

# 国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of  
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1177

December 2021

## 発泡ウレタンによる 空港プレストレストコンクリート版下面の 空洞充填に関する研究

坪川将丈・河村直哉・足立雅樹  
蛭川愛志・今真吾・伊藤茂雄・亀倉和彦

Study on Filling a Void underneath Airport Prestressed Concrete Slab  
with Polyurethane Foam

TSUBOKAWA Yukitomo, KAWAMURA Naoya, ADACHI Masaki  
HIRUKAWA Aishi, KON Shingo, ITO Shigeo, KAMEKURA Kazuhiko

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management  
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

# 発泡ウレタンによる 空港プレストレストコンクリート版下面の 空洞充填に関する研究

坪川将丈\*・河村直哉\*\*・足立雅樹\*\*\*・蛭川愛志\*\*\*\*・今真吾\*\*\*\*\*・伊藤茂雄\*\*\*\*\*・亀倉和彦\*\*\*\*\*

## 要 旨

空港のエプロン及び誘導路で用いられているプレストレストコンクリート版下面に充填されたグラウトが欠損することで空洞が生じる場合がある。そこで、割れにくい性質を持つ発泡ウレタン樹脂でプレストレストコンクリート版下の空洞を充填することを目的として研究を実施し、標準工法を提案した。

キーワード：発泡ウレタン樹脂，空洞，PC舗装，グラウト，空港

---

\* 空港研究部 空港施設研究室 室長

\*\* 空港研究部 主任研究官

\*\*\* 未来建設工業株式会社 技術本部 研究開発部長

\*\*\*\* 未来建設工業株式会社 技術本部 研究開発部 部長

\*\*\*\*\* 未来建設工業株式会社 九州支店 工事部

\*\*\*\*\* メインマーク株式会社 技術部 部長

\*\*\*\*\* メインマーク株式会社 技術部 次長

## Study on Filling a Void underneath Airport Prestressed Concrete Slab with Polyurethane Foam

**TSUBOKAWA Yukitomo\***

**KAWAMURA Naoya\*\***

**ADACHI Masaki\*\*\***

**HIRUKAWA Aishi\*\*\*\***

**KON Shingo\*\*\*\*\***

**ITO Shigeo\*\*\*\*\***

**KAMEKURA Kazuhiko\*\*\*\*\***

### Synopsis

A void may occur underneath prestressed concrete slab used at apron and taxiway in airport due to loss of grout filled between slab and base. Therefore, we conducted research with the aim of filling a void with polyurethane foam which has properties of being hard to break. Based on research result, we proposed standard construction method for filling a void with polyurethane foam.

**Key Words:** polyurethane foam, void, prestressed concrete pavement, grout, airport

---

\* Head, Airport Facilities Division, Airport Department

\*\* Senior Researcher, Airport Department

\*\*\* Director, Research and Development Department, Mirai Construction Co., Ltd.

\*\*\*\* Director of Research and Development Department, Mirai Construction Co., Ltd.

\*\*\*\*\* Construction Department, Kyushu Branch, Mirai Construction Co., Ltd.

\*\*\*\*\* Director, Engineering Department, Mainmark Co., Ltd.

\*\*\*\*\* Vice Director, Engineering Department, Mainmark Co., Ltd.

National Institute for Land and Infrastructure Management, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism  
3-1-1, Nagase, Yokosuka 239-0826, Japan

Phone: +81-46-844-5019, Fax: +81-46-842-9265, E-mail: ysk-nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

## 目 次

1. はじめに	1
2. 樹脂の室内性能試験	2
2.1 試験概要	2
2.2 膨張時間の測定試験	3
2.3 温度変化の測定試験	4
2.4 密度試験	5
2.5 一軸圧縮試験	6
2.6 時間別の一軸圧縮試験	8
2.7 繰返し一軸圧縮試験	10
2.8 含水条件における密度試験	12
2.9 まとめ	13
3. 実大規模樹脂充填基礎試験	14
3.1 試験概要	14
3.2 試験装置	14
3.3 試験方法	16
3.4 試験結果	18
3.5 まとめ	29
4. 実大規模樹脂充填本試験	30
4.1 試験概要	30
4.2 試験装置及び試験方法	30
4.3 樹脂 200 の試験結果	32
4.4 樹脂 200 の充填特性の考察	44
4.5 樹脂 300 の試験結果	47
4.6 樹脂 300 の充填特性の考察	59
4.7 まとめ	62
5. 多層弾性理論による PC 版下面の応力解析	63
5.1 解析条件	63
5.2 解析結果	63
6. 標準工法の提案	64
7. 結論	65
8. おわりに	65
参考文献	66



## 1. はじめに

本研究は、みらい建設工業株式会社及びメインマーク株式会社の二者による基礎的試験の成果と、その後の2020年11月から1年間にわたり国土交通省国土技術政策総合研究所、みらい建設工業株式会社、メインマーク株式会社の三者が実施した「発泡ウレタンによる空港プレキャストコンクリート舗装下面の空洞充填に関する共同研究」の成果をまとめたものである。共同研究では、室内試験及び実大規模充填試験の実施をみらい建設工業とメインマークが担当し、試験の監修、解析、全体とりまとめを国土技術政策総合研究所が担当した。

空港のエプロン及び一部の誘導路では、コンクリート舗装が用いられることが多い。空港コンクリート舗装の種類としては無筋コンクリート舗装が大半を占めるが、供用後の不同沈下が想定される場所では、リフトアップ工法<sup>1)</sup>によりコンクリート版の高さ修正が可能なプレストレストコンクリート舗装（以下、PC舗装）が用いられる場合がある。

既設PC舗装の高さ修正のリフトアップでは、多数の油圧ジャッキを制御することによりPC版を上方に持ち上げ、その後、持ち上げたPC版とその下の路盤との間に生じた空洞に裏込め材を充填する必要がある。また、プレキャストPC舗装を新設する場合も、工場製作されたプレキャストPC版を路盤上に設置した後、プレキャストPC版と路盤との間の不陸が生じるため、同様に裏込め材を充填する必要がある。

裏込め材としてはグラウトが使用されているが、PC版や路盤が健全であっても、グラウトが航空機荷重の繰返し走行等により割れ、舗装内に侵入した雨水と混じることにより泥化し、泥化したグラウトが流出したり、目地部から上方へ噴き上がるポンピング現象が生じることがある。写真-1.1に、泥化したグラウトのポンピング現象が発生した既設PC版を撤去し露出させたグラウト層を示す。このようにグラウトが泥化あるいは流出すると、PC版直下に空隙が発生するため、その上を航空機荷重が走行した場合、PC版に大きな鉛直変位及び荷重応力が発生しPC版の破損に繋がる。そのため、グラウトの改良や<sup>2),3),4)</sup>、PC版に大きな変形が発生しやすい目地部の変形を抑制する構造改良<sup>5)</sup>がなされてきた。

以上の背景から、裏込め材には、強度が高いだけでなく、変形係数が一定程度ありPC版を支持できること、繰返し変形を受けても割れにくいこと、割れたとしても水と混じることにより泥化・流出しないこと、PC版下の数mmの空洞に対しての充填が容易であること、早期に

硬化することが求められる。そこで、本研究では、工場等のコンクリート床版の高さ修正工事で実績のある発泡ウレタン樹脂<sup>6),7)</sup>をPC版の裏込め材に適用することを目的として研究を行うこととした。

本工法は、沈下したコンクリート版下の空洞に充填した発泡ウレタン樹脂が膨張することで、コンクリート版の高さ修正を行う目的で用いられる工法であり、本来は発泡ウレタン樹脂の膨張力でコンクリート版を数十～100mm以上持ち上げるため多量の樹脂を充填することとなる。本研究では、樹脂充填によりPC版を持ち上げる点は研究目的として省略し、PC版の高さ修正を行わない場合であっても、PC版下の空洞へ樹脂を充填し、十分な強度を有する樹脂を確実に形成することを目的として、室内性能試験・実大規模試験・舗装構造解析を実施することとした。

2章では、発泡ウレタン樹脂の基本的な特性を明らかにするために実施した室内性能試験の内容を記した。3章及び4章では、PC版を想定した鉄板下部の空洞へ発泡ウレタン樹脂を充填し、空洞厚や空洞内の湿潤状態が形成樹脂の形状及び密度に及ぼす影響を明らかにするために実施した実大規模充填試験（基礎試験及び本試験）の内容を記した。5章ではPC版下部に発泡ウレタン樹脂が充填された場合を想定した構造解析の結果を記し、6章で標準工法を提案した。



写真-1.1 既設PC版を撤去し露出させたグラウト層

## 2. 樹脂の室内性能試験

本研究で使用する発泡ウレタン樹脂は、主材の水溶性のポリオール化合物と、反応材のイソシアネート化合物を、注入ガンの吐出先で突合混合させる二液混合方式で製造する。発泡ウレタン樹脂は、施工途中で樹脂の性能の変更を行うことはなく、主材及び反応材は現場条件や要求性能に合わせた樹脂を選定して使用する。

共同研究者であるメインマークは、表-2.1 に示す 4 種類の樹脂をコンクリート舗装下の空洞充填工事やコンクリート床版の高さ修正工事に使用しているが、要求される性能は、樹脂 200 を除き、圧縮強さが 500kN/m<sup>2</sup> 程度である。

本研究では、空港の PC 版下の空洞充填を対象とすることから、充填に使用する樹脂には高い強度が要求される。航空機のタイヤ接地圧が概ね 1,500kN/m<sup>2</sup> 程度であること<sup>8)</sup>を考慮すると、圧縮強さが 500kN/m<sup>2</sup> 程度の従来品の樹脂は、航空機の一回の走行で破壊する可能性がある。そのため、現在使用している樹脂よりも高強度となる 3 種類の樹脂を開発し、樹脂の室内性能試験を実施した。

以降では、それぞれの室内性能試験方法及び試験結果を述べる。なお、新たに開発した 3 種類の樹脂を、樹脂の密度の数値を用い樹脂 300 (旧)、樹脂 300 (新)、樹脂 400 と呼称する。

表-2.1 既存の 4 種類の樹脂

樹脂区分	密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	圧縮強さ (kN/m <sup>2</sup> )	変形係数 (MN/m <sup>2</sup> )
No.0509	0.041	193	13.2
No.1905	0.055	295	18.3
No.1705	0.071	429	22.7
樹脂 200	0.200	2,530	100.4

## 2.1 試験概要

発泡ウレタン樹脂の性能は、樹脂の膨張、温度、硬化などの化学反応に関連する物性試験と、樹脂の強度試験に区分される。以下にそれぞれの試験の概要を、表-2.2 にそれぞれの試験で使用した樹脂の種類を記す。

### (1) 樹脂の物性試験

空港の PC 版下の空洞充填を想定した場合、限られた時間内で施工を行い、施工後すぐに供用できるかどうかは重要な要素である。発泡ウレタン樹脂は、化学反応により混合後数秒で膨張が始まり、数十秒で一次膨張による見掛け上の体積変化は収束し、数十分の養生で所定の強度を発現する材料である。そのため、樹脂の膨張時間、温度変化を確認するための試験を実施した。

### (2) 樹脂の強度試験

発泡ウレタン樹脂の既知の特性として、形成された樹脂の密度と強度には相関性があり、密度が高くなると、それに伴い強度も高くなる。そのため、樹脂の密度、強度を確認し、樹脂密度と圧縮強さ及び変形係数の相関性を確立することを目的として、密度試験、一軸圧縮試験を実施した。なお、一軸圧縮試験は、混合直後の経過時間別でも実施するとともに、疲労抵抗性を確認するため繰返し一軸圧縮試験も実施した。

発泡ウレタン樹脂のもう一つの特性は、化学反応時に少量の水分が付加されると、脆弱な樹脂が製造される可能性がある点である。本研究での樹脂の充填対象は、空港の PC 版下の空洞であり、充填部が湿潤状態であることが想定されることから、水分の影響による樹脂密度の変化を確認する試験を実施した。

表-2.2 各試験で使用した樹脂

試験種別	従来品	開発品		
	樹脂 200	樹脂 300 (旧)	樹脂 300 (新)	樹脂 400
2.2 膨張時間の測定試験	○	○	—	—
2.3 温度変化の測定試験	○	○	—	—
2.4 密度試験	○	○	○	○
2.5 一軸圧縮試験	○	○	○	○
2.6 時間別の一軸圧縮試験	○	—	○	—
2.7 繰返し一軸圧縮試験	○	—	○	—
2.8 含水条件における密度試験	○	—	—	—

## 2.2 膨張時間の測定試験

発泡した樹脂は、数十秒の一次膨張の後も二次膨張が継続する。樹脂の膨張が継続する時間を確認することで、他の物性の変化状況とともに、施工後の供用の判断の目安となる。そのため、発泡した樹脂が安定するまでの時間を把握することを目的とし、膨張時間（樹脂充填から最大荷重に達するまでの時間）を測定する試験を実施した。試験は樹脂 200 及び樹脂 300（旧）を対象に実施した。

### (1) 試験方法

膨張時間の測定試験は、以下の手順で実施した。

- ① 樹脂が充填できる空間を備えた直径 150mm のモールドに、樹脂充填孔を設けた上蓋、上蓋の上に載せる錘を設置した（図-2.1）。上載質量（上蓋と錘の合計質量）は PC 版を想定し、PC 版の版厚と密度から表-2.3 の 5 種類とした。
- ② モールドの上に上蓋と錘を設置し、その上部に受圧板（鋼製）を設置する。錘と受圧板の間に小型ロードセルを 4 か所設置し、受圧板とモールドをクランプで固定する。
- ③ 上蓋の樹脂充填孔から発泡ウレタン樹脂をモールド内に充填する。樹脂の充填量は、樹脂の膨張により上蓋と錘が押し上げられることによりロードセルで荷重が測定可能となる量とした。充填量は後述する。
- ④ 樹脂が発泡して膨張する際の荷重を 4 か所の小型ロードセルで測定する。測定は荷重が最大値となった後、荷重の減少が確認できるまで継続する。

### (2) 試験結果

樹脂 200 の膨張時間測定結果を表-2.4 に示す。樹脂 200 では、モールド容積が  $1,766 \times 10^{-6} \text{m}^3$ 、上蓋の押上高さ 10mm が生じた場合のモールド容積が  $1,943 \times 10^{-6} \text{m}^3$  であることから、上蓋を確実に押し上げる  $2,000 \times 10^{-6} \text{m}^3$  の容積を想定し、400g の樹脂を充填して膨張時間を測定した。

上載質量が軽いほど、樹脂の膨張による最大荷重が大きくなる傾向があるが、膨張時間と上載質量との関連性は見受けられず、樹脂 200 の膨張は概ね 13～15 分で終了することがわかる。

樹脂 300（旧）の膨張時間測定結果を表-2.5 に示す。樹脂 300（旧）では、樹脂 200 と同様に  $2,000 \times 10^{-6} \text{m}^3$  の容積を想定し、600g の樹脂を充填して膨張時間を測定した。

樹脂 200 と同様に、上載質量が軽いほど、樹脂の膨張

による最大荷重が大きくなる傾向があるが、膨張時間と上載質量との関連性は見受けられず、樹脂 300（旧）の膨張は概ね 14～17 分で終了することがわかる。

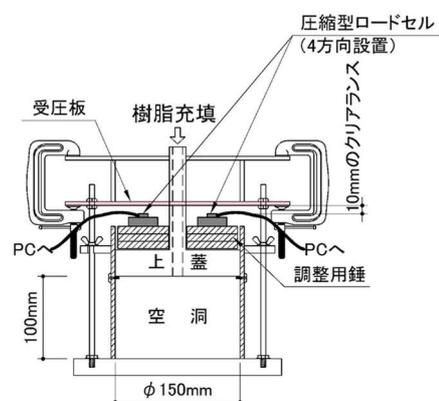


図-2.1 膨張時間測定装置概要図

表-2.3 上載質量条件

想定 PC 版厚 (mm)	上載質量 (kg)
200	8.66
258	11.19
317	13.73
377	16.34
436	18.92

表-2.4 樹脂 200 の膨張時間

上載質量 (kg)	膨張時間 (秒)	最大荷重 (N)
8.66	909	2,314
11.19	841	1,714
13.73	875	1,829
16.34	864	1,863
18.92	815	1,141

表-2.5 樹脂 300 (旧) の膨張時間

上載質量 (kg)	膨張時間 (秒)	最大荷重 (N)
8.66	897	2,385
11.19	1,022	2,123
13.73	920	2,145
16.34	944	2,264
18.92	884	1,747

温度は樹脂 200 の方がやや高いが、室温程度に低下するには樹脂 300 (旧) の方が時間を要した。

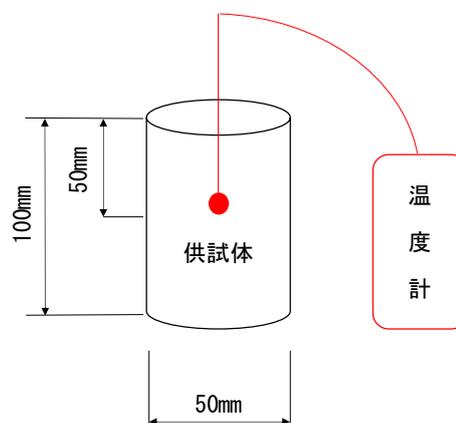


図-2.2 温度変化の測定状況

### 2.3 温度変化の測定試験

2.2 膨張時間の測定試験から、樹脂は製造後 13~17 分程度は膨張し、その後収縮へと転じる傾向がある。時間の経過に伴う樹脂の温度変化も同様の傾向が想定されることから、時間の経過に伴う温度変化を測定することを目的として試験を実施した。試験は樹脂 200 及び樹脂 300 (旧) を対象に実施した。

#### (1) 試験方法

温度変化の測定試験は、以下の手順で実施した。

- ① 供試体の作成方法は、後述する 2.4 密度試験に準じ、直径 50mm、高さ 100mm のモールド内に樹脂を吐出して作成した。
- ② 図-2.2 のようにモールド内に作成した供試体の中心に温度計を差し込み、経過時間と温度を測定した。温度測定は、樹脂の温度が外気温と同等程度に低下した時点で終了した。

#### (2) 試験結果

樹脂 200 及び樹脂 300 (旧) の試験結果を図-2.3 に示す。

樹脂 200、樹脂 300 (旧) とともに、1 分経過後に 100℃ を超過し、5 分程度経過後に最高温度(樹脂 200 は 162.5℃、樹脂 300 (旧) は 156.0℃) に到達した。その後、温度は徐々に低下し、室温程度に低下するまで、樹脂 200 では 60 分程度、樹脂 300 (旧) では 90 分程度を要した。最高

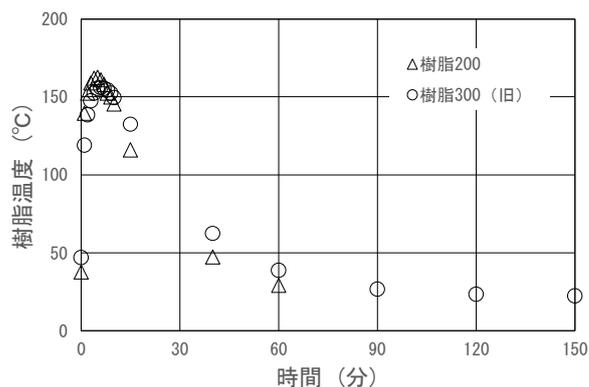


図-2.3 樹脂の温度変化

## 2.4 密度試験

既存の樹脂では、発泡した樹脂の密度と圧縮強さに相関性があることから、本研究で開発した樹脂の密度と圧縮強さの相関性を確認するため、密度試験を実施した。試験は従来品4種類及び開発品3種類の樹脂を対象に実施した。

### (1) 供試体作成方法

供試体の作成は、実際の現場で使用するプラント装置(写真-2.1)から、直径50mm、高さ120mmのモールド内に樹脂を吐出して作成した。

発泡した樹脂は、見掛け上、体積変化等が認められない状態であっても、内部で化学反応が継続していることもあるため、標準温度20℃の状態では24時間の養生後、脱型及び成形を行った。供試体の成形は、図-2.4に示すように、高さ120mmの供試体の上下10mm部分を切断し、中央部100mm部分を試験に供した。



写真-2.1 供試体の作成状況

### (2) 試験方法

密度試験は、ノギスで直接体積を求めるノギス法で実施した。

#### ① 供試体の体積測定

供試体の体積は、円柱の供試体の直径及び高さをノギスで測定した。直径の測定では、供試体の上部、中央、下部において直交する2方向で測定し、算術平均値を求めた。高さは円周を等分した3か所で測定し、算術平均値を求めた。最小読取値は0.1mmとした。

#### ② 樹脂の密度算出

デジタル秤で供試体の質量を0.1g単位まで測定し、供試体の質量を供試体の体積で除すことで樹脂の密度を算出した。

### (3) 試験結果

密度試験結果は、2.5 一軸圧縮試験で併せて詳述した。

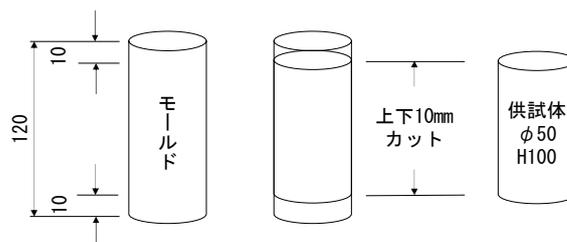


図-2.4 供試体の成形状況

## 2.5 一軸圧縮試験

既存の樹脂は、発泡した樹脂の密度と圧縮強さに相関性があることから、本研究で開発した樹脂の密度と圧縮強さの相関性を確認するため、一軸圧縮試験を実施した。試験は従来品4種類及び開発品3種類の樹脂を対象に実施した。なお、開発品である樹脂300(新)は、後述するように、樹脂300(旧)に靱性が低く破断しやすい傾向があったため、主材及び反応材は樹脂300(旧)と同一であるものの、充填時の機器等の設定を変えることにより改良した樹脂である。

### (1) 供試体作成方法

供試体の作成方法は、2.4 密度試験に準じた。

### (2) 試験方法

一軸圧縮試験は、ひずみ制御式一軸圧縮試験機(図-2.5)を用いて実施した。

#### ① 供試体の設置

供試体を一軸圧縮試験機の下部加圧版の中央に置き、供試体に圧縮力がかからないよう上部加圧版を密着させた。その後、変位計及び荷重計の原点を調整した。

#### ② 載荷

毎分1%の圧縮ひずみが生じる載荷速度を標準とし、連続的に供試体を圧縮した。圧縮中は、圧縮量と載荷重を測定した。載荷重が最大となって以降に引き続き圧縮ひずみが2%以上生じる、載荷重が最大値の2/3程度に減少する、または、圧縮ひずみが15%に達することを確認した後、載荷を終了した。

#### ③ 供試体の観察

供試体の変形、破壊状況などを観察し記録した。観察は、破壊の状態が最も顕著に確認できる方向から実施した。

#### ④ 結果の整理

供試体の圧縮ひずみ、圧縮応力及び変形係数は次式により算出した。また、圧縮ひずみが15%に達するまでの応力-ひずみ曲線から求めた圧縮応力の最大値を圧縮強さとし、その時の圧縮ひずみを破壊ひずみとした。

$$\varepsilon = \Delta H / H_0$$

$$\sigma = P / A_0 \times (1 - \varepsilon)$$

$$E_{50} = (q_u / 2) / \varepsilon_{50}$$

ここに、

$\varepsilon$  : 圧縮ひずみ

$\Delta H$  : 圧縮量 (mm)

$H_0$  : 圧縮前の供試体の高さ (mm)

$\sigma$  : 圧縮応力 (N/m<sup>2</sup>)

$P$  :  $\varepsilon$ の時の載荷重 (N)

$A_0$  : 圧縮前の供試体の断面積 (m<sup>2</sup>)

$E_{50}$  : 変形係数 (N/m<sup>2</sup>)

$q_u$  : 圧縮強さ (N/m<sup>2</sup>)

$\varepsilon_{50}$  : 圧縮応力が $q_u/2$ のときの圧縮ひずみ

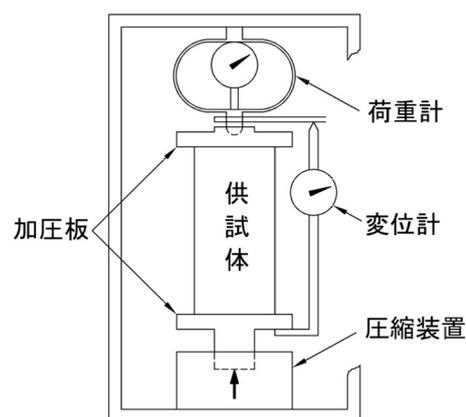
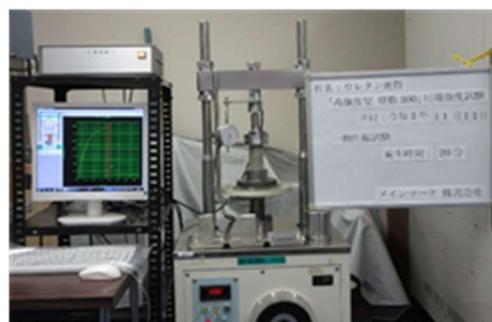


図-2.5 ひずみ制御式一軸圧縮試験機

### (3) 試験結果

密度試験結果及び一軸圧縮試験結果を表-2.6に示す。表中の数値は、各樹脂の12供試体で実施した平均値である。なお、破壊ひずみは載荷重が最大となった時点の圧縮ひずみを、破断時ひずみは載荷重が最大となった後にせん断破壊が生じた時点の圧縮ひずみを、破断発生率は12供試体のうちせん断破壊が生じた供試体数の割合を示している。

圧縮強さは、樹脂の密度が高くなると高くなる傾向が確認できる。樹脂200及び3種類の開発品の圧縮強さは2,500kN/m<sup>2</sup>以上であるが、大型航空機のタイヤ接地圧が概ね1,500kN/m<sup>2</sup>程度であることを考慮すると、航空機のタイヤがPC版を介さずに樹脂に直接載荷される状態であったとしても、樹脂は十分な圧縮強さを有していると言える。破断ひずみは2.21~5.75%を示すが、密度が低い

