

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

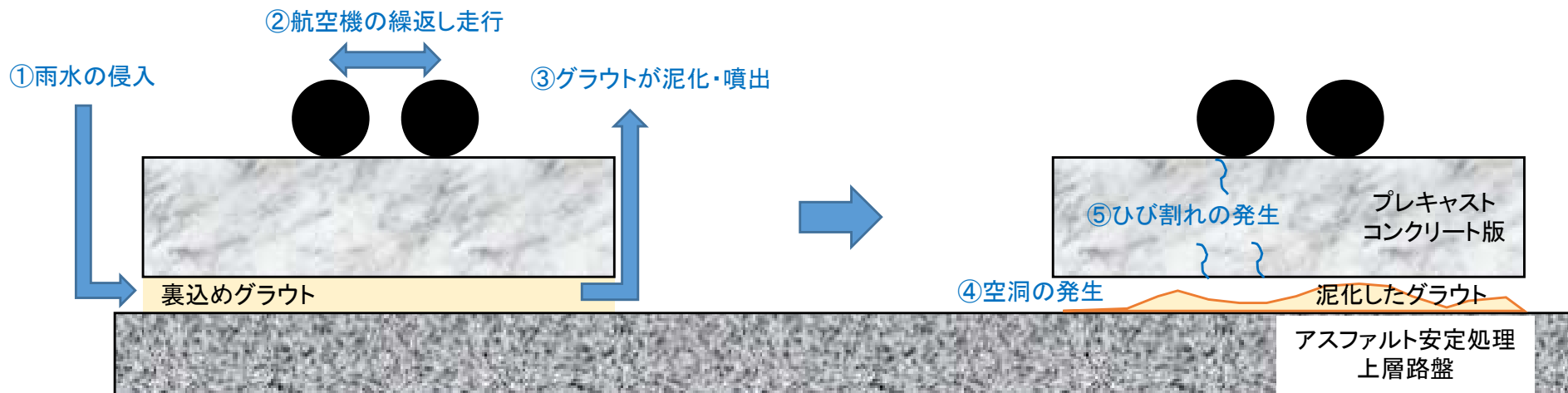
坪川将丈・河村直哉（空港施設研究室）

足立雅樹・蛭川愛志・今真吾（みらい建設工業株式会社）

伊藤茂雄・亀倉和彦（メインマーク株式会社）

背景と目的

- 空港で用いられているPC舗装を施工する場合、PC版と路盤との不陸を埋めるため、PC版を敷設後、**版下面に裏込めセメントグラウトを充填**している。
- 年月の経過とともに**裏込めセメントグラウトが割れ、舗装内に侵入した雨水と混じることにより泥化・噴出し、PC版下面に空洞が発生**する場合がある。
- 再度セメントグラウトにより空洞を充填するが、根本的な解決にはなっていない。
- 本共同研究は、割れにくい・泥化しない・充填性が高い特徴を有する**発泡ウレタンによりPC版下面に発生した空洞を充填**する工法について、空港舗装を対象とした充填方法や充填による効果を検証する目的で実施した。



共同研究の詳細

- 国総研、みらい建設工業(株)、メインマーク(株)による共同研究(2020年11月～2021年10月)。
- 国総研が全体総括及び構造解析を担当。
- みらい建設工業(株)及びメインマーク(株)が室内・屋外実験を担当。

2014年3月



2017年5月-PC版撤去



グラウト噴出状況



2016年12月-PC版の破損



露出させたグラウト層



As舗装による打換後



本資料の構成

1. はじめに
2. 樹脂の室内性能試験
樹脂の基本的特性を把握するための各種室内試験
3. 実大規模樹脂充填基礎試験
PC版下への充填を想定した基礎試験
4. 実大規模樹脂充填本試験
基礎試験結果を参考に、充填方法を修正し実施した本試験
5. 多層弾性理論によるPC版下面の応力解析
発泡ウレタン充填による版応力軽減効果の確認
6. 標準工法の提案
7. 結論
8. おわりに

2. 樹脂の室内性能試験

使用した樹脂

- 従来品

密度が $0.2\text{Mg}/\text{m}^3$ の樹脂200を除き、
密度が非常に低く、圧縮強さ・変形係数ともに低い。

- 開発品

密度が高い樹脂300(旧)、樹脂300(新)、樹脂400を使用。

供試体作成方法

- 主材(ポリオール化合物)と反応材(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供試体等を作成する。



