでは「3.5.1 コンクリート仕上がり面の角度と表面気泡の発生量の関係」の結果から、仕上がり面の角度を30°に設定して、(1) 剥離剤の種類、(2) 振動締固め程度、(3) 型枠の性状を変化させた供試体を作製し、その表面気泡量を測定した。それぞれのパラメータと発生した表面気泡の関係を調査することで、表面気泡の発生特性を把握するとともに、気泡低減効果を調査した。各供試体の表面気泡面積率を図3.5.6に、気泡径別の気泡個数を図3.5.7に示す。

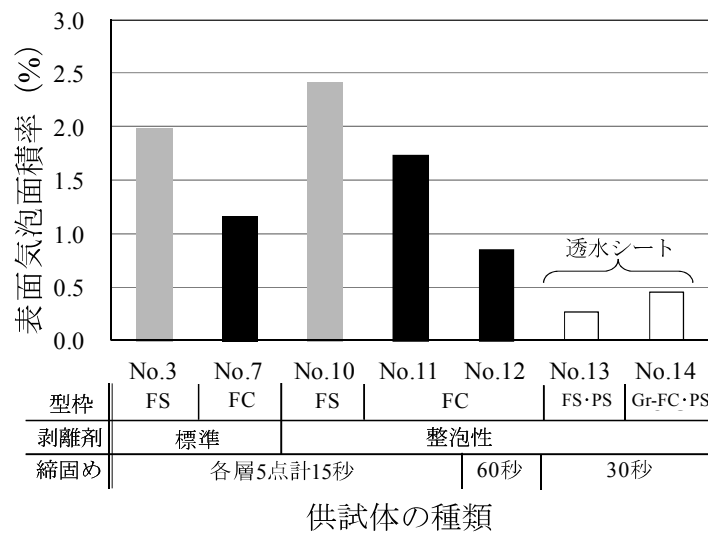


図 3.5.6 剥離剤と振動締固め時間をパラメータとした実験における表面気泡面積率

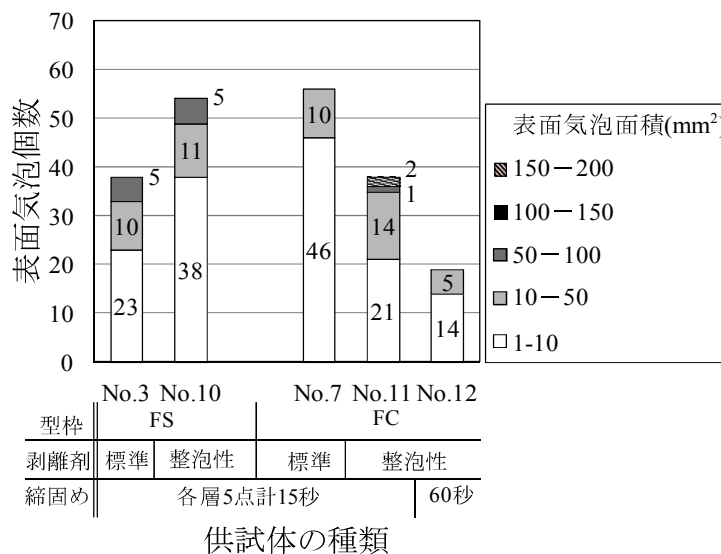


図 3.5.7 剥離剤と振動締固め時間をパラメータとした実験における表面気泡個数

(1) 剥離剤の種類

振動締固め条件を統一し、剥離剤の種類を標準タイプとシリコン系整泡性タイプの2種類を比較した。型枠の表面処理は処理なし(No.3とNo.10)とセラミック溶射(No.7とNo.11)の2種類、計4体を比較した。

図 3.5.6 において、型枠の種類によらず標準タイプの剥離剤に比べ整泡性タイプの剥離剤を使用した供試体の方が、表面気泡面積率が大きくなった。図 3.5.7 において、型枠の表面処理なしの供試体では剥離剤が標準タイプの方が整泡性タイプに比べ、気泡径によらず気泡数が少ない。型枠の表面をセラミック処理した供試体では、径 1~10mm² の気泡個数は整泡性タイプの方が標準タイプより少なく、気泡径が大きい気泡の個数は標準タイプの方が少なかった。発生した表面気泡数と大きさに、剥離剤の種類による有意な差異を確認できなかった。このことより、界面活性効果があるシリコン系整泡剥離剤は、覆工コンクリートを模擬した仕上がり面の角度 30°の型枠において、気泡面積 1mm² 以上の大きさの表面気泡に対して十分な低減効果が得られないことが分かった。

(2) 振動締固め時間

型枠の表面処理の条件が同じで、振動締固め時間が異なる No.7, No.11 と No.12 の表面気泡面積率と表面気泡径を比較する。図 3.5.6 において、振動締固め時間が長い供試体 No.12

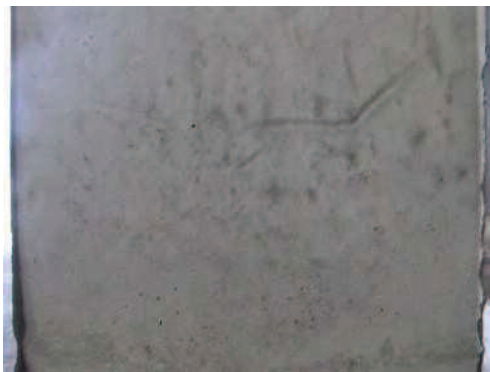
(2層打込み(層厚 30~40cm)、各層 1点、振動時間 60秒)の表面気泡面積率が 0.8%、振動締固め時間が短い供試体 No.7 (2層打込み、各層 5点 3秒、計 15秒)の表面気泡面積率が 1.2%、同じく No.11 が 1.7%となり、振動時間が長いほうが短いほうに比べ表面気泡面積率が小さい結果となった。図 3.5.7 における面積 1mm² 以上の気泡個数も、振動時間が長い No.12 が 19個となり、合計振動締固め時間が短い No.7 の 56個、No.11 の 38個に比べ少ない。このことは、一定時間以上の振動締固め時間は、表面気泡の径、数ともに低減する効果があることを示唆している。

(3) シート材による型枠面の被覆と型枠形状

シート材による型枠面の被覆をした実験では、図 3.5.6 によると、透水シートを使用した供試体の表面気泡面積率が No.13 で 0.3%、No.14 で 0.4%となり、他の供試体に比べ 1/2~1/10 と小さくなった。これは振動締固め時間が 1層 60秒と長い No.12 の 0.8%よりも小さい。仕上がり面が 30°傾斜したトンネル覆工コンクリートの側壁部を模擬した型枠においても、透水シートの表面気泡効果が認められた。仕上がり面からの空気および余剰水の積極的な排出をすることは、表面気泡の低減対策において有効な方法であると評価される。しかしながら、空気および余剰水の排出効果を期待した溝型枠と加工なしの型枠の差異はみられなかった。溝加工による空気および余剰水排出効果の向上が得られない、もしくは溝加工による空気および余剰水排出効果向上よりも透水シートの排出効果が大きいことが

考えられる。本実験ケースは、透水シートの使用によって表面気泡面積率が1/12~1/10になり、気泡低減効果が大きかったことから、透水シートの表面気泡低減効果が支配的で型枠形状の効果が十分に発揮できなかつたと考える。ただし図 3.5.8 に示すように、透水シートを使用した場合、仕上がり面に透水シートの織布の凹凸痕と色むらが目立ち、透水シートによる表面気泡低減効果は得られたもののコンクリート仕上がり面の見た目が向上しない一面もみられた。一宮ら (2005) によると、透水シートの使用に伴う仕上がり面への色むら発生は、透水シートの限界水圧よりも大きい側圧と振動による余剰水の強制排出が要因といわれている。今回使用した透水シートの耐水圧が 2.5kPa、評価対象範囲に作用するコンクリート側圧の計算値が 18.8kPa であることから、シート材の耐水圧を大きく上回るコンクリート側圧がコンクリート仕上がり面に作用したことが要因の一つと推察できる。なお、コンクリート側圧は、2007 年制定コンクリート標準示方書 (施工編) にあるコンクリートの側圧の計算式を用いて算出した。

型枠の表面処理に着目すると、図 3.5.6 において、表面処理なしとセラミック溶射処理 (No.3 と No.7, No.10 と No.11, 12) では、セラミック溶射処理 (FC) の方が処理なし (FS) に比べ表面気泡面積率が小さくなっていることが分かった。次に図 3.5.7 をみると、気泡はセラミック溶射処理による個数の減少はみられないものの、気泡径が小さくなっている。これらのことは、機構は明らかではないが、セラミック溶射処理した型枠の方が処理なしに比べ表面気泡を低減する可能性があることを示していると考ええる。透水シート材による型枠面の被覆および型枠の表面処理をパラメータとした実験の結果、仕上がり面の型枠の性状は、表面気泡の発生に何らかの影響を与えることを示唆していると考ええる。



No. 13 (FS・PS, 鋼板+透水シート)



No. 14 (Gr-FC・PS,
溝入セラミック溶射鋼板+透水シート)

図 3.5.8 透水シートを使用した供試体の表面性状

3.6 まとめ

本章では、トンネル覆工コンクリート側壁部を模擬した型枠を使用して室内供試体を作製することで、表面気泡発生特性を検討した。まず、可傾式の型枠によって仕上がり面の角度と表面気泡発生量の関係を調べた。続いて、評価対象面に透明なアクリル板を使用して仕上がり面を可視化した型枠を用いて、振動締固め過程における表面気泡の発生状況を観察した。さらに、表面気泡の発生に影響を与えるといわれている、剥離剤の種類、振動締固め時間、型枠の性状を実験パラメータとして、表面気泡発生量との関係を調査した。

本章の研究範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) コンクリート仕上がり面の角度は表面気泡発生量と大きさに影響を与える。角度が大きくなるにつれ、発生量も増え、大きさも大きくなるが、両者は比例関係にない。本実験では、仕上がり面の角度が少なくとも 30° 以上になると急激に表面気泡の発生量、大きさともに増加することが分かった。この角度は実際のセントルにおいて、下端から $0.5\sim 1\text{m}$ の範囲の角度であり、覆工コンクリート側壁部において、表面気泡が多く発生しやすいことを示唆している。
- (2) 一定時間の振動締固めは、表面気泡の発生量と大きさを低減する効果はあるが、完全な除去には限界があることが示唆された。
- (3) 気泡はコンクリート仕上がり面に連続して発生し、型枠界面を上方に移動すること、締固め初期段階において、 10mm 程度以上の大きな気泡は数 mm 程度の小さな気泡が連結して生じることが確認できた。振動締固め過程では、表面気泡は大きさが大きいほど加振中の移動量が大きくなる傾向にあり、直径 1mm 以下の気泡はほとんど動かないことが分かった。これら一連の現象が、振動締固めが表面気泡低減に一定の効果があるものの、限界があることの要因の一つであると考えられる。
- (4) 空気と余剰水の排出効果がある透水シートで型枠を被覆することは、表面気泡の低減に効果があることが分かった。ただし、シート背面の型枠に設けた空気、余剰水排出効果向上を期待した溝加工型枠は、透水シートの効果が支配的であったため、本実験では確認できなかった。
- (5) 型枠の表面処理では、処理なしの鋼板に比べセラミック溶射処理した鋼板の方が、機構は明らかではないが気泡低減効果がある可能性があることが示された。剥離剤の種類が表面気泡の発生に与える影響は確認できなかった。
- (6) トンネル覆工コンクリート側壁部を模擬した型枠において、型枠の性状が仕上がり面の表面気泡の発生になんらかの影響を与えることが示唆された。

第4章

締固め過程における 表面気泡発生機構の実験的調査

第4章 締固め過程における表面気泡発生機構の実験的調査

4.1 概説

前章の中で、振動締固め過程における表面気泡の発生状況、移動および挙動を観察することで、表面気泡の発生機構を検討した。一定時間の締固めは、表面気泡の発生量と大きさを低減する効果はみられるが限界があること、振動締固め過程では大きい気泡ほど加振中の移動量が大きく、直径1mm以下の気泡はほとんど動かないこと、気泡は内部から連続して発生すること、大きな気泡は小さな気泡が連結して発生することが確認できた。表面気泡の発生過程を観察し、発生機構を把握することは表面気泡を効率的に低減することに寄与すると考え、振動締固め過程の表面気泡発生状況を定量的に評価することとした（前田ら、2017）。従来の判定方法では限界があることから、振動締固め過程の表面気泡の発生量と大きさを定量的に測定するため、カラー撮影画像を用いて表面気泡を判定する新たな手法を考案した。

4.2 実験概要

本章では、振動締固め過程の表面気泡量を測定するにあたり、前章で評価対象面を可視化した型枠で振動締固め過程を観察・調査した際の撮影画像を使用した。連続した撮影画像の表面気泡発生量と大きさを定量化することで、経時的な表面気泡の発生状況を調べた。

4.2.1 実験装置

この実験で用いた型枠は前章と同じ型枠で、トンネル覆工コンクリート側壁部を模擬したものであり、寸法が幅300mm、高さ750mm、奥行き300mm、材質が厚さ幅6mmの鋼板、評価対象面が締固め過程が観察できる透明なアクリル板である（図3.2.1、図3.3.2）。

4.2.2 実験方法

供試体作製は、コンクリートを型枠上方から静かに投入し、棒状バイブレータ（径28mm、周波数220～280Hz）で締固めた。棒状バイブレータは、供試体中央1点、先端を型枠下端からおよそ10cmの位置に配置し、バイブレータを固定したまま60秒間×7回で計420秒間締固めた（図4.2.1、図4.2.2）。締固め中は、デジタルカメラ（3264×2448画素）で評価対象面を10秒間隔で撮影した。考案した気泡判定方法を用いて、この撮影画像の表面気泡の面積、大きさ、個数を測定した。評価対象面は、端部の欠けなど表面気泡以外の影響をなくするため下端から75mm上方の300mm×300mmとした。

コンクリートの配合は、前章で示したものと同様であり、一般的な覆工コンクリートの

配合を採用し、セメント量 270kg/m^3 以上、目標強度 21N/mm^2 (材齢 28 日)、目標スランプ 15cm 、目標空気量 4.5% とした。コンクリートの配合は表 3. 2. 1、使用材料の物性値は表 3. 2. 2 に記載しているものである。

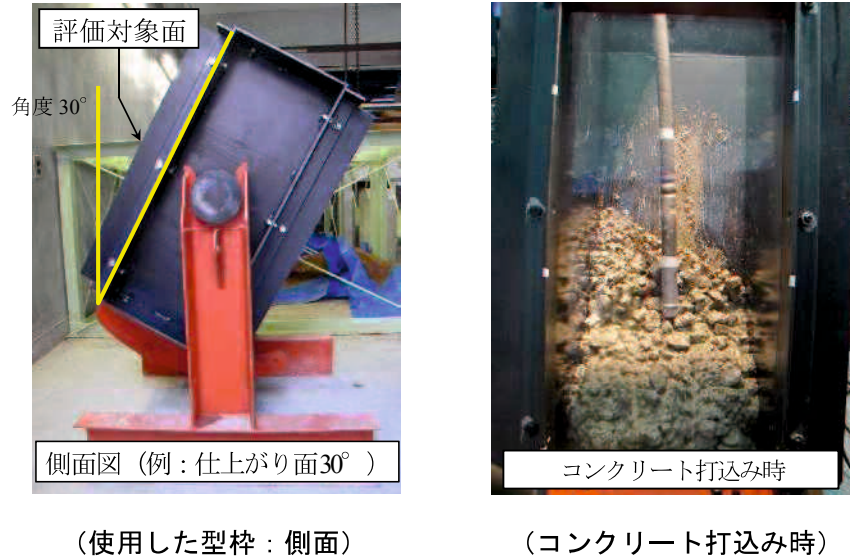


図 4.2.1 供試体作製状況

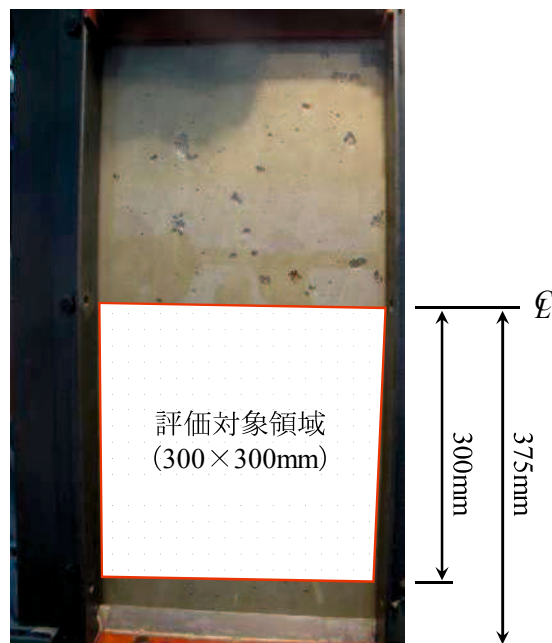


図 4.2.2 評価対象面

4.3 カラー撮影画像を用いた表面気泡の検出・評価方法

振動締固め過程の表面気泡を調査するためには、透明なアクリル板の型枠越しに表面気泡を定量的に測定しなければならない。しかし目視調査では、締固め過程の表面気泡の面積や大きさの定量的な測定が困難である。さらに測定者によって測定結果に差が生じることも考えられる。また、これまで表面気泡の検出に行われてきた圧力測定フィルムを用いた手法や撮影画像の二値化による画像解析の手法などでは、測定が困難であることや測定精度に限界がある。圧力測定フィルムは、評価対象面の凹部をフィルムへの加圧によって検出するため、アクリル板越しの表面気泡の検出ができない。撮影画像の二値化による判定は、表面気泡以外のコンクリートの表層の不具合、汚れや影など、表面気泡以外の状態を誤検出することがあり、アクリル板越しの表面気泡の判定ではアクリル板への反射による写り込みなどを誤検出が増えることによって、測定精度が低下することが予想される。そこで、振動締固め過程の表面気泡を従来の手法よりも精度よく定量的に測定することを目的に、カラーデジタル撮影画像を処理することによって表面気泡を自動判定・処理する手法とそのソフトウェア（以下、気泡判定ソフトと称す）を考案した。

4.3.1 気泡判定ソフト

本研究で考案した気泡判定ソフトは、デジタルカメラで撮影した評価対象面の画像データ（JPEG データ）を演算処理して、表面気泡を自動で判定し、面積、大きさ、数を自動算出するものである。判定には、JPEG データの RGB 値を用いる。RGB 値とは、色の形式のひとつで、赤（Red）、緑（Green）、青（Blue）の組合せで表現するもので、各色 0~255 まであり、その加法混合で色を表現するものである（図 4.3.1）。例えば、（赤、緑、青）=（0, 0, 0）が黒、（255, 255, 255）が白、（255, 255, 0）が黄である。

判定フローを図 4.3.2 に示す。撮影画像の評価対象面内にある典型的な表面気泡を選定し、その選定した表面気泡範囲内の画素ごとの R 値、G 値、B 値それぞれの平均値を算出して、表面気泡の基準値とした。表面気泡の判定は 1 画素ごとに行い、R 値、G 値、B 値の全てが基準色の値を下回った場合、その画素を表面気泡と判定した。また、デジタル撮影画像には「画素落ち」といわれる不具合が発生することがあるため、その対策を講じた。「画素落ち」とは撮影画像装置の機能上の不具合の一種で、何らかの要因によって画素が正常に表示されないことをいう。この画素落ちに対する対策として、表面気泡と判定された画素間の距離に応じて画素同士を結合し、一つの表面気泡と判定した。本研究では画素間の距離が 1 画素分であれば、一つの気泡と判定し、これらの画素を結合した。

RGB 値を使用することで、従来の二値化による二極化に比べ基準値を詳細に設定することができ、気泡の判定も二極化ではなく詳細に行うことができるようになった。これにより、撮影条件などによって異なる表面気泡の色や濃淡、汚れ、陰影、表面気泡以外の表層

不具合に対応し、従来の二値化処理に比べ誤検出を低減することができるようになった。

4.3.2 気泡判定ソフトを用いた表面気泡判定方法

撮影した評価対象面はデジタルカメラで撮影、解像度は 3264×2448 画素である。撮影は室内で行い、特別な照明は用いず自然光のみとした。撮影した評価対象面とデジタルカメラのレンズまでの距離は約 500mm、デジタルカメラは三脚で固定した。評価対象面の横に鋼尺を配置して撮影し、評価対象範囲の大きさを設定する基準とした (図 4.3.3)。

デジタルカメラでカラー撮影した画像データ (JPEG データ) を気泡判定ソフトに取り込む。評価対象範囲以外をマスキング処理で取り除く。その際、評価対象面横に設置した鋼尺を基準に評価対象範囲の大きさを設定する。これにより 1 画素あたりの大きさが設定され、表面気泡の面積を算出する。

