

無人航空機(ドローン)による構造物への補修材等吹付けの適用可能性の検証

西武建設株式会社 正会員 ○二村憲太郎, 井上靖雄
芝浦工業大学 正会員 伊代田岳史

1. 緒言

橋梁やトンネルなどのインフラでは、高所作業車や仮設足場を使用して主として人力で構造物点検から補修、補強工事を実施している。これら工種ではコンクリート等主要材料や大型重機を多く使用しないため、工事費の内訳で人件費は高い割合を占める。また、高所での人力作業が多くなるため墜落・転落災害の発生リスクも高い。

近年、構造物点検業務を省力化する目的で汎用性の高い無人航空機（以下、ドローン）の活用が期待されており、近い将来簡便かつ安全な点検方法の確立が予想される。今回、この点検業務のみならず、ドローンに補修材等の吹付け機能を付与することにより、補修工事への適用可能性を検証する。

2. 実験

2.1 実験機の仕様

実験機は機体と電源、ポンプユニット、送信機および機体管理用のノート型パーソナルコンピュータ(以下、PC)から構成される。機体の外観を写真1に示す。

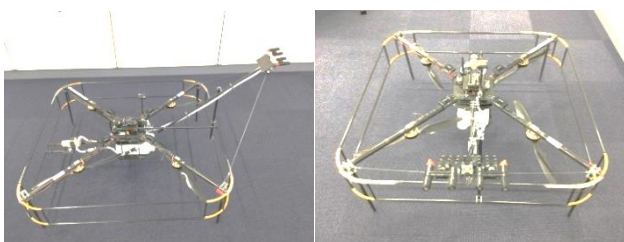


写真1 実験機外観（左：横方向、右：正面方向）

ベース機体の諸元を表1に示す。

表1 ベース機体諸元

ベース機体	PG700 (enRoute社)
フライトコントローラ	Pixhawk (3DR社)
ペイロード	4kg
電源・電源ケーブル	充電式リチウム電池 (350Wh, 22.2v) 並列 地上配置, 延長15m
飛行可能時間	30分

ベース機体は吹付け材を吐出するノズル部分とロ

ーターの離隔を確保する目的でシャフトの下側にローターを装備したクアッド型機体を採用し、離隔はノズルアーム最大仰角時に 600mm を確保した。また、構造物への接触対策としてガードフレームを装備したものを選定した。

ポンプユニットは、ポンプからタンクに入れた吹付け材を圧送し、ノズルアームを経由してノズルから噴射する装置である。ポンプ圧送能力は最大毎分 1.6 リットルの噴射量でポンプ重量は約 1kg の軽量タイプを採用した。ポンプユニットの構成を図1に示す。

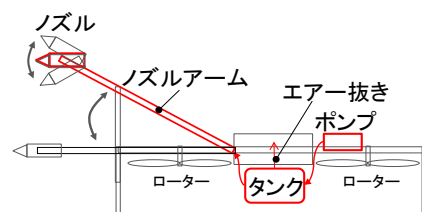


図1 ポンプユニット構成

ポンプは機体後方に配置した。ノズルおよびノズルアームとポンプの重量のバランスをとり重心を機体中央とした。タンク部を写真2に示す。



写真2 タンク部外観

タンクは吹付け材の吐出により重量が変化するため、機体中央の重心位置に配置した。タンクは最大 2 リットル積載可能とした。タンクを合わせた機体の乾燥重量は 4.5 kg となった。タンクのエアー抜きには、飛行時の揺れによる逆流を防止するため上向きの配管を取り付けた。ノズルは 1~4 個とし、それぞれミスト形状から水流形状までノズルを回すことで調整

キーワード 無人航空機(ドローン)、省力化、補修材、吹付け、ケイ酸塩系含浸材、予防保全

連絡先 〒359-8550 埼玉県所沢市くすのき台 1-11-2

西武建設株式会社 土木事業部 エンジニアリング部 Tel:04-2926-3421 E-mail:k-nimura@seibu-const.co.jp

できる構造とした。またノズルの向きは上下左右方向に手動で可変できるようにした。ノズルアームは仰角を水平から 40 度まで調整できる構造とした。

送信機を図 2 に示す。



図 2 送信機外観外略図

送信機には吹付け材の噴射量を調整するスイッチを装備した。スイッチは入り切りおよび 2 分の 1 出力の 3 段階とした。さらに無段階出力つまみで噴射量を調整できるようにした。