樹脂の破壊ひずみは 2%程度であるのに対し、密度が高い樹脂の破壊ひずみは 5%程度となる傾向がある。

樹脂の構造は独立気泡の集合体であり、密度が低い場合は、独立気泡の骨格部分に対して空隙部分の割合が大きく、ひずみが小さい段階で破壊に至るものと推察される。

一軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線を図-2.6 に示す。なお、各樹脂の 12 供試体に対する試験結果から代表的な結果を示した。密度が低い樹脂では、圧縮ひずみが 15%であっても塑性変形が増加しており、靱性がある粘り強い材質と言えるが、破断発生率に着目すれば、密度が高い樹脂 300 (旧) で 58%、最も密度が高い樹脂 400 では全ての供試体で破断が発生しており、これらは靱性が低い材質に区分される。しかしながら、樹脂 300 (旧) を改良した樹脂 300 (新) は破断することはなかった。

(4) 密度と圧縮強さの関係

表-2.6 に示す 7 種類の樹脂の密度試験結果及び一軸圧縮試験結果から、密度と圧縮強さの関係を図-2.7 に、密度と変形係数の関係を図-2.8 に示す。

圧縮強さ、変形係数ともに密度との高い相関性が認められることから、圧縮強さ及び変形係数は、密度から次式を用いることで精度高く推測することが可能である。

$$q_u = 53923\rho^2 + 1632.5\rho \quad (\text{式-2.1})$$

$$E_{50} = 1684.6\rho^2 + 144.16\rho + 4.4884 \quad (\text{式-2.2})$$

ここに、

$q_u$  : 圧縮強さ (kN/m<sup>2</sup>)

$E_{50}$  : 変形係数 (MN/m<sup>2</sup>)

$\rho$  : 密度 (Mg/m<sup>3</sup>)

表-2.6 密度試験及び一軸圧縮試験結果

	樹脂区分	密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	圧縮強さ (kN/m <sup>2</sup> )	破壊ひずみ (%)	変形係数 (MN/m <sup>2</sup> )	破断発生率 (%)	破断時ひずみ (%)
従来品	No.0509	0.041	193	2.67	13.2	0	—
	No.1905	0.055	295	2.21	18.3	0	—
	No.1705	0.071	429	2.84	22.7	0	—
	樹脂 200	0.200	2,530	4.71	100.4	0	—
開発品	樹脂 300 (旧)	0.309	5,776	4.66	222.2	58	7~14
	樹脂 400	0.395	9,100	5.64	322.6	100	6~8
	樹脂 300 (新)	0.291	4,799	5.75	178.6	0	—

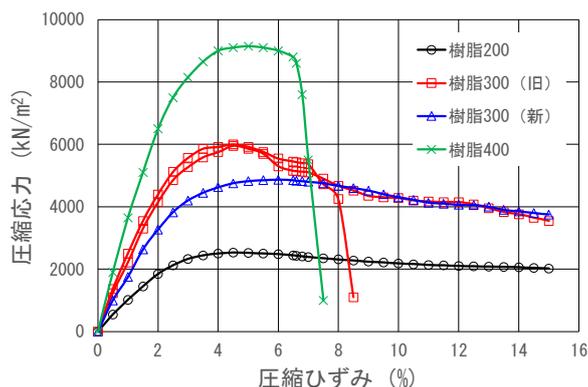


図-2.6 一軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線

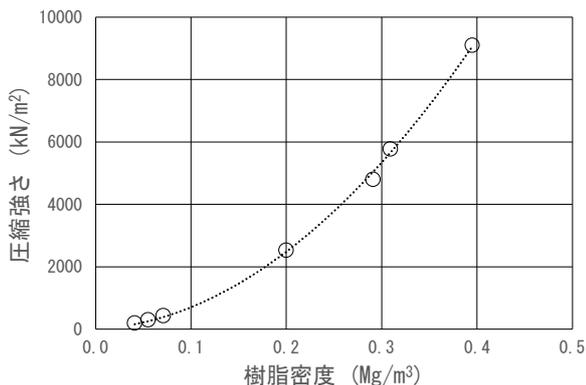


図-2.7 密度と圧縮強さの関係

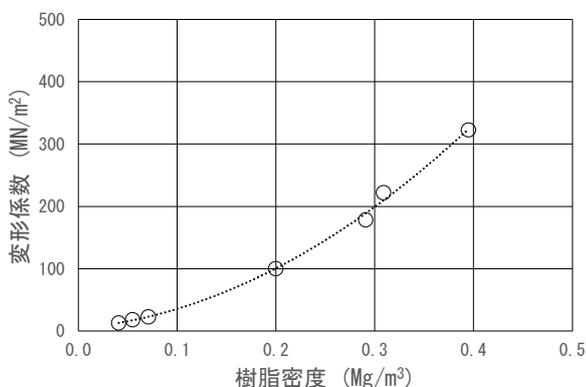


図-2.8 密度と変形係数の関係

## 2.6 時間別の一軸圧縮試験

樹脂充填後、施工場所が直ちに使用できるかは重要な要素であることから、短時間養生での樹脂の強度を把握する必要がある。2.2 膨張時間の測定試験の結果では、樹脂は製造後 13～17 分程度は膨張し、その後収縮へと転じる傾向があることから、時間の経過に伴う強度変化を測定することを目的として試験を実施した。この試験は樹脂 200 及び樹脂 300 (新) を対象に実施した。

### (1) 試験方法

時間別の一軸圧縮試験は、以下の手順で実施した。

- ① 供試体の作成方法は、2.4 密度試験及び 2.5 一軸圧縮試験に準じ、直径 50mm、高さ 120mm のモールド内に樹脂を吐出して作成した。高さ 120mm の供試体の上下 10mm 部分を切断し、中央部 100mm 部分を試験に供した。
- ② 樹脂製造後の養生時間を 20, 40, 60, 120, 180, 360 分の 6 種類として一軸圧縮試験を実施するとともに、密度試験も実施した。

### (2) 試験結果

樹脂 200 及び樹脂 300 (新) の試験結果を表-2.7、表-2.8 及び図-2.9 に示す。

樹脂 200 の圧縮強さは養生時間とともに増加し、120 分経過後の圧縮強さに対し、20 分経過後では約 77%、40 分経過後では約 96%であった。また、40 分以上経過後も徐々に増加しているが、大きな変化はなかった。破壊ひずみに着目すると、20 分経過後では破壊ひずみが大きいものの、40 分以上経過後では大差がなかった。以上のことから、樹脂 200 は 40 分経過した時点で安定した状態であると考えられる。

樹脂 300 (新) の圧縮強さも養生時間とともに増加し、120 分経過後の圧縮強さに対し、20 分経過後では約 71%、40 分経過後では約 93%であった。樹脂 200 とは傾向が若干異なり、40 分以上経過後も圧縮強さの増加は継続していた。破壊ひずみに着目すると、20 分経過後では破壊ひずみが大きいものの、120 分以上経過後では大差がなかった。以上のことから、樹脂 300 (新) は 120 分経過した時点で安定した状態であると考えられる。

2.3 温度変化の測定試験の結果では、樹脂 200 は温度が外気温に近い 20℃台に低下するのに 60 分程度を要したのに対し、樹脂 300 (旧) は 90 分程度を要していることから、密度が高い樹脂では化学反応の収束に時間を要すると推察される。

表-2.7 樹脂 200 の時間別圧縮強さ

養生時間 (分)	密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	圧縮強さ (kN/m <sup>2</sup> )	圧縮強さの比 (120分を100)	破壊ひずみ (%)	変形係数 (MN/m <sup>2</sup> )
20	0.200	2,072	77.1	9.68	65.8
40	0.203	2,588	96.3	4.99	96.0
60	0.199	2,605	96.9	4.89	102.1
120	0.199	2,688	100.0	4.71	106.3
180	0.199	2,679	99.7	4.45	109.6
360	0.202	2,757	102.6	4.72	113.4

表-2.8 樹脂 300 (新) の時間別圧縮強さ

養生時間 (分)	密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	圧縮強さ (kN/m <sup>2</sup> )	圧縮強さの比 (120分を100)	破壊ひずみ (%)	変形係数 (MN/m <sup>2</sup> )
20	0.277	2,960	70.5	13.54	62.5
40	0.278	3,923	93.4	6.38	132.9
60	0.273	3,965	94.4	6.40	134.0
120	0.280	4,199	100.0	5.30	165.8
180	0.283	4,358	103.8	4.50	169.7
360	0.280	4,489	106.9	5.14	165.6

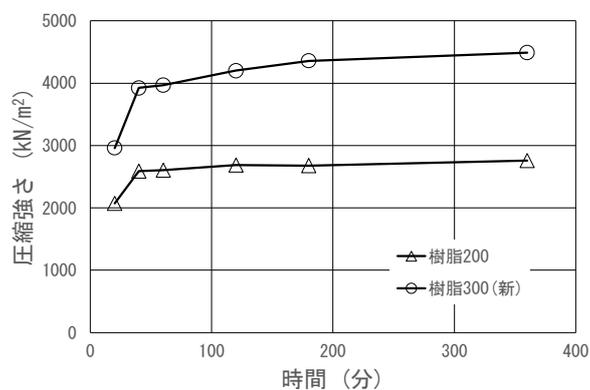


図-2.9 時間別圧縮強さ

## 2.7 繰返し一軸圧縮試験

2.5 一軸圧縮試験で示したとおり、樹脂 200 及び 3 種類の開発品の樹脂は十分な圧縮強さを有していると言えるが、一回の荷重で破壊に至らずとも、繰返し荷重による疲労破壊が生じる可能性もある。そこで、樹脂の疲労抵抗性を確認するため、繰返し一軸圧縮試験を実施した。この試験は樹脂 200 及び樹脂 300（新）を対象に実施した。

### (1) 試験方法

繰返し一軸圧縮試験は、以下の手順で実施した。

- ① 供試体の作成方法は、2.4 密度試験及び 2.5 一軸圧縮試験に準じ、直径 50mm、高さ 120mm のモールド内に樹脂を吐出して作成した。高さ 120mm の供試体の上下 35mm 部分を切断し、中央部 50mm 部分を試験に供した。
- ② 写真-2.2 に示す疲労試験機により試験を実施した。供試体を試験機に設置し、初めに 10N の荷重を作用させた後、所定の応力比（発生圧縮応力÷圧縮強さ）が得られる荷重荷重のサイン波形により 10 万回の繰返し荷重を実施した。荷重周波数は 10Hz とした。

### (2) 試験結果

樹脂 200 及び樹脂 300（新）の繰返し一軸圧縮試験結果を表-2.9 に、荷重回数と累積ひずみの関係を図-2.10 に示す。

どちらの樹脂も、圧縮変位は荷重 100 回程度まで上昇した後、ほぼ一定となり、荷重 10 万回では破壊に至らなかった。しかしながら、応力比が高い条件では、ある時点から圧縮変位が急激に増加し、10 万回より前に破壊に至った。

前述のとおり、大型航空機のタイヤ接地圧が 1,500kN/m<sup>2</sup> 以下であることを考えれば、どちらの樹脂も 10 万回以内では破壊しないと考えられる。エプロンを想定した場合、1 日 10 便が着陸後にエプロンに入り、その後、離陸のためにエプロンから出ると仮定すれば、1 日の走行回数は 20 回、1 年間の走行回数は 7,300 回であるため、10 万回以内で破壊しない樹脂は実際の交通量に十分耐えられる性能と考えられる。



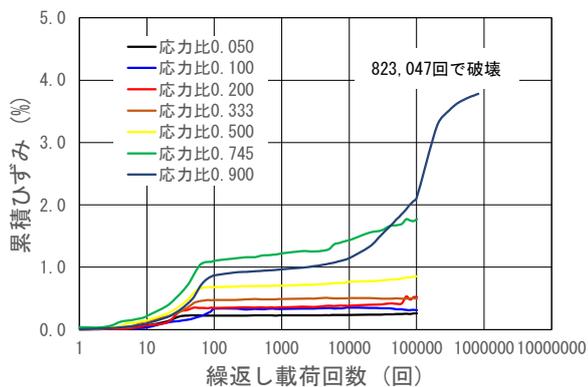
写真-2.2 疲労試験機と試験状況

表-2.9 繰返し一軸圧縮試験結果

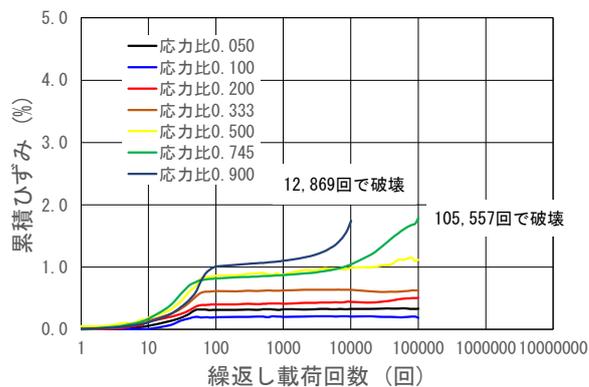
樹脂区分	圧縮強さ (kN/m <sup>2</sup> )	繰返し圧縮応力 (kN/m <sup>2</sup> )	応力比	圧縮変位 (mm)	累積ひずみ (%)	破壊回数 (回)
樹脂 200	2,530	126.50	0.050	0.130	0.26	破壊せず
		253.00	0.100	0.157	0.31	破壊せず
		506.00	0.200	0.259	0.52	破壊せず
		842.49	0.333	0.252	0.50	破壊せず
		1,265.00	0.500	0.426	0.85	破壊せず
		1,884.85	0.745	0.887	1.77	破壊せず
		2,277.00	0.900	1.055	2.11	823,047
樹脂 300 (新)	4,421	221.05	0.050	0.167	0.33	破壊せず
		442.10	0.100	0.095	0.19	破壊せず
		884.20	0.200	0.254	0.51	破壊せず
		1,472.19	0.333	0.311	0.62	破壊せず
		2,210.50	0.500	0.559	1.12	破壊せず
		3,293.65	0.745	0.894	1.79	105,557
		3,978.90	0.900	—	—	12,869

※圧縮強さは繰返し一軸圧縮試験に供した樹脂密度より式-2.1により推定した値である。

※圧縮変位及び累積ひずみは10万回载荷終了時点の値である。



(a) 樹脂 200



(b) 樹脂 300 (新)

図-2.10 载荷回数と累積ひずみの関係

## 2.8 含水条件における密度試験

発泡ウレタン樹脂は、化学反応時に少量の水分が付加されると全く異なる樹脂が製造され、製造された樹脂は脆弱なものになる。そこで、実際の PC 版下が湿潤状態であることを想定し、含水した仮想地盤上に樹脂を充填した際の密度の変化を確認することを目的として密度試験を実施した。この試験は樹脂 200 を対象に実施した。

### (1) 試験方法

含水条件における密度試験は、以下の手順で実施した。

- ① 樹脂が充填できる空間を備えた直径 150mm のモールド底面に、表-2.10 の 5 種類の仮想地盤を敷設した。仮想地盤は固化したセメントモルタルを粉砕した粉（以下、Co 粉という）と水を混合して作成した。
- ② モールド底面に仮想地盤を敷設後、樹脂充填孔を設けた上蓋、上蓋の上に載せる錘を設置した。上載質量（上蓋と錘の合計質量）は、PC 版を想定し、表-2.11 の 2 種類とした。
- ③ 上蓋の樹脂充填孔から発泡ウレタン樹脂をモールド内に充填し、樹脂の充填後は 40 分養生した。樹脂の充填量は、樹脂の膨張により上蓋と錘が押し上げられることが確認できる量として、含水比 0%では 350g、それ以外は樹脂と水との反応により膨張量が大きくなることを想定されたため 200g とした。
- ④ 養生後、モールドから樹脂を取り出し、2.4 密度試験の方法に準じて樹脂の密度を算出した。

### (2) 試験結果

含水条件における樹脂 200 の密度試験結果を表-2.12 に示す。

仮想地盤の含水比が高くなると、形成される樹脂の密度は低下する傾向がある。これは、仮想地盤に含まれる水により樹脂が過度に膨張したためと考えられる。また、滞水状態の場合は、過大に膨張した樹脂がモールドからあふれ出し、密度測定ができなかった。PC 版下への充填を想定した場合、含水状態の場合は樹脂が過大に膨張し、密度が低く、圧縮強さが低い樹脂が形成される可能性がある。

表-2.10 仮想地盤の種類

仮想地盤の種類	水：Co 粉 質量比	仮想地盤の 含水比
ドライ	0：100	0%
含水比・低	20：100	20%
含水比・中	25：100	25%
含水比・高	50：100	50%
滞水	100：0	滞水状態

表-2.11 上載質量条件

想定 PC 版厚 (mm)	上載質量 (kg)
180	7.79
240	10.39

表-2.12 含水条件の密度

仮想地盤の 含水比	樹脂充填量 (g)	上載質量 (kg)	樹脂密度 (Mg/m <sup>3</sup> )
0%	350	7.79	0.1884
		10.39	0.1868
20%	200	7.79	0.0970
		10.39	0.1030
25%	200	7.79	0.0908
		10.39	0.0942
50%	200	7.79	0.0550
		10.39	0.0560
滞水状態	200	7.79	測定不能
		10.39	測定不能

## 2.9 まとめ

樹脂の室内性能試験結果より、以下のことが明らかとなった。

### (1) 樹脂の密度と圧縮強さの関係

樹脂の密度と圧縮強さには明瞭な相関があり、密度と圧縮強さの関係は式-2.1、密度と変形係数の関係は式-2.2 で表すことができるため、これらの式により形成樹脂密度から圧縮強さ及び変形係数を推定できると考えられる。

発泡ウレタン樹脂は靱性がある粘り強い材質であるが、密度が 0.300Mg/m<sup>3</sup> を超えると靱性は弱くなり破断しやすくなることが確認できた。また、密度が 0.400Mg/m<sup>3</sup> 程度の場合は靱性がほぼない状態であるため、破断による粉砕を避けるためには、密度を 0.300Mg/m<sup>3</sup> 以下とする方が望ましいが、これらの特性は破壊時に関するものであり、樹脂に作用する応力が圧縮強さより十分に小さい場合は、この点を過度に意識する必要はないと考えられる。

### (2) 樹脂の強度発現と安定性

樹脂 200 と樹脂 300（新）（旧）の膨張時間、温度、圧縮強さ、破壊ひずみを時間軸で整理したのが表-2.13 及び表-2.14 である。

樹脂 200 の膨張は 13～15 分程度で終了し、60 分後には外気温と同程度まで低下した。樹脂の硬化の指標となる圧縮強さ及び破壊ひずみも 40 分後には安定した状態となっている。以上のことから、充填後 40～60 分程度で供用できる充填材料と考えられる。

樹脂 300（新）（旧）の膨張は 14～17 分で終了し、90 分後には外気温と同程度まで低下した。樹脂の硬化の指標となる圧縮強さ及び破壊ひずみは、樹脂 200 と比較して安定するまで時間を要するが、60 分経過時点でおおむね安定していること、樹脂 200 よりも高い強度が得られていることから、充填後 60 分程度で供用できる充填材料と考えられる。

### (3) 含水比が樹脂に及ぼす影響

仮想地盤に対し樹脂を充填すると、仮想地盤の含水比が比較的低い 20%程度であっても、通常時よりも密度が 50%程度低い樹脂が形成され、脆弱な樹脂となる。施工方法を検討するにあたっては、地盤の含水状態別にどのような樹脂が形成されるかを確認する必要があるため、3 章以降で検討することとした。

表-2.13 樹脂 200 の経過時間による性状変化

測定項目	樹脂充填からの経過時間 (分)								
	5	10	15	20	40	60	120	180	360
膨張時間 (分)	13～15 で終了								
温度 (°C)	100～160				47.3	29.2			
圧縮強さ (kN/m <sup>2</sup> )				2,072	2,588	2,605	2,688	2,679	2,757
破壊ひずみ (%)				9.68	4.99	4.89	4.71	4.45	4.72

表-2.14 樹脂 300（新）（旧）の経過時間による性状変化

測定項目	樹脂充填からの経過時間 (分)									
	5	10	15	20	40	60	90	120	180	360
膨張時間 (分)	14～17 で終了									
温度 (°C)	100～160				62.4	38.8	26.7	23.5		
圧縮強さ (kN/m <sup>2</sup> )				2,960	3,923	3,965		4,199	4,358	4,489
破壊ひずみ (%)				13.54	6.38	6.40		5.30	4.50	5.14

### 3. 実大規模樹脂充填基礎試験

実大規模樹脂充填基礎試験（以下、充填基礎試験）は、室内性能試験で得られた樹脂の基礎的な充填特性を確認するとともに、PC版下の空洞充填における現場条件を想定し、工事採用の可否判断に資する基礎データを把握し、標準工事仕様を確立することを目的として試験計画を立案した。

標準工事仕様を確立するためには必要な項目は以下が想定される。

- ・ 樹脂充填方法（充填方法、充填量の設定、充填の終了基準）
- ・ 樹脂充填ピッチ
- ・ 充填された樹脂の強度
- ・ 空洞厚条件別の施工方法
- ・ 施工条件による樹脂の密度及び強度
- ・ 使用材料の選定

充填基礎試験は、上記の項目を明確にする内容とするが、樹脂の充填を実大規模で実施し空洞部に形成された発泡ウレタン樹脂の状態及び特性を確認する試験は過去に実施したことがない初めての試みである。そのため、この充填基礎試験では、空洞部に形成された発泡ウレタン樹脂の状態及び特性を概略的に把握する目的で実施した。また、充填基礎試験で得られた形成樹脂の特性・傾向などを基に、問題点や不明点を整理し、4章で述べる実大規模樹脂充填本試験において検証・解明すべき事項を整理した。

#### 3.1 試験概要

充填基礎試験は、以下の①～④の条件を組み合わせ実施し、それぞれの条件下における形成樹脂の特性を把握することとした。

- ① 樹脂の種類：樹脂 200（標準樹脂密度 0.200Mg/m<sup>3</sup>）
- ② 樹脂充填方法：10 カウント 5 秒インターバル方式  
（1 カウントは樹脂原液 0.1kg の充填であり、10 カウント＝樹脂原液 1.0kg を充填した後に 5 秒空け、再度 10 カウント充填することを繰り返す）
- ③ 空洞の条件：空洞厚 10mm 及び 20mm
- ④ 仮想地盤の条件：含水比 0%（ドライ）、20%、33%、50%、滞水状態の 5 種類の仮想地盤（滞水状態以外は、シルトと水とを混合したもの）

#### 3.2 試験装置

試験装置の概要図を図-3.1 に示す。本試験装置では、PC版（厚さ 180mm）の代用として、厚さ 12mm の鉄板及び鋼製山留により PC版と同等の荷重を設定した。

##### (1) 試験装置の設置手順

試験装置は以下の手順で設置した。

- ① 水平に設置した敷鉄板の上に、仮想地盤の水分の流出を防ぐ防災シートを敷設し、防災シートの上に所定の含水比に調整した仮想地盤を厚さ 10mm で敷き均した。
- ② ③で敷設する鉄板を支えるピース板を 1m ピッチで配置した。ピース板の厚さは、空洞厚 10mm の場合は 20mm、空洞厚 20mm の場合は 30mm とした。
- ③ 3.048m×1.524m の 2 枚の鉄板をボルトなどで接合し、これをクレーンで吊り、ピース板の上に設置することで仮想地盤と鉄板の間に空洞を構築した。
- ④ 鉄板の上に重量調整用の鋼製山留を積載し、PC版相当の荷重とした。

##### (2) 上載荷重の設定

鉄板の上に積載する鋼製山留による上載荷重は、厚さ 180mm の PC版相当とし、以下のとおり設定した。

- ・ PC版の単位体積重量を 24kN/m<sup>3</sup> とし、厚さ 180mm の PC版の面積 1m<sup>2</sup> 当たりの重量は、24kN/m<sup>3</sup>×0.18m = 4,320N/m<sup>2</sup> となる。
- ・ 使用する鉄板の諸元は表-3.1 であるため、1 枚の鉄板の面積 4.645m<sup>2</sup> に対して必要な PC版相当の重量は、4,320N/m<sup>2</sup>×4.645m<sup>2</sup>=20,066N となる。この重量から鉄板自体の重量 4,386N を引くと、鉄板上に積載が必要な鋼製山留の総重量は 15,680N となる。
- ・ 使用する鋼製山留の諸元は表-3.2 であり、1 本当たり 1,960N であるため、1 枚の鉄板上に 8 本の鋼製山留を積載する。鉄板上の鋼製山留の配置は図-3.2 とした。

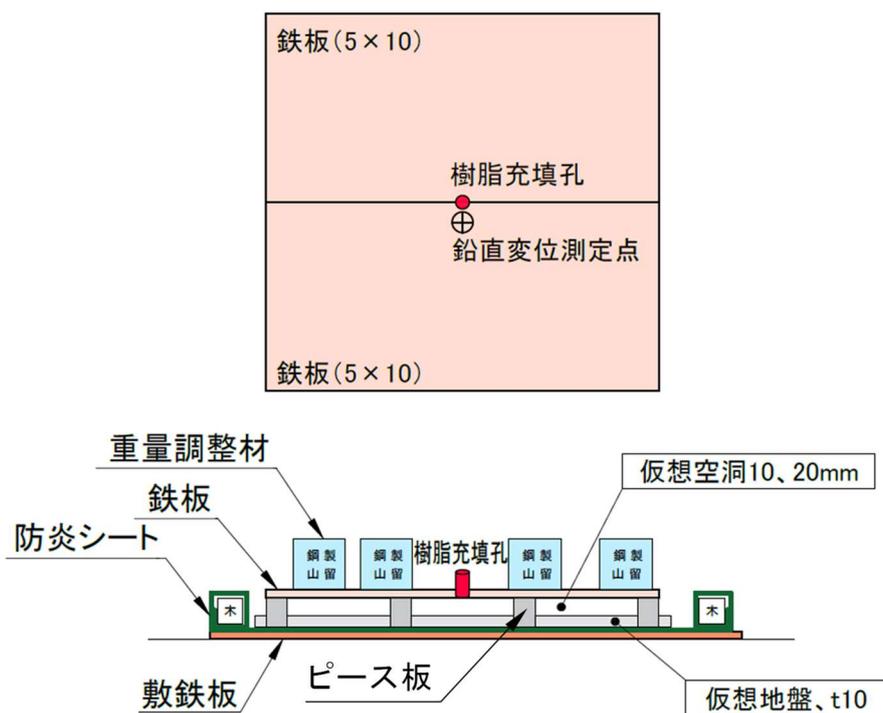


図-3.1 試験装置概要図

表-3.1 鉄板の諸元

種類	5×10
長さ (mm)	3,048
幅 (mm)	1,524
厚さ (mm)	12
面積 (m <sup>2</sup> )	4.645
単位重量 (N/m <sup>2</sup> )	923.2
重量 (N)	4,288
付属部品重量 (N)	98
全重量 (N)	4,386