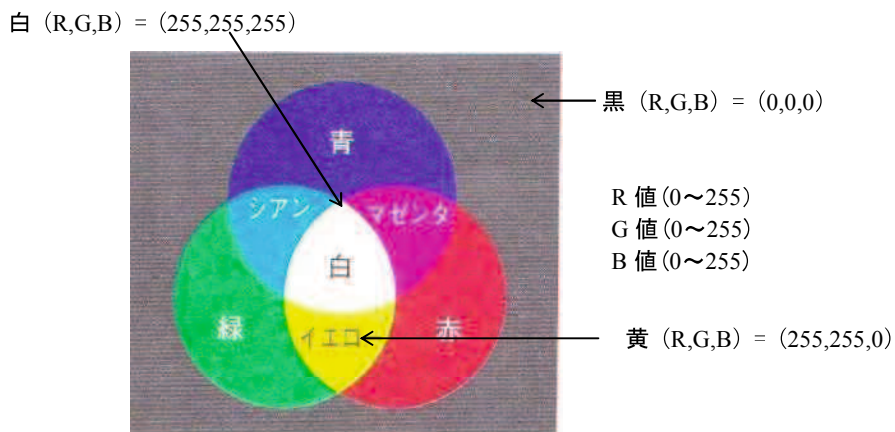


図 4.3.1 加法混合の例
(画像情報処理振興協会：ビジュアル情報処理-CG・画像処理入門-)

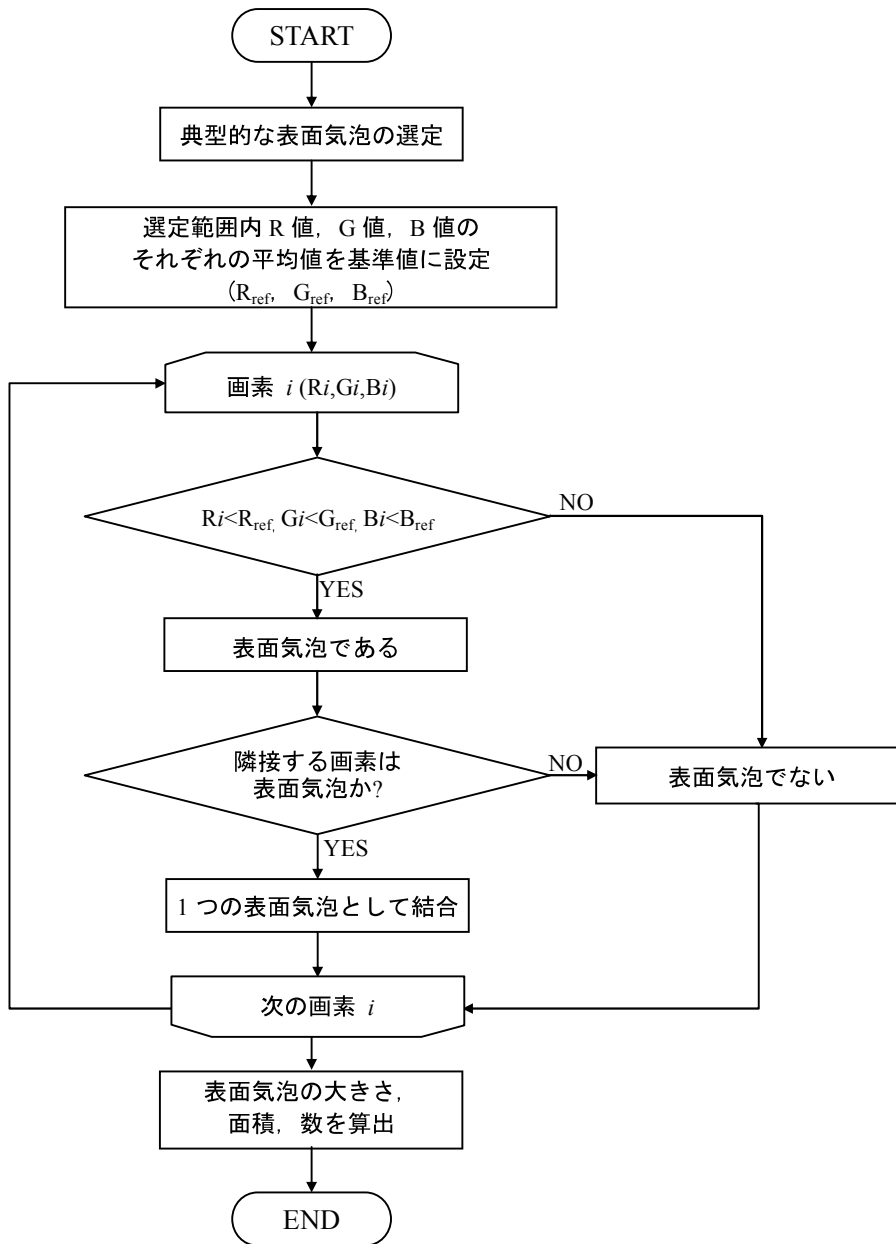


図 4.3.2 気泡判定フロー

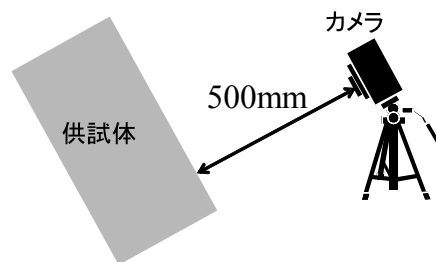


図 4.3.3 評価対象面の撮影イメージ

4.3.3 気泡検出精度

本章では、表面気泡の発生状況をアクリル板越しに撮影した。アクリル板は反射や陰影など、評価対象面に多数の色が混在するため、誤判定が多くなることが想定された。振動締固め過程における表面気泡の発生量を定量的に評価するに先立ち、開発した表面気泡測定方法と従来の測定方法での気泡検出結果を比較することで、開発した気泡判定ソフトの気泡検出精度を確認した。

本章における検出精度の確認は、振動締固め過程のアクリル越しの気泡撮影画像、すなわちフレッシュコンクリートの撮影画像で行った。硬化したコンクリートの撮影画像における気泡検出精度の確認は、第5章で行うのでそちらを参照されたい。

圧力測定フィルムによる測定方法ではアクリル板越しに撮影した表面気泡を測定できないため、比較は撮影画像の二値化による測定方法とで行った。開発した気泡判定ソフトによる測定（カラー解析）と二値化処理による測定方法（モノクロ解析）によって判定された画像およびそれぞれの解析で検出した表面気泡の数と面積を比較した。

気泡判定の基準値はカラー解析では代表的な表面気泡を選定して、選定した気泡内の画素のRGB値の平均値をしきい値とした。モノクロ解析では、5mm以上の気泡検出精度を基準にグレースケール値（0~255）のしきい値を100に設定した。締固め開始30秒後と180秒後の撮影画像で確認した（図4.3.4）。

図4.3.4において、黒い部分が表面気泡である。締固め開始から30秒では5~20mm程度の大きな気泡が多くみられ、180秒後では大きな気泡がなくなり、残った気泡は径5mm程度以下である。大きな気泡がみられる30秒後の画像のカラー解析とモノクロ解析の結果を比較する。図4.3.4の中で、矩形箇所を拡大した解析結果を図4.3.5に示す。矩形内の気泡は約20mmである。カラー解析の画像から矩形内の表面気泡は、同一気泡内で色の濃淡が確認できる。カラー解析では、その色の濃淡の影響なく大きな気泡は大きな気泡として判定しており、大きな気泡周辺の小さな気泡も別の表面気泡として判定している。一方、モノクロ解析では色の濃淡によって、大きな気泡を1つの気泡ではなく複数の気泡として判定している。RGB値を直接用いて表面気泡を検出するカラー解析では、大きな気泡に生じやすい同一気泡内の色や影の濃淡の差異を詳細に検出できることが分かった。しかし、モノクロ解析では同一気泡内の色や影の濃淡による差異を正しく検出できていない。カラー解析画像（RGB値）を二極化（白黒）して判定するため、しきい値の詳細な設定できないことから判定精度がカラー解析に比べ低くなったことが要因の一つと考えられる。また図4.3.4において、締固め開始から180秒後の画像では発生した表面気泡が約5mm以下であり、両解析での表面気泡検出結果に差異はほとんどみられない。しかし、モノクロ解析では画像下端部のアクリル板への写り込みが解析結果では黒くなっていることから、表面気

泡と誤判定している。

続いて、両解析結果の大きさ別の表面気泡数と気泡径 1mm 以上の表面気泡面積率を図 4.3.6 と図 4.3.7 に示す。図 4.3.6 では、1mm 以上の表面気泡の個数は、締固め開始 30 秒後ではカラー解析とモノクロ解析に結果に大きな差異がない。180 秒後の結果では、気泡径 1~5mm には差がないが、それ以上の気泡径で差が生じている。カラー解析では気泡径 5~10mm が 1 個、10mm~が 0 個、モノクロ解析では気泡径 5~10mm が 0 個、10mm~が 4 個と、モノクロ解析のほうが大きな気泡を多く検出した結果となった。180 秒後の元画像には 10mm 以上の気泡が確認できないことから、モノクロ解析の 10mm 以上 4 個は表面気泡を誤判定しているといえる。図 4.3.7 では、締固め開始 30 秒後、180 秒後ともに表面気泡面積率は、カラー解析よりモノクロ解析のほうが大きくなった。締固め開始 30 秒後ではカラー解析が 1.860%、モノクロ解析が 2.725%で約 1.5 倍、180 秒後では カラー解析が 0.522%、モノクロ解析が 2.633%で約 5 倍の差が生じている。これは 5mm 以上の大きな気泡の判定誤差により生じていると思われる。

以上より、振動締固め過程におけるアクリル板越しの表面気泡の判定では、カラー解析を用いることで、従来のモノクロ解析に比べ気泡の誤検出が低減することがいえた。これによりカラー解析はモノクロ解析より判定精度が向上するものと判断する。また、自動解析を採用することで、表面気泡の判定を判定者の経験や主観による判定精度のバラツキを少なくできると考える。

本研究で開発した気泡判定ソフトの径 1mm 以上の気泡の検出精度が従来の二値化による画像解析による検出精度より良いことを確認した。次節では、この気泡判定ソフトを用いて測定した振動締固め過程における表面気泡の発生量について定量的に評価し、報告する。

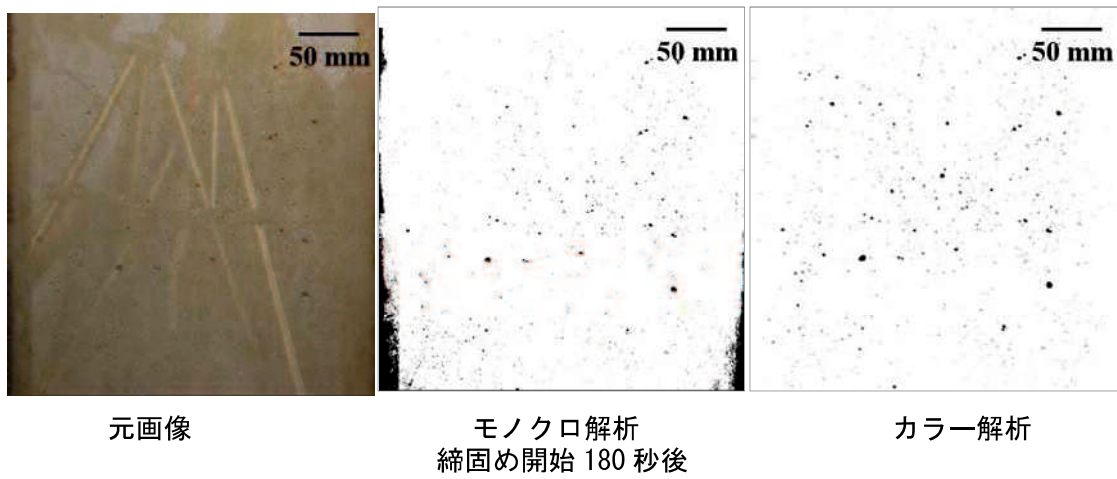
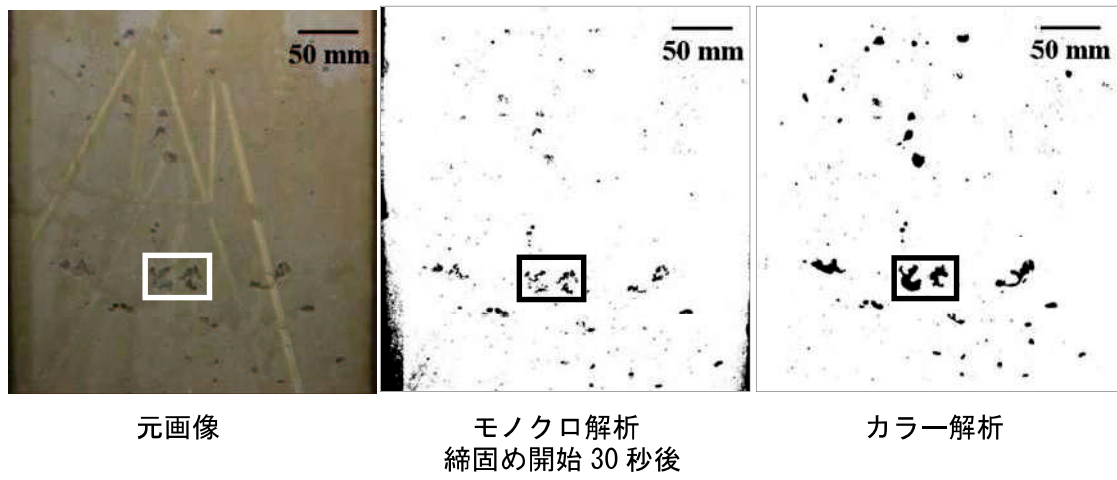


図 4.3.4 解析画像の比較

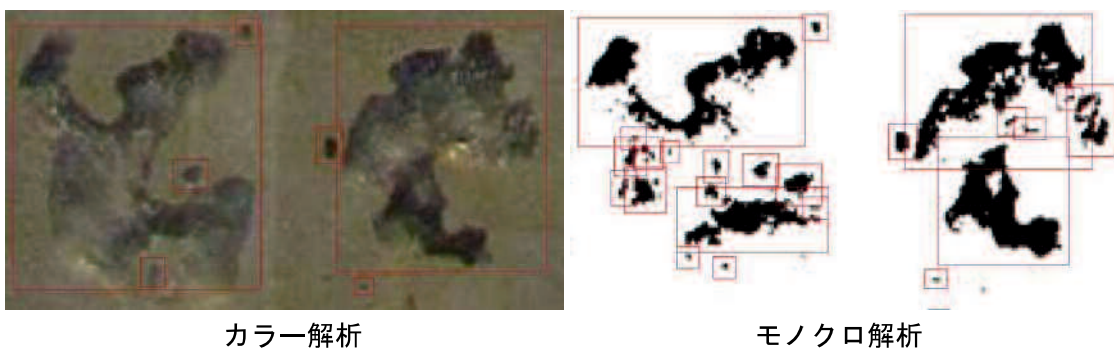


図 4.3.5 矩形内の解析結果の比較

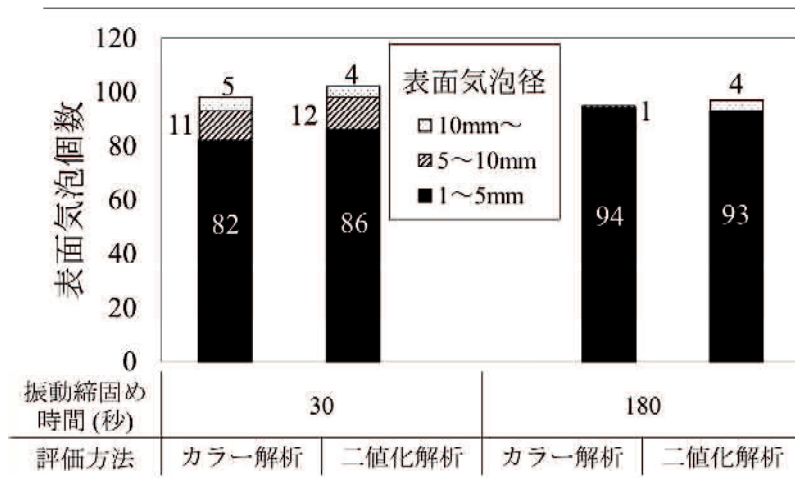


図 4.3.6 振動締固め時間と大きさ別表面気泡個数

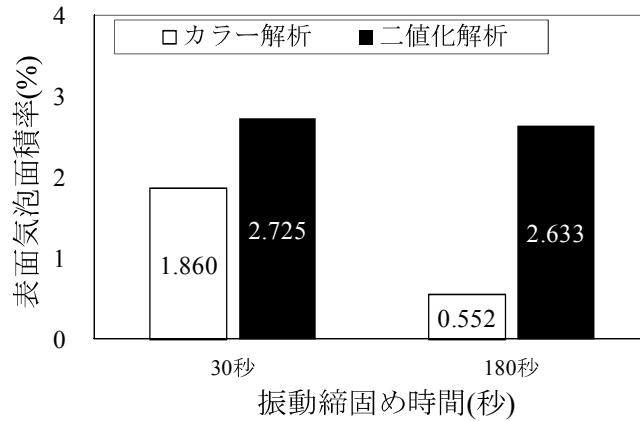


図 4.3.7 振動締固め時間と表面気泡面積率

4.4 締固め過程における表面気泡の発生機構

振動締固め過程の表面気泡の測定に使用した撮影画像を図 4.4.1 に示す。また、振動締固め時間と表面気泡総数の関係を図 4.4.2, 振動締固め時間と大きさ別の表面気泡数および最大気泡径の関係を図 4.4.3, 振動締固め時間と大きさ別の表面気泡面積率の関係を図 4.4.4 に示す。ここでの気泡径は気泡判定ソフトで算出された面積を円換算した値とした。

図 4.4.1 において、使用した撮影画像にはアクリル板の反射や影が写り込んでいるが、本研究で開発した気泡判定ソフトを使用することで、これらの誤検出はないと考える。目視では、表面気泡は振動締固め時間が長くなると小さくなるものの、完全に消えていないことが確認できる。図 4.4.2 の振動締固め過程における表面気泡総数の経時変化に着目すると、振動締固め時間が長くなるにつれ、気泡総数が増加していることがわかる。締固め開始から 120 秒までは表面気泡総数が増加傾向にあり、一旦収束するものの 180 秒以降は再び増加傾向になっている。図 4.4.3 の振動締固め過程の気泡径 1mm 以上の大きさ別の表面気泡数に着目すると、径 1mm 以上の気泡数は表面気泡総数と同様の傾向がみられる。しかし気泡の大きさ別にみると、増加しているのは径 1~5mm の気泡であることが分かった。径 1~5mm の気泡数は締固め開始から 60 秒まで増加し、60~180 秒間でやや減少、その後増加に転じている。この傾向は、気泡総数の傾向と若干異なるがほぼ同じである。一方で 10mm 以上の気泡は、振動締固め開始から 30 秒では 5 個、60 秒では 4 個となり、それ以降の検出がない。径 5~10mm の気泡は、30 秒で 11 個、60 秒では 3 個と減少し、180 秒後では 1 個となり、その後 1~2 個の横ばいである。最大気泡径をみると、振動締固め開始後 30 秒で 16.8mm、60 秒で 14.0mm と若干小さくなり、120 秒後で 7.3mm と急激に小さくなる。それ以降は 5~7mm 程度を推移している。以上より、振動締固め時間が長くなるにつれ、気泡数の変化は一旦なくなるものの再び増加に転じていることが確認できた。そして振動締固め過程において、振動締固め開始当初は 5mm 以上の気泡が多く、特に締固め初期段階、本研究では締固め開始から 60 秒までの間は径 10mm 以上の大きな気泡が多いことが分かった。さらに、振動締固め時間が長くなると気泡径 10mm 以上の大きなものはなくなり、5mm 以下の小さな気泡が増加することが分かった。本研究では少なくとも 120 秒以降にこの傾向がみられた。なお、振動締固め過程において、評価対象面のアクリル板面にセメントペーストによる汚れはなく、セメントペーストの汚れによって気泡が隠れていないことを確認している。

図 4.4.4 によると、表面気泡面積率は、振動締固め開始 30 秒後が最大値で 1.86%、180 秒後が 0.54%で約 30%になり減少傾向にある。その後増加に転じ 420 秒後には 180 秒後の 2 倍以上の 1.21%まで増加している。次に気泡の大きさ別にみると、5mm 以上の表面気泡面積率は振動締固めの過程で徐々に減少しているのに対して、1~5mm の気泡面積率はほとんど変化がなく、1mm 以下気泡面積率は時間の経過とともに上昇していることが分かった。