飛行中のローター回転によって生じる気流が機体方向に流れることで、吹付け材が機体に掛かる、リバウンド現象による故障が懸念された。このため機体中央付近の各種電子機器を透明なビニールで防護した。また、上空が遮蔽された非 GPS 環境下での飛行となるため、AltHold(気圧センサーによる高度維持)モードで飛行させた。さらに、誤作動による操縦不能を防止するために、バッテリー低下警告機能を除いたフェールセーフ機能を解除した。なお、この場合のフェールセーフ機能は、送信機や GPS からの電波受信不能・不良時、および設定範囲外を飛行した場合に離陸位置に自動帰還する機能である。機体の状態や飛行ログを記録するための PC は粉塵の影響による故障が心配されたため移動用の車両内部に搭載し、アンテナのみを外部に張り出した。ソフトは「Mission Planner(ver.1.3.34)」を使用した。

2.2 実験場所、条件と体制

実験は 2015 年 12 月 21 日から 23 日までの 3 日間実施した。実験場所はトンネルの覆工コンクリートを利用した。トンネルは NATM 構造で延長 208m、アーチ部センターで高さ約 7m、内幅は約 15m であった。トンネルの側壁を壁方向、アーチ部センター付近を天井方向と設定した。トンネル坑内は風速 0~2m であった。掘削が完了していたため坑内換気設備は無く、覆工コンクリート養生環境確保のため坑口をシートで遮蔽していた。実験参加者は、ドローン操縦士 1 名、計測員兼撮影者 1 名、安全管理者 1 名で実施した。なお、操縦士の累積飛行経験時間は約 15 時間であった(機体

メーカーでの講習会、飛行訓練時間含む)。

2.3 人身への安全対策

飛行エリアでの安全対策として、飛行前に吹付け予定箇所からトンネル延長方向両坑口に向かって 10m 以上離隔を確保した位置に三角コーンによる明示をし、第三者の立ち入りを制限した。トンネル工事に使用するミキサー車等車両通過時は安全管理者が車両を一旦停止させてから機体を着陸させ通過させた。また、トンネルは遮蔽された構造であり、飛行音が非常に大きいため安全管理者から操縦士等への合図は LED 誘導灯とホイッスルを利用した。ドローン飛行時粉塵が発生するため防塵マスクのほか保護メガネの着用や、事前に床面を湿潤状態にするなどの対策が必要となる。液体である吹付け材使用時の感電対策として電源接続作業時は保護手袋の着用を義務付けた。

2.4 機体の墜落対策

今回、吹付け面の状況を接近して撮影するためウェアラブルカメラを搭載したが、ワイヤレス接続(Wi-Fi)は使用せず直接カメラを操作した。これは送信機の電波との混線を予防するためである。機体の点検はマニュアルに沿って操縦士、安全管理者の 2 名で飛行日ごとに確認し、チェックシートに記録した。また、第三者賠償責任保険のほか機体補償保険への加入によりリスク転嫁を図った。今回は生じなかったが、精密機器への粉塵付着による不具合の発生などを想定した機体構造も検討を要する。

2.5 実験に必要な届出

本実験にあたり国土交通省航空局との通常の「無人航空機の飛行に関する許可・承認申請書」手続きのほかに吹付け行為に関して同局への許可が必要となる。具体的には「人又は物件から 30m 以上の距離が確保できない飛行」「危険物の輸送」「物件投下」の 3 項目が該当する。申請には使用する吹付け材の安全データシート(SDS)の添付が必要である。

2.6 吹付け材の選定

使用した含浸材の仕様を表 2 に示す。

表 2 使用吹付け材概略

含浸材	比重	設計塗布量(ℓ)	粘度(cP)
A	1.2	0.4 (0.2×2回)	6~8
B	1.05	0.4~0.6 (0.2~0.3×2回)	1~2

A,Bとも塗布後無色透明

実験に使用した補修材はケイ酸塩系含浸材(以下、含浸材)を選定し、粘度の異なる 2 種類を使用した。それぞれメーカーで定められた塗布量以上を満たすように吹き付けた。