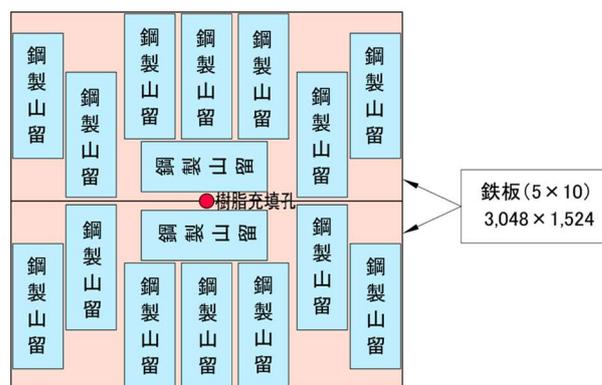


図-3.2 鋼製山留の配置

表-3.2 鋼製山留の諸元

種類	H-40
長さ (mm)	1,000
幅 (mm)	400
高さ (mm)	400
重量 (N)	1,960

### 3.3 試験方法

充填基礎試験は、仮想地盤の条件、空洞の条件別に、以下の手順で実施した。

- ① 樹脂充填前に、鉄板の四隅及び中央の樹脂充填孔近傍の充填前高さの測定を実施する。
- ② プラント車両から伸びるホース先端に注入ガンを取り付け、樹脂充填孔から樹脂 200 を 10 カウント 5 秒インターバル方式で充填する。
- ③ 樹脂充填孔近傍の鉄板の鉛直変位をオートレベルで確認しつつ充填を実施する。
- ④ 樹脂充填孔近傍の鉄板の鉛直変位が 1mm に達したら充填を終了し、樹脂充填終了時のプラント車両の流量計のカウンター数値を記録する。
- ⑤ 樹脂充填後は、鉄板の四隅及び中央の樹脂充填孔近傍の 5 点で鉄板の鉛直変位を測定する。測定は、樹脂充填終了後、3 分後、10 分後、20 分後、30 分後、40 分後に実施する。
- ⑥ 40 分後の鉛直変位測定後、鋼製山留及び鉄板を撤去し、空洞で拡がった樹脂の観察・計測を実施する。
- ⑦ 樹脂の観察後、密度測定用の樹脂サンプルを採取する。採取位置は図-3.3 に示すとおり、充填点を中心として 8 方向に対し、充填点から 0.3m、0.6m、0.9m、1.2m の位置とする。なお、樹脂の形状によっては採取間隔を変更する。
- ⑧ 電動穴あけ工具のホルソー等で樹脂を直径 50～60mm でくり抜き採取する。図-3.4 のように、採取した円柱状の樹脂サンプルの直径を 2 か所で、樹脂の厚さを中心の 1 か所及び外周の 8 か所でノギスにより測定する。また、直径及び厚さの平均値により樹脂サンプルの体積を算出する。
- ⑨ 寸法測定後は、樹脂サンプルに付着した土などの不純物を除去し、乾燥状態であることを確認後、樹脂サンプルの質量をデジタル秤で 0.1g まで測定する。
- ⑩ 樹脂サンプルの体積と質量から密度を算出する。

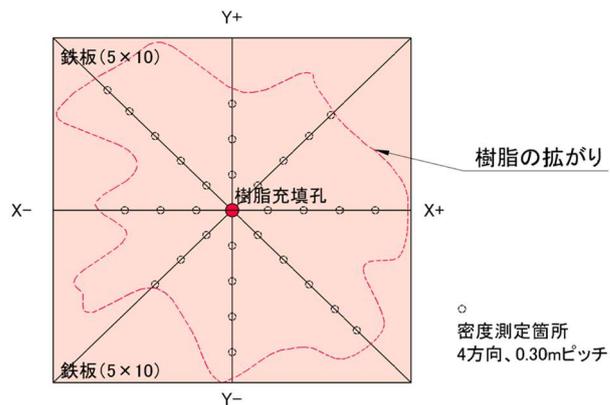


図-3.3 樹脂サンプルの採取位置

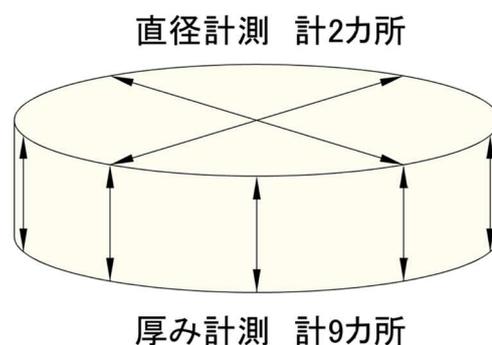


図-3.4 樹脂サンプルの寸法測定

充填基礎試験の一連の流れを写真-3.1 に示す。



① 防火シート敷設



② 仮想地盤形成



③ ピース板設置



④ 鉄板敷設



⑤ 鋼製山留設置



⑥ 樹脂充填



⑦ 40分養生後の樹脂確認



⑧ 樹脂の観察



⑨ 樹脂サンプル採取



⑩ 採取した樹脂サンプル

写真-3.1 充填基礎試験の流れ

### 3.4 試験結果

充填基礎試験は、5種類の仮想地盤、2種類の空洞厚に対して表-3.3に示す計10ケースを実施した。

#### (1) 空洞における樹脂の挙動

樹脂の形成状況について、空洞厚10mmの場合を図-3.5に、空洞厚20mmの場合を図-3.6に示す。なお、図中の①②③④はそれぞれ1回目充填、2回目充填、3回目充填、4回目充填による樹脂を示し、写真における円形の孔は密度測定用サンプル採取により生じた孔である。

樹脂充填を数回に分けるインターバル充填方式では、1回目に充填された樹脂は、仮想地盤の含水比、空洞厚に関わらず、充填点近傍に形成された。2回目以降に充填された樹脂は、1回目で形成された樹脂の外周部に形成されるが、その形成位置に明瞭な傾向はなかった。複数回充填の場合、2回目以降に充填した樹脂の形成位置をコントロールすることは困難と言える。

形成樹脂の下面の観察では、1回目充填で形成された樹脂の下面に筋状の樹脂の流動痕が存在していた。これは、図-3.7及び図-3.8に示すとおり、2回目以降の充填樹脂が1回目充填で形成された樹脂と地盤の間を通過して遠方へ拡がったものと考えられる。

滞水状態において充填した際の樹脂の拡がり状態を図-3.9に再掲する。1回目充填による形成樹脂が2回目充填による樹脂の膨張により遠方へ押し出され、複数回の樹脂区分が確認できない状態で形成されており、仮想地盤上への充填とは異なった挙動を示した。これは、2.8含水条件における密度試験で示したとおり、滞水状態の場合は樹脂が過大に膨張するためと考えられる。なお、滞水状態において充填された樹脂は、水に浮かんだような状態で形成されていた。

表-3.3 充填基礎試験の試験条件

試験 No.	仮想地盤の含水比	空洞厚 (mm)	樹脂充填量 (kg)
基-1	0%	10	2.0
基-2		20	4.0
基-3	20%	10	3.0
基-4		20	3.0
基-5	33%	10	2.0
基-6		20	2.0
基-7	50%	10	3.0
基-8		20	4.0
基-9	滞水状態	10	2.0
基-10		20	2.0

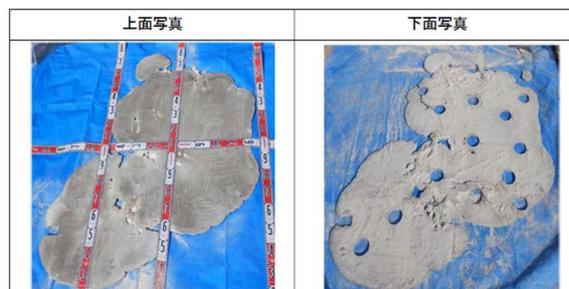
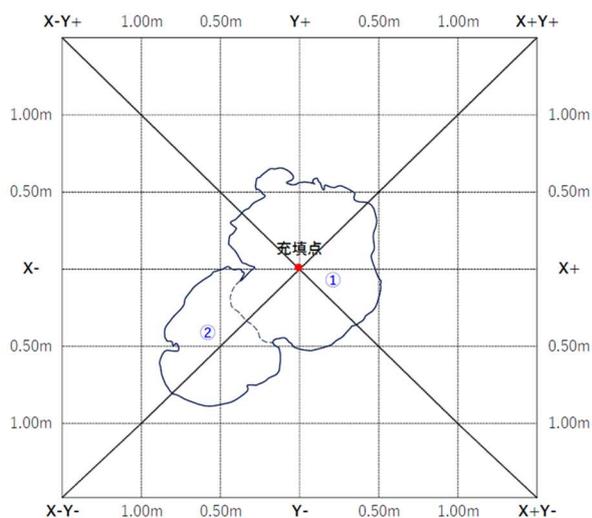


图-3.5(a) 基-1 (空洞厚 10mm, 含水比 0%)

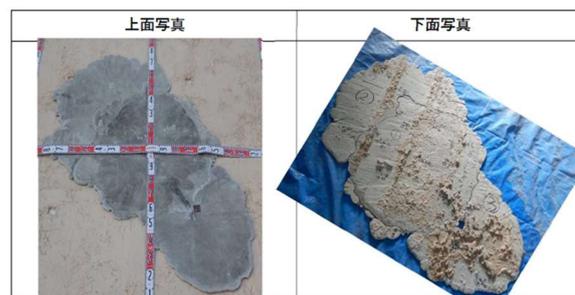
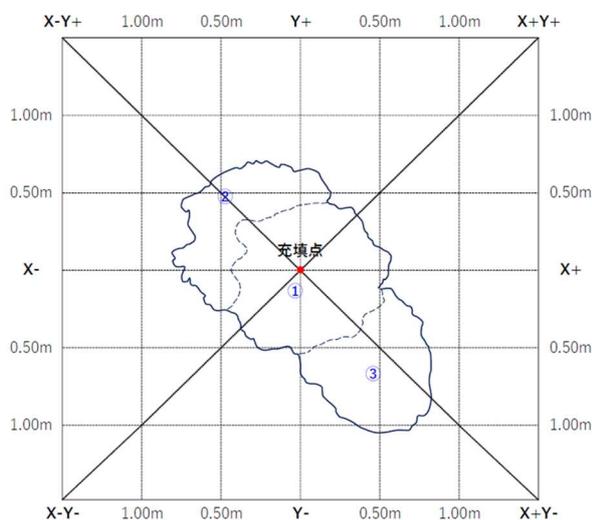


图-3.5(b) 基-3 (空洞厚 10mm, 含水比 20%)

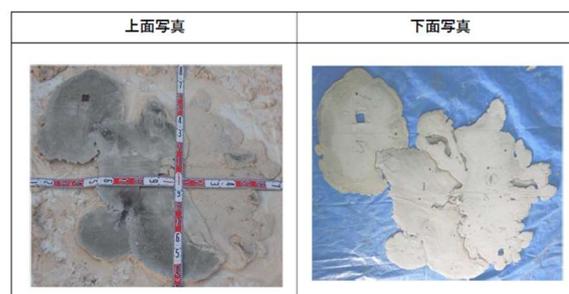
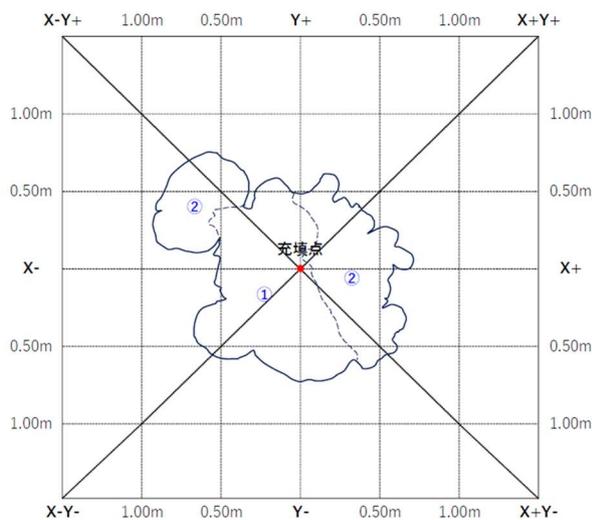


图-3.5(c) 基-5 (空洞厚 10mm, 含水比 33%)

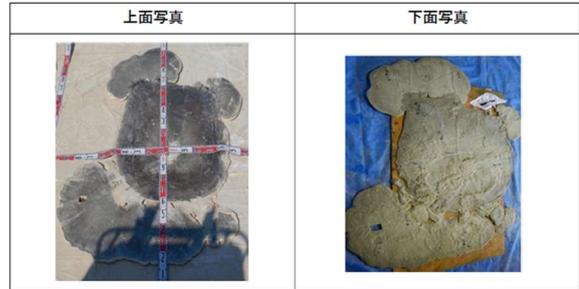
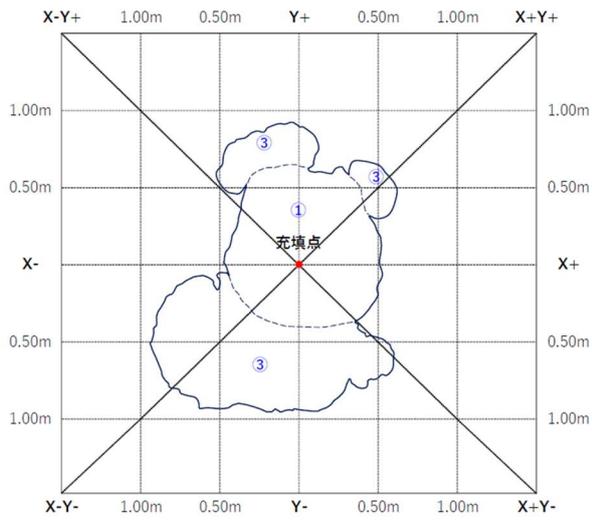


図-3.5(d) 基-7 (空洞厚 10mm, 含水比 50%)

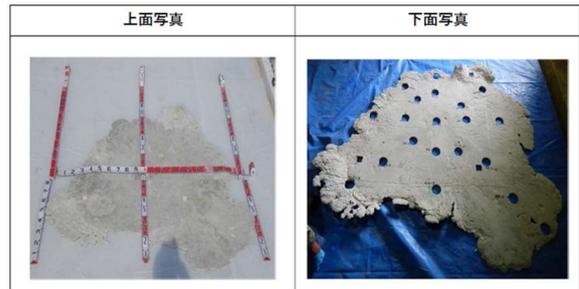
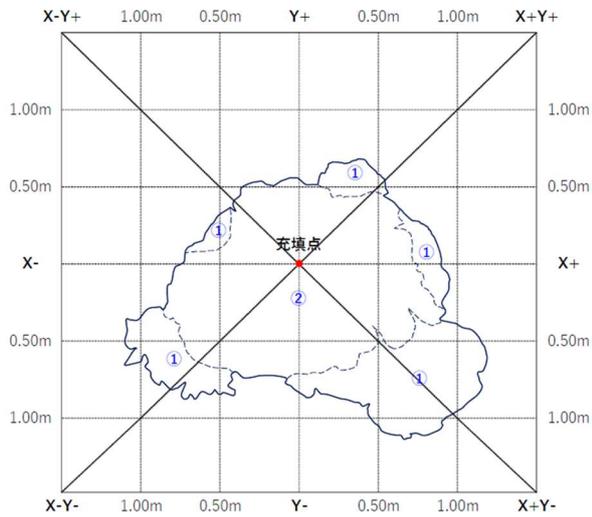


図-3.5(e) 基-9 (空洞厚 10mm, 滞水状態)

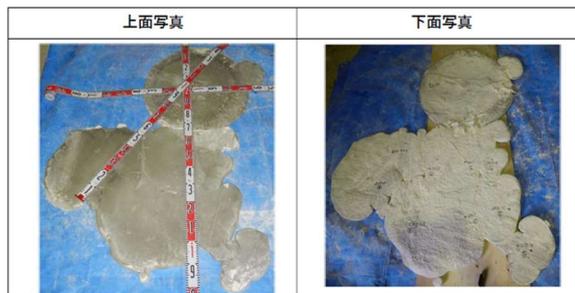
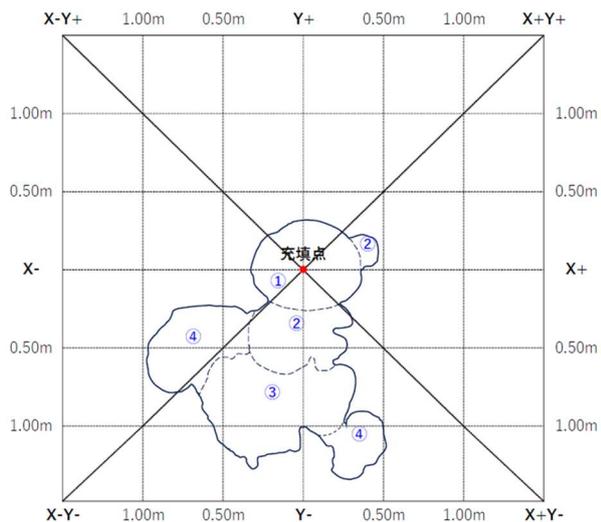


图-3.6(a) 基-2 (空洞厚 20mm, 含水比 0%)

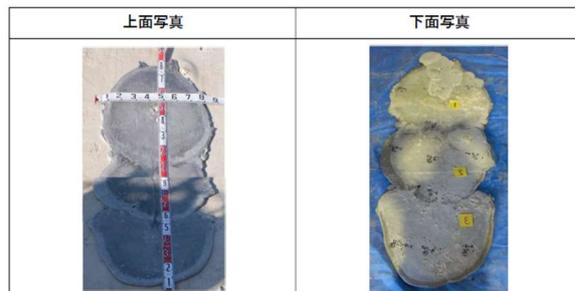
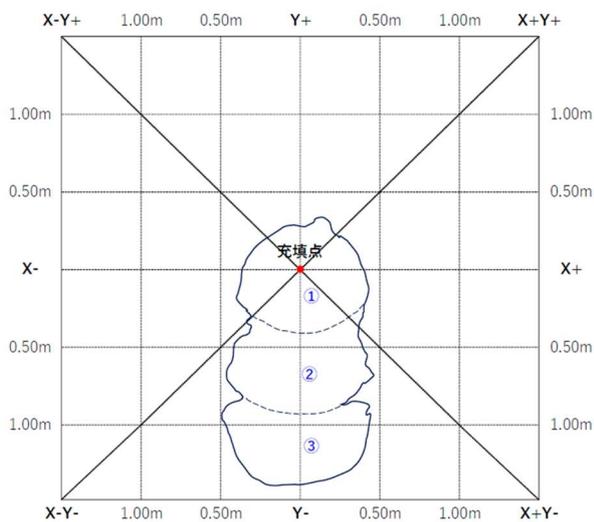


图-3.6(b) 基-4 (空洞厚 20mm, 含水比 20%)

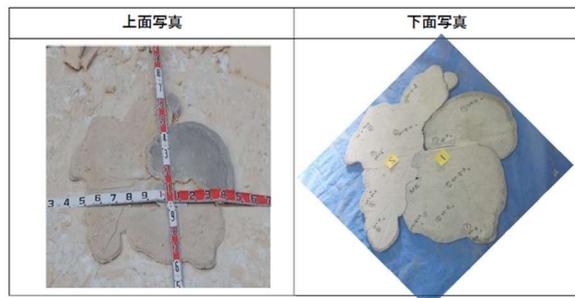
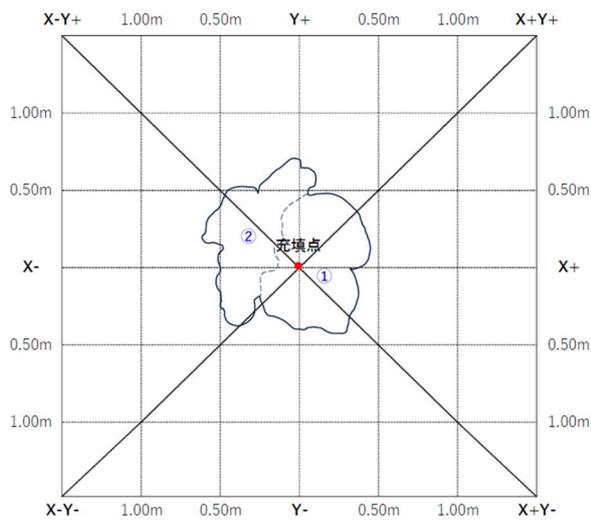


图-3.6(c) 基-6 (空洞厚 20mm, 含水比 33%)

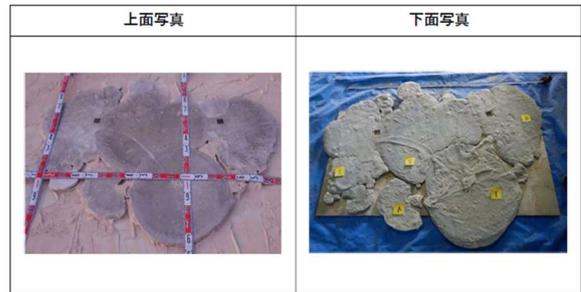
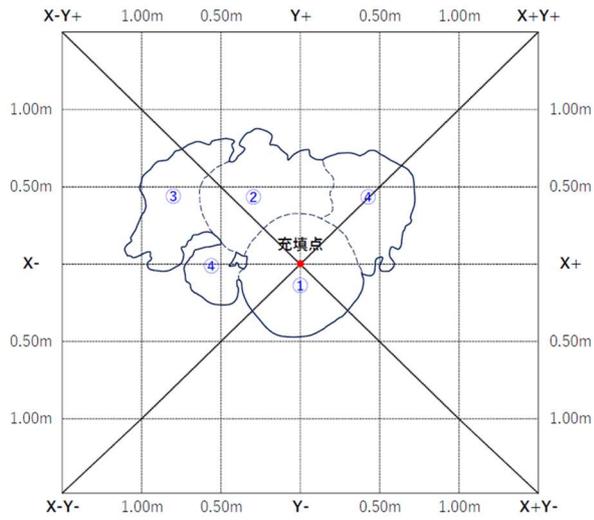


図-3.6(d) 基-8 (空洞厚 20mm, 含水比 50%)

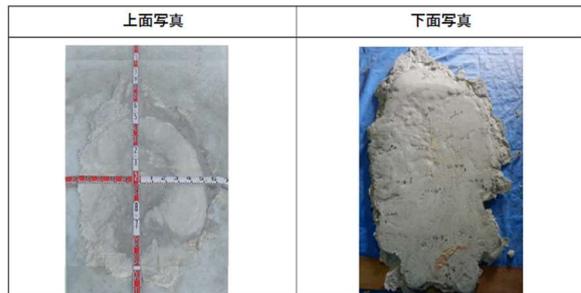
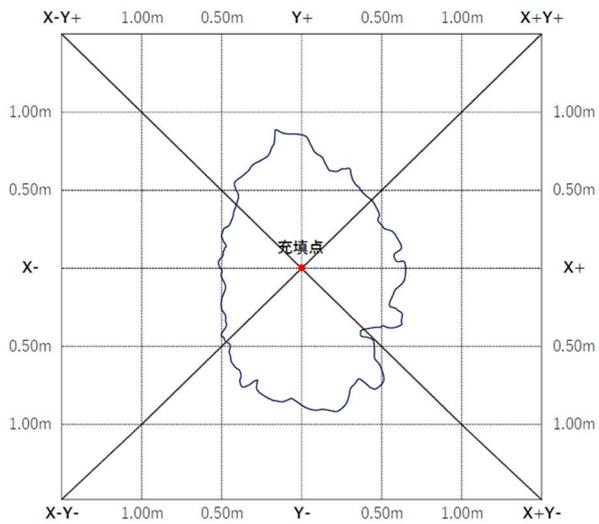


図-3.6(e) 基-10 (空洞厚 20mm, 滞水状態)

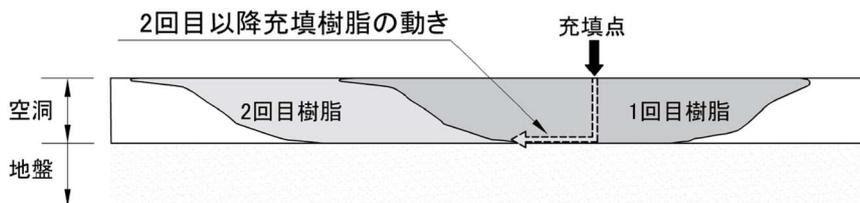


図-3.7 2回目充填樹脂の拡がり

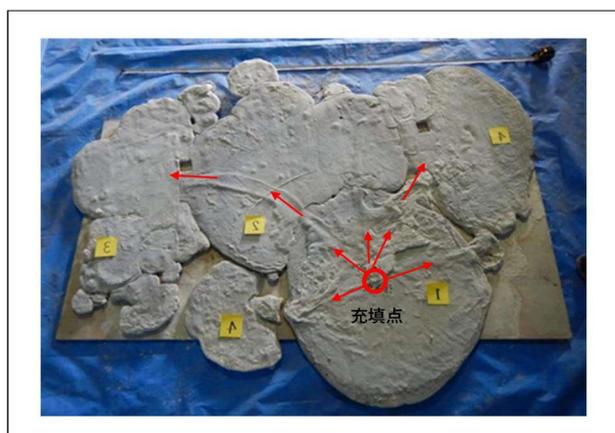
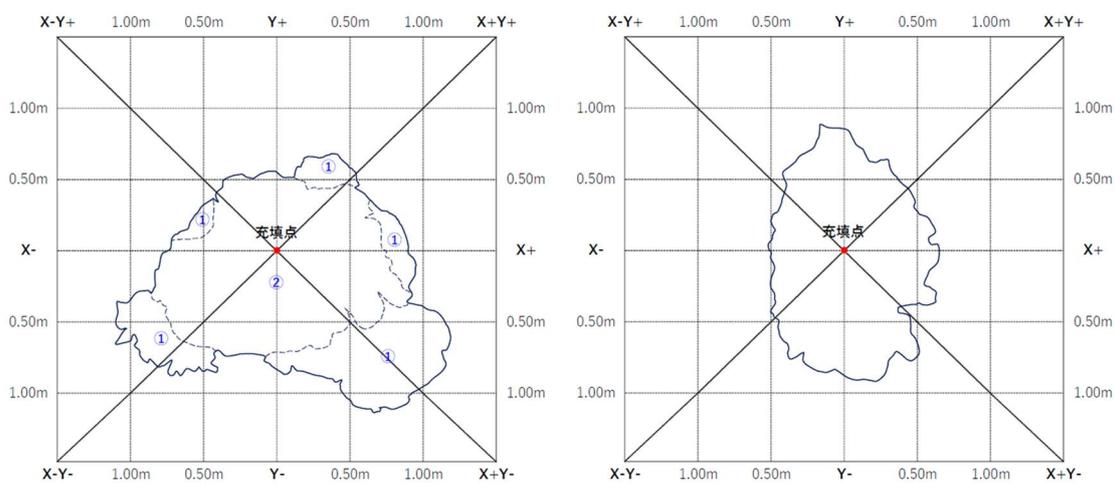


図-3.8 形成樹脂の下面

(基-8, 赤矢印は2回目以降樹脂の流動痕)



(a) 基-9 (空洞厚 10mm)

(b) 基-10 (空洞厚 20mm)

図-3.9 滞水状態における樹脂の拡がり状態

(2) 形成樹脂の拡がり方, 形状・寸法

表-3.4 に各試験条件における充填回数別の樹脂の拡がり面積, 樹脂厚さ, 見掛けによる推定体積を一覧として示した.