特に締固め開始 30 秒後では、径 10mm 以上の表面気泡面積率が 0.94%と全体の 50%以上を占めているのに対して、径 0~1mm の表面気泡面積率は 0.07%で全体の 3.5%と小さい。締固め 420 秒後では、10mm 以上の表面気泡はなく、径 5~10mm の表面気泡面積率が 0.02%で全体の 1.6%、径 1~5mm が 0.55%で全体の 45%、径 0~1mm が 0.64%で全体の約半分以上を占める。表面気泡面積率はある締固め時間までは減少するものの、再び増加することが分かった。本研究では少なくとも 120 秒以降である。また、締固め開始後は径の大きい気泡の影響を受け、その後、径の小さい気泡の影響を受けることが窺える。

以上より、前章の研究結果である、トンネル覆工側壁部を模擬し、仕上がり面を 30°傾斜した型枠において、仕上がり面に発生する気泡は内部から断続的に発生し、気泡径が大きいほど加振中の移動量が大きく、径 1mm 以下の気泡は移動量がほとんどなく、さらに大きな気泡は小さな気泡が連結してできることを定量的に評価することができた。

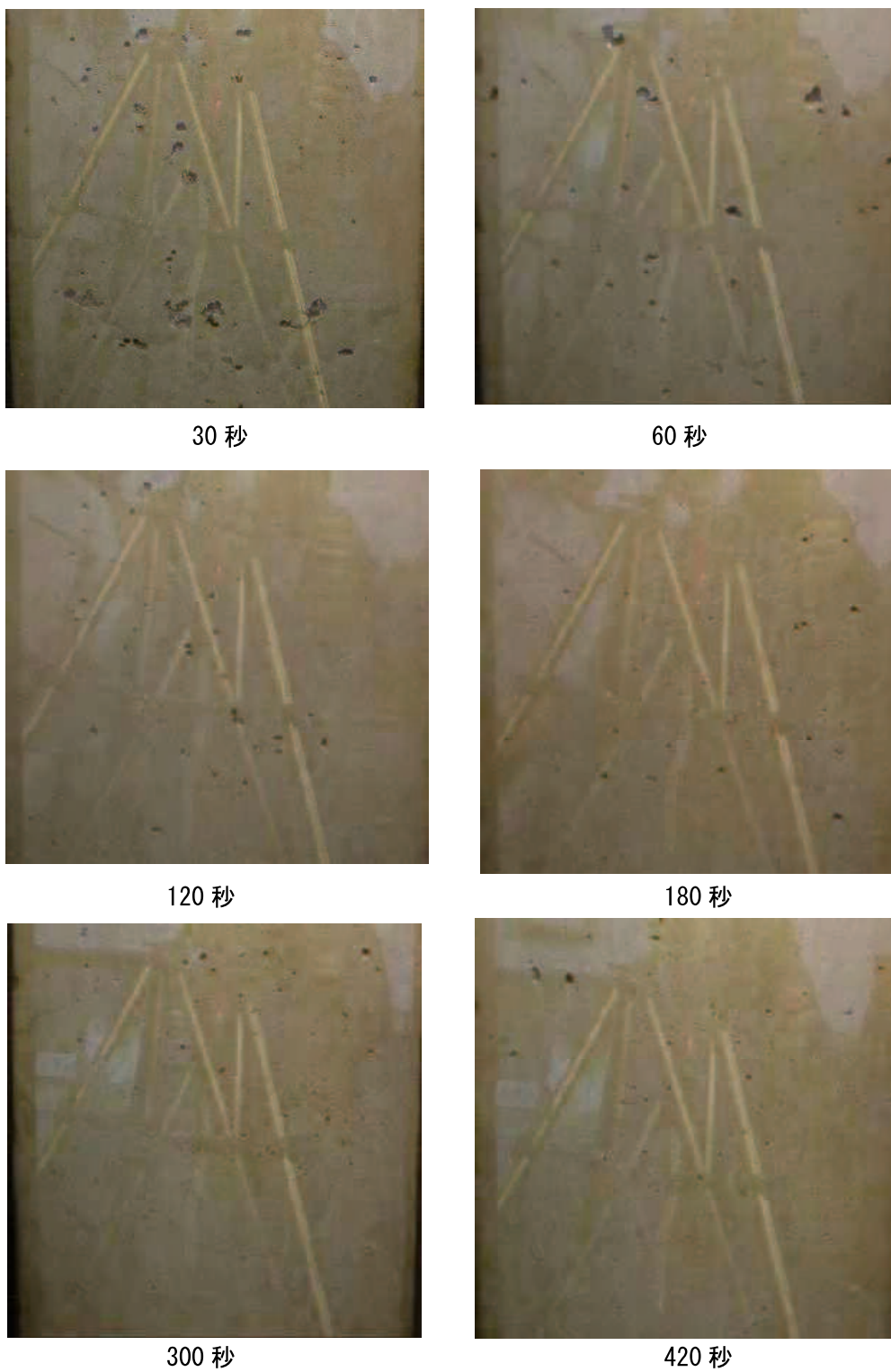


図 4. 4. 1 表面気泡の経時変化

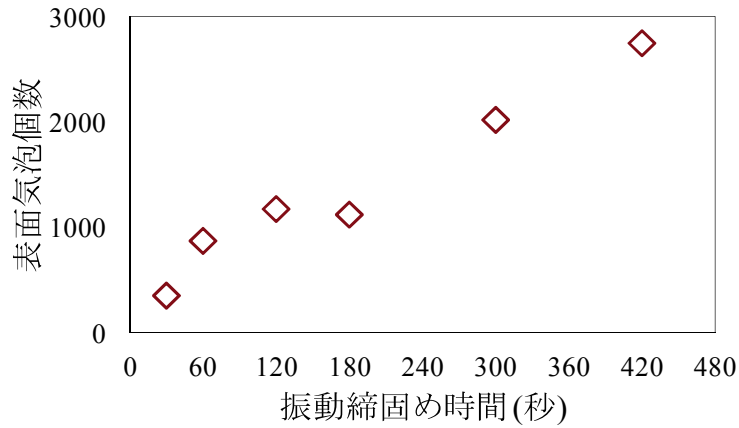


図 4. 4. 2 振動締固め時間と表面気泡個数

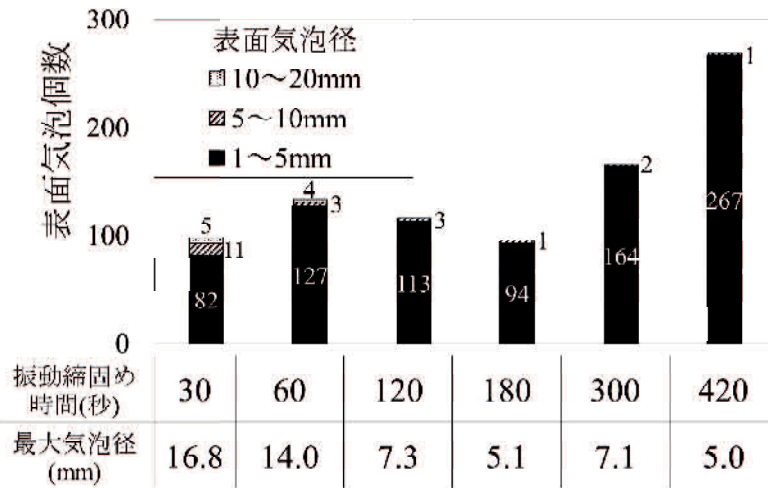


図 4. 4. 3 振動締固め時間と大きさ別の表面気泡個数

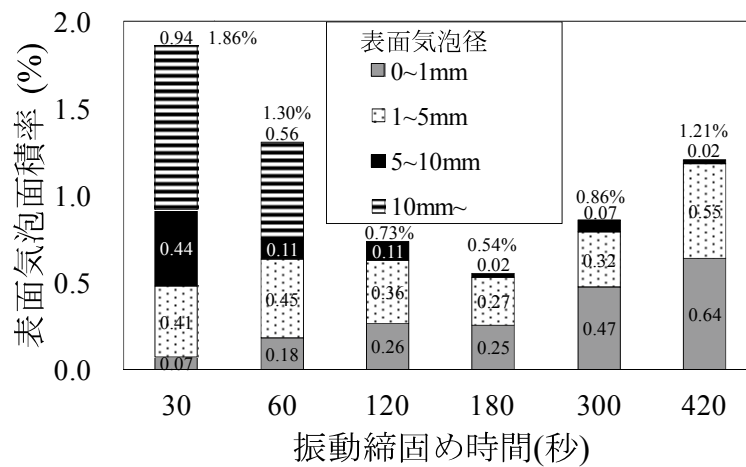


図 4. 4. 4 振動締固め時間と大きさ別の表面気泡面積率

4.5 まとめ

本章では、トンネル覆工側壁部を模擬し評価対象面を透明アクリル板で可視化した型枠を用いて、振動締固め過程における表面気泡の発生量を、本研究で考案したデジタルカラー画像解析で経時的に測定することで、定量的に評価した。型枠の傾斜角度は 30° である。振動締固め過程は、振動締固め時間 60 秒を 7 回、計 420 秒間を調べた。

本章の研究範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 本研究で開発したデジタルカラー画像解析による気泡判定ソフトは、アクリル板越しの締固め過程の表面気泡の検出において、従来の撮影画像の二値化による表面気泡の検出に比べ、表面気泡内部の色の濃淡や表面気泡以外の表面不具合の誤検出を低減できた。
- (2) 振動締固め時間は気泡低減に一定の効果があるものの、気泡を完全に除去できないことが示唆された。これは、振動締固め時間が長くなるにつれ径が大きい気泡は減少するものの、径が小さい気泡は増加することが要因であることが分かった。本研究ないでは、振動時間が長くなると、少なくとも径 5mm 以上の気泡が減少し、径 5mm 以下の気泡が増加している。
- (3) 振動締固め過程における表面気泡の総数は、振動締固め時間が長くなるにしたがい一旦収束傾向になるものの、増加することが分かった。収束傾向がみられるのは 120~180 秒の間であった。これは、径が 10mm 以上の気泡が 60 秒後になくなり、5~10mm 以上の気泡が減少するものの、径 1~5mm の気泡が増加するためであった。また振動締固め開始 60 秒までの気泡最大径は、30 秒後が 16.8mm、60 秒後が 14.0mm、60 秒以降は 5~7mm であった。
- (4) 表面気泡面積率は、振動締固め時間が長くなるにつれ、一旦は当初の約 30%程度の 0.54%まで減少するものの 180 秒以降は増加に転じた。420 秒後には 180 秒後の 2 倍以上の 1.21%まで増加した。
- (5) 表面気泡面積率は、振動締固め初期は大きな気泡の影響が大きく、締固め時間が長くなるにしたがい小さな気泡の影響が大きくなることが分かった。振動締固め開始後 30 秒では 10mm 以上の気泡が全体の約 50%を占め、420 秒後では 10mm 以上の気泡がなくなり、1~5mm が全体の 45%、1mm 以下が 50%以上であった。

前章および本章の研究結果より、小さな気泡は締固め中の動きが遅く、気泡は仕上がり面に断続的に出現することから、覆工コンクリート側壁部では、セントル上方から気泡を排出するには限界があると考えられる。表面気泡を効率的に除去するためには振動締固めに加え、5mm 以下の気泡、特に 1mm 以下の気泡の除去が重要となる。美観性向上の観点からは、小さいが見た目にも気泡があると認識できる径が 1~2mm の気泡の除去が有効と考える。ま

た仕上がり面に断続的に気泡が出現することは、コンクリート打込み時の巻き込み空気およびエントラップトエアが要因と考えられることから、表面気泡の効率的な低減には、打込み時の巻き込み空気の適切な排出も有用と考える。

第5章

コンクリート表面気泡の 低減に関する実験的検討

第5章 コンクリート表面気泡の低減に関する実験的検討

5.1 概説

近年ではコンクリート構造物は耐久性に加え美観性も注目され、これらの向上を目的に表面気泡を低減する方法が開発されている。例えば、平田ら（2014）の熱可塑樹脂シートを型枠表面に用いて表面気泡を低減する方法、依田ら（2015）の超撥水機構を有する型枠を用いて表面気泡を低減する方法がある。これらの方法は、気泡を型枠面に沿って上方に排出する方法である。前章までに表面気泡の発生機構と特性を調査した研究の結果、振動締固めには気泡低減効果があるものの限界があること、表面気泡は振動時間が長くなると大きな気泡が少なくなるが小さな気泡が多くなること、その気泡は締固め過程において仕上がり面に断続的に発生すること、小さな気泡は振動締固めを行っても移動速度が遅いことが分かっている。したがってトンネル覆工コンクリート側壁部のように、狭隘な空間でかつ仕上がり面が負の勾配に傾斜している箇所へコンクリートを打込む場合、打ち上がり速度が速く、気泡の移動が制限されることから、気泡を型枠上方に排出するには限界があることが推察される。このことは、仕上がり面が負の勾配に傾斜していることに加え、覆工コンクリート側壁部に気泡が発生しやすい要因の一つと考える。一方、前章の実験結果から、型枠の性状は表面気泡の発生量に影響を与えることが示唆され、さらに仕上がり面からの空気および余剰水の積極的な排出をすることは、透過性の大きいシートでは色むらが発生するものの、表面気泡の低減対策において有効な方法であることが示唆されている。

そこで表面気泡の低減を目的に、コンクリート仕上り面の気泡を型枠上方からではなく仕上り面から排出することを試み、排出の程度を変化させることで表面気泡の低減特性を実験的に調査した。仕上り面からの気泡排出はコンクリート仕上り面に物質透過性を付与することで行い、コンクリート仕上り面への透過性の付与は、透過性があるシート材で型枠を被覆することで行った。はじめに、透過性が異なる材質のシート材を用いて供試体を作製して表面気泡の発生量を測定し、透過性が表面気泡の低減に与える影響を調査した。その他に型枠に気泡や余剰水排出効果向上を期待した加工を施し、その効果を検証した。続いて、気泡と余剰水の透過に影響を与える透気抵抗度と対水圧を変化させたシート材で供試体を作製し、発生した表面気泡量と透気抵抗度および対水圧の関係を調査し、表面気泡の低減特性を定量的に評価した[Harada ら(2015), Maeda ら(2016)]。なお評価にあたり、美観性に影響を与えることから色むらをなくすことも考慮した。

5.2 実験概要

5.2.1 実験装置

本実験で使用した型枠はこれまでと同様のもので、トンネル覆工コンクリート側壁部を模擬した型枠である。仕上がり面を負の勾配に傾斜させ、傾斜角度は前章の実験結果から表面気泡の発生量が急激に増加した 30° とした。

5.2.2 実験方法

本実験では2パターンの実験を行った。パターンの1つは、型枠に物質透過性を与えるために被覆するシート材の種類と評価対象面の型枠の材質と形状をパラメータとしたパターン、もう1つが被覆するシート材の透気抵抗度と耐水圧をパラメータとしたパターンである。コンクリートの配合は、一般的な覆工コンクリートの配合を採用し、セメント量 270kg/m^3 以上、目標強度 21N/mm^2 （材齢28日）、目標スランプ15cm、目標空気量4.5%とした。具体的な配合は表3.2.1の配合B、使用材料の物性値は表3.2.2、練混ぜ方法は前章に示したとおりである。コンクリートの打込みは2層（高さ約40cm）と4層（高さ約20cm）、振動締固めは棒状バイブレータ（径28mm、周波数220~280Hz）を用いて中央1点に振動総時間60秒間とした。脱型は打込み完了から18~20時間後で、その後は室内気中養生とした。

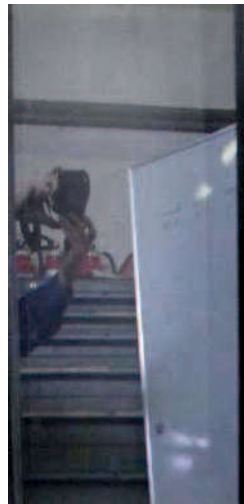
5.2.3 実験のパラメータ

(1) 型枠の材質・形状および被覆するシート材の種類

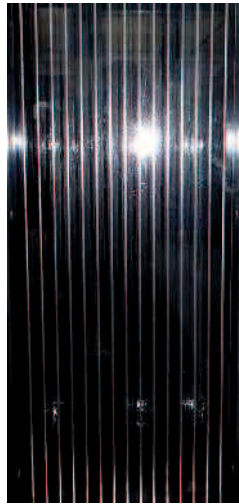
本実験では、型枠を被覆するシート材の種類および評価対象面の型枠材質と形状を変更し、表面気泡発生量を測定することで、表面気泡の低減特性を調査した。型枠の写真を図5.2.1に示す。型枠は材質と加工が異なる5種類があり、加工は気泡や余剰水の排出効果向上を目的としている。材質がアクリル板で表面が平滑と溝入りの2種類、材質が鋼板で表面処理がなく平滑なタイプとスリット入り、表面がセラミック溶射で溝入りの3種類である。そのうち、鋼板セラミック溶射溝入りの型枠は、1枚の型枠の中で2パターンの溝の間隔を設けた。アクリル板の溝形状、セラミック溶射鋼板の溝形状、鋼板のスリット形状を図5.2.2、図5.2.3、図5.2.4に示す。アクリル板の溝は三角形で幅と深さが2mm、間隔が20mm、セラミック溶射鋼板の溝は正方形で幅と深さが2mm、間隔が15mmと30mmの2パターンである。鋼板のスリットは、幅0.4mm、長さ60mm、水平方向の間隔が50mmの千鳥配置、垂直方向の間隔が20mmである。

本章で使用したシート材は、前章で使用した気泡と余剰水排出効果がある透水シート1種類と新たに湿気を透過するが液体の透過を制限する透湿防水シート3種類、計4種類である。図5.2.5に透水シートと透湿防水シートのイメージを、シート材の写真を図5.2.6

に示す。透水シートは、透水層の織布と排出層の不織布からなる二層構造のシート、透湿防水シート A が透湿層のポリテトラフルオロエチレン (PTFE) 多孔質膜と支持材の二層構造のシート、透湿防水シート B が透湿層のポリエチレン系のシートと支持材の不織布からなる二層構造のシート、透湿防水シート C が多孔質な超高分子ポリエチレン製の 1 層構造シートである。そのうち、本実験パターンでは、透水シートと透湿防水シート 2 種類の計 3 種類のシートを使用した。そして、型枠性状とシート材の種類を組み合わせる実験パターンとした (表 5.2.1)。透気抵抗度は、JIS L 1096 8.26.1 (フラジール形法) および JIS L 1096 8.26 B (ガーレ形法) 法で求めるガーレ通気 (単位: sec/100cc)、耐水圧は JIS L 1092 耐水圧試験 A 法 (低水圧法) の値を用いている。剥離剤は標準的に使用されている油性タイプを使用した。



アクリル/処理なし/加工なし*)