2.7 吹付けノズル調整

コンクリート面へ吹き付ける前にノズルを調整した。ノズルからの噴射状況を図 3 に示す。



図 3 ノズルからの噴射状況

この調整の目的は機体へ吹付け材のリバウンドを防ぐとともに、吹付けロスを小さくすることで最大の吹付面積を確保するためである。調整方法は機体をアイドリング状態(離陸前の状態)に保持して、水を使用して水流形状からミスト形状にノズル 1 本ずつ捻り、リバウンドが無い最適な位置に調整した。リバウンドが認められた場合、ただちに停止しモーター部分や機体に付着した水分を拭き取った。水での調整を終えたあと含浸材 A を同じ方法で調整したが比較的高い粘度にもかかわらずノズル調整位置は水とほぼ同位置であった。ノズル調整のうえでは目視や指触では粘度による明確な違いは判明しなかった。含浸材 B は水と粘度が同程度であったため調整は実施しなかった。なお、調整に要した時間は 5 分程度である。

2.8 壁方向への吹付け実験

壁方向への吹付け状況を写真 4 に示す。



写真 4 壁方向吹付け状況

壁方向への吹付けにおいて含浸材 A を使用しサイクルタイムを計測した。1 回の吹付け面積を 3m^2 (高さ $1\text{m} \times$ 幅 3m) とした。各サイクルの作業工程は「離陸か

ら吹付け開始」、「吹付け状態」、「吹付け終了から着陸まで」を 1 サイクルとし、合計 3 サイクル計測した。

「離陸から吹付け開始」とは送信機の始動レバーを倒した瞬間から吹付けスイッチを入れるまでの時間を示す。「吹付け状態」とは吹付けに要した時間を示す。

「吹付け終了から着陸まで」とは吹付けスイッチを切ってから着陸し停止操作の後にローターの回転が停止するまでの時間を示す。試験飛行および飛行訓練を約 1 時間程度実施後に実験を開始した。吹付けノズル数は 4 個および圧力は最大に設定した。機体の移動は機体を吹付け位置の上端に移動させ、吹付けスイッチを入れてから左右に往復し、順次下方へ移動しながら吹き付けた。吹付けムラを目視で確認した場合は再度その地点に移動し吹き付けた。表 3 に結果を示す。

表 3 サイクルタイム

実験回数		1	2	3	平均
時間 (秒)	離陸～吹付開始 (GL+2m)	6	6	4	5.3
	吹付け状態	62	47	56	55.0
	吹付終了 (GL+1m)～着陸	5	4	5	4.7
	合計	73	57	65	65.0

※地上でのアイドリング時間は除外

離着陸に要する時間は 5 秒前後とバラツキが少ないが、吹付け状態は最速 47 秒から最遅 62 秒まで 14 秒の差が生じた。この原因は、非 GPS 環境下での AltHold モードによる飛行となるため、トンネル坑内の通風や機体から生じる風による影響から水平位置(x,y 方向)の固定ができず、操縦者の手動による水平位置の微調整が必要となったことによる。この微調整が無駄な機体の揺動につながり、吹付けにムラが生じた。このムラの再吹付を実施するために、さらに移動に時間を要した。また、機体はコンクリート面に対して前後にも揺動するため、コンクリート面からの離隔を微調整するたびにノズルが大きく上下し、予定範囲を超えて多く吹き付けた。これはノズルが機体と一体となっているためである。吹付け形状を写真 5 に示す。



写真 5 壁方向吹付け形状

2.9 天井方向への吹付け実験

天井方向の吹付け状況を写真 6 に示す。



写真 6 天井方向吹付け状況

天井方向においてはリバウンド量が多くなる傾向を示した。これは機体上空が遮断されローターによる気流が側方から流れ込むためと考えられる。そのためノズルの噴射をより水流形状に近づけたが、水流形状で面的に吹き付けるためには、機体を左右に揺動させなければならなかった。また、リバウンド防止のために飛行の向きは秒速 0.5m 程度の後進とし、トンネル坑内の通風の下流から上流へ向かって飛行した。図 4 に要領図を示す。