滞水状態における結果を除外すると, 空洞厚 10mm の条件では 1 回目の樹脂 1.0kg 充填で 0.72~0.83m<sup>2</sup> 拡がっており, これは直径 1.0m の円に相当する面積である. また, 空洞厚 20mm の条件では 1 回目の樹脂 1.0kg 充填で 0.30~0.45m<sup>2</sup> 拡がっており, 直径 0.60~0.75m の円に相当する面積である.

1 回目の充填面積と 2 回目以降の充填面積に着目すると, 全ての試験条件で 1 回目充填面積の方が大きく拡がっていた. また, 拡がった樹脂の外周の先端部形状は, 図-3.10 に示すとおり, 先端部が空洞厚よりも薄い凸レンズ状であった. 2 回目以降の充填樹脂は, 前述のとおり, 1 回目充填樹脂の先端部下側に残った空洞部を充填してから遠方に拡がるため, 見掛け上面積が小さいと推察される.

1 回目充填樹脂の形状に着目すると, 滞水状態の場合を除き, 充填点近傍に楕円形が形成されており, 充填点からの半径は表-3.5 のとおりであった. 樹脂の拡がりの平均半径と最短半径の比を算出すると, 一部を除き, 概ね 0.7~0.8 であることから, 充填点を中心とした円形に近い楕円形であることがわかる.

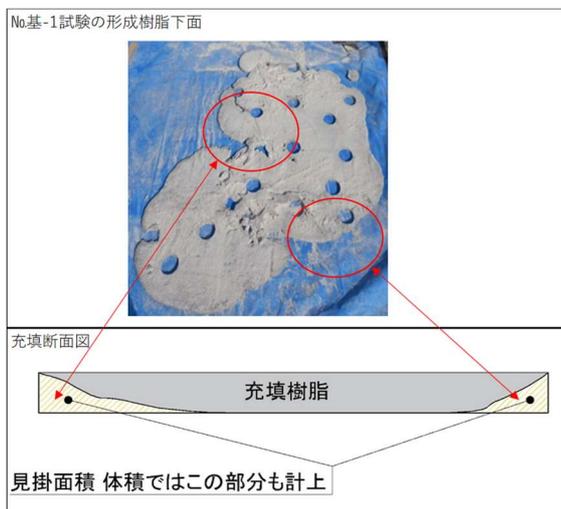


図-3.10 樹脂の見掛け面積と体積  
(写真の孔はサンプル採取により生じた)

表-3.4 樹脂の拡がり面積，樹脂の厚さ，推定体積

仮想地盤の含水比		0%		20%		33%		50%		滞水状態		
試験 No.		基-1	基-2	基-3	基-4	基-5	基-6	基-7	基-8	基-9	基-10	
空洞厚 (mm)		10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	
樹脂量 (kg)		2.0	4.0	3.0	3.0	2.0	2.0	3.0	4.0	2.0	2.0	
拡がり面積 (m <sup>2</sup> )	充填 1 回目	0.827	0.307	0.722	0.436	0.771	0.444	0.825	0.453	0.897	1.445	
	充填 2 回目	0.416	0.246	0.410	0.418	0.724	0.352	1.068	0.388	1.557		
	充填 3 回目	—	0.451	0.470	0.375	—	—		0.292	—		—
	充填 4 回目	—	0.364	—	—	—	—	—	0.411	—		—
	計	1.243	1.368	1.603	1.229	1.495	0.796	1.893	1.543	2.454		1.445
樹脂の厚さ (mm)	充填 1 回目	11.7	22.9	11.2	14.9	9.3	17.3	12.1	18.5	13.8	24.0	
	充填 2 回目	16.3	24.3	10.0	18.0	11.1	18.5	14.8	20.9	16.0		
	充填 3 回目	—	22.4	9.5	15.4	—	—		20.4	—		—
	充填 4 回目	—	22.6	—	—	—	—	—	20.3	—		—
	平均	12.8	23.0	10.5	16.2	10.2	17.9	13.2	19.7	15.7		24.0
推定体積 (×10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> )	充填 1 回目	9.63	7.02	8.06	6.49	7.13	7.70	9.99	8.35	12.40	34.62	
	充填 2 回目	6.77	5.97	4.10	7.52	8.02	6.50	15.78	8.08	24.96		
	充填 3 回目	—	10.09	4.47	5.78	—	—		5.94	—		—
	充填 4 回目	—	8.25	—	—	—	—	—	8.35	—		—
	計	16.40	31.33	16.63	19.79	15.15	14.20	25.77	30.73	37.36		34.62
樹脂 1kg 当たり体積 (×10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup> )	1~4 回目累積	8.20	7.83	5.54	6.60	7.57	7.10	8.59	7.68	18.68	17.31	

※樹脂 1.0kg は 10 カウントの樹脂量であり，1 回の充填で 1.0kg 充填している。

表-3.5 1 回目充填樹脂の拡がり半径

仮想地盤の含水比		0%		20%		33%		50%		滞水状態	
試験 No.		基-1	基-2	基-3	基-4	基-5	基-6	基-7	基-8	基-9	基-10
空洞厚 (mm)		10	20	10	20	10	20	10	20	10	20
樹脂量 (kg)		1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
拡がり半径 (m)	X+	0.47	0.36	0.56	0.39	0.07	0.40	0.51	0.37	0.74	0.55
	X-	0.29	0.32	0.44	0.36	0.52	0.14	0.45	0.34	0.73	0.50
	Y+	0.57	0.31	0.41	0.27	0.39	0.44	0.64	0.31	0.55	0.85
	Y-	0.52	0.25	0.54	0.40	0.72	0.40	0.39	0.48	0.69	0.88
	X+ Y+	0.61	0.35	0.51	0.31	0.06	0.52	0.61	0.46	0.66	0.61
	X+ Y-	0.51	0.31	0.50	0.42	0.15	0.42	0.51	0.42	0.69	0.57
	X- Y+	0.61	0.32	0.54	0.28	0.55	0.19	0.51	0.32	0.58	0.58
	X- Y-	0.47	0.27	0.51	0.43	0.78	0.32	0.42	0.42	0.88	0.68
平均半径 (m)		0.51	0.31	0.50	0.36	0.41	0.35	0.50	0.39	0.69	0.65
最短半径 (m)		0.29	0.25	0.41	0.27	0.06	0.14	0.39	0.31	0.55	0.50
最短半径/平均半径		0.57	0.80	0.82	0.76	0.15	0.40	0.77	0.80	0.80	0.77

※X+や Y-の記号は図-3.5～図-3.6 おける充填点からの方向を示す。

(3) 形成樹脂の密度

密度試験結果を表-3.6に示す。以降では以下の用語を用いている。

- ・ サンプル密度  
空洞に形成された樹脂から採取したサンプルの実測質量を、サンプルの実測体積で除すことにより算出した密度
- ・ 標準密度  
常温において周辺からの拘束を受けない状態で樹脂を発泡させた際の密度

① 空洞厚が密度に及ぼす影響

空洞厚 10mm と 20mm のサンプル密度を比較すると、仮想地盤の含水比によらず、空洞厚 10mm のサンプル密度の方が高かった。これは、空洞が薄いほど閉塞効果（狭い空間で樹脂が発泡すると周囲の拘束を受けて密になる）によりサンプル密度が高くなったと考えられる。

② 充填回数別の密度

1 回目充填のサンプル密度は、2 回目充填のサンプル密度よりも高い傾向がある。また、2~4 回目充填のサンプル密度は、ほぼ一定となっている。1 回目充填と 2~4 回目充填でサンプル密度が異なる理由は以下が考えられるが、2~4 回目充填のサンプル密度がほぼ一定であることから、後者による影響が大きいと考えられる。

- ・ 1 回目充填による樹脂は、2 回目以降充填による樹脂の膨張作用を受けたため、サンプル密度が高くなっ

た。

- ・ 2 回目以降充填による樹脂は、既存形成樹脂と地盤の間を通り遠方に拡がるが、既存形成樹脂の下を通過後、急激に膨張作用が働き、サンプル密度が低下した。

③ 仮想地盤の含水比の影響

仮想地盤の含水比が高いほどサンプル密度が低下する傾向があり、滞水状態の場合は水の影響を直接受けているためサンプル密度の低下が顕著である。表-3.6及び図-3.11の密度変化率は、樹脂 200 の標準密度 (0.193Mg/m<sup>3</sup>) に対するサンプル密度の比であり、含水比 0%及び 20%の条件では標準密度と同等以上のサンプル密度が得られているものの、含水比 33%以上のサンプル密度は標準密度の 70%程度まで低下する場合もある。

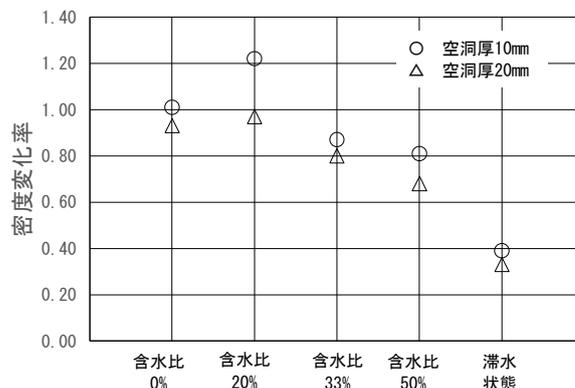


図-3.11 仮想地盤の含水比と密度変化率

表-3.6 充填基礎試験における密度試験結果

仮想地盤の含水比		0%		20%		33%		50%		滞水状態		
試験 No.		基-1	基-2	基-3	基-4	基-5	基-6	基-7	基-8	基-9	基-10	
空洞厚 (mm)		10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	
樹脂量 (kg)		2.0	4.0	3.0	3.0	2.0	2.0	3.0	4.0	2.0	2.0	
標準密度 (Mg/m <sup>3</sup> )		0.193										
サンプル密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	充填 1 回目	0.199	0.195	0.258	0.203	0.179	0.154	0.174	0.163	0.050	0.063	
	充填 2 回目	0.183	0.172	0.209	0.180	0.158	0.153	0.134	0.115	0.080		
	充填 3 回目	—	0.175	0.216	0.180	—	—		0.117	—		—
	充填 4 回目	—	0.172	—	—	—	—	—	0.104	—		—
	平均	0.195	0.180	0.236	0.188	0.168	0.154	0.157	0.132	0.075		0.063
密度変化率 (サンプル密度/標準密度)		1.01	0.93	1.22	0.97	0.87	0.80	0.81	0.68	0.39	0.33	

※サンプル密度は複数サンプルによる平均値である。

(4) 樹脂充填後の鉛直変位

樹脂充填後に図-3.12 に示す 5 点で鉄板（縦 3,048mm × 横 3,048mm）の鉛直変位を測定した結果を表-3.7 に示す。

樹脂充填孔近傍の測点①の隆起が 1mm に達した時点で樹脂充填を終了したが、その後の樹脂の膨張により、最大 4mm の隆起が確認された。樹脂充填に伴い隆起が確認されたのは測点①のみであり、他の測点では隆起はほとんど認められなかった。形成された樹脂の寸法と鉄板の寸法を考慮すると、樹脂充填範囲から 1.0m 程度離れていれば、PC 版相当の重量では隆起は生じないものと

考えられる。なお、測点②～⑤では沈下が確認されているが、鉄板が樹脂充填孔近傍で隆起したことで上に凸の形状となったことによる反動と推察される。

充填終了から 40 分後の測点①の鉛直変位を確認すると、空洞厚 20mm の条件では、充填終了直後から 1mm 沈下している場合があった。室内性能試験では、樹脂の膨張は 15 分前後で終了し、40 分経過後の樹脂はほぼ硬化した状態であることを確認しているが、形成された樹脂が厚い場合は、硬化終了までの間に上載荷重の影響も受け若干収縮したものと考えられる。

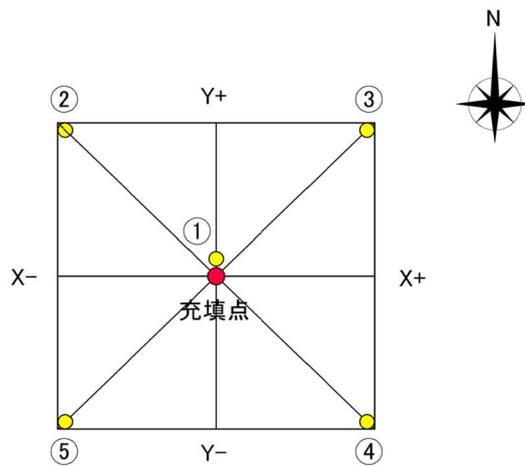


図-3.12 鉛直変位の測定位置

表-3.7 樹脂充填後の鉛直変位

仮想地盤の含水比		0%		20%		33%		50%		滞水状態	
試験 No.		基-1	基-2	基-3	基-4	基-5	基-6	基-7	基-8	基-9	基-10
空洞厚 (mm)		10	20	10	20	10	20	10	20	10	20
樹脂量 (kg)		2.0	4.0	3.0	3.0	2.0	2.0	3.0	4.0	2.0	2.0
充填直後の鉛直変位 (mm)	測点①	1	1	4	2	4	3	1	2	2	1
	測点②	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0
	測点③	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
	測点④	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0
	測点⑤	0	0	0	0	-2	0	1	0	0	0
40 分後の鉛直変位 (mm)	測点①	1	0	4	2	4	2	1	1	2	0
	変位差	—	-1	—	—	—	-1	—	-1	—	-1

## (5) 形成樹脂の推定強度

2.5 一軸圧縮試験で導いた式-2.1及び式-2.2を用い、サンプル密度から圧縮強さ及び変形係数を推定した結果を表-3.8に示す。なお、充填基礎試験に用いた樹脂200の標準密度  $0.193\text{Mg/m}^3$  から推定した標準圧縮強さは  $2,324\text{kN/m}^2$ 、標準変形係数は  $95.1\text{kN/m}^2$  である。

含水比 0%の場合は圧縮強さ、変形係数ともに標準値と同程度となっているが、含水比が高くなると徐々に低

下し、滞水状態の場合は圧縮強さ、変形係数ともに極端に低く、標準値の20%前後となっている。

以上のことから、様々な現場環境に対応することを考慮すると、空洞が湿潤状態であっても十分な圧縮強さ及び変形係数を確保するためには、施工前に空洞内の水分を極力排除することや、充填基礎試験に用いた樹脂200よりも強度の高い材料を使用することが望ましいと言える。

表-3.8 推定した圧縮強さと変形係数

仮想地盤の含水比	0%		20%		33%		50%		滞水状態	
	基-1	基-2	基-3	基-4	基-5	基-6	基-7	基-8	基-9	基-10
試験 No.										
空洞厚 (mm)	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20
樹脂量 (kg)	2.0	4.0	3.0	3.0	2.0	2.0	3.0	4.0	2.0	2.0
サンプル密度 ( $\text{Mg/m}^3$ )	0.195	0.180	0.236	0.188	0.168	0.154	0.157	0.132	0.075	0.063
サンプル密度/標準密度	1.01	0.93	1.22	0.97	0.87	0.80	0.81	0.68	0.39	0.33
推定圧縮強さ ( $\text{kN/m}^2$ )	2,369	2,041	3,389	2,213	1,796	1,530	1,586	1,155	426	317
推定圧縮強さ/標準圧縮強さ	1.02	0.88	1.46	0.95	0.77	0.66	0.68	0.50	0.18	0.14
推定変形係数 ( $\text{kN/m}^2$ )	96.7	85.0	132.3	91.1	76.3	66.6	68.6	52.9	24.8	20.3
推定変形係数/標準変形係数	1.02	0.89	1.39	0.96	0.80	0.70	0.72	0.56	0.26	0.21

### 3.5 まとめ

充填基礎試験結果より、以下のことが明らかとなった。また、これらの結果を基に、実大規模樹脂充填本試験に向けて検討・検証すべき事項を整理した。

#### ① 樹脂の拡がり形状

10 カウント 5 秒インターバル方式による充填では、地盤の含水状態に関わらず、1 回目充填の樹脂は充填点近傍に円形に近い楕円形の樹脂が形成される。この結果から、1 回の樹脂充填量を増加することにより、充填点近傍に大きな楕円形が形成され、充填管理がしやすくなることが想定される。

#### ② 樹脂のコントロール

10 カウント 5 秒インターバル方式による充填では、2 回目以降に充填した樹脂は 1 回目充填樹脂の下面を通り、1 回目充填で形成された樹脂の外側に形成された。また、2 回目以降に充填した樹脂の拡がり方に規則性はなかった。この結果から、複数回充填では 2 回目以降に充填する樹脂のコントロールが困難であり、1 回での充填が妥当と考えられる。

#### ③ 形成樹脂の断面

形成樹脂外周の先端断面形状は凸レンズ状（空洞厚よりも薄い樹脂が形成される）であるため、実際の形成樹脂の拡がり面積は、充填量と密度から推定する面積よりも大きくなる。

#### ④ 空洞厚が密度に及ぼす影響

空洞が薄い 10mm の条件において形成された樹脂の密度が高くなる傾向が確認できた。空洞厚による閉塞効果が密度に影響していると想定されることから、空洞厚と密度の関係を更に明確にする必要がある。また、実際の現場では空洞厚が 10mm 以下の状態も想定されるため、薄い空洞に樹脂を充填した場合の検証が必要である。

#### ⑤ 充填回数別の密度

1 回目充填の密度は 2 回目以降充填の密度よりも高くなる傾向がある。①②も併せて考えれば、1 回での充填が妥当と考えられる。

#### ⑥ 仮想地盤の含水比の影響

仮想地盤の含水比が高いほど密度が低下する傾向があり、形成樹脂は脆弱となる。特に、滞水状態の場合は密度の低下が顕著であり、圧縮強さもほとんど発現しないと考えられることから、本研究の対象外とする。

#### ⑦ 形成樹脂の圧縮強さ、変形係数

形成樹脂の圧縮強さ及び変形係数を一定以上確保す

るためには、空洞中の水分に起因した水和反応による密度低下を考慮し、充填基礎試験で使用した樹脂 200 よりも高強度の樹脂を用いることが必要である。

以上を踏まえ、実大規模樹脂充填本試験では、以下の対策を行うこととした。

- 樹脂の充填回数は 1 回とし、1 回充填における樹脂の形状と寸法を確認する。
- 薄い空洞条件における充填試験を実施する。
- 空洞中の水分が密度に及ぼす影響を更に明確にする。
- 充填基礎試験で使用した樹脂 200 よりも高強度の樹脂を使用する。
- 仮想地盤が滞水状態の場合は、本研究の対象外とする。

## 4. 実大規模樹脂充填本試験

### 4.1 試験概要

実大規模樹脂充填本試験（以下、充填本試験）は、充填基礎試験で得られた結果に基づき、表-4.1を基に試験計画を立案した。

充填本試験は、以下の①～④の条件を組み合わせで実施し、それぞれの条件下における形成樹脂の特性を把握することとした。なお、2.5 一軸圧縮試験で述べたように、樹脂 300（新）の主材及び反応材は樹脂 300（旧）と同一であり、充填時の機器等の設定を変えることにより改良した樹脂であることから、4章以降では樹脂 300（新）を樹脂 300 と記載することとした。

- ① 樹脂の種類：樹脂 200（標準樹脂密度 0.200Mg/m<sup>3</sup>）及び樹脂 300（標準樹脂密度 0.291Mg/m<sup>3</sup>）
- ② 樹脂充填方法：鉄板の鉛直変位 1mm まで連続充填
- ③ 空洞の条件：空洞厚 10mm（水平空洞という）及び空洞厚 0～10mm（傾斜空洞という）
- ④ 仮想地盤の条件：含水比 0%（ドライ）、20%、33%、50%の 4 種類の仮想地盤（シルトと水とを混合したもの）

### 4.2 試験装置及び試験方法

試験装置及び試験方法は充填基礎試験と同様であるが、以下の点を変更した。

- ① 充填基礎試験では 3.048m×1.524m の 2 枚の鉄板をボルト等で接合し使用したが、充填本試験では試験スペースが手狭であったことに加え、仮想地盤を形成するための時間短縮のため 3.048m×1.524m の 1 枚とした。なお、本章に掲載している樹脂形成図では、Y 方向が鉄板の長手方向（Y = -1.5m～1.5m）であり、X 方向が鉄板の短手方向（X = -0.75m～0.75m）である。
- ② 充填基礎試験では、空洞厚を 10mm または 20mm で一定としたが、充填本試験で実施する空洞厚 0～10mm の傾斜空洞の場合には、図-4.1 に示すように、空洞厚に 10mm を加えたピース板の上に鉄板を傾斜させて敷設した。
- ③ 鉄板上に積載する鋼製山留の数は変更していないが、1 枚の鉄板の中央に樹脂充填孔を設けたため、図-4.2 に示すように、鋼製山留の配置を変更した。

表-4.1 充填本試験における方針と対策

充填基礎試験結果を基にした充填本試験の方針	充填本試験における対策
樹脂の充填回数は 1 回とし、1 回充填における樹脂の形状と寸法を確認する。	1 回の連続充填で実施し、形成樹脂の観察を行う。
薄い空洞条件における充填試験を実施する。	空洞厚が 10mm で一様の空洞に加え、鉄板を傾斜させて敷設することで空洞厚を 0～10mm と変化させた空洞に対しても実施する。
空洞中の水分が密度に及ぼす影響を更に明確にする。	仮想地盤の含水比を 0%、20%、33%、50%として実施する。
充填基礎試験で使用した樹脂 200 よりも高強度の樹脂を使用する。	樹脂 200 及び樹脂 300 を使用する。
仮想地盤が滞水状態の場合は、本研究の対象外とする。	仮想地盤が滞水状態の試験は実施しない。



### 4.3 樹脂 200 の試験結果

樹脂 200 を用いた充填本試験は、4 種類の仮想地盤、2 種類の空洞厚に対して表-4.2 に示す計 10 ケースを実施した。水平空洞における樹脂の形成状況を図-4.3 に、傾斜空洞における樹脂の形成状況を図-4.4 に示す。なお、5-②及び 7-②は、5 及び 7 の再確認のために追加したケースである。

表-4.2 樹脂 200 を用いた充填本試験の試験条件

試験 No.	仮想地盤の含水比	空洞厚 (mm)	樹脂充填量 (kg)
1	0%	10	3.6
5		0~10	2.8
5-②			1.9
2	20%	10	2.6
6		0~10	2.2
3	33%	10	2.2
7		0~10	1.5
7-②			2.2
4	50%	10	2.6
8		0~10	1.4

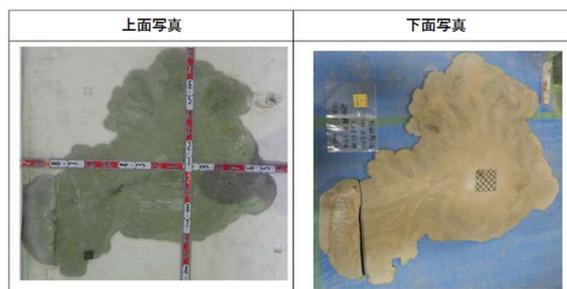
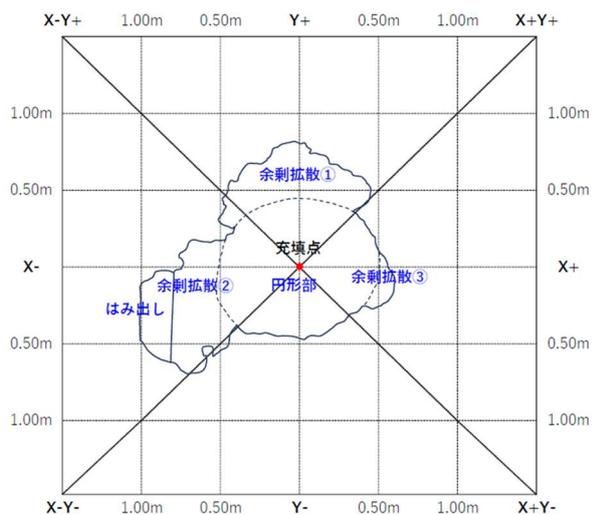


図-4.3(a) No.1 (樹脂 200, 空洞 10mm, 含水比 0%)