アクリル/処理なし/溝加工



鋼板/処理なし/スリット加工



鋼板/処理なし/加工なし



鋼板/セラミック溶射/溝加工

*) 左側から
材質/表面処理の有無
/加工の有無

図 5.2.1 使用した型枠

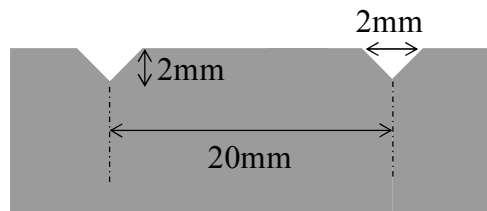


図 5. 2. 2 アクリル板の溝形状



図 5. 2. 3 鋼板セラミック溶射の溝形状

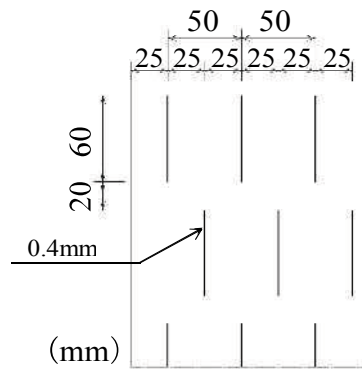


図 5. 2. 4 鋼板スリット加工の形状

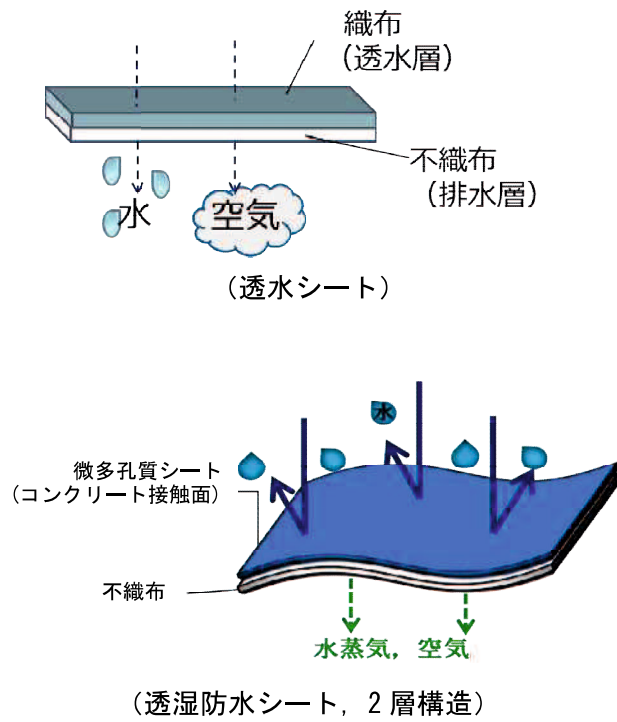


図 5. 2. 5 透水シートおよび透湿防水シートのイメージ

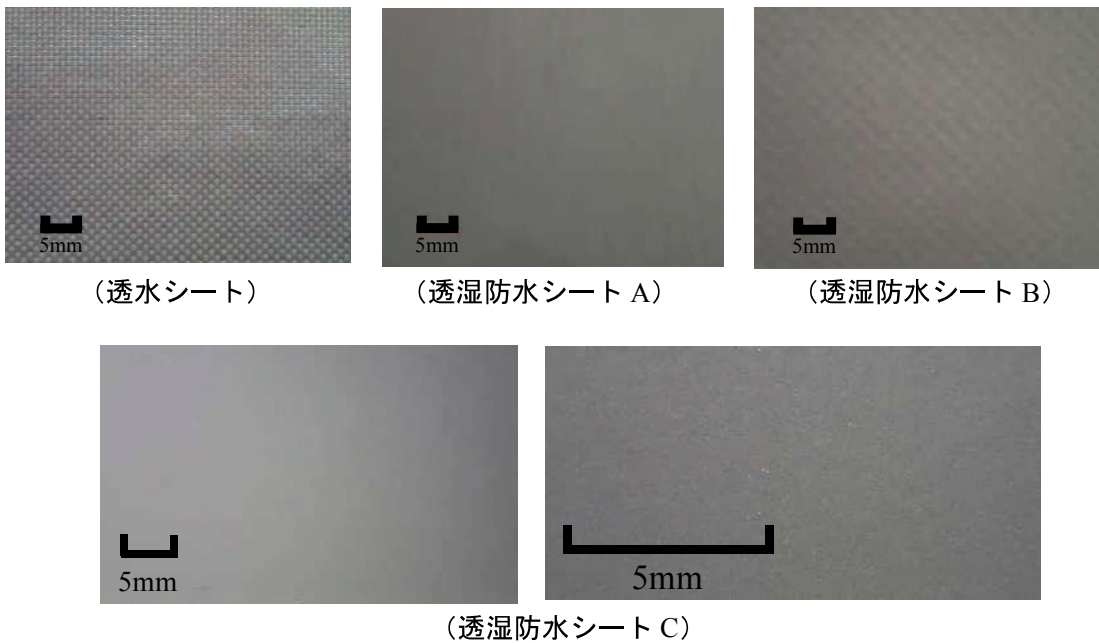


図 5. 2. 6 使用したシート

表 5.2.1 型枠の材質・形状および被覆するシート材の種類の実験ケース^{*}

No.	シート材 ^{**} (透気抵抗度/耐水圧) (記号)	型枠性状 材質/表面処理/加工 (記号)	打込み層 /振動締固め条件
1	なし (N)	アクリル/なし/溝 (Gr-A)	4層(高さ約20cm) /中央1点各層15秒 計60秒
2	透湿防水シートA (4sec/100cc/30kPa) (BS-A)		
3	透湿防水シートB (309sec/100cc/200kPa) (BS-B)	アクリル/なし/なし (Fl-A)	
4		アクリル/なし/溝加工 (Gr-A)	
5		鋼板/なし/スリット (Sl-M)	
6	透水シート (1.7sec/100cc/2.5kPa) (PS)	鋼板/なし/なし (Fl-M)	2層(高さ約40cm) /中央1点各層30秒 計60秒
7		鋼板/セラミック溶射/ 溝 (Gr-C)	

^{*})配合B

^{**})透湿防水シートCは耐水圧と透気抵抗度が異なる実験で使用

(2) 透気抵抗度と耐水圧が異なるシート材

評価対象面の型枠を被覆するシート材の物性値を変化させた供試体を作製し、表面気泡発生量を測定した。評価対象面に接する型枠の余剰水や気泡の透過性が表面気泡の発生に及ぼす影響を調査することを目的に、前述の供試体作製時に使用した透湿防水シート A の透湿層の透気抵抗度と耐水圧を変化させたものと透気抵抗度と耐水圧が異なる透湿防水シート C を使用した。表面気泡低減効果確認の比較対象として、シートがないケースと色むらは発生するものの気泡低減効果がみられる透水シートを使用した供試体を作製し、表面気泡発生量を測定した。型枠の材質に、アクリル板とセラミック溶射した鋼板の 2 種類を使用した。これまでの実験結果からシートを被覆した場合、型枠の材質によるコンクリート仕上がり面への影響がないことから、アクリル板とセラミック溶射した鋼板の使用による結果への影響はないと考える。型枠の形状は、シート材を使用したケースでは、気泡排出効果を確認するため溝加工してある型枠を使用し、シート材を使用しないケースでは、表面加工のない平滑な形状とした。実験パラメータを表 5.2.2 に示す。

表 5.2.2 シート材の透気抵抗度と耐水圧を変化した実験パラメータ

No.	シート材 (記号)	型枠種類 材質／表面処理／加工 (記号)	耐水圧 (kPa)	透気抵抗度 (sec/100cc)	剥離剤
8	透水シート (PS)	鋼板／セラミック溶射／溝 (Gr-C)	2.5	1.7	油性
9**)	透湿防水シート A (BS-A)	アクリル／なし／溝 (Gr-A)	200.0	10.0	
10					なし
11					油性
12			100.0	12.0	
13			30.0	4.0	
14			7.0	0.6	
15			透湿防水シート C (BS-C)	鋼板／なし／なし (FI-M)	10
16	なし				
17	なし	鋼板／なし／なし (FI-M)	—	—	油性

*) 配合 B, 打込み 4 層 (高さ約 20cm)

**) No.9 の透湿防水シート A は、透湿層のみ支持材なし

5.3 硬化したコンクリートでのカラー画像解析の検出精度

本実験では、表面気泡量の測定に本研究で開発した気泡判定ソフトを使用した。前章では、アクリル板越しのフレッシュコンクリートにおける表面気泡の検出精度を確認したが、ここでは硬化したコンクリートにおける気泡検出精度を従来の測定方法と比較することで気泡検出精度を確認する。表面気泡の測定は、既設のコンクリート壁表面を対象に評価領域(230×180mm)を定め、3箇所(Sample 1~3)で実施した(図5.3.1)。表面気泡の測定を、(1)気泡判定システムを用いた方法、従来法である(2)圧力測定フィルムによる方法、(3)撮影画像の二値化による方法、(4)詳細目視点検の4種類の方法で実施し、直径1mm以上の表面気泡の個数を気泡径別に求めた。各測定方法を詳述する。

5.3.1 測定方法

(1) 気泡判定システムによる測定方法

撮影には解像度が1600×1200画素(以下、低解像度カメラとする)と5184×3456画素(以下、高解像度カメラとする)の2種類のデジタルカメラを用いた。撮影は屋外で実施し、照明等を用いず自然光のみとした。評価対象面からデジタルカメラの中心までの距離を低解像度カメラが750mm、高解像度カメラが950mmとなるように三脚で固定し、評価領域の横に5mmごとに目盛がある標尺を設置して撮影した(図5.3.2)。撮影画像を気泡判定システムで読み込み、測定領域以外をマスキング処理し自動解析した。撮影画像中の標尺の目盛りから尺度を取得することで、1画素あたりの面積を求め、表面気泡と判定された画素の集合体の面積(mm²)を算出した。そして取得した気泡面積(mm²)を円換算で気泡径(mm)に換算し、円換算直径1mm以上の表面気泡個数を気泡径別に求めた。

(2) 圧力測定フィルムの二値化による測定方法

前章に記した検出方法にしたがい、評価領域を含む評価対象面に顕色剤が塗布されたシート、発色剤のマイクロカプセルが塗布されたシートの順に粘着テープで貼り付け、その上からハンドローラで圧力測定フィルムを加圧し、表面気泡の形状を採取した。加圧により表面気泡以外の部分が赤く発色したフィルムを、フラットスキャナでパソコンに取り込み、二値化処理し、表面気泡の判定を行った。スキャナ画像(3200×2400画素、270×200mm)のうち、評価領域部分をトリミング(2700×2200画素、230×180mm)して、気泡検出を行った。圧力測定フィルムの面積から1セルあたりの面積を求め、気泡と判定されたセルの個数をカウントすることで気泡面積(mm²)に換算した。

(3) 撮影画像の二値化による測定方法

前述の(1)において高解像度カメラで撮影画像を二値化処理し、表面気泡を抽出した。評価領域をトリミング(約1100×900画素)し、画像編集ソフトを用いてコントラスト比を

強調したうえで8bit BMPファイルに変換し、二値化を行った。圧力測定フィルムと同様の手順で円換算直径1mm以上の表面気泡個数を、気泡径別に求めた。

(4) 詳細目視点検

各測定方法の精度比較のため、基準となる真値が必要となる。本実験ではコンクリート診断士の資格を有する経験年数10年以上の土木技術者が行った。詳細な目視点検調査結果を「真値」とし、この値に近い測定方法ほど測定精度が高いものとして評価した。

クラックスケールで表面気泡径を測定しながら、径が1mm以上の表面気泡の個数を1評価領域(230×180 mm)あたり10分程度で測定した。



撮影の様子



撮影画像, 5184×3456画素

図5.3.1 評価対象面の撮影



Sample1



Sample3



Sample2

図5.3.2 検出精度の比較に使用したサンプル

5.3.2 測定精度比較の結果

各測定方法で得られた表面気泡個数の真値(詳細目視点検)との差異を気泡径別に図5.3.3に示す。図5.3.3において、値が0に近いほど目視点検で得られた結果と差異が小さく、精度が高いものと評価した。

図5.3.3における直径5mm以上の表面気泡の測定結果からは、各測定方法の精度に有意な差異はみられなかった。しかしながら、直径1~5mmの小さな表面気泡の測定結果に着目すると、圧力測定フィルム法や撮影画像の二値化による従来法と比較して、気泡判定システムを用いた測定結果の方が真値との差異が小さいことが分かる。気泡判定システムと詳細目視点検との差は5~10%程度である。また測定結果の差異は、圧力測定フィルム法では真値より少なく、二値化した撮影画像では真値より多くなる傾向がみられた。圧力測定フィルム法は、凹部であっても大きさが2mm以下の場合、フィルムが加圧され発色することが目視観察された。すなわち径が小さい表面気泡は誤認識されやすいため、圧力測定フィルム法では表面気泡を真値より少なく評価したのと考えられる。一方、撮影画像を二値化する場合、撮影した画像と二値化した画像を比べると、コンクリート表面の色むらや表面気泡以外の欠陥を小さな気泡として誤抽出する傾向がみられた。そのため表面気泡を真値より多く判定したのと思われる。

以上より、1~5mmの表面気泡を測定する場合、二値化処理を用いた従来法よりも気泡判定システムを用いた測定方法の方が、熟練者による詳細な目視調査に近い判定が可能であり、精度が良いことが分かった。さらにこの気泡判定システムは、定量評価ができるとともに、熟練者の詳細目視調査より簡便かつ短時間で表面気泡を検出でき、汎用性・利便性に優れるのと考えられる。

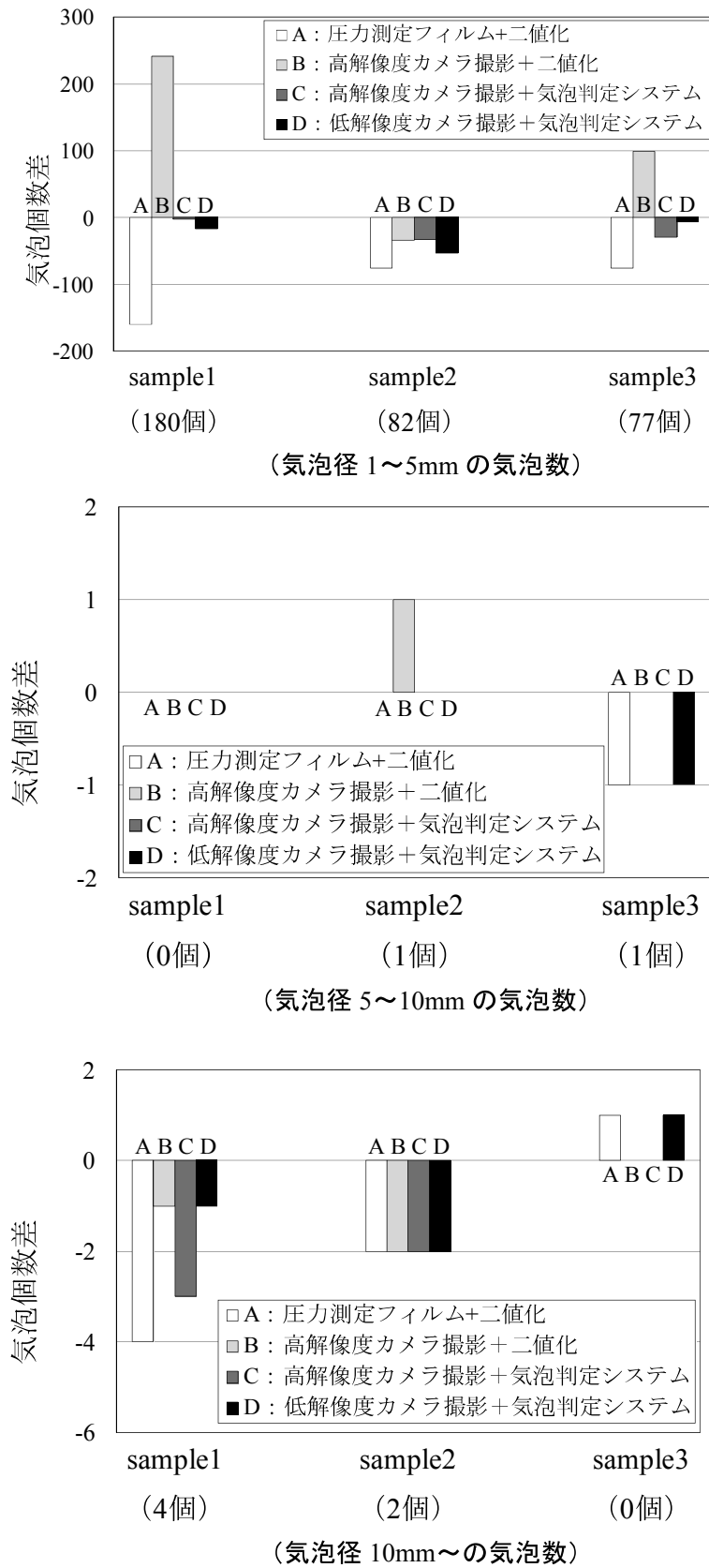


図 5.3.3 気泡径別の表面気泡個数差

5.4 実験結果と考察

5.4.1 型枠の材質・形状および被覆するシート材の種類

図 5.4.1 に作製したコンクリート供試体の評価対象範囲の状況を示す。この評価対象面領域の 1mm 以上の表面気泡を気泡判定ソフトで検出，測定した。供試体 No.1, 2, 4, 7 にみられる縦方向の筋は，型枠の溝加工跡，供試体 No.5 の色むらはスリットの跡である。供試体別の表面気泡面積率および気泡径別の表面気泡個数を図 5.4.2, 図 5.4.3 に示す。

図 5.4.2 より，シート材なしの鋼板で作製した供試体 No.1 が 0.983% と最も大きく，シート材なしの供試体 No.1 に比べ，透湿防水シート A, B や透水シートを使用した供試体のほうが，表面気泡面積率が小さいことが分かる。特に透水シートの表面気泡面積率は供試体 No.6 が 0.048%，No.7 が 0.064% と，シート材の被覆がない供試体 No.1 に比べ 1/20 程度まで低減している。また，透湿防水シートの中でも透気抵抗度および耐水圧が小さい方の透湿防水シート A を使用したケースでは，表面気泡面積率が 0.197% と供試体 No.1 に比べ 1/5 程度に低減されている。このことは，仕上がり面の型枠に余剰水や気泡の物質透過性を付与することで，仕上がり面に発生する表面気泡発生量は低減すること，さらにその低減効果には物質透過部分の透気抵抗度と耐水圧が影響し，透気抵抗度と耐水圧が小さい方が，表面気泡低減効果が高いことが示唆された。しかしながら，物質透過性を付与するためのシート材に透水シートを使用したケースでは，仕上がり面に色むらが発生した。これは前章でも述べたように，供試体作製時，型枠に作用するコンクリート側圧は，土木学会コンクリート標準示方書【施工編】(2012)によると 18.8kPa 程度で，それに対して透水シートの耐水圧が 2.5kPa である。既往の研究において一宮ら (2005) によると，仕上り面への色むらの発生は透水シートの限界水圧より大きい側圧と振動による余剰水の強制排出が要因と報告している。今回の供試体においても，コンクリートの側圧は透水シートの対水圧に対して大きく上回っていることから，このことが色むら発生要因の一つと考える。

続いてスリット入鋼板型枠を透湿防水シートで被覆した供試体 No.5 の表面気泡面積率が 0.703% と大きい。図 5.4.1 の評価対象面をみると，供試体 No.5 はスリット箇所の色むらが発生している。出頭ら (1988) はスリット型枠によって，仕上がり面にスリット跡は残るものの気泡低減効果があることを報告しているが，本研究ではスリット入り型枠による気泡低減効果を充分得ることができなかった。本実験では，型枠の被覆に透湿防水シート B を使用したため既往の研究に比べ物質透過性が低かったこと，スリットの幅や大きさ，配置が既往の研究より小さかったことが要因の一つと推測する。次に型枠の溝加工に着目して供試体 No.3 と 4 および No.6 と 7 の表面気泡面積率を比較する。シート材に透湿防水シート B を使用した No.3 と No.4 においては，溝加工を施した型枠を使用した No.4 の方が，表面気泡面積率が 60% 程度に小さくなり，溝加工による気泡低減効果が示唆された。しか

し、シート材に透水シートを使用した No.6 と No.7 においては両者の差が小さく、溝加工がない型枠の方が小さい値となった。これは溝加工の効果より透水シートの効果の方が支配的であったことが要因と考える。

図 5.4.3 をみると、表面気泡個数はシート材被覆のない供試体 No.1 とスリット付型枠の No.5 が多く、次いで透湿防水シート B の供試体 No.3, 4 が多い。一方で、透水シートを用いた供試体 No.6, 7 が最も少なく供試体 No.1 の 1/10 以下、透湿防水シート A を使用した供試体 No.2 も 88 個と少なく、供試体 No.1 の 1/3 程度である。さらに表面気泡径が 5~10mm の比較的大きな気泡は、透気抵抗度と耐水圧が小さい透湿防水シートおよび透水シートを使用した供試体ではほとんど発生していない。余剰水および気泡の透過性があるシートで型枠を被覆することで、コンクリート仕上がり面への表面気泡の発生量を減らすとともに発生する表面気泡径小さくする効果があることが示唆された。

これらの結果より、型枠を被覆したシート材の物性（透気性や耐水性）、すなわちコンクリート仕上り面の物質透過性は表面気泡の低減に影響を及ぼし、その程度によって表面気泡の低減量に影響がある推察された。