樹脂を搭載した作業車両



作成した供試体

2. 樹脂の室内性能試験

樹脂の基本特性を把握するため、以下の室内試験を実施した。

- 膨張時間の測定試験
モールドに樹脂を充填し、樹脂の膨張継続時間を計測する。
- 温度変化の測定試験
モールドに樹脂を充填し、温度の推移を計測する。
- 密度試験
- 一軸圧縮試験
充填後の樹脂の密度と圧縮強さの関係を把握する。
- 時間別の一軸圧縮試験
充填後の養生時間と圧縮強さの関係を把握する。
- 繰返し一軸圧縮試験
硬化した樹脂の疲労破壊特性を把握する。
- 含水条件における密度試験
充填時に樹脂が水と接触した際の密度の変化を把握する。

2. 樹脂の室内性能試験

膨張時間および温度変化の測定試験

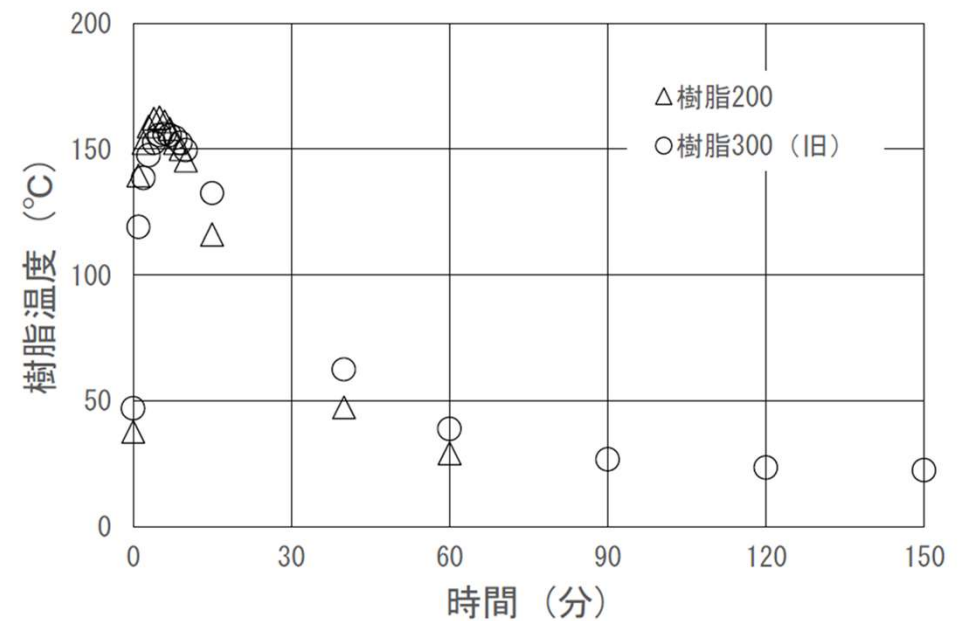
- 樹脂の膨張は13～17分程度で収束する。
- 樹脂温度も60～90分程度で収束する。