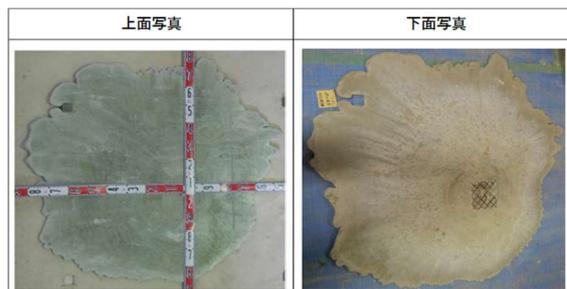
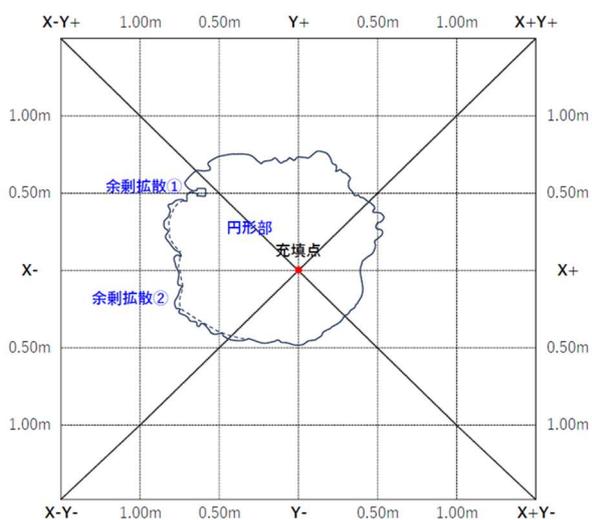


図-4.3(b) No.2 (樹脂 200, 空洞 10mm, 含水比 20%)

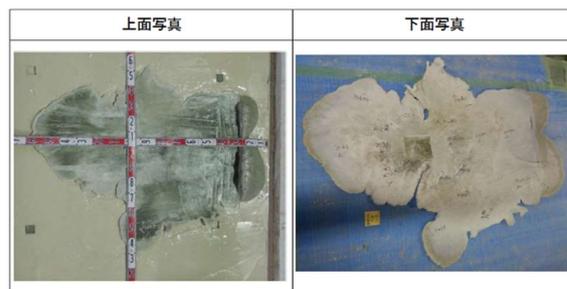
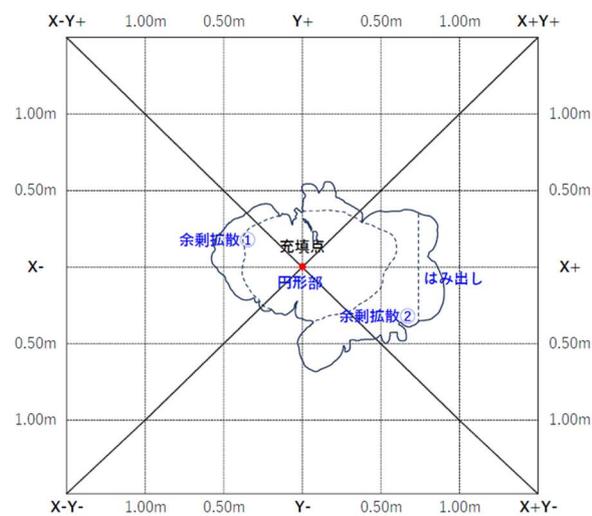


図-4.3(c) No.3 (樹脂 200, 空洞 10mm, 含水比 33%)

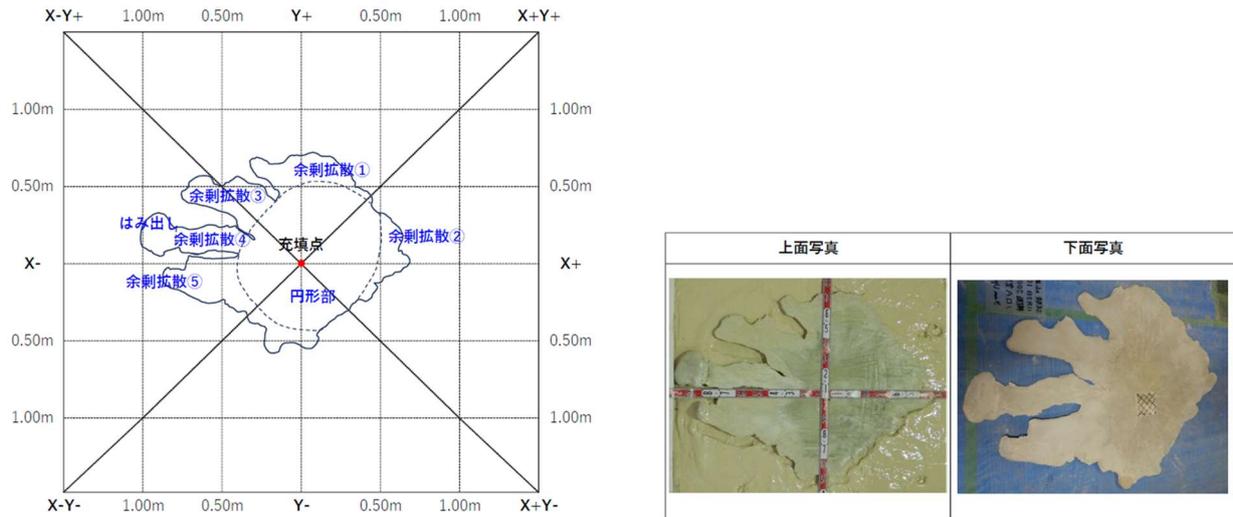


図-4.3(d) No.4 (樹脂 200, 空洞 10mm, 含水比 50%)

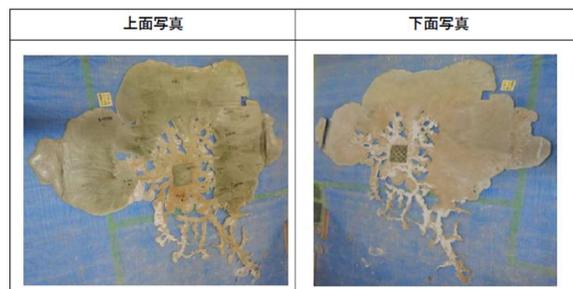
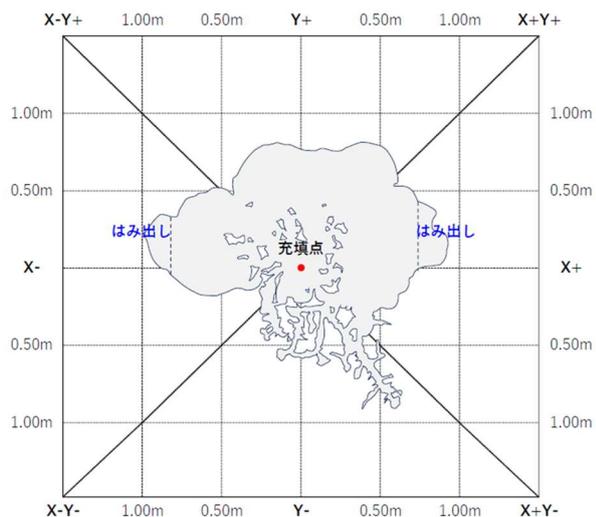


図-4.4(a) No.5 (樹脂 200, 空洞 0~10mm, 含水比 0%)

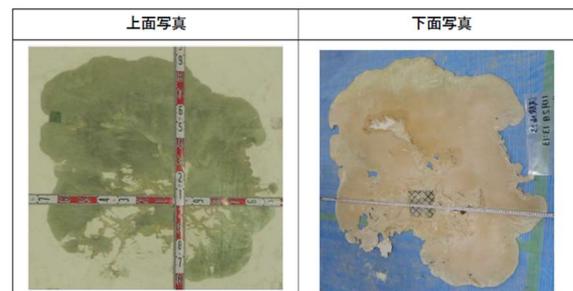
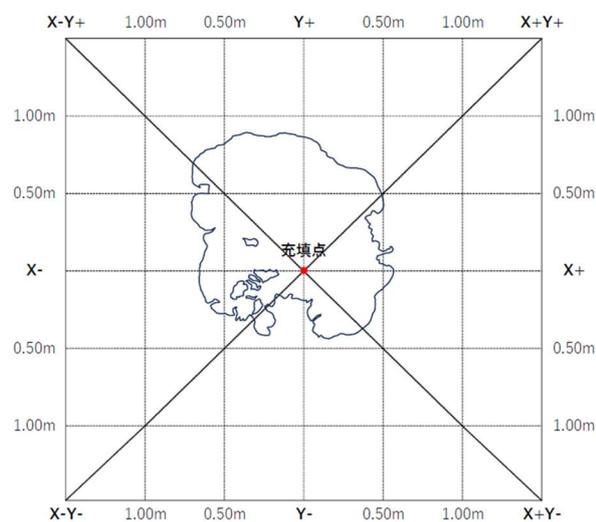


図-4.4(b) No.5-② (樹脂 200, 空洞 0~10mm, 含水比 0%の再確認ケース)

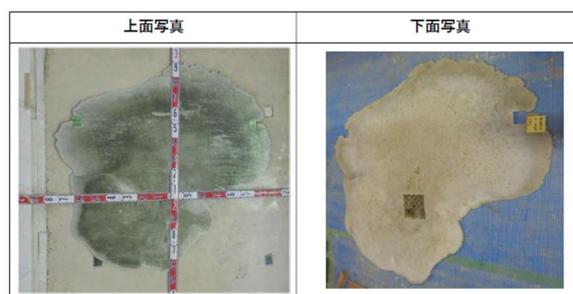
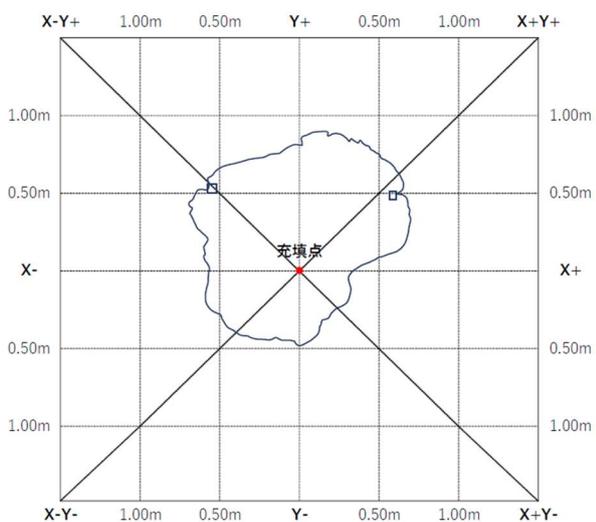


図-4.4(c) No.6 (樹脂 200, 空洞 0~10mm, 含水比 20%)

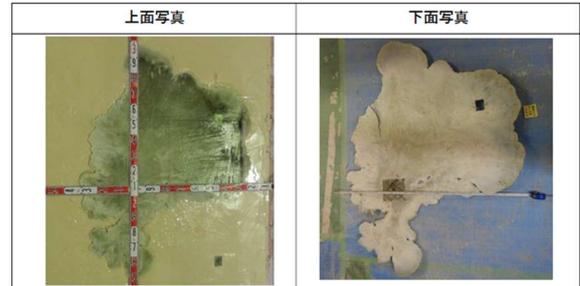
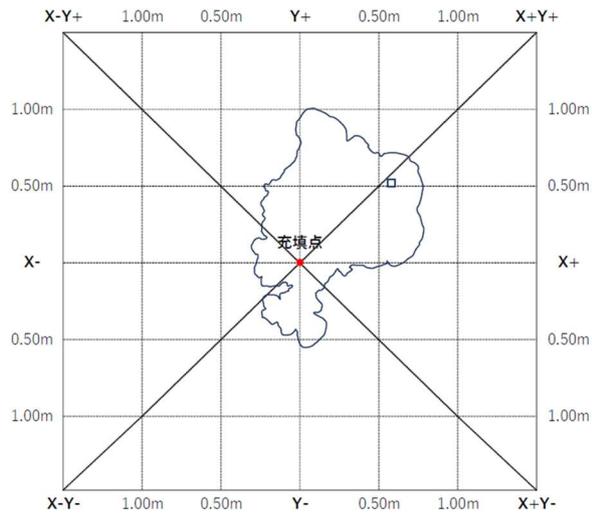


図-4.4(d) No.7 (樹脂 200, 空洞 0~10mm, 含水比 33%)

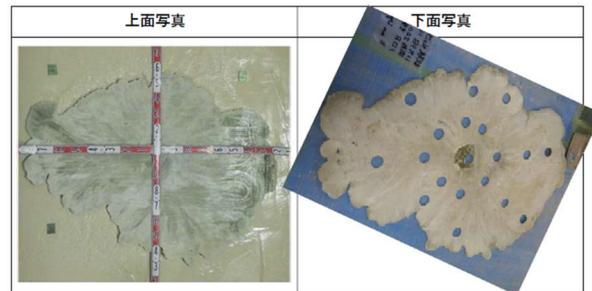
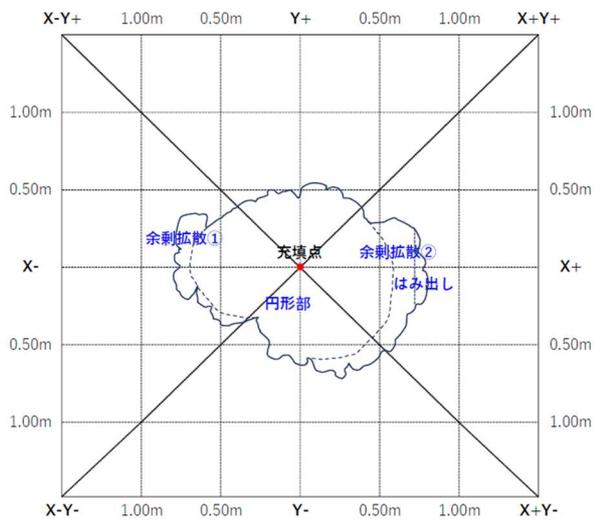


図-4.4(e) No.7-② (樹脂 200, 空洞 0~10mm, 含水比 33%の再確認ケース)

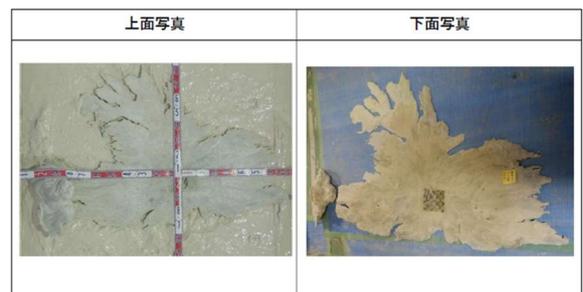
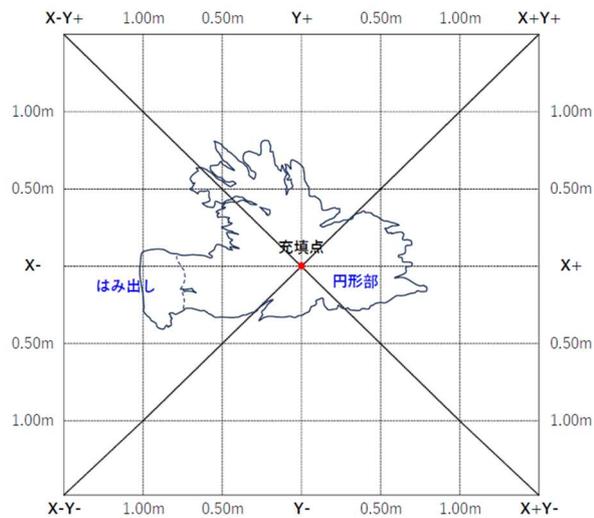


図-4.4(f) No.8 (樹脂 200, 空洞 0~10mm, 含水比 50%)

(1) 空洞における樹脂の挙動と形状

a) 水平空洞

水平空洞に形成された樹脂の下面の状況を図-4.5に示す。充填基礎試験のインターバル方式とは異なり、充填本試験では連続充填方式としたが、連続充填の初期に充填された樹脂（以下、初期充填樹脂）は充填点近傍に楕円形に拡がり、形成樹脂の下面に筋状の樹脂の流動痕が確認された。これは、充填基礎試験のインターバル方式の場合とほぼ同様であり、図-4.6のように連続充填の後期に充填された樹脂（以下、後期充填樹脂）が初期充填樹脂の下面を通り拡がったものと推測される。その際、後期充填樹脂が初期充填樹脂の上面（鉄板と樹脂の境界）を通らなかったのは、鉄板と初期充填樹脂が比較的密着

しており、後期充填樹脂が通過する隙間がなかったものと推測される。後期充填樹脂の拡がり方に規則性は認められず、仮想地盤が低い箇所や空洞が厚い箇所などの拡がりやすい方向へ充填されたものと考えられる。

水平空洞に形成された樹脂形状に着目すると、仮想地盤の含水比により形状が異なっていた。前述のとおり、初期充填樹脂は充填点近傍に楕円形を形成し、後期充填樹脂はその周辺に形成されるが、図-4.7のように含水比が低い場合は後期充填樹脂が半円形に、含水比が高い場合は後期充填樹脂が樹枝状になっていた。含水比が高い場合は、仮想地盤中の水分の影響を受け、水和反応により樹脂が樹枝状に伸びて拡散したと考えられる。



図-4.5 水平空洞における形成樹脂の下面（No.1，樹脂 200，赤矢印方向の白い筋は樹脂の流動痕）

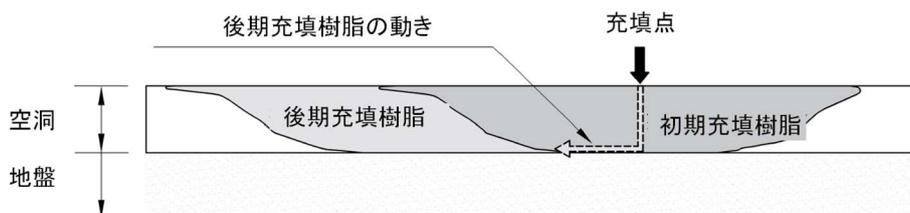


図-4.6 連続充填時の樹脂の拡がり

含水比 0%、20%、33%の地盤条件の形状	含水比50%の地盤条件の形状
楕円形状+半円形状	楕円形+樹枝状

図-4.7 水平空洞における樹脂形状（樹脂 200）

b) 傾斜空洞

傾斜空洞における充填では、樹脂の拡がり方が水平空洞とは異なっており、充填された樹脂の大半は空洞が厚い方に拡がっていた。図-4.8のように充填点を基点として拡がり面積を比較すると、空洞が薄い方の面積が29%、空洞が厚い方の面積が71%となっており、樹脂は空洞が厚く拡がりに対する抵抗が小さい方により拡がる傾向が明確に現れている。

傾斜空洞に形成された樹脂形状に着目すると、含水比が高い場合には外周部が樹枝状の形状となっていた。これは水平空洞の場合と同様であり、含水比が高い場合は、水和反応により樹脂が樹枝状に伸びて拡散したと考えられるが、空洞が厚い方が樹枝状の程度が高かった。

傾斜空洞に形成された樹脂の最も特徴的な点は、含水比0%の場合に洲が多く確認されたことである。他の含水比の場合でも小さな洲はわずかながらに存在するが、含水比0%の場合は顕著であった。これは図-4.9に示す以下の原因によるものと推測される。

- ① 初期充填樹脂は、拡がりに対する抵抗が小さい空洞が厚い方へ拡がる。
- ② 後期充填樹脂も、初期充填樹脂と同様に、空洞が厚い方に拡がる。
- ③ 空洞が厚い方にある程度樹脂が充填されると、充填された樹脂の抵抗があるため、空洞が薄い方に拡がる。
- ④ その後も充填点近傍や空洞が薄い方にも充填されるが、完全に充填される前に鉛直変位が1mmに達したため充填が終了する。その結果、洲が残る。

表-4.3にケース毎の洲の発生の有無をまとめた。洲の発生場所は充填点近傍であり、発生場所と空洞厚との関係は認められなかった。洲が発生しなかったのはNo.6及びNo.7-②であり、これらの試験時の鉛直変位は他の試験における鉛直変位よりも相対的に大きいことから、樹脂量が少ないと洲が発生しやすくなる可能性がある。図-4.10に充填直後の鉛直変位が小さかったNo.7と、鉛直変位が大きかったNo.7-②を示す。

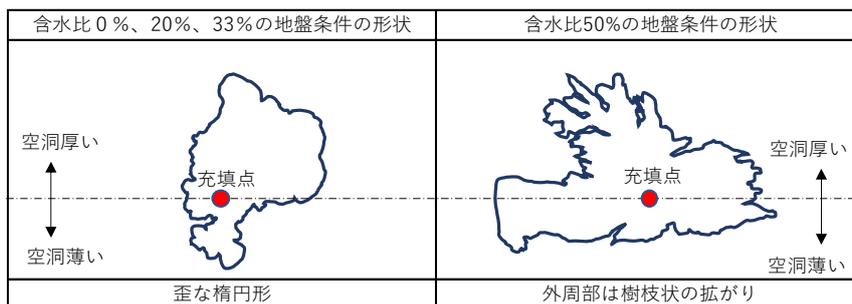


図-4.8 傾斜空洞における樹脂形状 (樹脂 200)

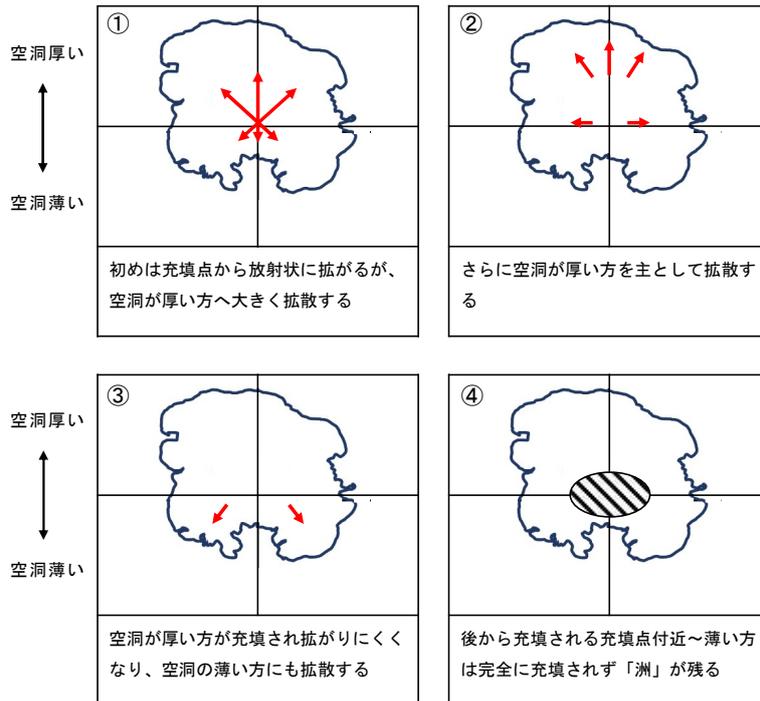


図-4.9 傾斜空洞における樹脂形状の進展（樹脂 200）

表-4.3 傾斜空洞における洲の発生状況（樹脂 200）

仮想地盤の含水比	0%		20%	33%		50%
試験 No.	5	5-②	6	7	7-②	8
樹脂量 (kg)	2.8	1.9	2.2	1.5	2.2	1.4
充填直後の鉛直変位 (mm)	3.0	3.0	3.0	0.5	5.0	1.0
洲の有無	有	有	無	少し有	無	少し有

試験 No.	No.7	No.7-②
仮想地盤の含水比	33%	33%
樹脂量 (kg)	1.5	2.2
充填直後の鉛直変位 (mm)	0.5	5.0
形成樹脂図		
洲の有無	赤円内にわずかに洲が発生している	洲は発生していない

※写真の円形の孔はサンプル採取により生じた。

図-4.10 傾斜空洞に形成された樹脂の洲（樹脂 200）

## (2) 形成樹脂の寸法

## a) 水平空洞

表-4.4 に水平空洞に形成された樹脂の拡がり面積、樹脂厚さ、拡がり直径を一覧として示した。

鉛直変位が 1mm に達するまで 2.2~3.6kg の樹脂を充填した結果、樹脂は 0.9~1.3m<sup>2</sup> 程度拡がった。含水比 33% の場合のみ拡がり小さいが、この条件のみ形成された樹脂が薄く、他の条件よりも空洞が薄かったことが原因と考えられる。含水比 33% の場合を除けば、拡がり面積を正方形あるいは円形と仮定すると、1 辺あるいは直径が概ね 1m 超に相当する。

拡がり直径は図-4.3 における 4 方向で測定した。拡がり面積を円形と仮定した場合の直径と平均直径との差は小さいこと、最短直径/平均直径の値も 0.85~0.89 であることから、円形に近い楕円形であることがわかる。

## b) 傾斜空洞

表-4.5 に傾斜空洞に形成された樹脂の拡がり面積、樹脂厚さ、拡がり直径を一覧として示した。

鉛直変位が 1mm に達するまで 1.5~2.8kg の樹脂を充填した結果、樹脂は 0.9~1.4m<sup>2</sup> 程度拡がった。水平空洞の場合よりも全体の空洞体積が小さいため、水平空洞よりも樹脂量は少ない。含水比 33% の場合のみ拡がり小さいのは、水平空洞と同様の原因と考えられる。

拡がり面積は、面積比率として、空洞が薄い方 (Y-) が 30%、空洞が厚い方 (Y+) が 70% であった。拡がり面積を正方形あるいは円形と仮定すると、水平空洞の場合と同様に、1 辺あるいは直径が概ね 1m 超に相当する。

拡がり直径は図-4.4 における 4 方向で測定した。拡がり面積を円形と仮定した場合の直径と平均直径との差は小さいことから、円形に近い楕円形であることがわかる。ただし、水平空洞の場合よりも最短直径/平均直径の値のばらつきが大きく、水平空洞と傾斜空洞では樹脂の挙動が異なることが表れていると考えられる。

表-4.4 水平空洞における樹脂の拡がり面積、樹脂の厚さ、拡がり直径 (樹脂 200)