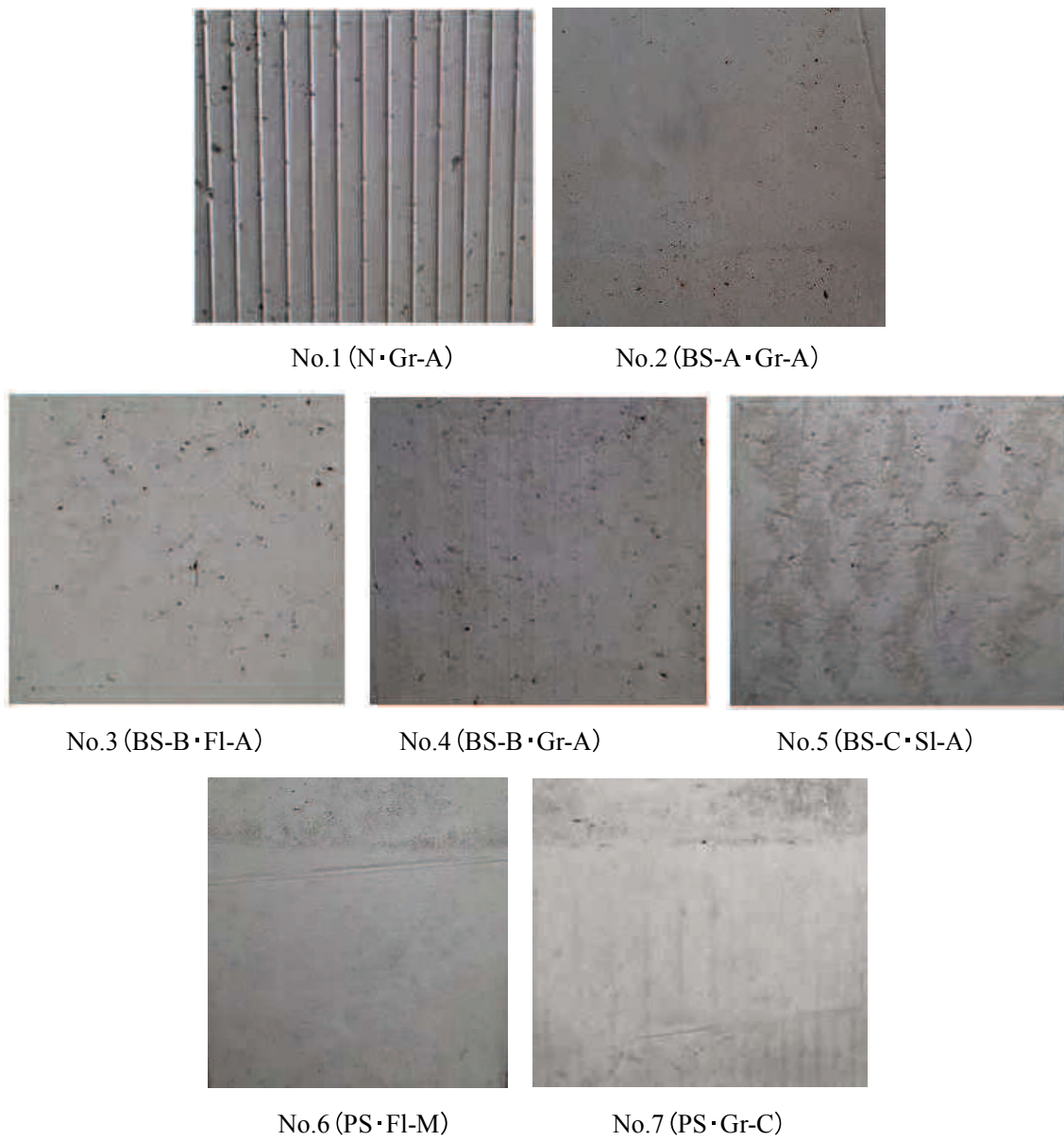


図 5.4.1 評価対象面の状況

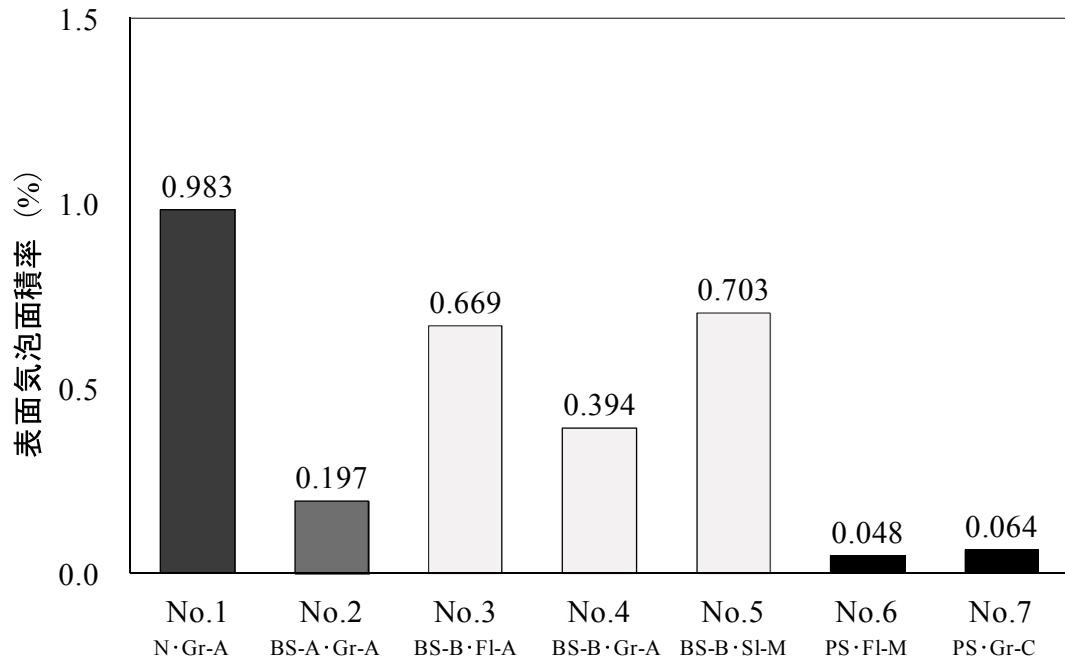


図 5. 4. 2 供試体ごとの表面気泡面積率

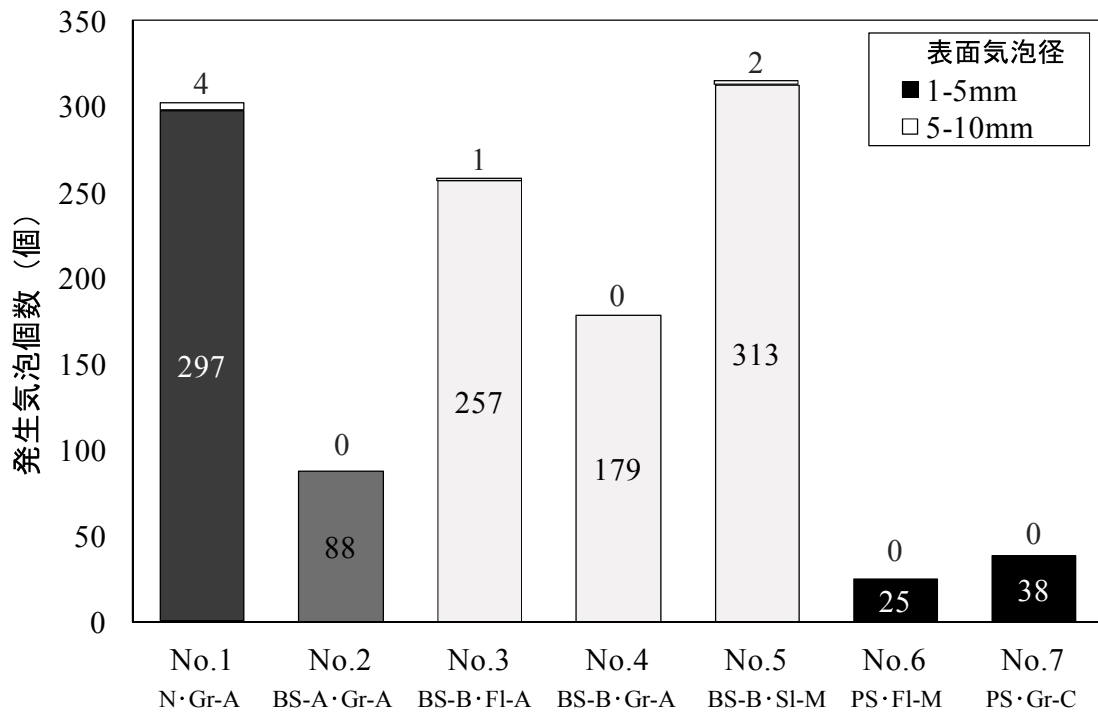


図 5. 4. 3 気泡径別の気泡個数

5.4.2 透気抵抗度と耐水圧が異なるシート材

コンクリート供試体の評価対象範囲の状況を図 5.4.4 に示す。この評価対象範囲領域の表面気泡を気泡判定ソフトで検出し、径が 1mm 以上の気泡の表面気泡面積率を透気抵抗度および耐水圧の関係を調査した (図 5.4.5, 図 5.4.6)。なお破線は、型枠をシート被覆しないケース No.17 で、表面気泡低減効果を判定する基準とした。この時の表面気泡面積率は 0.955% である。図 5.4.5 において、透湿防水シートを用いた場合、透気抵抗度が低くなるほど、表面気泡面積率が小さくなる傾向が見られた。表面気泡面積率の最大値は、油性剥離剤を塗布した透気抵抗度が 10sec/100cc のシート材を使用したケースで 0.977% であった。この値は、型枠をシートで被覆しないケースと同程度であり、透気抵抗度 10sec/100cc のシート材では気泡低減効果が得られなかった。これらのことから、透気抵抗度が小さいほど表面気泡を低減できるが、気泡低減可能な透気抵抗度には限界があることが示唆された。本研究では、少なくとも透気抵抗度 10sec/100cc 以上で、径が 1mm 以上の表面気泡の低減効果を得ることができなかった。

図 5.4.6 において、透湿防水シートを用いた場合、透気抵抗度と同様、耐水圧が小さくなると表面気泡面積率が小さくなる傾向がみられた。一方で、100kPa と 200kPa のシートで被覆したケースでは、シートの被覆がない No.17 と同程度の表面気泡面積率となった。したがって、耐水圧を小さくすることは表面気泡の低減に効果があるものの、透気抵抗度と同様、限界があることが示唆された。本研究では、少なくとも径が 1mm 以上の表面気泡の低減効果は耐水圧が少なくとも 100kPa 以上では得ることができなかった。

次に図 5.4.5 の透気抵抗度 10sec/100cc と図 5.4.6 の耐水圧 200kPa における表面気泡面積率の差に着目する。これは剥離剤の種類が異なっており、水性剥離剤、剥離剤なし、油性剥離剤の順に表面気泡が増加している。シート材と剥離剤の相互作用が表面気泡の発生量に何らかの影響を与えることが示唆された。今後さらに検討を要する課題の一つと考える。

また本実験では、No.8, 10, 15, 16 の供試体に色むらがみられた。供試体 No.8 はシート材の耐水圧が 2.5kPa と、コンクリート側圧の計算値 18.8kPa を大きく下回っており、過剰な排水が要因の一つと考える。No.15, 16 も耐水圧が 10kPa で同様の要因が考えられる。しかし、供試体 No.10 は耐水圧が 200kPa と大きい。そこで打設中の仕上がり面の状態をみると、水性剥離剤を刷毛で塗った塗りムラの部分 (濃い部分) から排水していることが分かった (図 5.4.7)。このことから、No.10 の色むら、水性剥離剤が影響していることが示唆される。その他に脱型後、シート背面 (コンクリート非接触面) にフェーノールフタレイン溶液を噴霧して、セメント分の排出の有無を確認した結果、着色せず、排水はあるがセメント分の排出がないことが分かった。このことは、色むらはコンクリート中の余剰水の排水が要因の一つであることを示していると考えられる。また剥離剤を塗布しないときに見られ

なかったシート面からの排水が、水性剥離剤を塗布することで発生している。このことは、水性剥離剤を塗布することでシート材表面の性質に変化が生じたことが推測される。



(No.8, 透水シート)*)



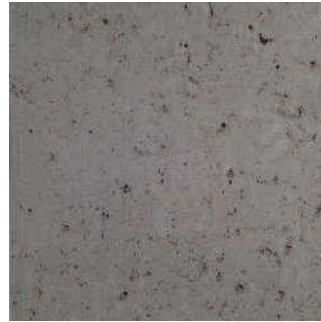
(No.9, 透湿防水シート A)



(No.10, 透湿防水シート A)



(No.11, 透湿防水シート A)



(No.12, 透湿防水シート A)



(No.13, 透湿防水シート A)



(No.14, 透湿防水シート A)



(No.15, 透湿防水シート C)



(No.16, 透湿防水シート C)



(No.17, シートなし)

* () 内, 左: 供試体 No., 右: シート材の種類

図 5.4.4 シート材の耐水圧と表面気泡面積率の関係

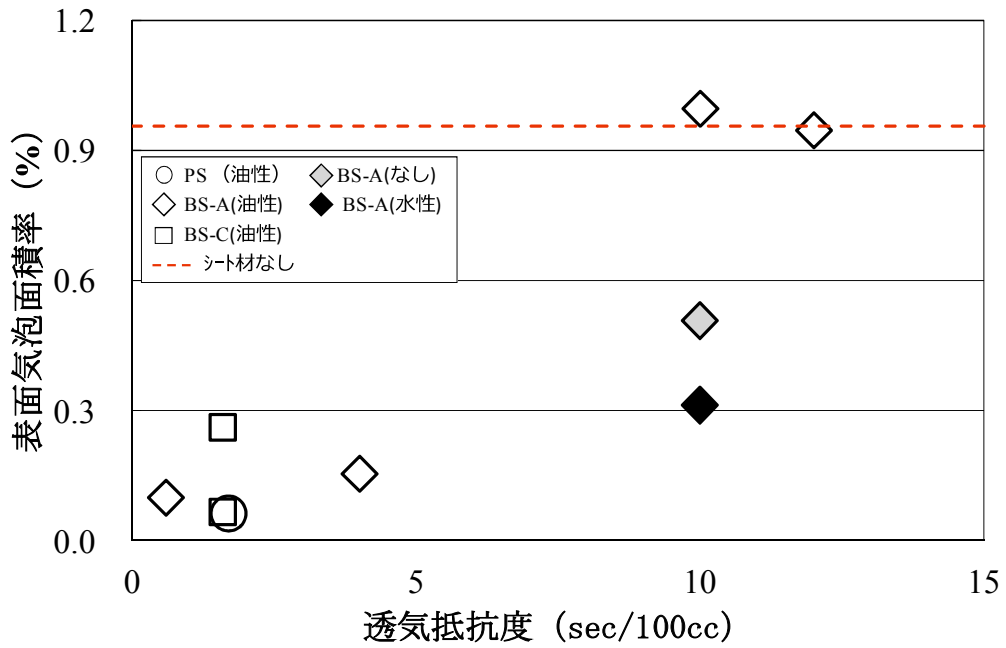


図 5.4.5 透気抵抗度と表面気泡面積率の関係

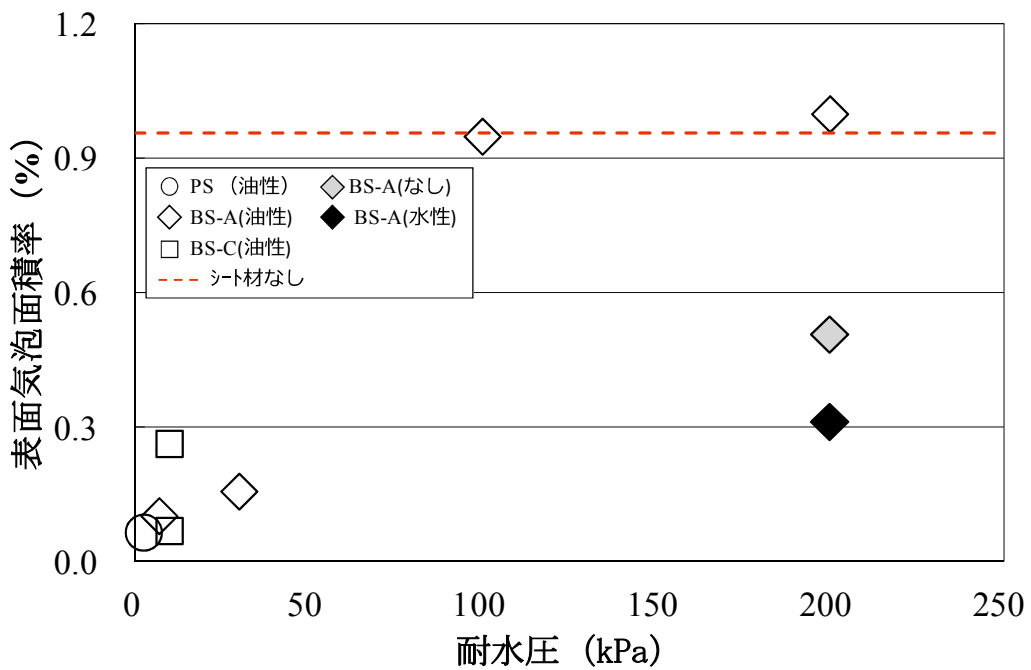


図 5.4.6 耐水圧と表面気泡面積率の関係

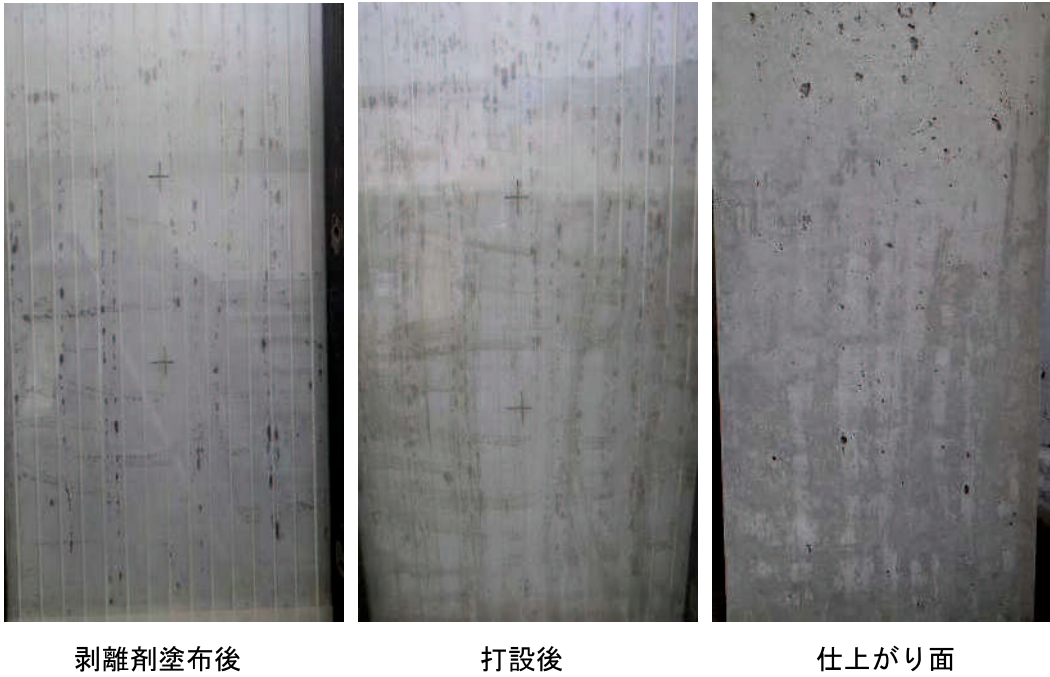


図 5.4.7 水性剥離剤を塗布したコンクリートの表面状態 (No.10)

5.5 まとめ

本章では、評価対象面の型枠の性状を変化させることで、型枠の性状がコンクリートの表面気泡に及ぼす影響を調査し、表面気泡の低減特性を実験的に検討した。コンクリート仕上がり面の型枠の状態を、型枠の性状やその型枠をシート材で被覆することで変化させた。さらに、型枠を被覆するシート材の物性を変えることによって、仕上がり面の型枠の余剰水および気泡透過性を変化させ、表面気泡面積率との関係を定量的に調査した。表面気泡の判定には本研究で開発した気泡判定ソフトを用いた。

本章の研究範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 硬化コンクリートにおける気泡判定ソフトの表面気泡検出精度は、従来のデジタル撮影画像の二値化処理や圧力測定フィルムによる表面気泡検出に比べ、経験ある技術者による目視確認結果に近いことが窺えた。気泡判定ソフトと目視調査の気泡発生個数の測定誤差は5~10%程度であった。硬化したコンクリートでの気泡判定ソフトの適用性が確認できた。
- (2) 透過性があるシート材で評価対象面の型枠を被覆し、コンクリート仕上がり面の型枠に余剰水や気泡などの透過性を付与することで、表面気泡面積率を低減することができた。発生する気泡の数も少なくなり、気泡径も小さくなることが分かった。
- (3) 耐水圧が大きい(200kPa)透湿防水シートでスリット入りの型枠を被覆したケースでは、スリットによる表面気泡低減効果を確認できなかった。一方、同じく耐水圧が大きい透湿防水シートで溝加工した型枠を被覆したケースでは、表面気泡面積率が小さくなり、溝加工による表面気泡低減効果が期待できることが示された。
- (4) シート材を型枠に被覆しコンクリート仕上がり面に透過した場合、シート材の透気抵抗度および耐水圧が小さいほど表面気泡低減効果があるが、効果が得られる透気抵抗度・耐水圧には限界があることが示唆された。本研究では少なくとも透気抵抗度が10sec/100cc、耐水圧が100kPa以上で効果を得ることができなかった。
- (5) 透水シート(耐水圧2.5kPa)および耐水圧10kPaの透湿防水シートで型枠を被覆したケースでは、色むらが見られた。供試体に作用する型枠計算上の側圧18.8kPaである。このことから、シート材の耐水圧が側圧を大きく下回ったことによる過剰な水分排出が要因の一つであることが考えられる。
- (6) 表面気泡低減効果および色むら発生抑制は、評価対象面に塗布する剥離剤の種類も影響を及ぼすことが分かった。これは、剥離剤の塗布によりシート材表面の性質が変化したことが要因と考えられる。