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

樹脂300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

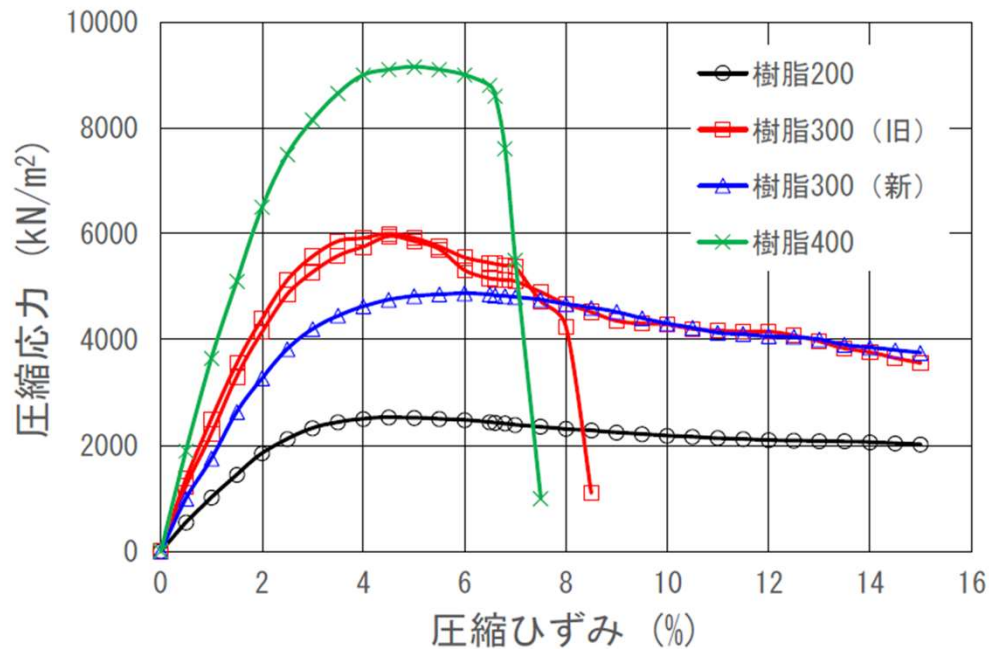


樹脂の温度変化

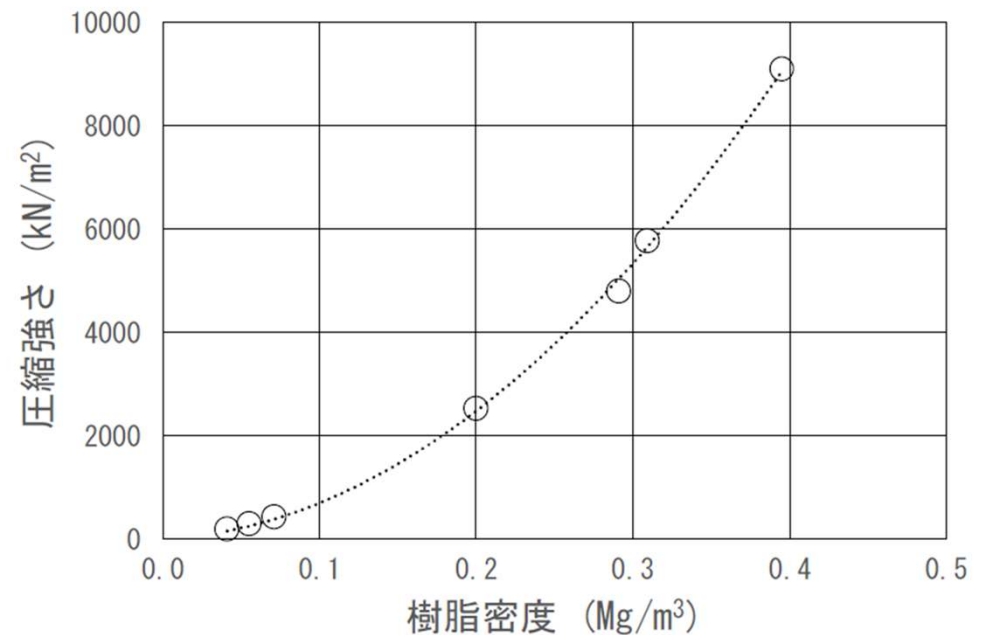
2. 樹脂の室内性能試験

一軸圧縮試験結果

- 密度が高い樹脂300(旧)と樹脂400は、供試体が破断する等、脆性的な破壊であった。そのため、樹脂300(旧)と主材・反応材は同じで、充填時の機器等の設定を変えた樹脂300(新)は、破壊性状が改善された。
- 圧縮強さ・変形係数と密度には相関関係があり、密度から圧縮強さを推定可能なことを確認した。