仮想地盤の含水比		0%	20%	33%	50%
試験 No.		1	2	3	4
空洞厚 (mm)		10	10	10	10
樹脂量 (kg)		3.6	2.6	2.2	2.6
拡がり 面積 (m <sup>2</sup> )	楕円部	0.732	1.260	0.524	0.640
	楕円外	0.535	0.025	0.416	0.466
	計	1.268	1.285	0.940	1.106
正方形とした場合の辺長 (m)		1.13	1.13	0.97	1.05
円形とした場合の直径 (m)		1.27	1.28	1.09	1.19
樹脂の 厚さ (mm)	楕円部	10.39	10.22	6.74	11.34
	楕円外	11.23	10.22	7.62	16.27
	平均	10.65	10.22	6.99	13.67
拡がり 直径 (m)	X 軸	1.30	1.13	1.30	1.41
	Y 軸	1.26	1.21	0.99	1.23
	X+Y+ ~ X-Y-	1.61	1.22	0.93	1.09
	X-Y+ ~ X+Y-	1.12	1.51	1.19	1.14
最短直径 (m)		1.12	1.13	0.93	1.09
最長直径 (m)		1.61	1.51	1.30	1.23
平均直径 (m)		1.32	1.27	1.10	1.22
最短直径/平均直径		0.85	0.89	0.85	0.89

※X+や Y+の記号は図-4.3 における充填点からの方向を示す。

表-4.5 傾斜空洞における樹脂の拡がり面積，樹脂の厚さ，拡がり直径（樹脂 200）

仮想地盤の含水比		0%		20%	33%	50%
試験 No.		5	5-②	6	7	8
空洞厚 (mm)		0~10	0~10	0~10	0~10	0~10
樹脂量 (kg)		2.8	1.9	2.2	1.5	1.4
洲の有無		有	有	無	少し有	少し有
拡がり 面積 (m <sup>2</sup> )	Y+	0.985	0.878	0.931	0.753	0.610
	Y-	0.438	0.320	0.330	0.186	0.394
	計	1.423	1.198	1.261	0.939	1.004
正方形とした場合の辺長 (m)		1.19	1.09	1.12	0.97	1.00
円形とした場合の直径 (m)		1.35	1.24	1.27	1.09	1.13
面積比率 (%)	Y+	69	73	74	80	61
	Y-	31	27	26	20	39
樹脂の 厚さ (mm)	Y+	6.39	6.75	9.08	6.14	10.10
	Y-	5.39	5.27	5.60	5.17	10.67
	平均	6.10	6.15	7.48	5.96	10.37
拡がり 直径 (m)	X 軸	1.57	1.23	0.90	0.94	1.41
	Y 軸	1.33	1.04	1.29	1.43	0.97
	X+ Y+ ~ X-Y-	1.21	1.12	1.44	1.20	0.85
	X- Y+ ~ X+Y-	1.36	1.50	1.15	0.59	1.32
最短直径(m)		1.21	1.04	0.90	0.59	0.85
最長直径(m)		1.57	1.50	1.44	1.43	1.41
平均直径(m)		1.37	1.22	1.19	1.04	1.14
最短直径/平均直径		0.89	0.85	0.75	0.56	0.75

※X+や Y+の記号は図-4.4における充填点からの方向を示す。

※空洞が厚いのは Y+の方向である。

(3) 形成樹脂の密度

充填本試験において空洞に形成された樹脂から密度測定用の樹脂サンプルを採取し，密度試験を実施した。樹脂サンプルは原則、充填点から8方向に対し0.25m間隔の0.25, 0.50, 0.75, 1.00mの位置で採取し，採取できない場合は位置を変更するか採取を省略した。

a) 水平空洞

水平空洞における樹脂の密度試験結果を表-4.6に示す。仮想地盤の含水比と密度の関係に着目すると，含水比が高いほどサンプル密度が低くなる傾向が確認できる。また，密度変化率も同様の傾向であり，これらの傾向は，充填基礎試験でも確認された水和反応による密度低下と考えられる。

3章の充填基礎試験における密度変化率と，4章の充填本試験における密度変化率を比較したのが表-4.7で

ある。充填基礎試験のインターバル方式とは異なり，この充填本試験では連続充填方式としたが，特に含水比が低い条件における密度変化率が改善されている。

離隔別サンプル密度を見ると，含水比0%では充填点付近のサンプル密度が高く，充填点から離れた位置ではやや密度が低い。一方，含水比20%以上の場合，サンプル密度と離隔には同様の傾向はみられなかった。また，離隔別サンプル密度の変動係数から，含水比が低いほどサンプル密度のばらつきは小さいと言える。

b) 傾斜空洞

傾斜空洞における樹脂の密度試験結果を表-4.8に示す。水平空洞の場合とほぼ同様の傾向が確認できるが，離隔別サンプル密度の変動係数から，水平空洞の場合よりもサンプル密度のばらつきがやや大きいと言える。

表-4.6 水平空洞における密度試験結果（樹脂 200）

仮想地盤の含水比		0%	20%	33%	50%
試験 No.		1	2	3	4
空洞厚 (mm)		10	10	10	10
樹脂量 (kg)		3.6	2.6	2.2	2.6
標準密度 (Mg/m <sup>3</sup> )		0.201	0.206	0.201	0.201
サンプル密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	楕円部	0.234	0.228	0.195	0.175
	楕円外	0.224		0.245	0.175
	平均	0.231	0.228	0.212	0.175
密度変化率 (サンプル密度/標準密度)		1.15	1.11	1.05	0.87
離隔別 サンプル密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	～0.30m	0.245	0.227	0.190	0.178
	0.31～0.50m	0.221	0.233	0.242	0.163
	0.51m～	0.221	0.219	0.218	0.194
	平均	0.231	0.228	0.212	0.175
	変動係数	6.3%	6.6%	20.3%	11.3%

表-4.7 水平空洞 10mm における密度変化率（樹脂 200）

仮想地盤の含水比		0%	20%	33%	50%
密度変化率	インターバル充填方式	1.01	1.22	0.87	0.81
	連続充填方式	1.15	1.11	1.05	0.87

表-4.8 傾斜空洞における密度試験結果（樹脂 200）

仮想地盤の含水比		0%		20%	33%	50%
試験 No.		5	5-②	6	7	8
空洞厚 (mm)		0～10	0～10	0～10	0～10	0～10
樹脂量 (kg)		2.8	1.9	2.2	1.5	1.4
標準密度 (Mg/m <sup>3</sup> )		0.203	0.200	0.207	0.207	0.200
サンプル密度 (Mg/m <sup>3</sup> )		0.286	0.265	0.217	0.243	0.142
密度変化率 (サンプル密度/標準密度)		1.41	1.32	1.05	1.17	0.71
離隔別 サンプル密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	～0.30m	0.314	0.281	0.187	0.235	0.149
	0.31～0.50m	0.291	0.262	0.232	0.240	0.135
	0.51m～	0.261	0.244	0.253	0.262	0.141
	平均	0.286	0.265	0.217	0.243	0.142
	変動係数	11.2%	7.1%	16.0%	9.6%	11.6%

(4) 樹脂充填後の鉛直変位

樹脂充填後に図-4.11 に示す 5 点で鉄板（縦 3,048mm × 横 1,524mm）の鉛直変位を測定した結果を表-4.9 に示す。条件や測点により隆起・沈下が確認されたが、試験条件に起因すると考えられる傾向や特異な変形は確認されなかった。

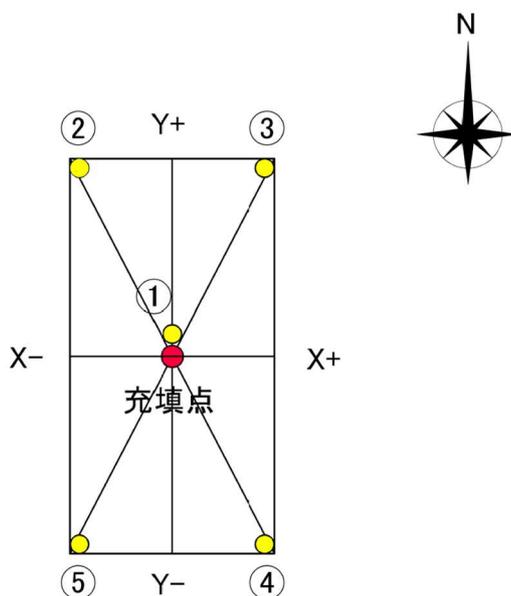


図-4.11 鉛直変位の測定位置

表-4.9 樹脂充填後の鉛直変位（樹脂 200）

空洞の種別	水平空洞 10mm				傾斜空洞 0~10mm					
	0%	20%	33%	50%	0%	20%	33%	50%		
試験 No.	1	2	3	4	5	5-②	6	7	8	
樹脂量 (kg)	3.6	2.6	2.2	2.6	2.8	1.9	2.2	1.5	1.4	
充填直後の鉛直変位 (mm)	測点①	1.0	2.5	2.5	2.5	3.0	3.0	3.0	0.5	1.0
	測点②	0.0	1.5	3.0	0.0	1.0	0.0	2.0	1.5	2.0
	測点③	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	1.0	0.5
	測点④	0.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	2.0	3.0	1.0
	測点⑤	-0.5	2.0	1.5	-0.5	0.0	0.0	2.0	2.0	1.0
40 分後の鉛直変位 (mm)	測点①	0.0	3.5	3.0	2.5	2.0	2.0	4.0	2.5	0.5
	変位差	-1.0	1.0	0.5	—	-1.0	-1.0	1.0	2.0	-0.5

※傾斜空洞の場合、空洞が厚いのは Y+ の方向の測点②及び測点③である。

#### 4.4 樹脂 200 の充填特性の考察

樹脂 200 を用いた充填基礎試験では、空洞厚が薄いほど形成樹脂の密度が高くなる傾向が認められ、空洞厚と密度の関係の明確化が課題であった。また、仮想地盤の含水比が高いほど形成樹脂の密度が低くなる傾向が認められ、含水比と密度の関係の明確化も課題であった。

本節では、充填基礎試験及び充填本試験において樹脂 200 を用いて実施した試験結果を用い、空洞厚と密度の関係及び仮想地盤の含水比と密度の関係を考察した。

充填基礎試験及び充填本試験において、樹脂 200 を用いた試験結果を表-4.10 にまとめた。

##### (1) 含水比 0%における空洞厚と密度の関係

含水比 0%における空洞厚と密度の関係を図-4.12 に示す。空洞厚が薄いほど閉塞効果により密度は高くなることから、空洞厚のみが密度に影響を及ぼしていると考えられる。

空洞厚と密度は式-4.1 で表すことができ、決定係数は  $R^2=0.8508$  と高い相関性が認められた。

##### (2) 含水比 20, 33, 50%における空洞厚と密度の関係

含水比 20, 33, 50%における空洞厚と密度の関係を図-4.12 に示す。含水比 0%の場合と同様に、空洞厚が薄いほど密度は高くなるだけでなく、含水比が低いほど密度は高くなる。この理由としては、次の 2 つの現象が現れたものと推察される。

- ① 充填基礎試験で確認されたとおり、含水条件では、水分と樹脂との水和反応により樹脂の膨張が大きくなり、密度が低くなる。
- ② 含水比 0%の場合の考察で明らかにしたように、空洞が薄くなると閉塞効果により密度が高くなる。それぞれの含水比別に、空洞厚と密度は表-4.11 の各式で表すことができる。含水比 0%の場合と異なり決定係数は低いものの、空洞厚と密度には概ね線形関係が認められる。

##### (3) 形成樹脂の特性値の推定

(1)(2)の密度推定式及び 2 章の圧縮強さ及び変形係数の推定式から、空洞厚及び含水比に応じた密度、圧縮強さ、変形係数を推定した結果を表-4.12 に示す。

表-4.10 樹脂 200 を用いた試験結果一覧

仮想地盤の含水比	空洞の種類	試験 No.	形成樹脂厚 (mm)	鉛直変位 (mm)	初期空洞厚 (mm)	サンプル密度 (Mg/m <sup>3</sup> )
0%	水平	基-2	23.0	1.0	22.0	0.180
	水平	基-1	12.8	1.0	11.8	0.195
	水平	1	10.7	1.0	9.7	0.231
	傾斜	5	6.1	3.0	3.1	0.286
	傾斜	5-②	6.2	3.0	3.2	0.265
20%	水平	基-4	16.2	2.0	14.2	0.188
	水平	基-3	10.5	4.0	6.5	0.236
	水平	2	10.2	3.5	6.7	0.228
	傾斜	6	7.5	4.0	3.5	0.217
33%	水平	基-6	17.9	3.0	14.9	0.154
	水平	基-5	10.2	4.0	6.2	0.168
	水平	3	7.0	3.0	4.0	0.212
	傾斜	7-②	9.5	7.0	2.5	0.168
50%	水平	基-8	19.7	2.0	17.7	0.132
	水平	基-7	13.2	1.0	12.2	0.157
	水平	4	13.7	2.5	11.2	0.175
	傾斜	8	10.4	1.0	9.4	0.142

※初期空洞厚＝形成樹脂厚－鉛直変位であり、形成樹脂厚と鉛直変位は充填点近傍の値を採用した。

※鉛直変位は、充填終了直後及び 40 分後の値のうち、大きい値を採用した。

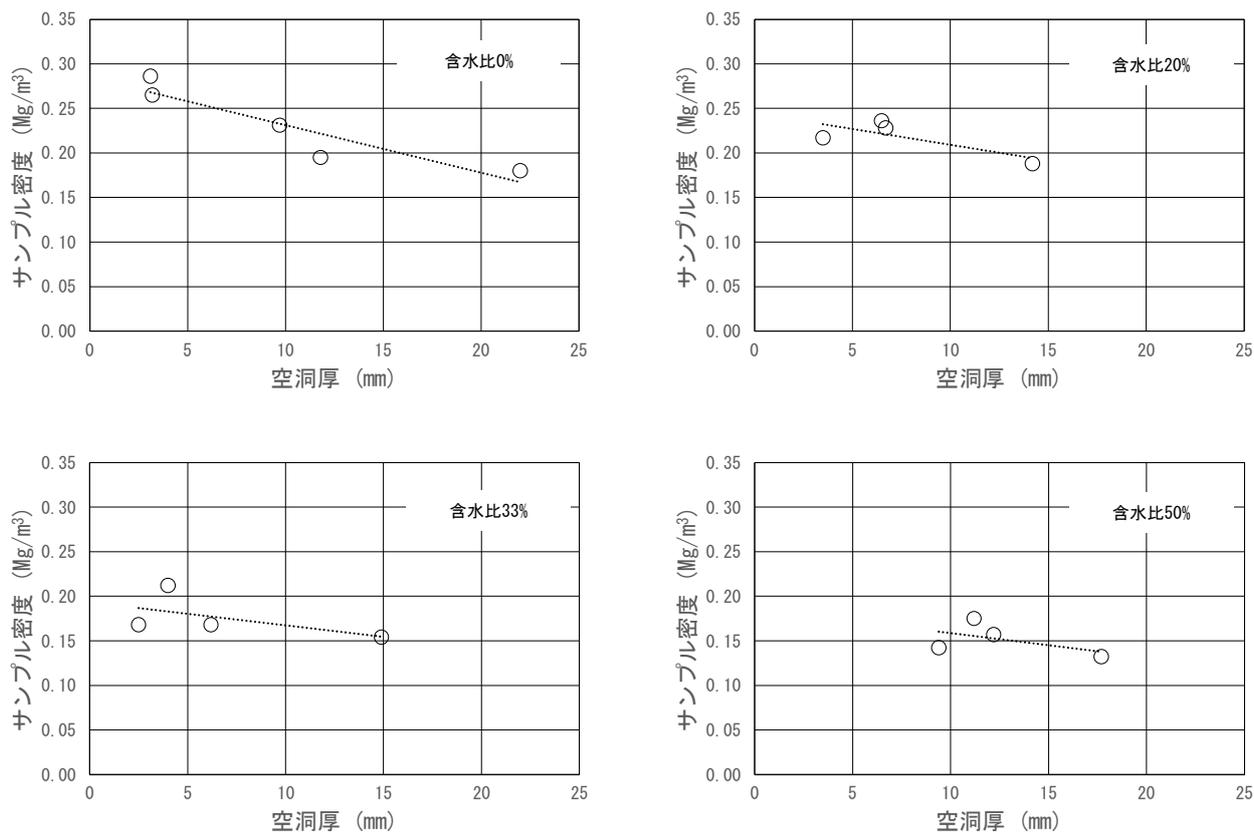


図-4.12 空洞厚と密度の関係（樹脂 200）

表-4.11 空洞厚と密度の相関式（樹脂 200）

仮想地盤の含水比	相関式	決定係数 R <sup>2</sup>	式番号
0%	$\rho = -0.0053t + 0.2846$	0.8508	式 4-1
20%	$\rho = -0.0036t + 0.2448$	0.5995	式 4-2
33%	$\rho = -0.0026t + 0.1934$	0.3263	式 4-3
50%	$\rho = -0.0027t + 0.1858$	0.2685	式 4-4

ここに,

$\rho$  : 密度 (Mg/m<sup>3</sup>)

$t$  : 空洞厚 (mm)

表-4.12 特性値の推定値（樹脂 200）

仮想地盤の 含水比	特性値	空洞厚 (mm)							
		1	3	5	7	10	12	15	20
0%	密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	0.279	0.269	0.258	0.248	0.232	0.221	0.205	※
	圧縮強さ (MN/m <sup>2</sup> )	4.66	4.33	4.01	3.71	3.27	2.99	2.60	※
	変形係数 (MN/m <sup>2</sup> )	176	165	154	143	128	119	105	※
20%	密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	0.241	0.234	0.227	0.220	0.209	0.202	0.191	0.173
	圧縮強さ (MN/m <sup>2</sup> )	3.53	3.33	3.14	2.96	2.69	2.52	2.27	1.89
	変形係数 (MN/m <sup>2</sup> )	137	130	124	117	108	102	93	80
33%	密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	0.191	0.186	0.180	0.175	0.167	0.162	0.154	0.141
	圧縮強さ (MN/m <sup>2</sup> )	2.27	2.16	2.05	1.94	1.78	1.68	1.54	1.31
	変形係数 (MN/m <sup>2</sup> )	93	89	85	81	76	72	67	59
50%	密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	0.183	0.178	0.172	0.167	0.159	0.153	0.145	0.132
	圧縮強さ (MN/m <sup>2</sup> )	2.11	1.99	1.88	1.77	1.62	1.52	1.38	1.15
	変形係数 (MN/m <sup>2</sup> )	87	83	79	75	70	66	61	53

※含水比 0%で空洞厚 20mm では、推定密度が標準密度 0.200Mg/m<sup>3</sup> 以下となるため空欄とした。

#### 4.5 樹脂 300 の試験結果

樹脂 300 を用いた充填本試験は、4 種類の仮想地盤、2 種類の空洞厚に対して表-4.13 に示す計 10 ケースを実施した。水平空洞における樹脂の形成状況を図-4.13 に、傾斜空洞における樹脂の形成状況を図-4.14 に示す。なお、13-②及び 16-②は、13 及び 16 の再確認のために追加したケースである。

表-4.13 樹脂 300 を用いた充填本試験の試験条件

試験 No.	仮想地盤の含水比	空洞厚 (mm)	樹脂充填量 (kg)
9	0%	10	3.9
13		0~10	2.0
13-②			2.8
10	20%	10	2.6
14		0~10	2.7
11	33%	10	2.6
15		0~10	2.3
12	50%	10	2.2
16		0~10	1.1
16-②			1.6

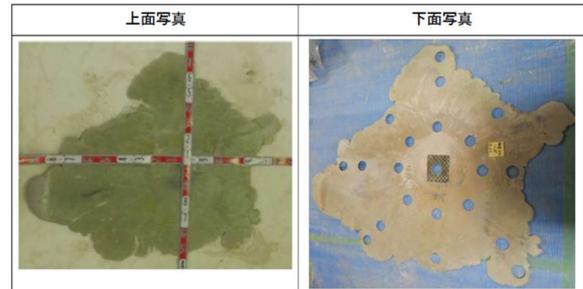
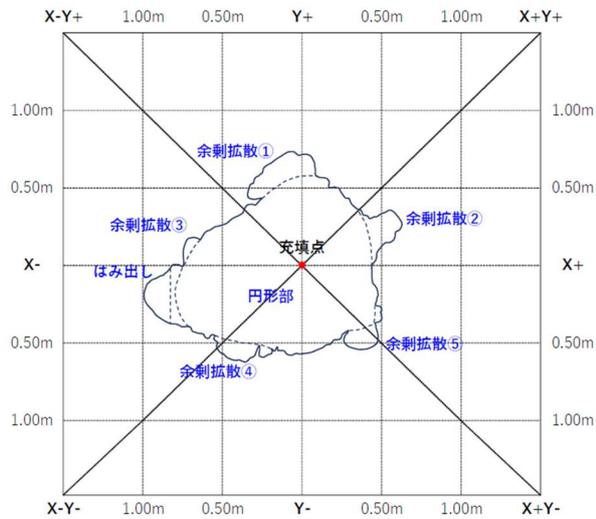


図-4.13(a) No.9 (樹脂 300, 空洞厚 10mm, 含水比 0%)

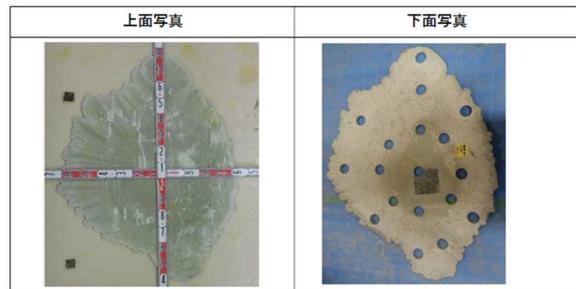
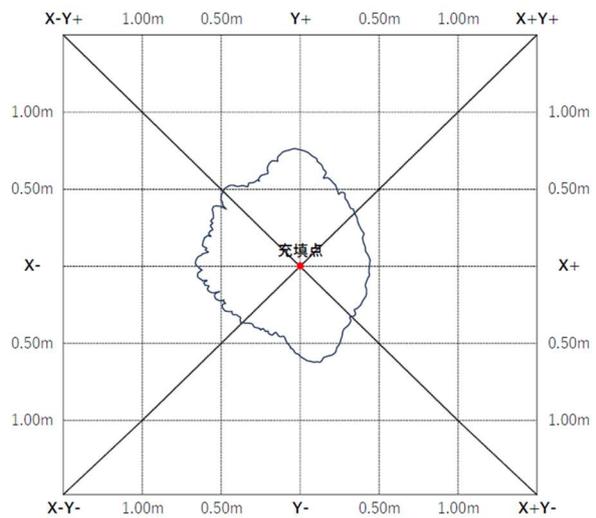


図-4.13(b) No.10 (樹脂 300, 空洞厚 10mm, 含水比 20%)

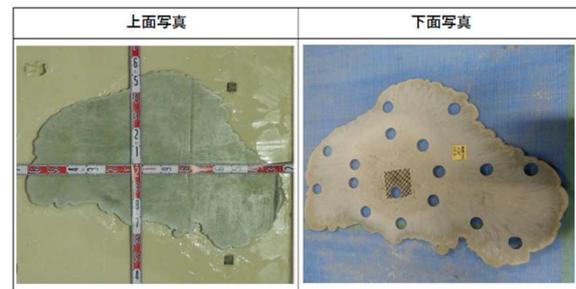
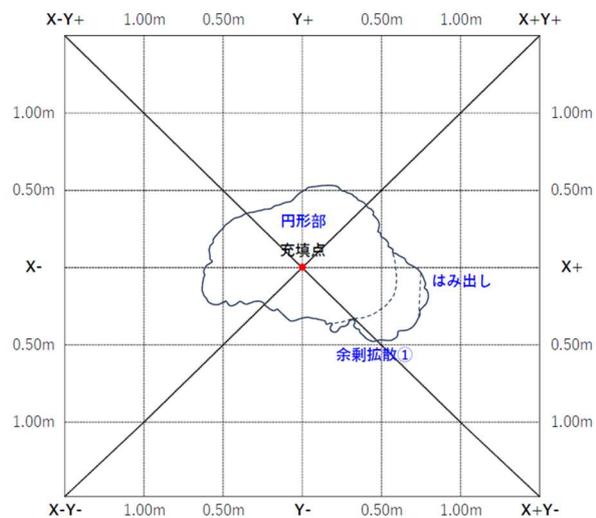


図-4.13(c) No.11 (樹脂 300, 空洞厚 10mm, 含水比 33%)

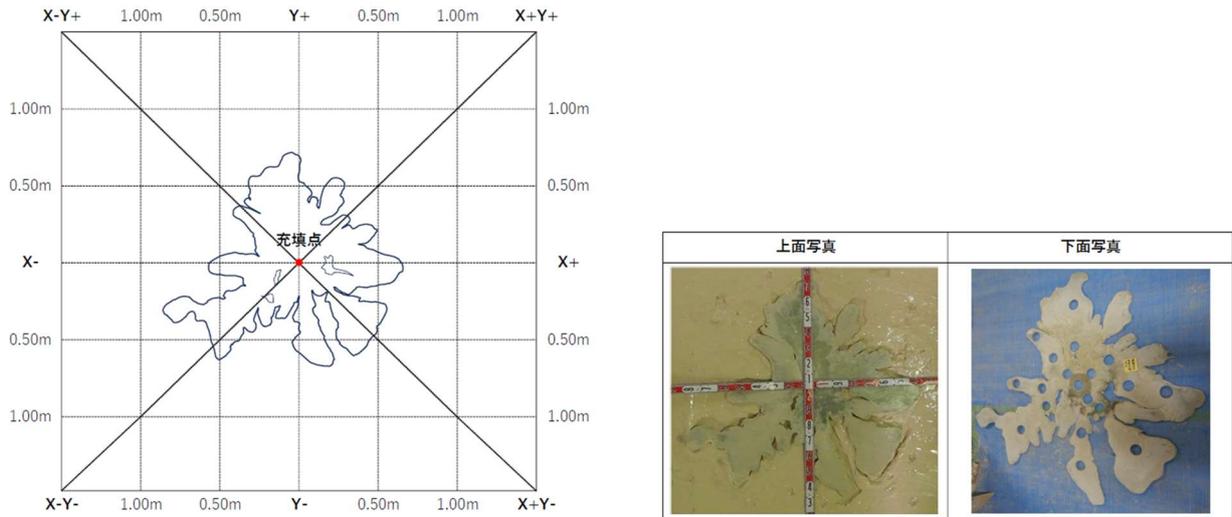


図-4.13(d) No.12 (樹脂 300, 空洞厚 10mm, 含水比 50%)