以上より、コンクリート仕上がり面の耐水圧と透気抵抗度をコントロールすることで、色むらなく表面気泡の効率的な低減に寄与できると考える。

第6章

表面気泡と透気係数の関係の調査

第6章 表面気泡と透気係数の関係の調査

6.1 概説

仕上り面に発生する表面気泡は表層品質の一つであり、コンクリートの表層品質は耐久性と関連があるといわれている。表面気泡は表層部分の密実性に影響を与える可能性がある。その他に表面気泡が多いと汚れや劣化因子が付着しやすいと考えられる。例えば、積雪地域では冬期は融雪剤が日常的に散布され、トンネルにおいても坑口から約 50m の区間では除雪作業によって融雪剤が多く含まれた雪が側壁部に付着する。融雪剤の塩分がコンクリート表面に付着するとスケーリングが発生しやすいといわれることから、トンネル覆工コンクリート側壁部における表面気泡も耐久性に影響がないとは言い切れないと考える。そこで研究では、表面気泡の評価手段の一つとして、表面気泡が美観性以外のその他のコンクリート表層品質に与える影響を、実験によって定量的に調査し、耐久性との関連付けをすることを試みた。

表 6.1.1 に表層品質の検査手法の例を示す。表層品質の評価手法の一つに、かぶりコンクリートの物質移動抵抗性の測定がある。かぶりコンクリートの物質移動抵抗性は、鉄筋コンクリートにおいて、劣化因子が鉄筋に到達するまでの抵抗性を示すことから耐久性の評価指標の一つとして用いられている。大半が無筋コンクリートである覆工コンクリートにおいても、物質移動抵抗性はコンクリートの密実性や緻密性と関係があると考え、表面気泡の評価手段として、表面気泡がコンクリート表層の物質移動抵抗性に与える影響を調査することとした。コンクリート表層の物質移動抵抗性の中で、近年注目されている Torrent 法 (Torrent, 1992) を採用し、透気係数を測定した。Torrent 法による透気係数の測定は、「コンクリート構造物の品質確保の手引き (案) (トンネル覆工コンクリート編) 平成 28 年 5 月 国土交通省東北地方整備局」において“覆工コンクリートでも緻密性を適切に評価できる「非破壊試験」を行い施工記録に残すことが望ましい”としており、その「非破壊試験の一つとして示されている。

測定は、室内供試体と実際のトンネル覆工コンクリート側壁部 [Maeda ら (2014), 前田ら (2014), 平野ら (2014)] で行った。Torrent 法で測定した透気係数は、測定箇所表面水分率、逸散水分量や養生条件によって結果が異なるといわれている。配合や測定対象物の形状、養生環境の条件をできるだけ同じになるようにするため、表面気泡と透気係数の関連性を調査した結果は、室内供試体と実際のトンネル覆工コンクリート側壁部で個別にまとめた。

表 6.1.1 表層品質の測定手法とその概要

(土木学会：構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（JSCE335 委員会）
第二期成果報告書およびシンポジウム講演会)

検対象とした手法	測定手法の概要
表層透気試験 (Torrent 法)	コンクリート表層を減圧した上で、圧力の戻り方から表層における透気性を調べることにより、表層品質を評価する。側面からの空気の巻き込みを防ぐために二重チャンバーを採用している。
表層透気試験 (シール法)	コンクリート表層を減圧し、チャンバー内の圧力および透気流量が定常に至ったときの表層品質を透気係数により評価する。透気係数の算出に必要な透気領域を明確化させるために、コンクリート表面近傍を撤去可能な材料で事前にシールする。
表面吸水試験	コンクリート表面から水を与え、吸水速度および吸水速度の時間変化から吸水性を調べることにより、表層品質を評価する。
散水試験	コンクリート表面に少量の水を与え、その後の表面色の変化や鉛直面を流下した水の流下距離の計測を繰返し行うことにより、表層品質を評価する。
電気抵抗率試験	コンクリート表層の電気抵抗率を調べることにより、表層品質を評価する。
リバウンドハンマー試験	コンクリート表面の反発硬度を調べることにより、表層品質を評価する。
超音波試験 (透過法)	コンクリートを透過する超音波の伝播速度を調べることにより、表層から躯体内部を含めたコンクリートの品質を評価する。
超音波試験 (十研法)	コンクリート表層の深さ方向の超音波伝播速度を推定することにより、表層品質を評価する。
衝撃弾性波 (接触時間) 試験	コンクリート表面を小型のハンマーで打撃した時のハンマーとコンクリート表面との接触時間を測定することにより、表層品質を評価する。
コンクリート表面の目視評価	コンクリート表面の性状を目視にて評価することにより、表層品質の品質管理に用いる。

6.2 Torrent 法

Torrent 法はコンクリート表層の透気性を非破壊で評価する手法の一つで、ダブルチャンバー法と呼ばれる方法でコンクリート表層の透気性を測定し、コンクリート表層の緻密性、すなわち耐久性に有害な物質の難浸透性を評価するものである。Torrent 法で使用する機材と計測原理を図 6.2.1 と図 6.2.2 に示す。

手順は、ダブルチャンバーをコンクリート評価対象面に設置し、チャンバー内を真空にする。経時的なチャンバー内の気圧変化から透気係数 $KT (\times 10^{-16} \text{m}^2)$ を算出する。算出した透気係数は表 6.2.1 の 5 段階のグレードに区分される [Torrent (2007), 東北地方整備局 (2015)]。



図 6.2.1 使用資機材（コンプレッサと測定器）

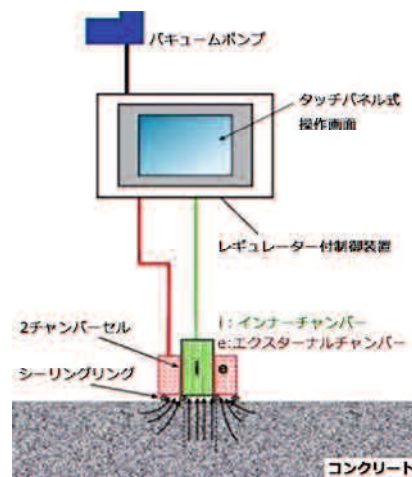


図 6.2.2 測定原理イメージ（計測リサーチコンサルタントホームページ）

表 6.2.1 透気係数の評価基準

品質	優	良	一般	劣	極劣
透気係数 (10^{-16}m^2)	< 0.01	0.01 ～ 0.1	0.1 ～ 1.0	1.0 ～ 10	> 10

6.3 室内供試体における表面気泡面積率と透気係数の関係

6.3.1 実験概要

室内供試体における表面気泡面積率と透気係数の関係を調査した (Maeda ら, 2014). 本研究では, 前章で作製した室内供試体を中心に調査を行った. 透気係数は 1 つの評価対象面に対し 3 箇所測定し, その平均値を採用した. 測定箇所を図 6.3.1 に示す. 透気係数は測定箇所の逸散水分量の影響を受け相関関係にあるといわれており, 逸散水分量は低 W/C ほど小さい傾向を示すことが, 早川ら (2012) によって報告されている. また測定箇所の表面水分率が透気係数に影響を与えることが知られており, 国土交通省東北地方整備局では表面水分率が 5.5%以下であることを推奨している. また, 温品ら (2012) の研究によると, 透気試験は表面含水率 6.0%未満とすることが望ましいことが報告されている. そこで透気係数測定時に測定箇所の表面水分率を表面水分計 (ケット社製) で測定し, 表面水分率による影響の有無を確認した (図 6.3.2). 表面気泡面積率はデジタル撮影画像から気泡判定ソフトで算出した全ての気泡の面積の値を採用した.

室内供試体の養生時間は気中で 18~20 時間, その後脱型, 室内気中養生している. 供試体の一覧を表 6.3.1 に示す. シートの材質は, 前章の供試体作製で使用したのと同じ透水シートおよび透湿防水シート A, B, C である. 透水シートが織布と不織布の二重構造, 透湿防水シート A が透湿層のポリテトラフルオロエチレン (PTFE) 多孔質膜と支持材の二層構造, 透湿防水シート B が透湿層のポリエチレン系シートと不織布の基材の二重構造, 透湿防水シート C が多孔質な超高分子ポリエチレン製のシートである. 透気係数の測定した供試体を使用したコンクリート配合は 2 種類で, 前章で使用した配合 B と配合 C で, 使用材料の詳細は前章で示したのと同じである.

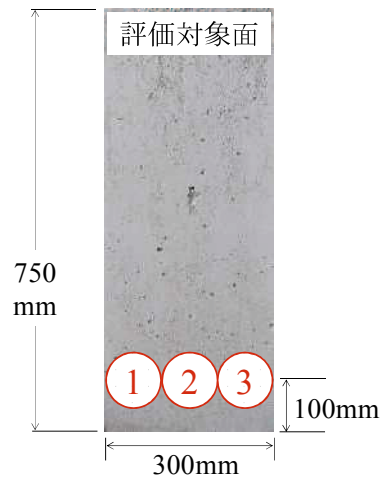


図 6.3.1 透気係数測定箇所



図 6.3.2 表面水分率測定状況

表 6.3.1 透気係数を測定した供試体一覧

No.	シート材			型枠性状 (記号)	配合 ^{*1)}	剥離剤	打込 層数 ^{*2)}	振動 条件 ^{*3)}	材令 (日)		
	種類 (記号)	耐水圧 (kPa)	透気抵抗度 (sec/100cc)								
1	なし (N)	—	—	鋼/なし/なし (F1-M)	B	油性	4	1	211		
2				アクリル/なし/なし (F1-A)					228		
3				203							
4	透水 シート (PS)	2.5	0.73	鋼/なし/なし (F1-M)	C	2	2	1	47		
5				鋼/セラミック溶射/溝 (Gr-C)					51		
6	透湿防水 シート A (Bs-A)	200	10.0	アクリル/なし/溝 (Gr-A)	B	油性	4	1	246		
7									水性	218	
8									なし	29	
9									100	12.0	170
10									30	4.0	79
11									7.0	0.6	99
12	透湿防水 シート B (Bs-B)	200	309.0	アクリル/なし/なし (F1-A)	B	油性	4	3	139		
13				鋼/なし/スリット (S1-M)					180		
14				アクリル/なし/溝 (Gr-A)					152		
15									2	34	
16									1	61	
17				4					40		
18				透湿防水 シート C (Bs-C)					10	1.6	アクリル/なし/溝 (Gr-A)
19	なし	239									

*1) 配合の種類は前章参照。A, B, C 配合のうち透気試験を実施した配合は B, C の 2 種類

*2) 打込み層数に対して打込み高さは、1層が 75cm, 2層が約 40cm, 4層が約 20cm

*3) 振動締固め条件：1；中央 1 点（棒状パイプレータ）、総振動時間 60 秒

2；中央 1 点（棒状パイプレータ）、総振動時間 420 秒

3；中央 1 点（棒状パイプレータ）60 秒+4 点（型枠パイプレータ）60 秒

6.3.2 結果と考察

測定した全気泡径に対する表面気泡面積率と透気係数の結果一覧およびそれらの関係を表 6.3.2 と図 6.3.3 に示す。表面水分率は 1.0～4.1%であったことから、測定箇所の表面水分率の差による透気係数への影響は限定的と判断し、結果を評価する。そのほか、シート材および型枠性状、剥離剤、打込層数、振動時間の供試体条件と透気係数の関連性が確認されていないことから、本実験では考慮しないものとした。

図 6.3.3 において、表面気泡面積率が大きくなると透気係数も大きくなる傾向がみられた。特に表面気泡面積率 2%以下の範囲でその傾向が強い。このことは、表面気泡発生量はコンクリートの耐久性と関係性が高い透気係数に何らかの影響を与える可能性があることを示唆している。また、室内供試体の透気係数測定結果は、Torrent (2007) が示したグレード評価では「極劣」～「劣」の間で、低い水準となった。既往の研究において、井上ら (2014) や白根ら (2010) などは養生環境と透気係数の関係を調査している。その中で、湿潤養生環境下において一定期間以上養生したほうがしないケースよりも透気係数が大きくなることを示している。室内供試体の透気試験測定値がグレード評価で低い水準となったことは、供試体の養生環境が要因の一つであると考えられる。供試体の養生環境は、これまで覆工コンクリート養生方法として一般的とされてきた方法を採用し、打込み後 18～20 時間気中養生での脱型、その後の養生も気中養生としている。供試体は形状が幅 300mm、奥行き 300mm、高さ 750mm であり、実際の覆工コンクリートよりも乾燥しやすく水分が早期に逸散したものである。

以上より、室内供試体において、一定の範囲内で表面気泡面積率が大きくなると透気係数も大きくなる関係にあり、表面気泡面積率が透気係数に影響を及ぼすこと、すなわちコンクリート表層の物質移動抵抗性に影響をおよぼす可能性があることが示唆された。本実験では表面気泡面積率 2%以下の範囲でその傾向が強かった。

表 6.3.2 測定結果一覧

No.	シート材・ 型枠性状	配合 ^{*1)}	剥離剤	打込 層数 ^{*1)}	振動 条件 ^{*1)}	材令 (日)	表面 水分率 (%)	表面気泡 面積率 (%)	透気係数 ($\times 10^{-16} \text{m}^2$)	グ レ ー デ ィ ン グ					
1	N・Fl-M	B	油性	4	1	211	3.2	1.08	43.7	極劣					
2	N・Fl-A			1	2	228	2.4	1.00	6.8	劣					
3				4	1	203	1.8	4.78	21.2	極劣					
4	PS・Fl-M	C	2	47		4.2	0.13	4.1	劣						
5	PS・Gr-C			51		3.5	0.10	2.0	劣						
6	PS・Fl-M	B	水性	4		1	246	3.4	0.64	3.6	劣				
7	Bs-A・Gr-A		なし				218	2.8	1.10	19.0	極劣				
8			油性				29	3.1	0.32	26.2	極劣				
9							170	3.6	0.94	2.3	劣				
10							79	3.6	0.25	2.6	劣				
11							99	3.4	0.13	2.7	劣				
12							Bs-B・Fl-A	139	1.0	1.15	38.7	極劣			
13							Bs-B・Sl-M	180	1.9	1.83	300.7	極劣			
14							Bs-A・Gr-A	152	1.1	0.92	33.0	極劣			
15								2	34	2.2	1.12	9.4	劣		
16			1					61	1.7	0.46	4.8	劣			
17	Bs-C・Gr-A		油性				4	3	40	2.1	0.58	6.0	劣		
18								水性	4	1	332	4.1	0.06	10.1	極劣
19											なし	239	3.1	0.20	7.1

*1) 凡例は前表の供試体一覧と同じ

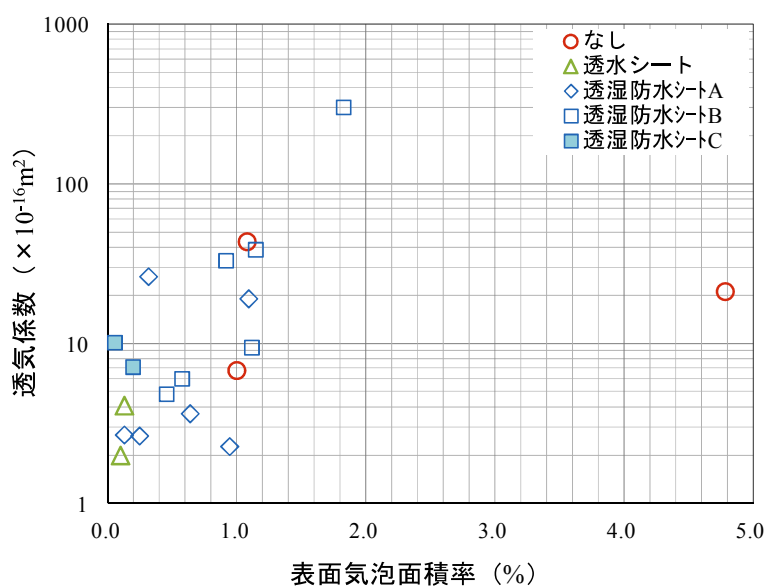


図 6.3.3 表面気泡面積率と透気係数の関係

6.4 トンネル覆工コンクリート側壁部における表面気泡面積率と透気係数の関係

本節では、実際のトンネル覆工コンクリート側壁部で、表面気泡面積率と透気係数を測定して、その関係性を調査した[平野ら (2014), 前田ら (2014)]。調査したトンネルは2本で、Aトンネル、Bトンネルとする。Aトンネルの側壁部には透水シートを使用している。出荷した生コン工場は同じである。コンクリートの配合を表6.4.1に示す。

6.4.1 試験施工概要

(1) Aトンネル

Aトンネルの覆工コンクリートは、供用中の道路トンネルの補強工事によるもので、既設トンネルの内空側にコンクリートを巻き立てる「セントル工法」によって構築された覆工コンクリートである。施工前と施工後の状況を図6.4.1に示す。延長が38.5m、覆工コンクリートは6ブロックで打設しており、一部の区間で覆工コンクリート内に鋼製支保工(H150)を巻き込んだ構造である(図6.4.2)。覆工コンクリートの巻厚は、鋼製支保工巻き込み区間が350mm、巻き込みのない区間が250mmである。この工事では、覆工コンクリート内部に鋼製支保工を巻き込んだの施工となることから、表面気泡の低減およびコンクリート表面の密実性向上を目的に、側壁部の型枠を透水シートで被覆している。透水シート設置位置はトンネル下端から60cmの範囲で、型枠には余剰水、気泡の排出向上を目的に溝を設けている。溝形状は三角、幅・深さ2mm、設置間隔20mmである(図6.4.3)。透水シートはこれまでの実験と同様のシートで、織布と不織布の二重構造、通気抵抗度0.73sec/100cc、耐水圧2.5kPaである。その他の部分のセントルの材質は鋼板で、表面はブラスト処理をしている。脱型は打込み完了後から約20時間、その後は気中養生である。

(2) Bトンネル

Bトンネルは、新設の道路トンネルで延長が394m、掘削断面が50.0m²、トンネル掘削完了後に覆工コンクリートを37ブロックで施工している(図6.4.3, 図6.4.4)。覆工コンクリートの巻厚は鉄筋区間が350mm、無筋区間が300mm、使用した型枠は一般的なセントルで、材質が鋼板、表面にブラスト処理をしている。そのほか、透水シートなど特別な対策は行っていない。養生環境はAトンネルと同程度で、脱型が打込み完了後から約18時間、その後は気中養生である。

表 6.4.1 コンクリート配合

トンネル名称	コンクリート種別	W/C (%)	単用量 (kg/m ³)					備考
			W	C	S	G	WRA	
A トンネル	18-15-20N	48.6	175	360	900	864	3.60	1~4BL
	24-15-20BB	56.5	167	296	814	1021	3.14	5, 6BL
B トンネル	24-15-20BB	56.5	167	296	814	1021	3.14	



(覆エコンクリート施工前, 鋼製支保工による既設トンネルの断面補強状況)



(覆エコンクリート施工完了, 鋼製支保工を内部に巻き込んでの打設)

図 6.4.1 施工前後の状況

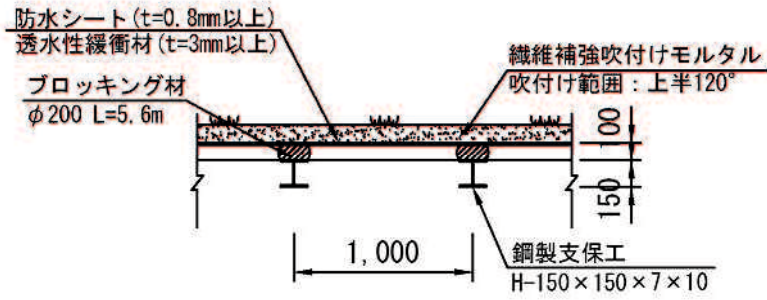
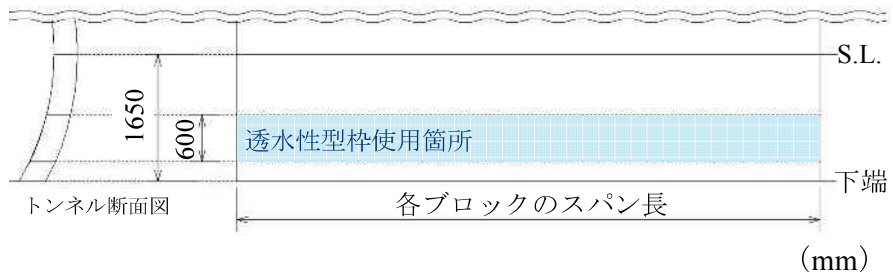


図 6. 4. 2 鋼製支保工巻込み区間の覆工コンクリート断面図



(透水シート設置位置)



(側壁部の溝入型枠)



(溝形状)



(側壁部への透水シート取付け状況)

図 6. 4. 3 側壁部への透水シート設置概要



(坑口, 37ブロック側)



(坑内)



(透気試験状況)