応力-ひずみ曲線



圧縮強さと密度の関係

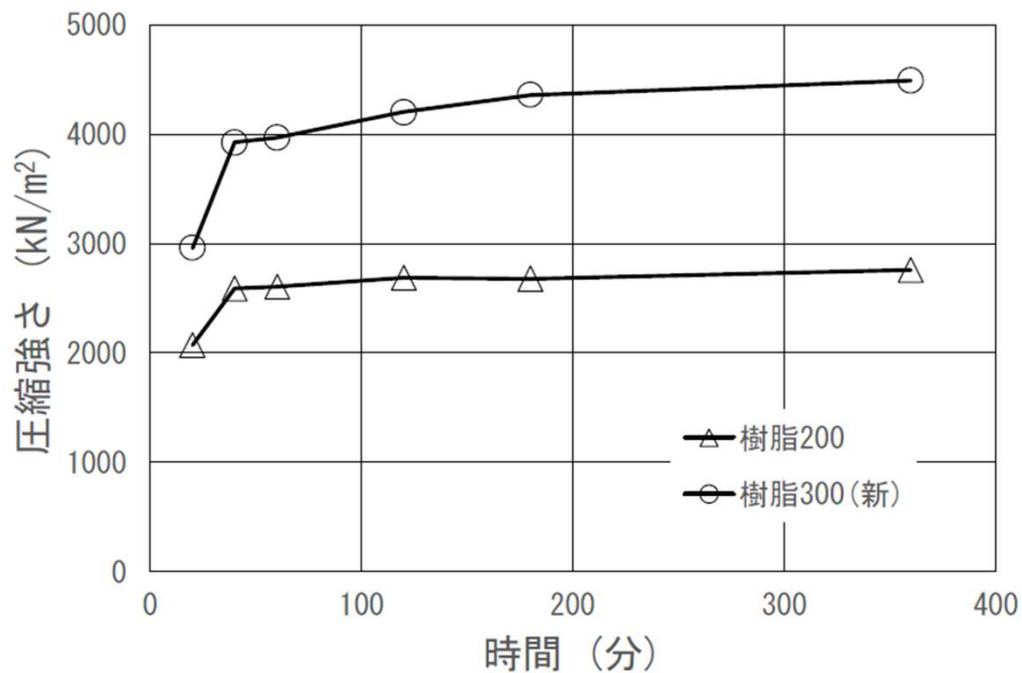
2. 樹脂の室内性能試験

時間別の一軸圧縮試験結果

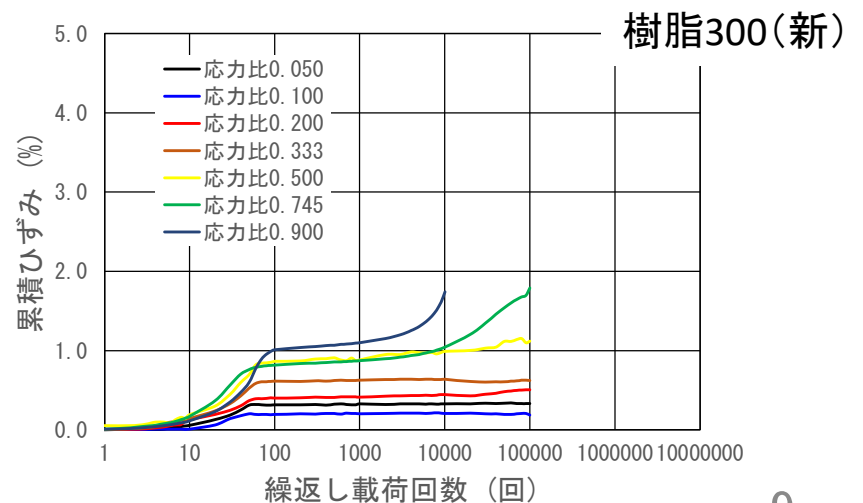
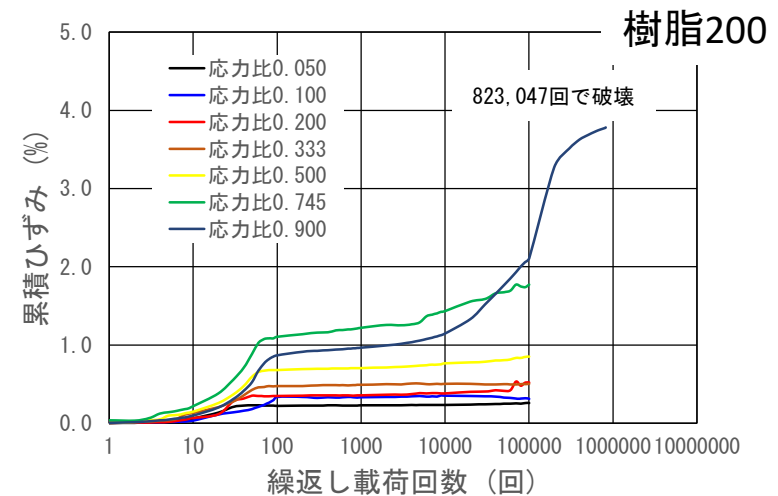
- 数十分で圧縮強さは一定となる。密度の高い樹脂300(新)の方が一定となるまで時間を要する。