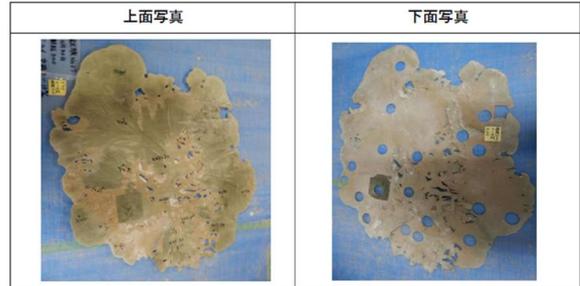
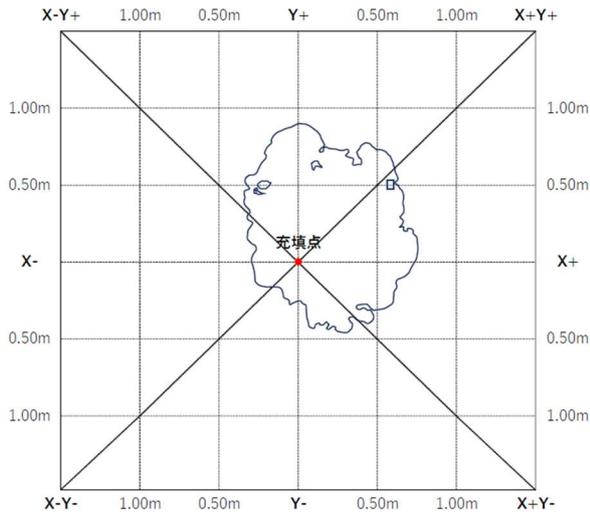


図-4.14(a) No.13 (樹脂 300, 空洞厚 0~10mm, 含水比 0%)

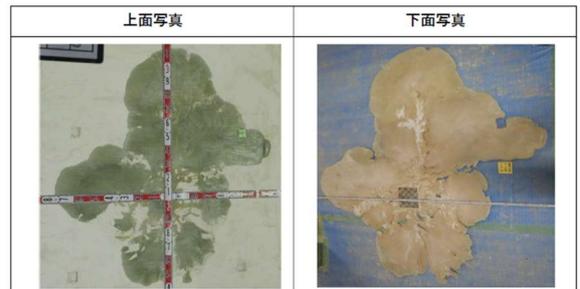
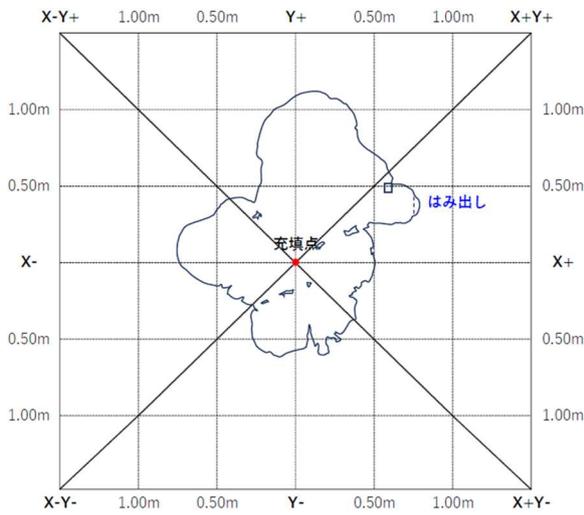


図-4.14(b) No.13-② (樹脂 300, 空洞厚 0~10mm, 含水比 0%の再確認ケース)

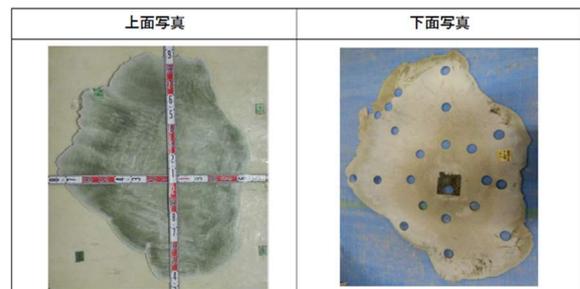
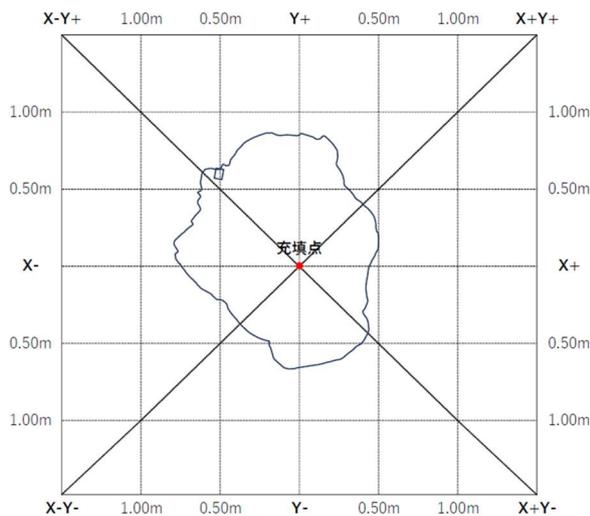


図-4.14(c) No.14 (樹脂 300, 空洞厚 0~10mm, 含水比 20%)

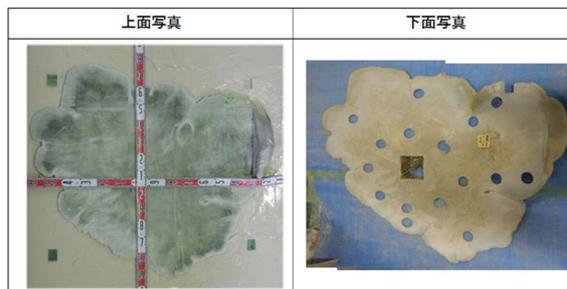
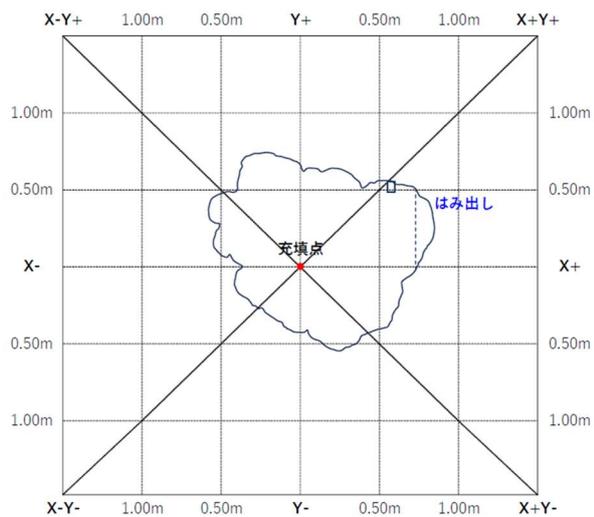


図-4.14(d) No.15 (樹脂 300, 空洞厚 0~10mm, 含水比 33%)

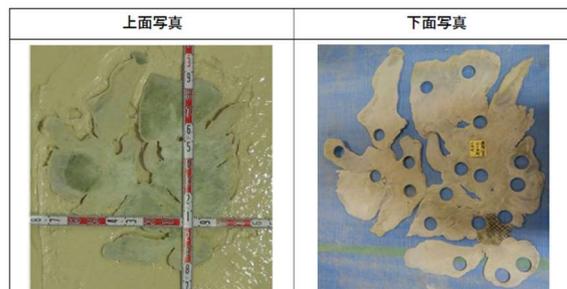
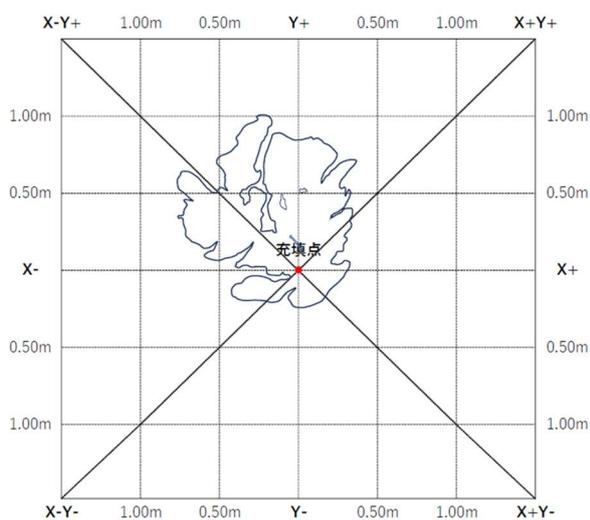


図-4.14(e) No.16 (樹脂 300, 空洞厚 0~10mm, 含水比 50%)

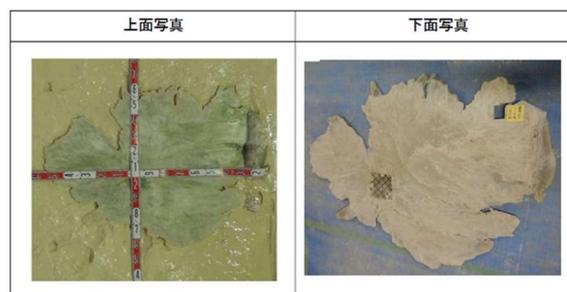
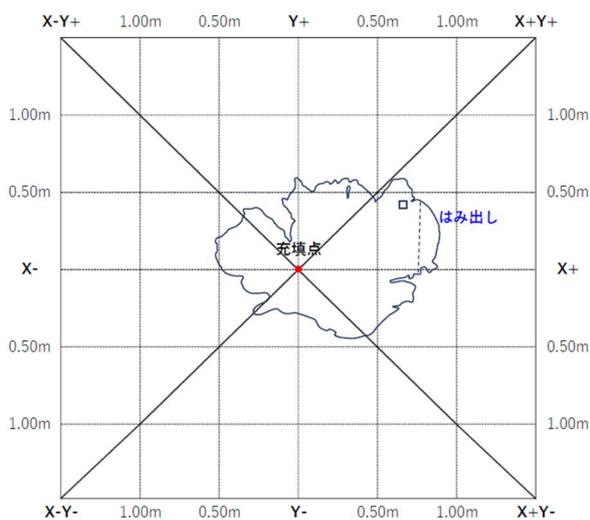


図-4.14(f) No.16-② (樹脂 300, 空洞厚 0~10mm, 含水比 50%の再確認ケース)

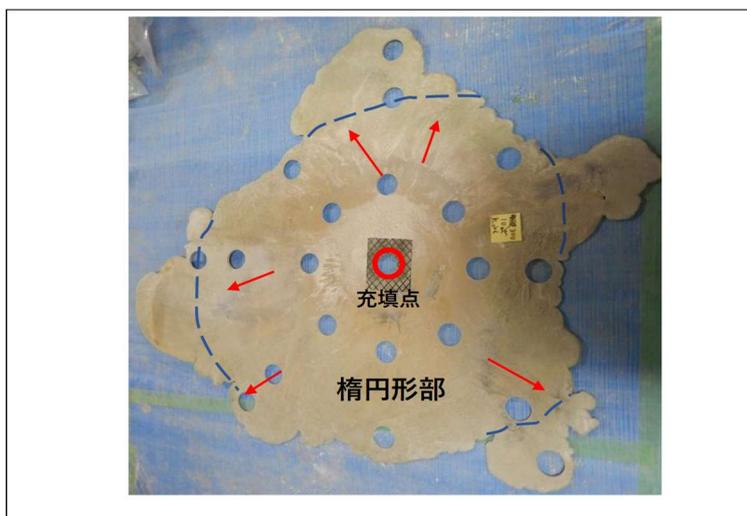
(1) 空洞における樹脂の挙動と形状

a) 水平空洞

樹脂 200 と同様に，初期充填樹脂は充填点近傍に楕円状に拡がり，**図-4.15** のように，後期充填樹脂が形成樹脂の下面を通過したと考えられる筋状の流動痕が確認された．後期充填樹脂の拡がり方には規則性は認められなかった．

水平空洞に形成された樹脂形状に着目すると，樹脂 200 と同様に，仮想地盤の含水比により形状が異なっていた．具体的には，**図-4.16** のように，含水比が低い場合は後期充填樹脂が半円形に，含水比が高い場合は後期充填樹脂が樹枝状になっていた．

以上のことから，水平空洞における樹脂 300 の挙動と形状は，樹脂 200 と大差がないと考えられる．



**図-4.15** 水平空洞における形成樹脂の下面 (No.9, 樹脂 300, 赤矢印方向の白い筋は樹脂の流動痕)

含水比 0%、20%、33%の地盤条件の形状	含水比50%の地盤条件の形状
<p>初期充填樹脂の楕円部</p> <p>後期充填樹脂の拡がり</p> <p>楕円形状+半円形状</p>	<p>樹枝状</p>

**図-4.16** 水平空洞における樹脂形状 (樹脂 300)

b) 傾斜空洞

樹脂 200 と同様に，傾斜空洞における充填では，充填された樹脂の大半は空洞が厚い方に拡がっていた．図-4.17 のように充填点を基点として拡がり面積を比較すると，空洞が薄い方の面積が 31%，空洞が厚い方の面積が 69%であり，樹脂 200 と大差がなかった．

傾斜空洞に形成された樹脂形状についても，含水比が高い場合には外周部が樹枝状の形状となっており，樹脂 200 と同様であった．

樹脂 200 と同様に，樹脂 300 でも洲が確認された．表-4.14 にケース毎の洲の有無を示すが，含水比 0%の場合に洲が多く，他の含水比の場合でも小さな洲はわずかながら確認された．

以上のことから，傾斜空洞における樹脂 300 の挙動と

形状は，樹脂 200 と大差がないと考えられる．

含水比 0%において確認された洲及び含水比が高い場合に確認された外周部の樹枝状の拡がりについて再確認するため，No.13 (含水比 0%) 及び No.16 (含水比 50%) については，樹脂充填量を増加させた No.13-②及び No.16-②を追加した．

含水比 0%で樹脂充填量を増加させた No.13-②では，図-4.18 に示すように洲の発生量は減少した．また含水比 50%で樹脂充填量を増加させた No.16-②では，図-4.19 に示すように外周部の樹枝状の形状が改善され，充填点近傍では樹脂が詰まった状態であった．このため，樹脂充填量を増加させることにより，洲や樹枝状の拡がりは改善させることが可能と考えられる．

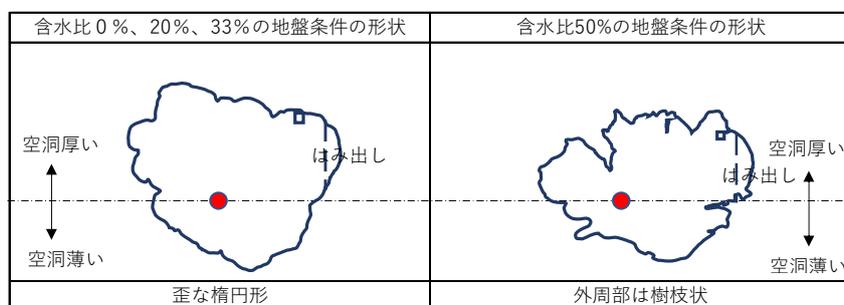


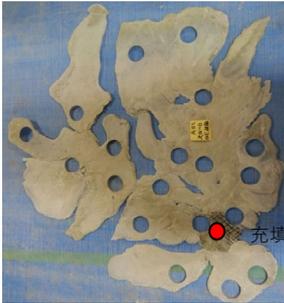
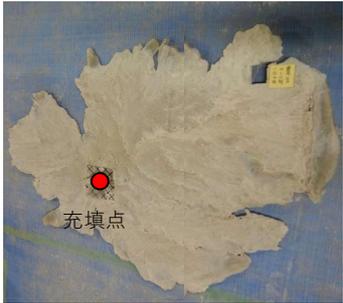
図-4.17 傾斜空洞における樹脂形状 (樹脂 300)

表-4.14 傾斜空洞における洲の発生状況 (樹脂 300)

仮想地盤の含水比	0%		20%	33%	50%	
試験 No.	13	13-②	14	15	16	16-②
樹脂量 (kg)	2.0	2.8	2.7	2.3	1.1	1.6
充填直後の鉛直変位 (mm)	1.0	2.0	3.5	1.5	1.0	2.5
洲の有無	多い	有	少し有	無	少し有	無

試験 No.	No.13	No.13-②
仮想地盤の含水比	0%	0%
樹脂量 (kg)	2.0	2.8
充填直後の鉛直変位 (mm)	1.0	2.0
形成樹脂図		
洲の有無	全体的に洲が見られる	洲は充填点近傍のみ

図-4.18 傾斜空洞に形成された樹脂の洲（樹脂 300，含水比 0%）

試験 No.	No.16	No.16-②
仮想地盤の含水比	50%	50%
樹脂量 (kg)	1.1	1.6
充填直後の鉛直変位 (mm)	1.0	2.5
形成樹脂図		
拡がり形状	樹枝状の拡がり	外周部以外は密実な状態にある

※写真の円形の孔はサンプル採取により生じた。

図-4.19 傾斜空洞に形成された樹脂の樹枝状の拡がり（樹脂 300，含水比 50%）

(2) 形成樹脂の寸法

a) 水平空洞

表-4.15 に水平空洞に形成された樹脂の拡がり面積、樹脂厚さ、拡がり直径を一覧として示した。

鉛直変位が 1mm に達するまで 2.2~3.9kg の樹脂を充填した結果、樹脂は約 0.9~1.2m<sup>2</sup> 程度拡がった。拡がり面積を正方形あるいは円形と仮定すると、1 辺あるいは直径が概ね 1m 超に相当し、樹脂 200 と大差はなかった。

拡がり直径は図-4.13 における 4 方向で測定した。拡がり面積を円形と仮定した場合の直径と平均直径との差は小さいこと、最短直径/平均直径の値も 0.79~0.97 であることから、円形に近い楕円形であることがわかる。

b) 傾斜空洞

表-4.16 に傾斜空洞に形成された樹脂の拡がり面積、樹脂厚さ、拡がり直径を一覧として示した。

鉛直変位が 1mm に達するまで 1.1~2.7kg の樹脂を充填した結果、樹脂は約 0.8~1.4m<sup>2</sup> 程度拡がった。水平空洞の場合よりも全体の空洞体積が小さいため、水平空洞よりも樹脂量は少ない。

拡がり面積は、面積比率として、空洞が薄い方 (Y-) が 31%、空洞が厚い方 (Y+) が 69% であった。拡がり面積を正方形あるいは円形と仮定すると、水平空洞の場合と同様に、1 辺あるいは直径が概ね 1m 超に相当し、樹脂 200 と大差はなかった。

拡がり直径は図-4.14 における 4 方向で測定した。拡がり面積を円形と仮定した場合の直径と平均直径との差は小さいことから、円形に近い楕円形であることがわかる。ただし、水平空洞の場合よりも最短直径、最長直径、平均直径のばらつきが大きく、水平空洞と傾斜空洞では樹脂の挙動が異なることが表れていると考えられる。

表-4.15 水平空洞における樹脂の拡がり面積、樹脂の厚さ、拡がり直径 (樹脂 300)

仮想地盤の含水比		0%	20%	33%	50%
試験 No.		9	10	11	12
空洞厚 (mm)		10	10	10	10
樹脂量 (kg)		3.9	2.6	2.6	2.2
拡がり 面積 (m <sup>2</sup> )	楕円部	1.037	0.974	0.782	0.902
	楕円外	0.193	—	0.114	—
	計	1.230	0.974	0.896	0.902
正方形とした場合の辺長 (m)		1.11	0.99	0.95	0.95
円形とした場合の直径 (m)		1.25	1.11	1.07	1.07
樹脂の 厚さ (mm)	楕円部	11.27	10.74	10.73	12.42
	楕円外	9.95	—	11.97	—
	平均	10.98	10.74	10.96	12.42
拡がり 直径 (m)	X 軸	1.17	1.08	1.32	1.21
	Y 軸	1.29	1.33	0.84	1.28
	X+Y+ ~ X-Y-	1.27	1.03	0.92	1.18
	X-Y+ ~ X+Y-	1.18	1.15	1.16	1.20
最短直径(m)		1.18	1.03	0.84	1.18
最長直径(m)		1.29	1.33	1.32	1.28
平均直径(m)		1.23	1.14	1.06	1.22
最短直径/平均直径		0.96	0.90	0.79	0.97

※X+や Y+の記号は図-4.13 における充填点からの方向を示す。

表-4.16 傾斜空洞における樹脂の拡がり面積，樹脂の厚さ，拡がり直径（樹脂 300）

仮想地盤の含水比		0%		20%	33%	50%	
試験 No.		13	13-②	14	15	16	16-②
空洞厚 (mm)		0~10	0~10	0~10	0~10	0~10	0~10
樹脂量 (kg)		2.0	2.8	2.7	2.3	1.1	1.6
洲の有無		多い	有	少し有	無	少し有	無
拡がり 面積 (m <sup>2</sup> )	Y+	0.724	0.960	0.812	0.754	0.706	0.569
	Y-	0.285	0.427	0.515	0.409	0.112	0.333
	計	1.009	1.387	1.327	1.163	0.818	0.902
正方形とした場合の辺長 (m)		1.00	1.18	1.15	1.08	0.90	0.95
円形とした場合の直径 (m)		1.13	1.33	1.30	1.22	1.02	1.07
面積比率 (%)	Y+	72	69	61	65	86	63
	Y-	28	31	39	35	14	37
樹脂の 厚さ (mm)	Y+	7.08	7.35	9.11	7.96	10.20	8.76
	Y-	6.05	6.26	8.57	6.11	11.19	11.48
	平均	7.04	6.80	8.50	7.38	10.68	10.20
拡がり 直径 (m)	X 軸	1.04	1.25	1.16	1.09	0.50	1.24
	Y 軸	1.05	1.66	1.50	1.08	1.08	0.88
	X+ Y+ ~ X-Y-	1.11	1.25	1.09	1.17	0.75	1.06
	X- Y+ ~ X+Y-	0.99	1.12	1.49	1.29	0.99	1.08
最短直径(m)		0.99	1.12	1.09	1.08	0.50	0.88
最長直径(m)		1.11	1.66	1.50	1.29	1.08	1.24
平均直径(m)		1.05	1.32	1.31	1.16	0.83	1.06
最短直径/平均直径		0.94	0.85	0.83	0.93	0.60	0.83

※X+や Y+の記号は図-4.14 における充填点からの方向を示す。

※空洞が厚いのは Y+の方向である。

(3) 形成樹脂の密度

充填本試験において空洞に形成された樹脂から密度測定用の樹脂サンプルを採取し、密度試験を実施した。樹脂サンプルは原則、充填点から8方向に対し0.25m間隔の0.25, 0.50, 0.75, 1.00mの位置で採取し、採取できない場合は位置を変更するか採取を省略した。

a) 水平空洞

水平空洞における樹脂の密度試験結果を表-4.17に示す。仮想地盤の含水比と密度の関係に着目すると、含水

比が高いほどサンプル密度が低くなる傾向が確認できる。また、密度変化率も同様の傾向であり、これらの傾向は、樹脂200と同等と言える。

b) 傾斜空洞

傾斜空洞における樹脂の密度試験結果を表-4.18に示す。水平空洞の場合とほぼ同様の傾向が確認できるが、離隔別サンプル密度の変動係数から、樹脂200と同様に、水平空洞の場合よりもサンプル密度のばらつきがやや大きいと言える。

表-4.17 水平空洞における密度試験結果 (樹脂300)

仮想地盤の含水比		0%	20%	33%	50%
試験 No.		9	10	11	12
空洞厚 (mm)		10	10	10	10
樹脂量 (kg)		3.9	2.6	2.6	2.2
標準密度 (Mg/m <sup>3</sup> )		0.277	0.279	0.268	0.276
サンプル密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	楕円部	0.307	0.259	0.259	0.228
	楕円外	0.265		0.265	
	平均	0.301	0.259	0.260	0.228
離隔別サンプル密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	~0.30m	0.320	0.257	0.253	0.213
	0.31~0.50m	0.295	0.259	0.268	0.251
	0.51m~	0.272	0.270	0.266	—
	平均	0.301	0.259	0.260	0.228
	変動係数	7.5%	4.8%	6.6%	21.6%
密度変化率 (サンプル密度/標準密度)		1.08	0.93	0.97	0.83

表-4.18 傾斜空洞における密度試験結果 (樹脂300)

仮想地盤の含水比		0%		20%	33%	50%	
試験 No.		13	13-②	14	15	16	16-②
空洞厚 (mm)		0~10	0~10	0~10	0~10	0~10	0~10
樹脂量 (kg)		2.0	2.8	2.7	2.3	1.1	1.6
標準密度 (Mg/m <sup>3</sup> )		0.275	0.275	0.282	0.269	0.281	0.274
サンプル密度 (Mg/m <sup>3</sup> )		0.336	0.318	0.255	0.219	0.168	0.165
離隔別サンプル密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	~0.30m	0.341	0.321	0.233	0.195	0.187	0.168
	0.31~0.50m	0.340	0.317	0.278	0.234	0.130	0.164
	0.51m~	0.321	0.318	0.254	0.268	0.165	0.145
	平均	0.336	0.318	0.255	0.219	0.168	0.165
	変動係数	9.2%	6.1%	17.8%	14.7%	19.7%	13.6%
密度変化率 (サンプル密度/標準密度)		1.22	1.16	0.90	0.81	0.60	0.60

(4) 樹脂充填後の鉛直変位

樹脂充填後に図-4.20 に示す 5 点で鉄板（縦 3,048mm ×横 1,524mm）の鉛直変位を測定した結果を表-4.19 に示す。条件や測点により隆起・沈下が確認されたが、樹脂 200 と同様に、試験条件に起因すると考えられる傾向や特異な変形は確認されなかった。