図 6.4.4 B トンネル調査状況

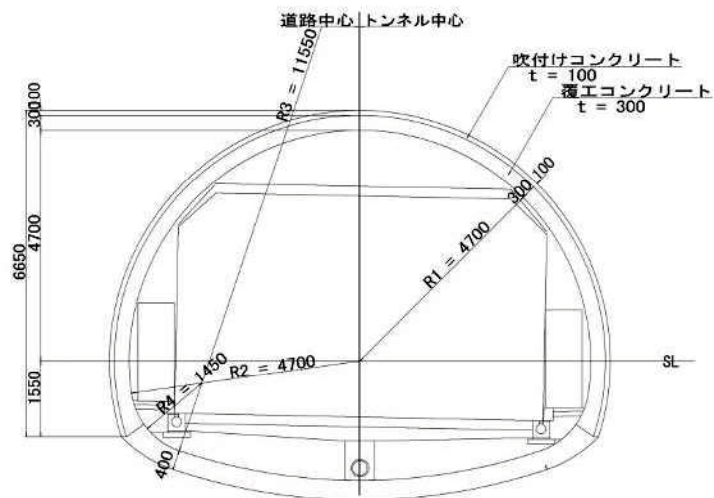


図 6.4.5 B トンネル断面図

6.4.2 測定方法

(1) 表面気泡面積率

A トンネルでは左側の側壁部のスプリングラインより下側を対象に、全ての気泡径の表面気泡面積率を測定した。測定位置は、全6ブロックのうち第1ブロック～第6ブロックの透水シート被覆箇所および第2, 5, 6ブロックの透水シートによる被覆がない鋼製型枠のみ箇所で行った。表面気泡面積率は、前章で採用したデジタル撮影画像の二値化処理で算出した。透水シート被覆箇所では、評価領域を約48cm×30cm (1280×800ピクセル)とし、各ブロック5箇所(側壁下端から42cm～78cmの範囲内)を撮影して表面気泡面積率を算出し、その平均を各ブロックの表面気泡面積率とした。鋼製型枠使用箇所では、評価領域を約27cm×27cm (710×720ピクセル)とし、各ブロック1箇所(側壁下端から97cm～133cmの範囲内)を撮影して表面気泡面積率を算出した。

B トンネルでは左右両側の側壁部のスプリングライン以下を対象に、全ての気泡径の表面気泡面積率を測定した。測定は、全37ブロックのうち、第2, 14, 26, 36ブロックの左右の側壁部で測定した。表面気泡面積率はAトンネルと同様、デジタル撮影画像の二値化処理で算出した。評価領域を48cm×36cm (1280×960ピクセル)とし、撮影範囲は側壁部内で表面気泡以外のコンクリート表層不具合が少ない箇所を選定して撮影した。

(2) 透気係数

透気係数は、表面気泡面積率を測定した箇所を中心に測定した。1回の測定で3箇所測定し、その平均を測定値とした。各測点とも透気性の測定結果に影響をおよぼすと思われるひび割れ箇所や表面状態が粗い箇所等を避けて選定した。

6.4.3 結果と考察

Aトンネルは透水シートを使用することで、表面気泡を低減することができた(図6.4.6)。A, Bトンネルで測定した表面気泡面積率と透気係数の一覧および関係を表6.4.2と図6.4.7に示す。表6.4.2より、表面水分率が3.2~5.0%であり、前項同様、表面の水分状態が透気係数の測定結果に与える影響は限定的と思われる。表面気泡面積率が0.02~4.00%、透気係数が $0.04\sim 2.07\times 10^{-16}\text{m}^2$ であった。グレード評価は、「良」($0.01\sim 0.1\times 10^{-16}\text{m}^2$) ~ 「劣」($1.0\sim 10.0\times 10^{-16}\text{m}^2$) の範囲に該当し、室内供試体より1~2段階グレードが上がった。

図6.4.7をみると、室内供試体における関係同様、表面気泡面積率が大きくなると透気係数も大きくなる傾向がみられた。特に表面気泡面積率2%以下の範囲において、この傾向が強い。このことは、表面気泡面積率は透気係数に影響を与える可能性があることが示唆されたと考える。配合別に両者の関係をみると、2種類ある配合のうちW/C48.6%と小さい配合のほうが、透気係数が小さくなった。W/Cが小さいほど透気係数が小さくなる傾向は、既往の研究でも示されている[早川ら, (2012)]。ここでW/C48.6%と56.5%の配合ごとの表面気泡面積率と透気係数の関係に着目する。W/C48.6%のケースはデータ数が少ないが、両者とも表面気泡面積率が大きくなるにつれ、透気係数も大きくなる傾向がみられる。したがって表面気泡面積率は配合によらず透気係数に影響を与える可能性があると考えられる。

次に材令の影響に着目する。AトンネルとBトンネルで材齢が大きく異なるため、AトンネルとBトンネル別に結果をみることにする。材齢が51~71日と短いAトンネルは表面気泡面積率が大きくなるにしたがい透気係数も大きくなっていることが分かる。一方、材齢736日以上となるBトンネルでは、表面気泡面積率が大きくなっても透気係数が大きくなるとは言い切れない。データ数が少ない中、一部突出したデータがあることも要因の一つであると考えられる。

続いて、透水シート材による型枠の被覆の有無に着目すると、透水シート材で型枠をしたケースの方が被覆しないケースに比べ、表面気泡面積率、透気係数ともに小さくなる傾向がみられた。またグレード評価で「良」となったケースは、透水シートで型枠被覆をしたケースである。このことより、透水シートによる型枠被覆は表面気泡面積の低減および透気係数の向上に効果があることが示唆された。さらに、表面気泡面積率と透気係数の関係をシート材の被覆の有無別にみると、表面気泡面積率が2%以下では、両者とも表面気泡面積率が大きくなると透気係数も大きくなる傾向がみられる。

以上より、実際の覆工コンクリート側壁部において、表面気泡面積率は一定の範囲内で、配合および評価対象面の型枠の物資透過性によらずコンクリートの耐久性評価の指標の一つである透気係数に影響を与える、すなわちコンクリート表層の物質移動抵抗性に影響を

およぼす可能性があることが示唆された。

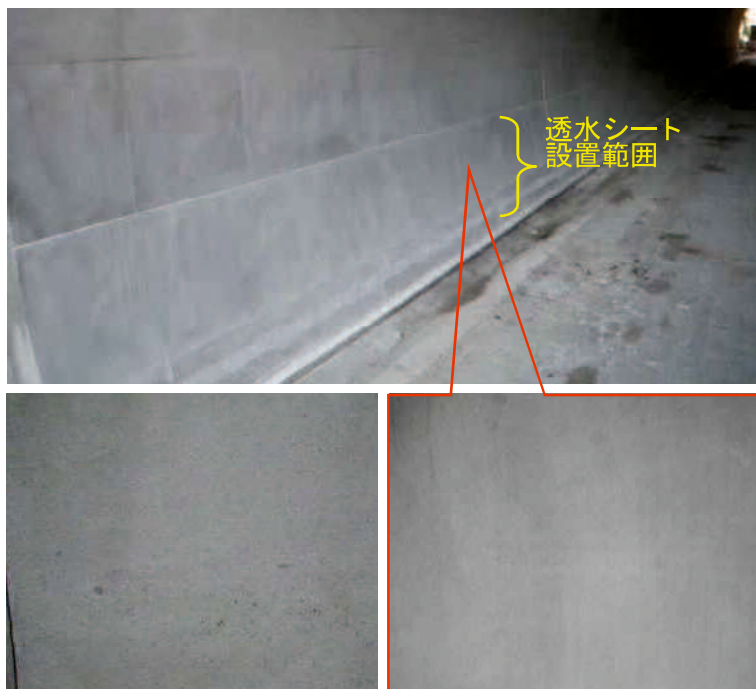


図 6.4.6 側壁部のコンクリート仕上り状況 (A トンネル)

表 6.4.2 表面気泡面積率と透気係数の測定結果一覧

No.	トンネル	型枠性状	配合	材齢 (日)	表面水率 (%)	表面気泡 面積率 (%)	透気係数 ($\times 10^{-16} \text{m}^2$)	グレー ディング	
1	A トンネル	透水シート 被覆	18-15-20N	71	5.0	0.021	0.04	良	
2				65	3.8	0.047	0.06	良	
3				61	4.2	0.505	0.25	一般	
4				57	4.8	0.028	0.29	一般	
5				24-15-20BB	54	4.6	0.086	0.10	一般
6					51	4.4	0.339	0.16	一般
7		18-15-20N	65		4.1	0.249	0.18	一般	
8		B トンネル	鋼板 プラスチック処理	24-15-20BB	54	3.8	1.996	2.07	劣
9					51	3.6	4.002	1.78	劣
10	829				3.5	0.630	0.95	一般	
11					3.2	0.392	0.97	一般	
12	799				4.0	0.084	0.20	一般	
13					3.7	0.751	0.53	一般	
14					771	3.7	0.147	0.65	一般
15						3.7	0.140	1.93	劣
16					736	3.4	0.093	0.74	一般
17	3.8	0.527	0.40	一般					

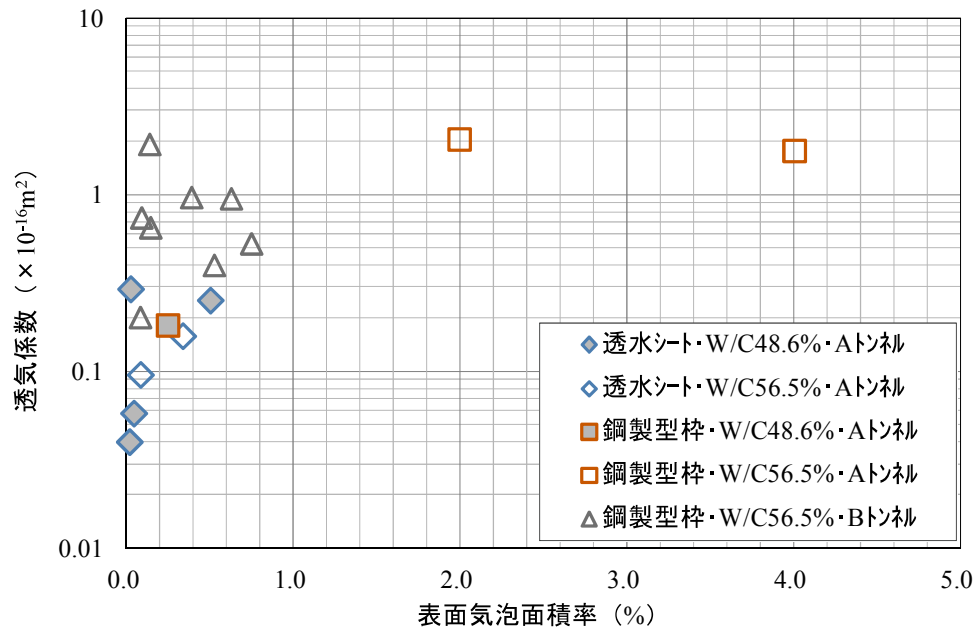


図 6.4.7 表面気泡面積率と透気係数の関係

6.5 まとめ

本章では、表面気泡面積率がコンクリートの耐久性におよぼす影響の程度を評価することを目的に、前章で作製した室内供試体および実際の覆工コンクリート側壁部の表面気泡面積率と透気係数の関係を調査した。配合、養生環境、形状など表面気泡面積率以外の要素が透気係数の測定結果に影響を与えることが想定されたため、室内供試体と実際の覆工コンクリートについてそれぞれ調査した。

本章の研究範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 室内供試体において、表面気泡面積率が大きくなるにつれ透気係数が大きくなる傾向がみられた。表面気泡面積率は透気係数に影響を与える可能性があることが定量的に示唆された。本章の実験では、特に表面気泡面積率 2%以下においてその傾向が強い。
- (2) 実際のトンネル覆工コンクリート側壁部においても、表面気泡面積率の増加に応じて透気係数が大きくなる傾向がみられた。配合変更や透水シート材による型枠被覆によらず、表面気泡面積率は透気係数に影響をおよぼすことが定量的に示唆された。本章の実験では、特に表面気泡面積率 2%以下においてその傾向が強い。
- (3) 実際のトンネル覆工コンクリート側壁部に比べ室内供試体の方が、透気係数が大きい結果となった。これは、室内供試体は実構造物に比べ乾燥しやすい状況にあったことが要因として推察された。

以上より、トンネル覆工コンクリート側壁部の表面気泡は、Torrent 法によって測定された透気係数に何らかの影響を与えることが示唆され、表面気泡は美観性だけでなく耐久性にも影響を与える可能性があることが示唆された。今後、データ数を増やし両者の関係性をより正確に把握することや表面気泡と他の耐久性の指標の関係を比較することで、表面気泡と耐久性の関係を評価することができると考える。

第 7 章

結論

第7章 結論

7.1 本研究のまとめ

近年、コンクリートの耐久性向上がいつそう求められるようになり、耐久性と関連があるといわれているコンクリートの表層品質について多くの研究が行われている。コンクリートの表層品質を評価する手法は様々であるが、施工中の早期に調査が可能な目視調査が再注目されている中で、コンクリートの美観性（見栄え）にも注目が集まっており、美観性を向上させるための技術も開発されつつある。本研究は、コンクリートの表層品質のうち、山岳トンネルの覆工コンクリートの側壁部において、発生しやく覆工コンクリートの美観性にも大きな影響を与える表面気泡に着目し、実験的検討を行った。

本研究では、表面気泡の効率的な低減手法の確立を最終目的に、はじめに表面気泡の発生機構や特性について室内実験により調査した。そして、そこで得られた知見を元に表面気泡発生低減に関して実験的検討を行った。さらに、表面気泡と他の表層品質との関係を作製した室内供試体と実際の覆工コンクリートにおいて定量的に調査することで、耐久性との関連付けを試みた。

本論文の主な要点（第3~6章）まとめを以下に述べる。

第3章では、トンネル覆工コンクリートの側壁部を模擬した型枠を用いて、コンクリート仕上がり面の角度と表面気泡の発生量の関係を調査することで、型枠の傾斜が表面気泡の発生におよぼす影響を調べた。さらに、振動締固め過程の表面気泡発生状況を観察することで、気泡の発生機構を調査した。その他に、表面気泡の発生に影響を与える要素といわれている剥離剤の種類、振動締固め時間、型枠表面の性状をパラメータとして室内供試体を作製し、表面気泡の発生量を調査することで、表面気泡の発生特性を調査した。

その結果、型枠仕上がり面の傾斜は表面気泡発生量に影響をおよぼすが、両者は比例関係にはなく、型枠傾斜角度が少なくとも30°以上になると急激に表面気泡の発生量と大きさが増加することが分かった。振動締固め過程において、長時間締固めても気泡は除去できないこと、気泡は仕上がり面に断続的に発生、型枠とコンクリートの界面に到達した気泡は振動エネルギーによって型枠上方に移動し、仕上がり面に残存するものが表面気泡となること、表面気泡は径が大きいほど移動速度が速く、1mm以下の気泡はほとんど移動しないことが分かった。トンネル覆工の模擬型枠を用いた試験において、振動締固めは限定的であるが気泡低減効果があり、型枠性状は気泡低減効果に影響を与えることが示唆された。

第4章では、第3章で行った振動締固め過程の表面気泡発生状況を定量計測することで、表面気泡発生機構を明らかにした。表面気泡を定量的に評価するにあたり、デジタル撮影画像を自動処理によって表面気泡量を計測する手法を考案した。

その結果、考案した表面気泡量を計測する手法は、従来の手法よりも誤検出が少ないことが確認できた。締固め過程における表面気泡の個数は、径10mm以上の気泡が締固め開始60秒後になくなり、径5~10mmの気泡が減少するものの、径1~5mmの気泡が増加し、総数は一旦収束傾向になるが徐々に増加することが分かった。表面気泡面積率は、締固め開始120秒後には30秒後の30%程度まで低減するものの、180秒以降は増加に転じ、420秒後は180秒後の2倍以上まで増加した。表面気泡面積率は振動締固め初期は径が大きな気泡の影響が大きく、締固め時間が長くなると径が小さい気泡の影響が大きかった。第3章と第4章の結果から、気泡はコンクリート仕上がり面に断続的に出現し、小さな気泡は動きが遅いことから、トンネル覆工コンクリート側壁部ではセントル上方へ気泡を排出するには限界があると考えた。表面気泡の効率的な低減には振動締固めに加え、径が5mm以下、特に1mm以下の小さな気泡の除去が効果的であり、見栄えの観点からは、見た目にも気泡があると認識できる径1~2mmの気泡の除去が有効であると考えた。

第5章では、トンネル覆工コンクリートは型枠上方からの表面気泡排出が困難な構造であることから、型枠に余剰水、気泡の透過性を付与し、表面気泡を型枠側上方ではなく型枠前面から排出することによる表面気泡低減を試みるとともに、型枠の物質透過性の程度を変化させ、表面気泡発生量との関係を調査することで、表面気泡低減の特性を示した。型枠への物質透過性の付与は、型枠をシート材で被覆することで行い、さらにシート材の種類を変えることで物質透過性を変化させた。

その結果、仕上がり面の型枠に余剰水および気泡の透過性を与えることで、表面気泡の発生面積、個数を低減し、気泡径を小さくすることができた。仕上がり面の型枠の物質透過性を変は表面気泡発生に影響を及ぼし、被覆したシート材の透気抵抗度と耐水圧が小さいほど、径が1mm以上の表面気泡面積率は小さくなる傾向がみられた。ただしその効果には限界があり、上限値は透気抵抗度が10sec/100cc、耐水圧が100kPaであった。耐水性の低いシートでは、耐水圧がコンクリート側圧を大幅に下回ったことが要因と思われる色むらが発生した。また、評価対象面の型枠に塗布した剥離剤の種類は、表面気泡低減効果および色むら発生抑制に影響を与えることが分かった。

以上より、仕上がり面の耐水圧、透気抵抗度をコントロールすることで、効率的に気泡を低減できると考える。

第6章では、コンクリート表面気泡は表層品質の一つであり、表層品質は耐久性に影響があるといわれていることから、表面気泡と美観性以外の他の表層品質との関係を定量的に調査することで、表面気泡と耐久性の関連付けを試みた。作製した供試体および実際の覆工コンクリート仕上がり面に発生した表面気泡量と Torrent 法による透気係数の関係を調べた。

その結果、脱型後早期に乾燥しやすい室内供試体および実際の覆工コンクリートにおいて、一定範囲内では表面気泡面積率が大きくなると透気係数が大きくなること、実際の覆工コンクリートでは、配合およびシート材による型枠の被覆によらず、同様の傾向があることが確認できた。この本実験では表面気泡面積率 2%以下でこの傾向が強かった。

以上より、トンネル覆工コンクリート側壁部における表面気泡は、透気係数に影響を及ぼす可能性があることが示唆された。

7.2 今後の課題と研究展望

本論文は、トンネル覆工コンクリート側壁部を想定した型枠によって作製した供試体を用いた表面気泡の発生特性・機構および表面気泡低減特性の定量的な検討と、表面気泡の評価手段として、耐久性の評価指標の一つである透気係数との関係を定量的に調査した。今後は実施工への適用、すなわち実施工での表面気泡低減を目指す必要があると考える。そのためには、表面気泡の発生および低減特性のさらなる把握とトンネル覆工コンクリートの実大規模での知見の再現性が必要と考える。さらに、本研究で示唆されたと考える表面気泡発生量が美観性に加え耐久性に与える影響を明らかにすることが、コンクリート構造物の品質向上にもつながると考える。

実施工へ展開するにあたり、室内供試体で得られた知見に対して、実大規模での再現性の確認が必要である。室内供試体と実施工では、締固めの振動エネルギーの伝達状況、型枠に作用するコンクリート側圧や型枠面からの余剰水、気泡の排出先不足など条件が異なるところがある。実大規模での再現性にあたり、さらなる表面気泡の発生機構および低減特性の把握が必要になることも考えられる。本研究では仕上がり面における気泡の挙動の把握を行ったが、コンクリート仕上がり面に長時間締固めても断続的に発生する気泡の挙動および発生要因は究明を行っていない。この要因究明が、より効率的な気泡低減手法の確立につながることも考えられる。また、あらゆるコンクリート構造物に反映するためには、異なる配合での知見を得ることも必要である。さらに施工環境に耐えうる仕上がり面の型枠の開発、その型枠への余剰水、気泡の透過性付与方法の確立などが実用化への問題として残っている。

本研究では、美観性の向上を目的に表面気泡の定量評価と低減に関する実験的に調査した。その中で、表面気泡がコンクリート表層の物質移動抵抗性に影響をおよぼす可能性があることが定量的に示唆された。本研究では、見栄えにおよぼす影響が大きいことからトンネル覆工コンクリート側壁部の表面気泡低減に着目したが、多くが無筋構造であるトンネル覆工コンクリート側壁部の表面気泡が美観性以外のコンクリート品質にどのような影響をおよぼすか明確でない。しかし、コンクリート表層の物質移動抵抗性向上は、コンクリートの緻密性にもつながることから、無筋コンクリートにおいてもコンクリート品質の向上につながる事が考えられる。覆工コンクリートにおいて、表面気泡が美観性以外の品質に与える影響として、例えば道路トンネルでは、通行車両の排気ガス付着による劣化、維持管理上の表面の汚れやすさ、コンクリート表面へのコケやカビの発生しやすさへの影響などが考えられる。その他、坑口部等は鉄筋コンクリート構造であるため、コンクリート表層の物質抵抗性向上がコンクリートの品質に影響をおよぼす。今後、表面気泡が美観性以外にコンクリートの品質に与える影響を定量的に評価することで、表面気泡低減の有

効性を示すことができる。表面気泡は材令によらず施工中に手軽に測定できることから、表面気泡と美観性以外のコンクリートの品質との関係を定量的に評価することができれば、施工中の品質改善やコンクリートの耐久性評価の簡素化に寄与できると考える。

参考文献

Azari, H., *et al.* : Assessing sensitivity of impact echo and ultrasonic surface waves methods for nondestructive evaluation of concrete structures, *Construction and Building Materials*, Vol.71, pp.384-391, 2014.