繰返し一軸圧縮試験結果

- 大型航空機のタイヤ接地圧 (1500kN/m^2) よりもはるかに大きな応力比0.9とした場合でも10万回では破壊に至らなかった。



時間別圧縮強さ



2. 樹脂の室内性能試験

含水状態における密度試験

- モールド底面に、泥化したグラウトを想定した仮想地盤（Co粉と水を混ぜて含水比を調整）を敷き、その上に樹脂を充填した。
- 仮想地盤の含水比が高くなると、仮想地盤内の水分と樹脂が接触・反応して過大に膨張し、密度は低下する。

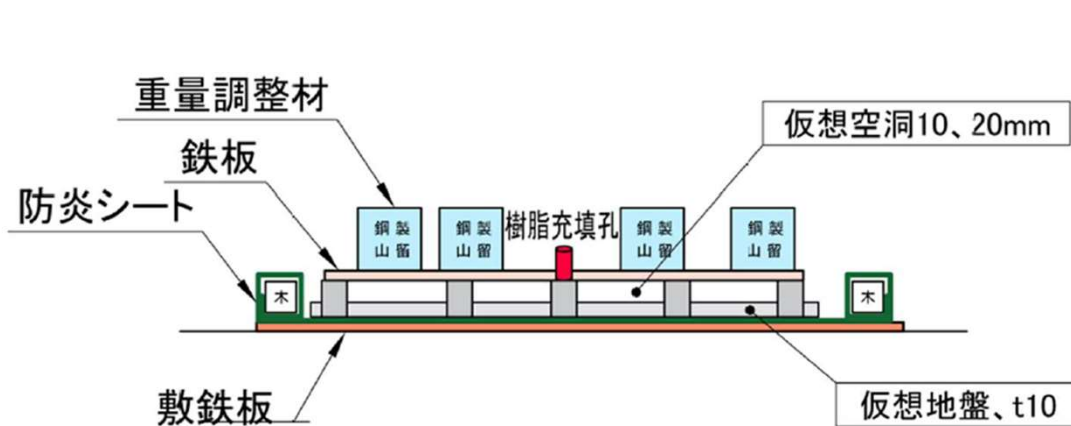
仮想地盤の 含水比	樹脂充填量 (g)	上載質量 (kg)	樹脂密度 (Mg/m ³)
0%	350	7.79	0.1884
		10.39	0.1868
20%	200	7.79	0.0970
		10.39	0.1030
25%	200	7.79	0.0908
		10.39	0.0942
50%	200	7.79	0.0550
		10.39	0.0560
滞水	200	7.79	測定不能
		10.39	測定不能

3. 充填基礎試験

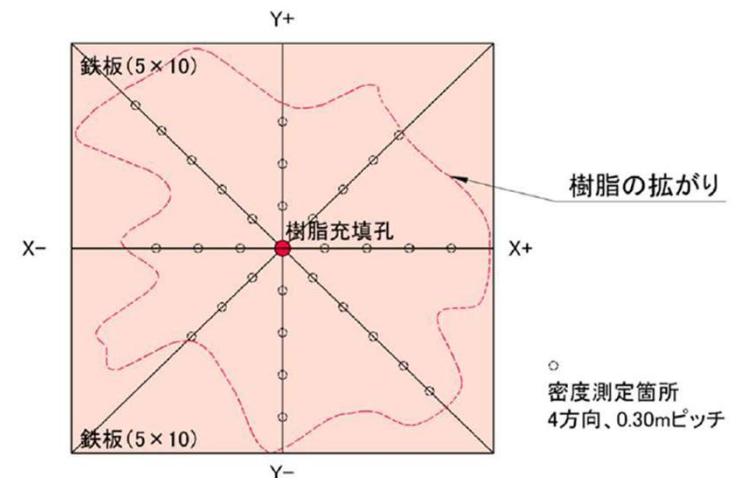
- 上面:鉄板(3m×3m)+PC版の重量に相当する鋼製山留
 - 下面:敷鉄板上のグラウトを模した仮想地盤(シルトと水を混合したもの)
- の間の空洞に、鉄板中央の充填孔から樹脂を充填し、出来形・密度・変位を確認した。