図 4 天井吹付け要領図

飛行は左右への機体の揺らし(ロール)と後進(ピッチ)を同時に操作しなければならず、飛行にはかなりの熟練を要すると考えられる。写真 7 に天井方向への吹付け形状を示す。



写真 7 天井方向吹付け形状

3. 調査結果

3.1 壁方向への吹付け量と設計吹付け量の比較および吹付け量増加の要因

壁方向への単位面積当たりの吹付け時間および吹付け量を表 4 に示す。

表 4 1 m²の吹付けに要する時間と量

	時間(秒)	吹付け量(l)	設計塗布量(l) (1回目)※
含浸材A	18.3	0.59	0.20

※含浸材Aは2回塗りのため最終的な設計量は0.40lとなる。

※含浸材Bはデータが1サイクルのみであったため今回記載せず。

1 回の吹付け量が設計塗布量の約 3 倍となった。含浸材 B の設計塗布量(表 2 参照)は 0.2~0.3l であるため、設計塗布量と吹付け量との比較は概ね 2~3 倍程度となると考えられる。吹付け量が増加した要因として、以下のことが考えられる。第一に、リバウンドを防ぐためノズルを水流形状に近い形状としたためである。これによりムラが生じやすく、再吹付けにより吹付け量が増加した。第二に、非 GPS 環境下での操作であるため、移動から停止する場合、反対方向への動き(カウンター)を加えなければならず、その瞬間揺動が生じ吹付け量が増加した。第三に、機体の移動とともに給電ケーブルを引きずることで機体のバランスが崩れ揺動が生じ吹付け量が増加した。これら機体の機能、操作性の低下が吹付け量を増加させたと考えられる。

3.2 天井方向への吹付けの適用性

天井方向への吹付けは、ノズルを水流形状に近づけるため均一な面状に吹き付けることが操作を含めて困難であった。面状に吹き付けるには機体とノズルの離隔をさらに離すなどの工夫が必要である。活用できる例としてピンポイントもしくはひび割れ等線状部分に吹き付ける場合は有効であると考えられる。ただし、天井への接触を考えた場合、墜落リスクが高いことから機体上部への接触防止の装備が必要となる。

4. 考察

本実験において、ドローンによる補修材の吹付けは可能であることが実証された。これは高所作業の削減につながり、安全性の向上や仮設足場設置コストの削減が期待できる。しかし現時点では、吹付け量が設計の塗布量より大幅に増加することから、コスト削減効果が限定される。そのため、材料コストを抑えるために吹付け量の低減が課題となる。具体的には、吹付けムラを減少させ、安定した飛行が可能となる機体の開発が必要である。

壁方向と天井方向への吹付けを比較した場合、天井方向は吹付けが困難で、用途がピンポイントの吹き付けに限定された。天井方向を面的に吹き付ける場合は、それに応じた機体の形態や性能の検討が必要となる。

エアフレームを利用した覆工養生システム

東急建設(株) 正会員 ○満尾 淳
東急建設(株) 大峰 秀之
東急建設(株) 寺山 拓也

1. はじめに

近年、山岳トンネル工事においては、覆工コンクリートの品質確保が大きな命題となっており、多くの振動締固めシステムや養生システムが各社で開発され実用化されている。

養生システムに関しては、種々の方法が提案されているが、その多くは大規模な鋼材フレームを用いるものであり、組立、移動、解体などにおいて多大な労力を要する。そこで当社では、エア注入式のフレームを用いた養生システムを開発し、山岳トンネル工事に適用した（写真－1）。フレームをエア注入式にすることにより軽量化が図れ、組立、移動、解体が容易にかつ、安全に行うことが可能となった。本報では、その養生システムの概要と適用結果を報告する。