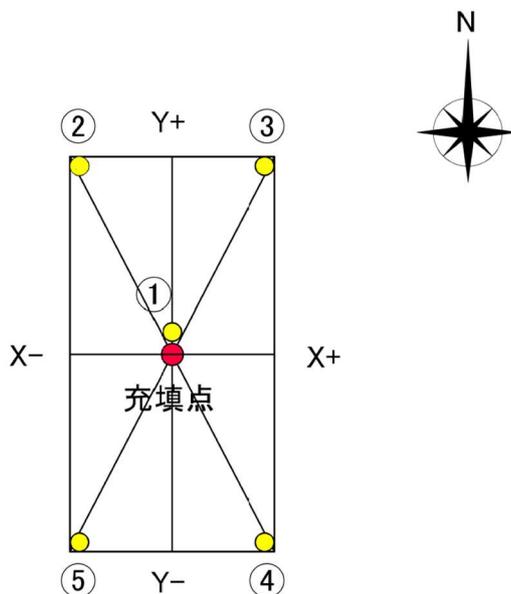


図-4.20 鉛直変位の測定位置

表-4.19 樹脂充填後の鉛直変位（樹脂 300）

空洞の種別		水平空洞 10mm				傾斜空洞 0~10mm					
仮想地盤の含水比		0%	20%	33%	50%	0%		20%	33%	50%	
試験 No.		9	10	11	12	13	13-②	14	15	16	16-②
樹脂量 (kg)		3.9	2.6	2.6	2.2	2.0	2.8	2.7	2.3	1.1	1.6
充填直後の 鉛直変位 (mm)	測点①	2.0	1.0	1.0	2.0	1.0	2.0	3.5	1.5	1.0	2.5
	測点②	0.0	-0.5	0.0	0.0	0.0	2.0	-1.5	0.0	0.0	2.0
	測点③	0.0	0.0	0.0	-0.5	0.0	1.0	-0.5	0.0	0.0	0.5
	測点④	0.0	-0.5	0.0	-0.5	0.0	0.5	-1.0	-0.5	0.0	2.0
	測点⑤	0.0	0.0	0.0	-0.5	-0.5	0.0	-0.5	-0.5	0.0	2.0
40 分後の 鉛直変位 (mm)	測点①	1.5	3.5	2.0	2.0	1.0	2.0	5.0	2.5	1.0	2.5
	変位差	-0.5	2.5	1.0	—	—	—	1.5	1.0	—	—

※傾斜空洞の場合、空洞が厚いのは Y+ の方向の測点②及び測点③である。

#### 4.6 樹脂 300 の充填特性の考察

本節では、充填本試験において樹脂 300 を用いて実施した試験結果を用い、空洞厚と密度の関係及び仮想地盤の含水比と密度の関係を考察した。ただし、充填本試験における空洞厚 10mm の水平空洞及び空洞厚 0~10mm の傾斜空洞の試験結果からは空洞が厚い場合の密度が不明であるため、3. 実大規模樹脂充填基礎試験と同様の条件で別途実施した樹脂 300・空洞厚 20mm の充填基礎試験結果を併せて考察することとした。

充填基礎試験及び充填本試験において、樹脂 300 を用いた試験結果を表-4. 20 にまとめた。

##### (1) 含水比 0%における空洞厚と密度の関係

含水比 0%における空洞厚と密度の関係を図-4. 21 に示す。空洞厚が薄いほど閉塞効果により密度は高くなることから、空洞厚のみが密度に影響を及ぼしていると考えられる。

空洞厚と密度は式-4. 5 で表すことができ、決定係数は  $R^2=0.701$  と高い相関性が認められた。

##### (2) 含水比 20, 33, 50%における空洞厚と密度の関係

含水比 20, 33, 50%における空洞厚と密度の関係を図-4. 21 に示す。含水比 0%の場合とは大きく異なり、空洞厚が厚いほど密度は高くなる傾向であった。これは樹脂 200 とは大きく異なる傾向であった。

それぞれの含水比別に、空洞厚と密度は表-4. 21 の各式で表すことができる。空洞厚と密度には概ね線形関係が認められる。

##### (3) 樹脂 200 と樹脂 300 の比較

樹脂 200 及び樹脂 300 の空洞厚と密度の関係について考察する。

樹脂 200 及び樹脂 300 の閉塞効果の影響を比較するため、水分の影響を受けない含水比 0%の密度推定式である式-4. 1 及び式-4. 5 から空洞厚ごとの推定密度を、空洞厚 20mm の推定密度で除すことにより得た正規化密度を表-4. 22 に示す。どちらの樹脂も空洞が薄いほど正規化密度が高くなるものの、その程度は樹脂 200 の方が高い。これは、無拘束条件における樹脂 200 の発泡倍率は約 5.0 倍、樹脂 300 の発泡倍率は約 3.4 倍であり、薄い空洞のように閉塞した空間で発泡した樹脂の密度が高くなる閉塞効果が大きく現れるのは、発泡倍率が大きい樹脂 200 であると言える。

一方、(2)で述べたとおり、含水条件では空洞が薄いほど樹脂 200 の密度が高く、樹脂 300 の密度が低くなるという異なる傾向を確認している。含水条件における樹脂の密度は、水分と樹脂の水和反応が原因で空洞厚によらず密度が低くなることを確認しているが、樹脂 200 と樹脂 300 の空洞厚と密度の関係が異なる原因は、それぞれの樹脂において、閉塞効果の影響が大きく現れるか、水和反応の影響が大きく現れるかの違いによるものと考えられる。すなわち、樹脂 200 は空洞が薄いほど閉塞効果により密度が高くなる傾向が大きく現れるが、樹脂 300 は空洞が薄い場合の閉塞効果の影響が小さく、水和反応の影響の方が大きくなり、樹脂 200 と樹脂 300 では異なる傾向が現れたと考えられる。これは空洞が薄い場合、充填される樹脂量が少ないため、樹脂量に対する水分量が比較的多いことも一因と考えられる。

##### (4) 形成樹脂の特性値の推定

(1)(2)の密度推定式及び 2 章の圧縮強さ及び変形係数の推定式から、空洞厚及び含水比に応じた密度、圧縮強さ、変形係数を推定した結果を表-4. 23 に示す。

樹脂 300 は樹脂 200 よりも高い密度が得られるため、推定圧縮強さも高く、また変形係数も空港舗装の構造解析において粒状路盤の変形係数として使用している 200MN/m<sup>2</sup>程度が得られている。

表-4.20 樹脂 300 を用いた試験結果一覧

仮想地盤の 含水比	空洞の 種別	試験 No.	形成樹脂厚 (mm)	鉛直変位 (mm)	初期空洞厚 (mm)	サンプル密度 (Mg/m <sup>3</sup> )
0%	水平	基-11	22.2	1.0	21.2	0.279
	水平	基-12	23.2	1.0	22.2	0.294
	水平	9	11.0	2.0	9.0	0.301
	傾斜	13	7.0	1.0	6.0	0.336
	傾斜	13-②	6.8	2.0	4.8	0.318
20%	水平	基-13	17.1	2.0	15.1	0.313
	水平	10	10.7	3.5	7.2	0.259
	傾斜	14	8.5	5.0	3.5	0.255
33%	水平	基-14	19.7	2.0	17.7	0.279
	水平	基-15	18.5	3.0	15.5	0.272
	水平	基-16	17.9	2.5	15.4	0.250
	水平	11	11.0	2.0	9.0	0.260
	傾斜	15	7.4	2.5	4.9	0.219
50%	水平	基-17	22.3	1.0	21.3	0.238
	水平	基-18	22.7	0.5	22.2	0.236
	水平	12	12.4	2.0	10.4	0.228
	傾斜	16	10.7	1.0	9.7	0.168
	傾斜	16-②	10.2	2.5	7.7	0.165

※初期空洞厚＝形成樹脂厚－鉛直変位

※形成樹脂厚と鉛直変位は、充填点近傍の値を採用した。

※鉛直変位は、充填終了直後及び 40 分後の値のうち、大きい値を採用した。

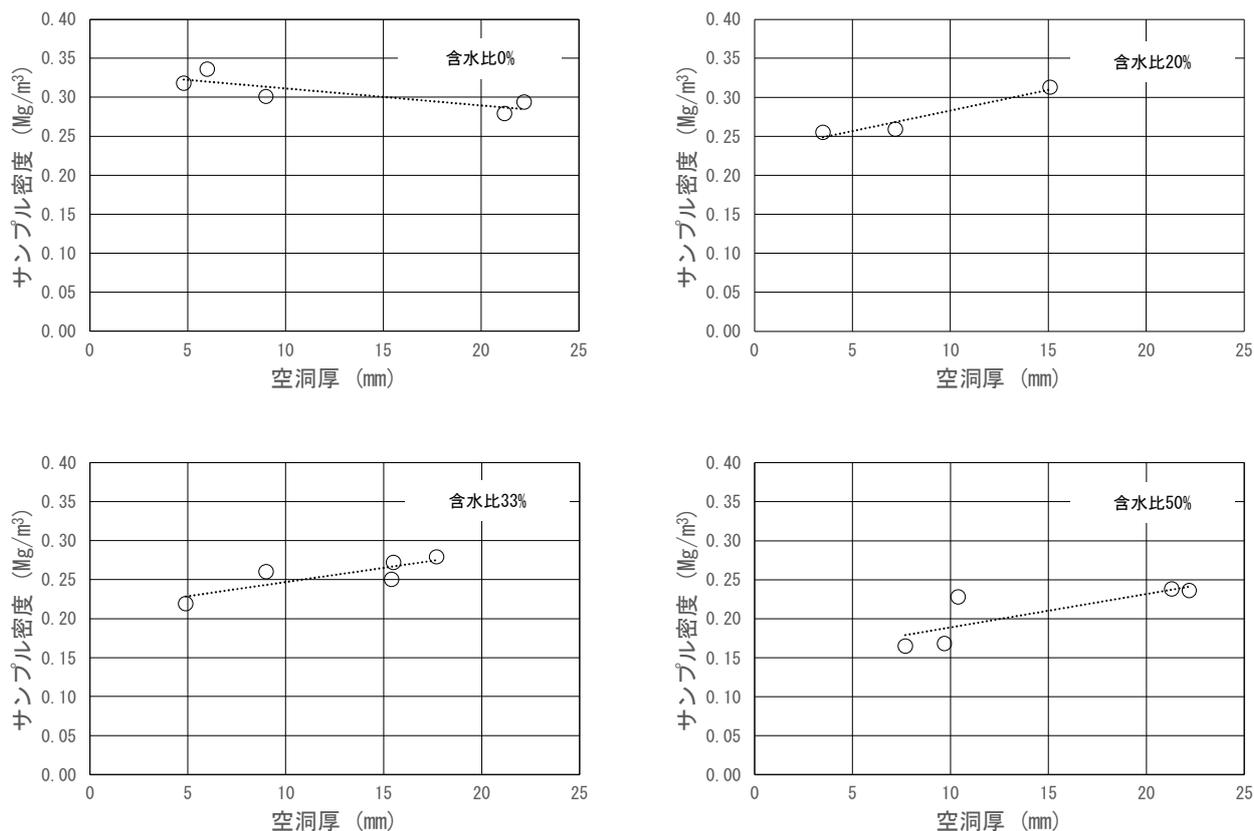


図-4.21 空洞厚と密度の関係（樹脂 300）

表-4.21 空洞厚と密度の相関式（樹脂 300）

仮想地盤の含水比	相関式	決定係数 R <sup>2</sup>	式番号
0%	$\rho = -0.0022t + 0.3333$	0.701	式-4.5
20%	$\rho = 0.0053t + 0.2302$	0.936	式-4.6
33%	$\rho = 0.0036t + 0.2104$	0.690	式-4.7
50%	$\rho = 0.0043t + 0.1458$	0.637	式-4.8

ここに,

$\rho$  : 密度 (Mg/m<sup>3</sup>)

$t$  : 空洞厚 (mm)

表-4.22 樹脂 200 と樹脂 300 の正規化密度（含水比 0%, 空洞厚 20mm の場合 1.0）

樹脂区分	空洞厚	空洞厚	空洞厚
	5mm	10mm	20mm
樹脂 200	1.45	1.30	1.00
樹脂 300	1.11	1.08	1.00

表-4.23 特性値の推定値（樹脂 300）

仮想地盤の 含水比	特性値	空洞厚 (mm)							
		1	3	5	7	10	12	15	20
0%	密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	0.331	0.327	0.322	0.318	0.311	0.307	0.300	0.289
	圧縮強さ (MN/m <sup>2</sup> )	6.45	6.29	6.13	5.97	5.73	5.58	5.35	4.99
	変形係数 (MN/m <sup>2</sup> )	237	231	226	221	213	207	200	187
20%	密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	0.236	0.246	0.257	0.267	0.283	0.294	※	※
	圧縮強さ (MN/m <sup>2</sup> )	3.38	3.67	3.97	4.29	4.79	5.13	※	※
	変形係数 (MN/m <sup>2</sup> )	132	142	153	163	180	192	※	※
33%	密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	0.214	0.221	0.228	0.236	0.246	0.254	0.264	0.282
	圧縮強さ (MN/m <sup>2</sup> )	2.82	3.00	3.19	3.38	3.68	3.88	4.20	4.76
	変形係数 (MN/m <sup>2</sup> )	112	119	125	132	142	149	160	180
50%	密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	0.150	0.159	0.167	0.176	0.189	0.197	0.210	0.232
	圧縮強さ (MN/m <sup>2</sup> )	1.46	1.62	1.78	1.96	2.23	2.42	2.73	3.28
	変形係数 (MN/m <sup>2</sup> )	64	70	76	82	92	99	109	128

※含水比 20%で空洞厚 15mm 以上では、推定密度が含水比 0%における推定密度以上となるため空欄とした。

#### 4.7 まとめ

充填本試験結果より、以下のことが明らかとなった。

- ① 樹脂 200 と樹脂 300 の違い
  - ⑤の空洞厚と密度の関係以外は同様の傾向である。
- ② 樹脂の拡がり方
 

水平空洞では、初期充填樹脂は充填点を中心として楕円形に拡がり、後期充填樹脂は既に充填された樹脂下面を通り遠方に拡がる。一方、傾斜空洞では初期充填樹脂は空洞が厚い方に拡がり、その後、空洞が薄い方に拡がる。
- ③ 樹脂の形状
 

含水比が低い場合では、後期充填樹脂は初期充填樹脂の外周に半円形に形成される。一方、含水比が高い場合には、初期充填樹脂の外周に樹枝状に形成される。また傾斜空洞では、含水比が低い場合に洲が、含水比が高い場合に樹枝状の形状が確認されたものの、樹脂量を増加することで改善される。
- ④ 仮想地盤の含水比の影響
 

仮想地盤の含水比が高いほど密度が低下する傾向がある。
- ⑤ 空洞厚と密度の関係
 

含水比 0%の場合は空洞が薄いほど密度が高くなるが、その傾向は樹脂 200 の方が顕著である。一方、含水条件の場合は空洞が薄くなると、樹脂 200 は密度が高くなり、樹脂 300 は密度が低くなった。これは閉塞効果と水和反応の影響の差が原因と考えられる。

## 5. 多層弾性理論による PC 版下面の応力解析

裏込めグラウトが流出した PC 版と路盤の間に発泡ウレタン樹脂を充填することの効果について、航空機荷重荷時の PC 版下面の応力に着目して解析する。解析には、多層弾性理論による舗装構造解析ソフトである GAMES<sup>9)</sup>を用いた。

### 5.1 解析条件

#### (1) 舗装構造

図-5.1 に、解析する舗装の断面を示す。舗装構成と各層の厚さは、PC 版を用いた空港コンクリート舗装で一般的なものとした。解析断面は 3 ケースである。ケース 1 では、PC 版と路盤の間にグラウトが充填されている状態を想定した。ケース 2 では、グラウトが航空機の繰返し走行により流出し空洞が形成された状態を想定した。ケース 3 では、形成された空洞を本研究で開発した樹脂 300 で充填した状態を想定した。

#### (2) 材料定数

表-5.1 に各層の材料定数を示す。PC 版、アスファルト安定処理上層路盤、粒状下層路盤および路床の材料定数は、空港土木施設設計要領（舗装設計編）を参考に設定した。グラウトの材料定数には、伊豆らが示した値<sup>4)</sup>を入力した。空洞については弾性係数を 0MPa とすることが考えられるが、GAMES における各層は水平方向に無限に広がるものであるため、弾性係数を 0 に設定すると解析ができない。そこで、空洞を模した剛性の低い層として、弾性係数を極力低減させ 10MPa とし、ポアソン比を 0.49 とした。発泡ウレタン樹脂の材料定数には、第 2 章の樹脂 300 に対する一軸圧縮試験の結果を用いた。各層間のすべり率は 0（層間が付着した状態）とした。

#### (3) 荷重条件

表-5.2 には荷重条件を示す。東京国際空港に就航する航空機材の中で最大級の機材として B777-300ER を想定した。本機材は 1 つの主脚につき 6 つの車輪が装着されているが、本解析は、グラウト、空洞、樹脂が PC 版と路盤の間にある時の PC 版下面の応力を相対比較するものであるため、解析を簡便にするために、GAMES における荷重の載荷は 1 つの車輪で行った。

輪荷重、接地圧、接地半径は、空港土木施設設計要領（舗装設計編）に記載される航空機の荷重諸元をもとに設定した。

### 5.2 解析結果

図-5.2 に、PC 版下面の最大主応力を示す。PC 版下が空洞である場合の応力は、グラウトで充填された場合の約 2.3 倍であったが、空洞を樹脂で充填した場合の応力は、グラウトに対して約 1.6 倍に留まることが分かる。樹脂を充填した場合の PC 版では、グラウトが充填された PC 版の応力状態には戻らないが、空洞が存在したままの PC 版よりは応力状態が改善される。



a) ケース 1      b) ケース 2      c) ケース 3

図-5.1 解析断面

表-5.1 各層の材料定数

	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
PC 版	34,000	0.15
グラウト	14,000	0.25
空洞	10	0.49
発泡ウレタン樹脂	180	0.072
アスファルト安定処理上層路盤	6,000	0.35
粒状下層路盤	200	0.35
路床	100	0.35

表-5.2 荷重条件

機材名	輪荷重 (MPa)	接地圧 (MPa)	接地半径 (m)
B777-300ER	266	1.52	0.236

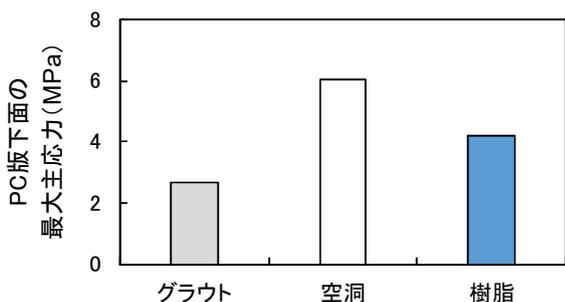


図-5.2 PC版下面の最大主応力

## 6. 標準工法の提案

本研究で実施した室内性能試験結果及び樹脂充填試験結果から、樹脂 200、樹脂 300 のどちらを用いた場合でも、PC 版を想定した鉄板下の空洞に、十分な圧縮強さを有する樹脂を形成することが可能であることを確認した。

樹脂充填試験結果から、PC 版下の空洞部に発泡ウレタン樹脂を充填するための標準工法を考察すると、以下のようにまとめられる。

### ① 樹脂充填方法

インターバル充填方式では密度のばらつきが大きく

なるため、連続充填方式とする。

### ② 充填終了設定

PC 版の鉛直変位が 1mm に達した時点で充填を終了すると、傾斜空洞では洲が、含水比が高い条件では樹枝状の拡がりが発生する可能性があるため、2mm 以上に達した時点で充填を終了する。

### ③ 空洞内の湿潤状況の確認

空洞内が湿潤状態にある場合は、水和反応により密度が低下する特徴がある。そのため、施工前に空洞内の湿潤状況を確認し、湿潤状態にあると考えられる場合は、極力、水分を排除することが望ましい。

### ④ 充填間隔

樹脂充填試験の結果、樹脂 200、樹脂 300 ともに概ね 1m<sup>2</sup> 程度の拡がりであり、密度のばらつきも小さく抑えることが可能であった。②で述べたように、鉛直変位が 2mm まで充填を行うことにより樹脂充填量が多くなるため、1 孔/1.0m<sup>2</sup> とするのが妥当である。

### ⑤ 樹脂の選定

室内性能試験結果から、樹脂 200 及び樹脂 300 の標準仕様をまとめると表-6.1 となる。樹脂 200、樹脂 300 ともに、航空機のタイヤ接地圧に十分耐えられる圧縮強さを有しているが、より変形係数の高い樹脂 300 を使用するのが妥当である。

表-6.1 樹脂 200 及び樹脂 300 の標準仕様

樹脂区分	標準密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	圧縮強さ (kN/m <sup>2</sup> )	破壊ひずみ (%)	変形係数 (MN/m <sup>2</sup> )	10 万回載荷後	
					累積ひずみ (%)	状態
樹脂 200	0.200	2,530	4.71	100.4	0.85~1.77	破壊せず
樹脂 300	0.291	4,799	5.75	178.6	0.62~1.12	破壊せず

※「累積ひずみ」「10 万回載荷後の状態」は、繰返し一軸圧縮試験における繰返し圧縮応力を航空機タイヤ接地圧相当 (1,500kN/m<sup>2</sup>) とした際の結果である。

## 7. 結論

- (1) 発泡ウレタン樹脂は、混合後 15 分程度は膨張を継続し、およそ 60 分程度で安定した性状が得られる。
- (2) 硬化した発泡ウレタン樹脂の密度と圧縮強さ及び変形係数には相関関係があり、密度から圧縮強さ及び変形係数を推定することが可能である。ただし、湿潤状態の空洞へ充填すると、形成される樹脂の密度は低下し、圧縮強さ及び変形係数も低下する。
- (3) 開発品である樹脂 300 (旧) 及び樹脂 400 は、圧縮強さは非常に高いものの、靱性が弱くなり破断しやすい材料となるが、圧縮強さが航空機のタイヤ接地圧の数倍であることから、問題にはならない。また、充填時の機器等の設定を変えることにより改良した樹脂 300 (新) では破断することはなかった。
- (4) 繰返し一軸圧縮試験の結果から、航空機タイヤ接地圧相当の繰返し圧縮を受けた場合でも、10 万回以内で破壊には至らなかった。
- (5) 空洞に充填した樹脂は、充填点を中心として楕円形に拡がり、その後、樹脂下面を通り遠方に拡がる傾向がある。また、空洞の厚い方に拡がった後、空洞の薄い方に拡がる傾向がある。
- (6) 形成された樹脂の密度は、湿潤状態でなければ空洞が薄いほど密度が高くなり、その傾向は樹脂 200の方が顕著である。一方、湿潤状態下の場合、空洞が薄いほど、樹脂 200 は密度が高くなり、樹脂 300 は密度が低くなる。
- (7) 形成された樹脂に洲や樹枝状の形状が確認されたが、充填樹脂量を増加することで改善される。
- (8) 航空機荷重により PC 版に発生する荷重応力は、グラウトが充填された PC 版の荷重応力よりは大きいものの、空洞のままの状態よりも荷重応力を低減することが可能となる。
- (9) 樹脂充填試験の結果から、PC 版下の空洞に発泡ウレタン樹脂を充填するための標準工法を提案した。

## 8. おわりに

本研究では、樹脂充填によりコンクリート版を持ち上げる点は研究目的としては省略し、PC 版の高さ修正をしない場合であっても、PC 版下の空洞へ樹脂を充填し、十分な強度を有する樹脂を形成することが可能であることを明らかにした。

発泡ウレタン樹脂自体の変形係数は従来のグラウトよりも低いものの、空洞充填のみならず、高さ修正も行う場合は、本試験よりも多量の樹脂を充填することとなるため、空洞に存在しうる水分の影響も相対的に低下すると考えられる。また、一度の施工で空洞の充填と高さ修正が可能となるため、施工時間が限定される空港内の工事に適している工法と言える。

最後に、樹脂充填基礎試験を実施するにあたり、試験ヤードを貸与頂くとともに、試験方法への助言を頂いた国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 伊豆太特別研究主幹に謝意を表す。

本資料は、国土技術政策総合研究所、みらい建設工業株式会社、メインマーク株式会社による共同研究「発泡ウレタンによる空港プレキャストコンクリート舗装下面の空洞充填に関する共同研究」の成果の公表に代わるものである。

(2021 年 11 月 16 日受付)

## 参考文献

- 1) 佐藤勝久, 八谷好高, 上中正志, 犬飼晴雄, 川本幸広, 塚田悟: 沈下したプレストレストコンクリート舗装版のリフトアップ工法の開発, 港湾技術研究所報告, 第28巻, 第2号, 1989.
- 2) 八谷好高, 福手勤, 梅野修一, 田中順: コンクリート舗装用グラウト材の品質, 港湾技研資料, No.818, 1995.
- 3) 前川亮太, 河村直哉, 諸橋克敏, 志道昭郎, 神谷清志: 空港エプロン舗装における PC 版裏込めグラウト材の耐久性向上に関する研究, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.67, No.3 (舗装工学論文集第16巻), 2011.
- 4) 伊豆太, 高原幸之助, 諸橋克敏: PC 舗装の裏込グラウト開発の現状等について, 第18回空港技術報告会, 2017.
- 5) 坪川将丈, 水上純一, 江崎徹, 小林雄二, 吉松慎哉, 青山敏幸, 阪上德行, 野中聡: 空港エプロン PC 舗装版の補強構造に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, No.456, 2008.
- 6) 水野雄介, 鬼頭順三: 中部国際空港エプロン内排水溝の段差補修について, 第13回空港技術報告会, 2012.
- 7) 亀倉和彦, 若城太郎: 樹脂の膨張力でコンクリート床版の沈下を修正, 一般社団法人日本建設機械施工協会誌「建設の施工企画」, 第757号, 2013.
- 8) 国土交通省航空局: 空港土木施設設計要領 (舗装設計編), 2021.
- 9) 土木学会舗装工学委員会舗装構造小委員会: 多層弾性理論による舗装構造解析入門—GAMES (General Analysis of Multi-layered Elastic Systems) を利用して—, 舗装工学ライブラリー3, 2005.

---

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1177            December 2021

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

---

本資料の転載・複写のお問い合わせは  
〔〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1  
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019〕  
E-mail:ysk.nil-46pr@gxb.mlit.go.jp

国土技術政策総合研究所資料

No.1177

研究 発泡ウレタンによる空港プレストレストコンクリート版下面の空港充填に関する

December 2021