CIB Report No. 24, Commission W29, Tolerances on blemishes of concrete, 1973.

Cotic, P., Kolaric, D., *et al.* : Determination of the applicability and limits of void and delamination detection in concrete structure using infrared thermography, *NDT and E International Journal*, Vol.74, pp.87-93, 2015.

Harada, S., Maeda, T., *et al.* : Reducing bug-holes on tunnel lining concrete by using covering sheets, *Proceedings of ISEC-8*, pp.689-694, 2014.

Lemaire, G., Escadeillas, G., *et al.* : Evaluating concrete surfaces using an image analysis process, *Construction and Building Materials*, No.19, pp.604-611, 2005.

Long, A, E., Henderson, G, D., *et al.* : Why assess the properties of near-surface concrete, *Construction and Building Materials*, Vol.15, pp.65-79, 2001.

Maeda, T., Harada, S., *et al.* : Reevaluation of the effect of covering sheets for reducing bugholes on tunnel lining concrete, *Proceedings of EURO-MED-SEC-1*, pp.79-84, 2016.

Maeda, T., Honma, H., *et al.* : Permeability of tunnel lining with air/water bubbles on concrete surface, *Proceedings of ASEA-SEC-2*, pp.321-325, 2014.

Ozkul, T., Kucuk, I. : Design and optimization of an instrument for measuring bughole rating of concrete surfaces, *Journal of the Franklin Institute*, No.348, pp.1377-1392, 2010.

Peterson, K., Carlson, J., *et al.* : Methods for threshold optimization for images collected from contrast enhanced concrete surfaces for air-void system characterization, *Materials Characterization*, 60(7), 710–715, 2008.

- Reading, J. T. : The bughole problem, *ACI Journal*, No.69-15, pp.165-171, 1972.
- Sanjuan, M., A., Martialay, R., M., *et al.* : Influence of the age on air permeability of concrete, *Journal of Materials Science*, Vol.30, pp.5657-5662. 1995.
- Silva, D., Leal, W., *et al.* : Expert system applied for classifying self-compacting concrete surface finish, *Advances in Engineering Software*, No.64, pp.47-61, 2013.
- Torrent, R. : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, *Materials and Structures*, Vol.25, No.6, pp.358-365, 1992.
- Torrent, R., Basheer, M., *et al.* : Non-destructive methods to measure gas-permeability, non destructive evaluation of the penetrability and thickness of the concrete cover, RILEM Report 40, pp.45-51, 2007.
- Valenca, J., L, M, S, Goncalves. *et al.* : Damage assessment on concrete surfaces using multi-spectral image analysis, *Construction and Building Materials*, Vol.40, pp.971-981, 2013.
- Yoshitake, I., Komure, H., *et al.* : Questionnaire investigation of surface deterioration of lining concrete in NATM tunnel, *Proceedings of ASEA-SEC-1*, pp.221-225, 2012.
- Zhenhua, Z., Ioannis, B., *et al.* : Detecting air pockets for architectural concrete quality assessment using visual sensing, *ITcon*, Vol.13, pp.86-102, 2008.
- Zhenhua, Z., Ioannis, B., *et al.* : Machine vision-based concrete surface quality assessment, *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol.136, No.2, pp.210-218, 2010.

- 秋山哲治, 鈴木 亮ほか: フィルム材を用いた型枠がコンクリート表層の耐久性向上に及ぼす効果に関する検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, pp.507-514, 2012.
- 浅井一彦, 国枝 稔ほか: 透水性型枠によるコンクリートの品質改善, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.369-374, 2004.
- 荒巻卓見, 大塚秀三ほか: コンクリート表面の色むらの官能評価に及ぼす検査条件の影響, ものづくり大学紀要, 第5号, pp.41-48, 2014.
- 石井明俊, 温品達也ほか: 熱可塑性樹脂シートの有無が表面気泡に与える影響に関する一考察, 土木学会第69回年次学術講演会, V-066, pp.131-132, 2014.
- 井上 翠, 澤本武博ほか: コンクリートの表層品質に及ぼす配合および養生方法の影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.68, No.1, pp.345-3518, 2015.
- 一宮一夫, 出光 隆ほか: 高流動コンクリートの打設条件が表面気泡特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.61-66, 1997.
- 一宮一夫, 出光 隆ほか: 高流動コンクリートの表面気泡におよぼす加振の効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.1243-1248, 1998.
- 一宮一夫, 出光 隆ほか: 粉体系および増粘剤系高流動コンクリートの表面気泡性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.541-546, 1999.
- 一宮一夫, 加藤優子ほか: 透水型枠工法適用時の表面美観に及ぼすコンクリートフレッシュ性状の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.1353-1358, 2004.
- 一宮一夫, 加藤優子ほか: 透水型枠の表面気泡低減効果と色むら発生に及ぼすフレッシュコンクリートの影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, pp.1027-1032, 2005.
- 稲川雪久, 吉武 勇ほか: 見栄えのよい覆工コンクリートの調査検討, NPO 法人臨床トネル工学研究所 小委員会報告書, Vol.1, pp.116-173, 2011.

- 内田 明, 中村敏夫ほか: 透水性型枠を用いたコンクリートの物性移動抵抗性に関する一考察, 土木学会第 66 回年次学術講演会, V-275, pp.549-550, 2011
- 海老剛行, 温品達也ほか: 締固め方法や熱可塑性樹脂シートの貼付方法が表面気泡に与える影響, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-065, pp.129-130, 2014.
- 大塚秀三, 中田善久ほか: プレキャスト製品における表面仕上がり状態の美観性に対する意識調査, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.31, No.1, pp.1693-1698, 2009.
- 大塚秀三, 中田善久ほか: 調合および施工要因の違いがコンクリート表面の色村に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.2, pp.271-276, 2007.
- 岡島達雄, 河辺伸二ほか: コンクリート素地仕上げの視覚心理的評価, コンクリート工学論文集, Vol.5, No.2, pp.95-102, 1994.
- 岡本 修, 大塚秀三ほか: 画像解析手法による打放しコンクリートの色むら評価その 1-2 画像解析による色むら評価方法の検討, 日本建築学会学術講演梗概集, A-1 分冊, pp.189-192, 2006.
- 奥野 昇, 嶋津幸一ほか: レーザー光線による覆工コンクリートのひび割れ調査方法の高性能化, 土木学会論文集, No.78, V-67, pp.195-200, 2005.
- 掛樋雅人, 平岡照規ほか: AHP を用いたアンケートによるトンネル覆工コンクリートの美観性調査, 土木学会第 67 回年次学術講演会, VI-013, pp.25-26, 2012.
- 画像情報処理振興協会: ビジュアル情報処理—CG・画像処理入門—, pp.29-44
- 片野啓三郎, 川西貴士ほか: コンクリートの表面美観確保に関する諸技術: 大林組技術研究所報, No.76, pp.1-6, 2012.
- 河辺伸二, 岡島達雄ほか: 水平振動方式によるコンクリートの締固め効果と表面気泡, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.943-948, 1999.

北 俊彦, 岡田明憲, 平間昭信, 寺沢正人: 傾斜コンクリート面のアバタ抑制剤 (材) の性能評価試験, 土木学会第 64 回年次学術講演会, VI-070, pp.139-140, 2009.

久保昌史, 天野 勲ほか: 赤外線画像と可視画像を併用した画像診断技術の開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.33, No.1, pp.1847-1852, 2011.

黒田泰弘, 辻埜真人ほか: 打放しコンクリートの美観向上に関する研究-超撥水機構を有する型枠による表面気泡および色むらの抑制-, 清水建設研究報告, Vol.93, pp.47-56, 2016.

計測リサーチコンサルタント: トレント法によるコンクリートの透気試験, (URL : <http://www.krcnet.co.jp/topics/topics76.html>) 2016.10.現在

高速道路株式会社: トンネル施工管理要領 平成 28 年 7 月, 2016

国土交通省東北地方整備局: コンクリート構造物の品質確保の手引き (案) (橋脚, 橋台, 函渠, 擁壁編) 平成 27 年 12 月, 2015.

国土交通省東北地方整備局: コンクリート構造物の品質確保の手引き (案) (トンネル覆工コンクリート編) 平成 28 年 5 月, 2016.

国土交通省東北地方整備局: 平成 26-29 年度国道 45 号気仙沼横断橋小々汐地区(株)工工事特記仕様書, 2014.

児玉総一郎, 三田勝也ほか: コンクリート表面に生じる色むら発生機構に関する実験的検討, 土木学会第 64 回年次学術講演会, V-283, pp.565-566, 2009.

小林正和, 伏見友宏ら: 覆工表層部の品質向上のために透水シートを適用, トンネルと地下, Vol.47, No.8, pp.19-26. 2016.

小柳 合, 岩瀬裕之ほか: 脱水型枠の使用によるコンクリートの性能改善, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.97-102, 1988.

御領園悠司, 前田敏也ほか: 超撥水型枠を有する型枠の材質と勾配がコンクリートの表面気泡に及ぼす影響, 木学会第 70 回年次学術講演会, V-283, pp.565-566, 2015.

コンクリート構造物の品質確保の手引き (案) (橋脚, 橋台, 函渠, 擁壁編) 平成 27 年 12 月, 2015.

坂田 昇, 渡邊賢三ら: コンクリート構造物の品質向上と表層品質評価手法, コンクリートジャーナル, Vol.50, No.7, pp.601-606, 2012.

ジェオフロンテ研究会覆工分科会覆工コンクリート標準仕様 WG: 最近の覆工技術に関する調査報告書, 2013.

渋谷能成, 村田和也ほか: 熱可塑性樹脂シートの存置期間が物質透過性に与える影響, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-064, pp.127-128, 2014.

出頭圭三, 篠田佳男ほか: スリット付型わくを用いて打設したコンクリートの基礎的物性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.4, 1988.

白根勇二, 舟橋政司ほか: 施工条件や養生条件がコンクリート表層部の品質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.32, No.1, pp.1313-1318, 2010.

瀧聞有作, 堂園淳一ほか: 中流動コンクリートにおける美観性の検討, 土木学会第 69 回年次学術講演会, VI-014, pp.27-28, 2012.

竹中 寛, 末岡英二ほか: 透水型枠工法を用いたコンクリートの表面品質の改善に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.31, No.1, pp.955-960, 2009.

陳 海峰, 河辺伸二: 水平振動方式によるコンクリートの表面状態, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.1, pp.771-776, 2007.

鉄道建設・運輸施設設備支援機構: 山岳トンネル設計施工標準・同解説 平成 20 年 4 月 pp.100-101, 2008.

鉄道総合研究所：RRR，Vol.70，No.10，pp.28-31，2013.10.

土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，2013.

土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，2013.

土木学会：構造物表層のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（JSCE334委員会）第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集，2012.

西尾壮平，上田 洋ほか：表面色によるコンクリート表層部の物質移動抵抗性の非破壊評価に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.33，No.1，2011.

日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術'09，2009.

日本道路協会：道路トンネル技術基準（構造編）・同解説 平成15年11月，pp.121-124，2003.

日本トンネル技術協会：トンネル技術白書 ー日本の山岳トンネル施工技術の現況と変遷ー，pp.5-68-5-72，2006.1.

日本非破壊検査協会：コンクリート構造物の目視試験方法，2012.

温品達也，坂田 昇ほか：表層透気試験で得られたコンクリート表層品質の判定結果に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.34，No.1，pp.1738-1743，2012.

農林水産省構造改造局：土地改良事業計画設計基準 平成8年10月，p.251，p.317，1996.

林 和彦，細田暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質評価手法に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.1，pp.82-97，2013.

早川健司，水上翔太ほか：表面透気試験によるかぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2，Vol.68，No.4，pp.385-398，2012.

平岡照規, 掛樋雅人ほか: トンネル覆工コンクリートの仕上がりにおける美観性 (見栄え) の重みについて, 土木学会第 67 回年次学術講演会, VI-012, pp.23-24, 2012.

平田周作, 村田和也ほか: トンネル覆工における熱可塑性樹脂シートを用いた表面気泡低減効果, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-067, pp.133-134, 2014.

平野正幸, 前田智之ほか: トンネル覆工コンクリート側壁部に生じる表面気泡低減のための基礎実験, 土木学会論文集 F1, Vol.71, No.2, pp.95-105, 2015.

平野正幸, 前田智之ほか: 表面気泡の生じたトンネル覆工コンクリート側壁部における透気係数, 土木学会第 69 回年次学術講演会, VI-066, pp.131-132, 2014.

平野正幸, 吉武 勇ほか: トンネル覆工コンクリートの側壁に生じる表面気泡の評価に関する基礎研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.67, No.1, pp.252-258, 2013.

藤本 泉, 福島民夫ほか: 型枠剥離剤がコンクリート構造物の表面美観に及ぼす影響, 土木学会第 55 回年次学術講演会, V-426, 2000.

前田哲宏, 松田孝充ほか: 透水性型枠を使用したコンクリートの表層および内部強度性状に及ぼす再振動締固めの影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.34, No.1, pp.345-360, 2002.

前田智之, 小笠原哲哉ほか: 内部に鋼製支保工を含む狭隘な巻立空間の覆工コンクリートの施工, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.36, No.1, pp.1612-1617, 2014.

前田智之, 原田沙里ほか: デジタルカラー画像解析による締固め過程のコンクリート表面気泡の評価, 材料, Vol.66, No.3, 2017. (平成 29 年 3 月発行予定)

前田智之, 原田沙里ほか: 傾斜があるコンクリート基礎壁面における表面気泡低減効果の検証, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-227, pp.453-454, 2015.

丸屋 剛, 堀口賢一ほか: ウェーブレット変換を用いた床版コンクリートのひび割れ調査の実用化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.2, pp.691-696, 2007.

三田勝也, 中島裕幸ほか: コンクリートの表面気泡の発生機構に関する実験的研究, 土木学会第 64 回年次学術講演会, V-451, pp.899-900, 2009.

依田侑也, 根本浩史ほか: 超撥水機構を有する型枠を用いたコンクリートの表面気泡抑制効果, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-282, pp.563-564, 2015.

依田侑也, 辻埜真人ほか: 打放しコンクリートの美観向上に関する研究, 日本建築学会学術講演概要集, 2015 (材料施工), 1066, pp.131-132, 2015.

渡邊賢三, 坂田 昇ほか: 目視調査に基づくコンクリートの表層品質評価手法と品質向上に資する取組み, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.34, No.1, pp.1354-1359, 2012.

倭富士桜, 辻 彰敏ほか: コンクリートの表面気泡の低減について, コンクリート工学年次講演会論文集, No.8, pp.253-256, 1986.

本論文に関する著者の発表論文

- (1) 平野正幸, 前田智之, 本間宏記, 原田沙里, 吉武 勇: トンネル覆工コンクリート側壁部に生じる表面気泡低減のための基礎実験, 土木学会論文集 F1, Vol.71, No.2, pp.95-105, 2015.10.
【本文との関連: 第3章】
- (2) 前田智之, 原田沙里, 森内麻衣, 藤原正稔, 吉武 勇: デジタルカラー画像解析による締固め過程のコンクリート表面気泡の評価, 材料, Vol.66, No.3, 2017.3.
【本文との関連: 第4章】
- (3) 原田沙里, 前田智之, 森内麻衣, 吉武 勇: トンネル覆工コンクリートの表面品質に与える型枠被覆シート材の影響, 土木学会論文集 F1, Vol.72, No.2, pp.76-81, 2016.11.
【本文との関連: 第5章】
- (4) Sari HARADA, Tomoyuki MAEDA, Masayuki HIRANO and Isamu YOSHITAKE : Reducing Bug-Holes on Tunnel Lining Concrete by Using Covering Sheets, *Proceedings of ISEC-8*, pp.689-694, 2015.11.
【本文との関連: 第5章】
- (5) Tomoyuki MAEDA, Sari HARADA, Mai MORIUCHI and Isamu YOSHITAKE : Reevaluation of the Effect of Covering Sheets for Reducing Bugholes on Tunnel Lining Concrete, *Proceedings of EURO-MED-SEC-1*, pp.117-122, 2016.5.
【本文との関連: 第5章】
- (6) Tomoyuki MAEDA, Hiroki HONMA, Masayuki HIRANO and Isamu YOSHITAKE : Permeability of Tunnel Lining with Air/Water Bubbles on Concrete Surface, *Proceedings of ASEA-SEC-2*, pp.321-325, 2014.11.
【本文との関連: 第6章】
- (7) 前田智之, 小笠原哲哉, 鶴岡 正, 小林勇貴: 内部に鋼製支保工を含む狭隘な巻立空間の覆工コンクリートの施工, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1612-1617, 2014.7.
【本文との関連: 第6章】

謝 辞

山口大学大学院創成科学研究科 吉武 勇准教授の懇切丁寧なご指導のもと、本研究をすすめてまいりました。吉武准教授には、研究で直接的なご指導を頂き、これまで現場業務に従事することが多く、研究経験が少ない著者に対し、研究者としての心構えから、研究の進め方、論文の取りまとめ方など多岐にわたり、ご指導・ご支援いただきました。心から感謝の意を表しますとともに、厚く御礼申し上げます。

ご多忙な公務の中、本論文審査の副査を務めて頂きました山口大学大学院創成科学研究科 清水則一教授、関根雅彦教授、中村秀明教授、高海克彦准教授には、論文の細部にわたり、適切なるご助言・ご指導いただくとともに、施工会社に所属する研究者としての心得等についてもご指導いただきました。謹んで御礼申し上げます。

また、NPO 法人臨床トンネル工学研究所 理事長 中川浩二博士（山口大学名誉教授）には、著者が学生のころから多くのご指導を頂き、「技術者のロマン」が詰まった土木の世界に進むきっかけをつくって頂きました。そして本研究を進めるにあたり、多大なご協力を頂くとともに、最後まで温かく見守っていただきました。ありがとうございました。

研究にあたり、型枠や材料、情報のご提供を頂きました岐阜工業株式会社の澤田哲真氏、鷺見直美氏、棚瀬富弘氏、平岡照規氏、株式会社翔の稲川雪久氏、また材料のご提供を頂きました日東電工株式会社様には厚く御礼申し上げます。

アプリケーションテクノロジー株式会社の佐藤孝一氏、吉野展由氏は、気泡の定量評価にあたり、著者の専門外となる知識と貴重なご意見を賜り、深く感謝申し上げます。

本研究を具体的に進めるにあたり、ご協力頂いた山口大学 施設材料学研究室の大学院生、4年生には大変感謝しております。本研究の1~2年目は供試体を多く作製し、材料準備から練混ぜ、打設、脱型と一連の製作行程にご協力いただき大変感謝しています。当時学生であった中電技術コンサルタント株式会社 平野正幸氏、独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構 森内麻衣氏、山口大学 大学院理工学研究科博士前期課程2年 原田沙里氏、同 社会建設工学科 4年 稗田真大氏には、研究を進めるうえで、実験、データ整理、論文作成等でご尽力いただきました。心より深くお礼申しあげます。特に、原田沙里氏は3年間の長期にわたり多大なるご協力を頂きました。本当に心から感謝しております。

そして、本研究を遂行する機会をつくって頂き、大学院入学の際には背中を押して頂くとともに、行き詰まった際に参考となる技術的助言や適切なご指導をくださいました五洋建設株式会社 技術研究所 土木技術開発部長 藤原正稔氏、同部長 小野滋久氏には深く感謝しております。また、現場業務と研究を両立する中で、スケジュール調整や業務負担をしていただいた五洋建設株式会社 名古屋支店 古屋トンネル工事事務所 所長 成瀬哲

哉氏，所長代理 前田 寛氏，工事主任 吉友郁哉氏，橘 雅則氏，上野 淳氏，渡部 剛氏には深く感謝いたします。

上述した方々以外にも多くの方々からご指導とご協力を頂きました。本研究は著者一人の成果ではなく，数多くの方々のご支援なくして完成し得なかったものです。ご指導，ご協力を頂きました皆様に対して，あらためて感謝いたします。本当にありがとうございます。ありがとうございました。

本論文を結ぶにあたり，見守ってくれた家族に感謝します。特に，出産・育児という大変な時期にもかかわらず，本研究の遂行に協力し，支えてくれた妻 牧子に感謝します。そしてその間，いい子にしていた愛息寛太，ありがとう。心より感謝いたします。

2017年3月
前田 智之