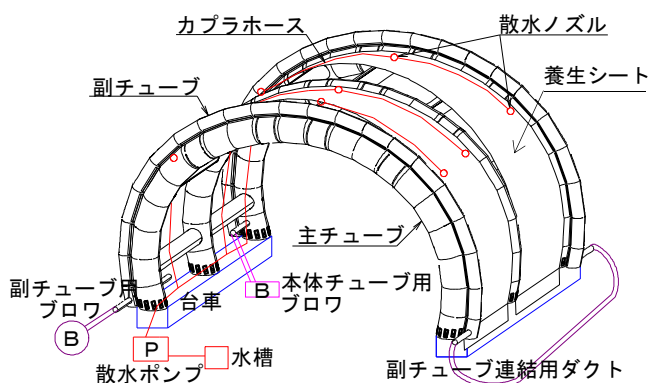


写真－1 装置全景

2. 養生システム概要

本養生システムは、主チューブ、副チューブと養生シートで構成される。移動台車に主チューブ脚部を固定した後、ブロア設備により空気を注入することによりフレームが自立する。その後、散水設備を取り付けてエアフレームは完成する。覆工コンクリート表面には、チューブ、シートで覆われた密閉空間が形成され、ここにミストを発生させることにより湿潤状態とすることが可能となる。また、本システムの特徴として、主チューブには伸縮機構が装備されており、二車線道路の多彩なトンネル断面にも対応可能となっている。

図－1 にシステム構成図を、表－1 に使用機器を示す。



図－1 養生システム構成図

表－1 使用機器一覧（1 スパン当り）

名称	仕様	数量
台車設備	養生システム移動用	2 台
エアフレーム	－	1 式
ブロワ	主チューブ用 1.5kw	1 台
ブロワ	副チューブ用 0.4kw	1 台
ミストポンプ	200V 3.7kw	1 台
散水ノズル	最小通路径：0.15 mm	9 個
ホース	1/4, 3/8	1 式
接続プラグ等	1/4, 3/8	1 式

キーワード トンネル、覆工コンクリート、保湿養生、エアフレーム、トレント試験

連絡先 〒150-8340 東京都渋谷区渋谷 1-16-14 東急建設株式会社 土木技術設計部 TEL 03-5466-6539

3. 現場導入

2014 年 12 月から、鹿児島県内の山岳トンネル現場へ本養生システムの試験導入を実施し、組立～解体の作業性と、覆工コンクリートの養生効果を確認した。

3.1 装置組立

本養生システムの部材最大重量は、エアフレーム本体で 1 スパンあたり約 300 kg である。その他の部材、資機材は軽量であり、組立・移動時にはクレーン等の重機は必要なく、ほぼ人力での作業が可能である。組立順序図を図-2 に示す。

従来の養生システムは、装置の組立に移動式クレーンを常時必要とし、1 スパンの組立に約 1 日、作業員 6～7 名程度必要であるが、本養生システムでは 5 名程度の作業員にて約 3 時間で組立が可能である。移動時には、外側副チューブのみ空気を抜き移動する。また、解体、搬出も容易である。養生終了後エアフレームの空気を抜き、搬出するまで約 2 時間 30 分と非常に短時間に作業を終えることが可能である。

また、エアフレームは空気を注入すると自立するので、組立、解体作業は散水ノズル、ホースの設置以外は高所作業車を使用せず、地上での作業となるので、安全性も向上した。写真-2～5 にエアフレーム設置状況を示す。

3.2 実施結果

(1) 保湿効果の確認

覆工コンクリートの養生期間は 7 日とし、1 日 2 回、各 2 時間程度の散水を実施した。エアフレーム内に温・湿度計を設置し、本装置の密閉性・保湿性の確認を実施した。養生期間中の温度は大きな変動はなく、湿度は常に 80% 以上が確保されていることが確認できた。

(2) トレント（透気性）試験他の測定結果

養生効果の検証を目的として、コンクリートの表面透気係数 KT 値、中性化速度係数の測定を行った。本試験方法は日本コンクリート工学会、品質試験方法と実施工時諸特性との相関性評価研究委員会「施工の確実性を判定するためのコンクリートの試験方法とその適用性に関する研究報告書」¹⁾ で実施された共通試験で取り上げられている試験方法である。表面透気係数 KT 値の測定は、Torrent 法²⁾ に基づく二重チャンバー方式の透気性試験機を用いた。測定

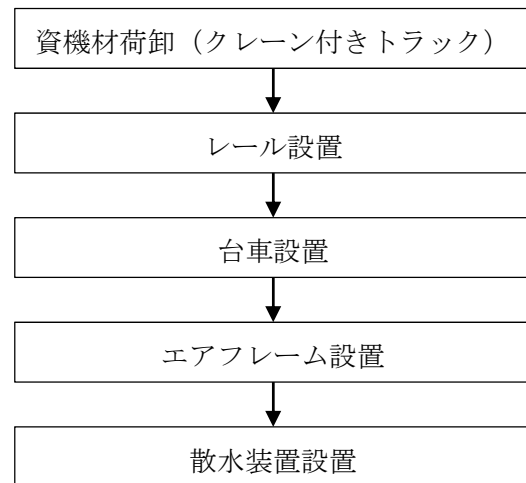


図-2 組立順序図



写真-2 レール・台車設置



写真-3 エアフレーム敷き広げ

では内部セル内を真空ポンプにより減圧し、減圧を停止してからの復圧を時間変化として計測し、その測定結果から表面透気係数 KT 値を求めるものである。図-3 に示すように、二重チャンバー方式である本試験方法は、内部セルと外部セル内の圧力を平衡させて透気性を評価するため、シングルチャンバー法で問題となる極表層のスキンといわれる脆弱層の影響を排除でき、表面から数センチの透気性を評価できるものである。写真-6 に試験状況を示す。表面透気性試験を実施する箇所では、試験前に覆工コンクリートの表面含水率を測定した。

測定位置は図-4、図-5 に示すように覆工ブロック 106～108BL の S.L.付近で 5 箇所、肩付近で 3 箇所行った。試験結果を表-2 に示す。

中性化速度係数は、既往の研究³⁾ およびコンクリート標準示方書⁴⁾ より算出した。

表面含水率は、養生をしていない区間と比較してエアフレームを設置した区間の方が高い結果となった。また、S.L.付近と肩付近では、S.L.付近の方が高い結果となった。これは肩付近の方が、風が吹抜けやすく、コンクリート表面から水分が蒸発しやすかった可能性が考えられる。

表面透気係数 KT 値は、エアフレームを設置した区間の③107BL-S.L.付近が最も小さく、養生していない区間の⑤108BL-S.L.付近で最大となった。肩付近と比較し S.L.付近の表面透気係数 KT 値のバラつきが大きいのは、コンクリート表面に表面気泡が多く発生していることが影響していると考えられる。

既往の研究を参考にして算出した中性化速度係数は、配合や環境条件を考慮したコンクリート標準示方書から求まる中性化速度係数よりも全体的に小さくなる傾向を示した。なかでもエアフレームを設置した区間の方が小さくなることが確認された。

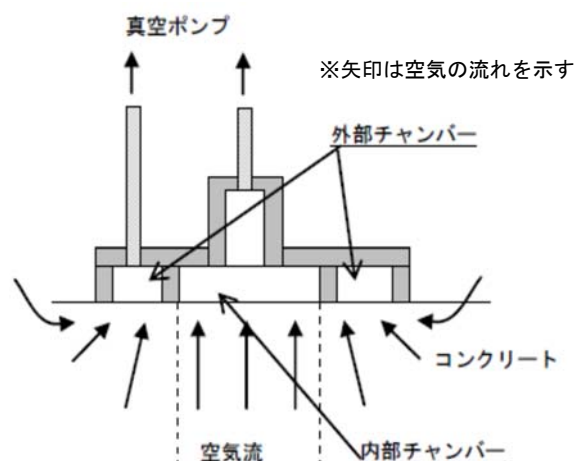


図-3 透気性試験概念図



写真-4 空気注入状況



写真-5 設置完了

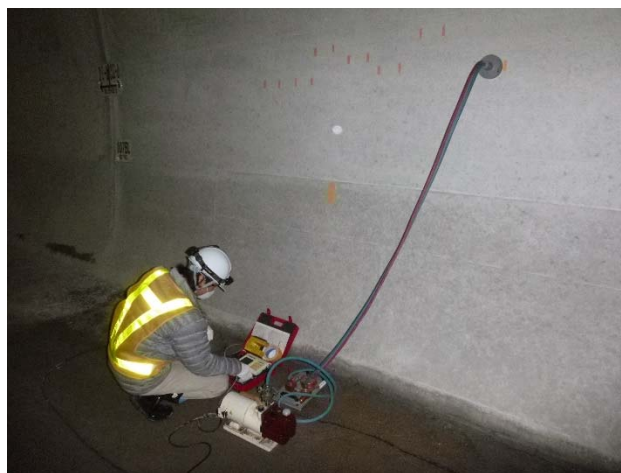
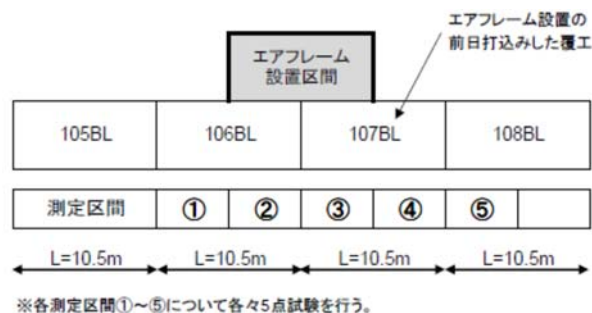
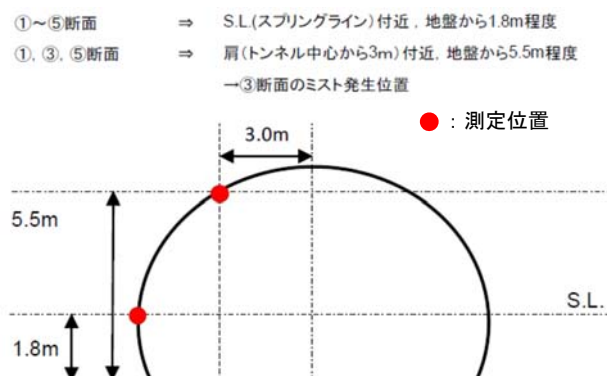


写真-6 透気性試験状況



図－4 測定位置平面図



図－5 測定位置断面図

表－2 試験結果一覧

測定区間	測定位置	養生条件	表面含水率 (%)	表面透気係数 KT 値 ($\times 10^{-16} \text{m}^2$)	中性化速度係数 ($\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$)	
					既往の研究 ³⁾ から算出した値	コンクリート標準示方書 ⁴⁾
①106BL	S.L.付近	なし	6.0	5.41	2.83	4.04
	肩付近		6.0	7.01	2.94	
②106BL	S.L.付近	エア フレーム	7.5	4.60	2.75	
③107BL	S.L.付近		6.8	3.73	2.66	
	肩付近		6.3	5.49	2.83	
④107BL	S.L.付近		5.6	9.40	3.08	
⑤108BL	S.L.付近	なし	5.7	11.77	3.18	
	肩付近		5.6	8.53	3.03	

4. おわりに

エアフレームを用いた養生システムの効果を、コンクリートの表面透気係数 KT 値や中性化速度係数を測定することにより確認した。その結果、養生をしていない区間よりも表面透気係数 KT 値や中性化速度係数は小さくなることが確認できた。これは本養生システムの効果により、覆工コンクリート表面部が緻密になったものと考えられる。本養生システムは、エアフレーム自体が自立構造であることから、形状保持のための鋼材フレームなどを必要としないため、組立・移動・解体を短時間かつ安全に行うことができる。その反面、重機との接触などに対するリスク回避対策が必要となるなど、留意しなければならない点も多く、今後、本養生システムの本格的な適用を図りながら、より現場に適したシステムへと改善を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：品質試験方法と実施工時諸特性との相関性評価研究委員会「施工の確実性を判定するためのコンクリート試験方法とその適用性に関する研究報告書」，2009.7
- 2) Torrent R. and Frenzer, G. : A method for the rapid determination of the coefficient of permeability of the covercrete, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering, p.985, Sept.1995
- 3) 小野聖久，上東泰：非破壊試験による充実性評価とコンクリートの耐久性に関する考察，土木学会第 60 回年次学術講演会，5-259，2005.9
- 4) 土木学会：2012 年度制定コンクリート標準示方書【設計編】，p.147，2012.1