主な試験条件

- 使用樹脂:樹脂200
- 充填方法:インターバル方式(樹脂原液1.0kg充填→5秒待機→再度充填)で充填孔付近の鉛直変位が1mmに達するまで。
- 空洞厚:10mm及び20mm
- 仮想地盤の含水比:0、20、33、50%及び滞水状態



断面図



平面図

3. 充填基礎試験



仮想地盤形成



樹脂充填



鉄板敷設

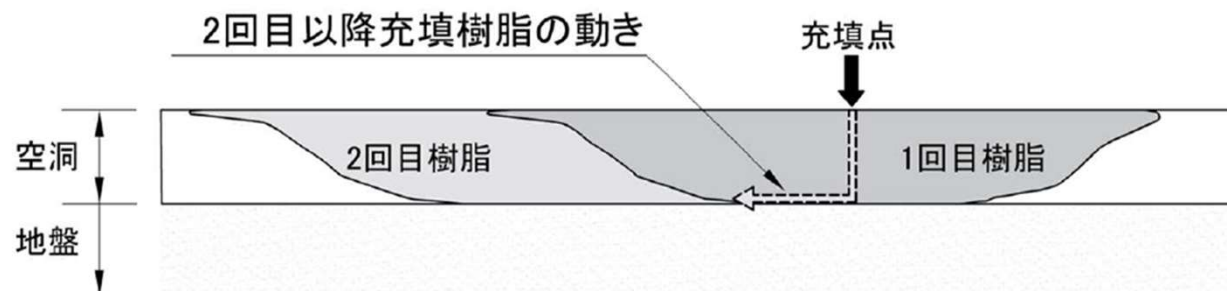
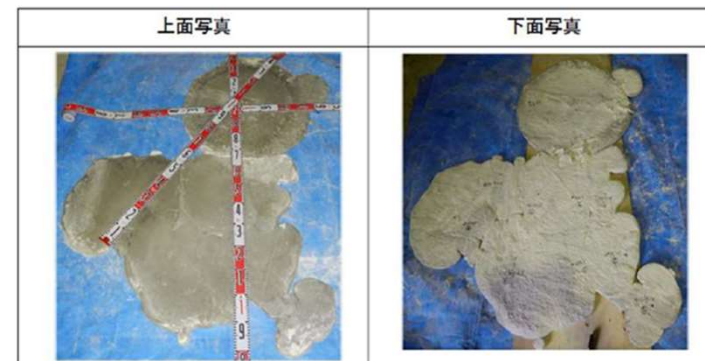
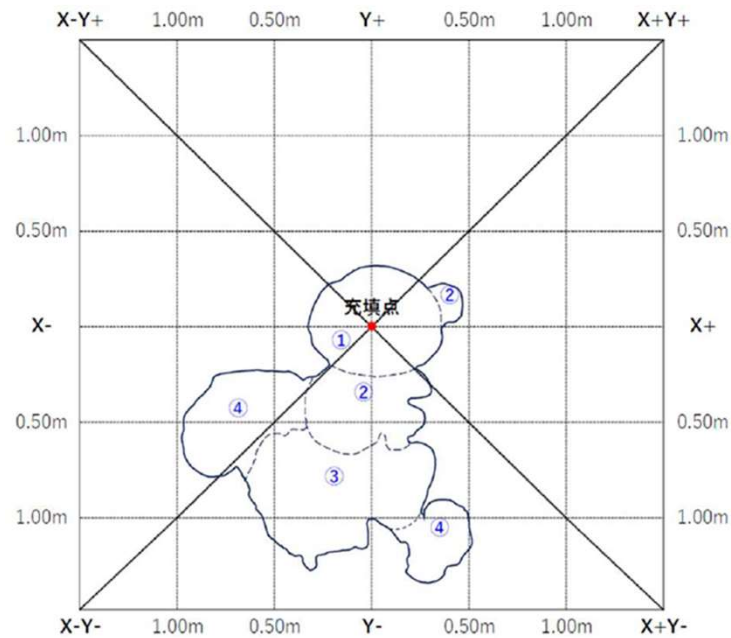


樹脂の観察

3. 充填基礎試験

充填完了後、鉄板を撤去して出来形を確認した。

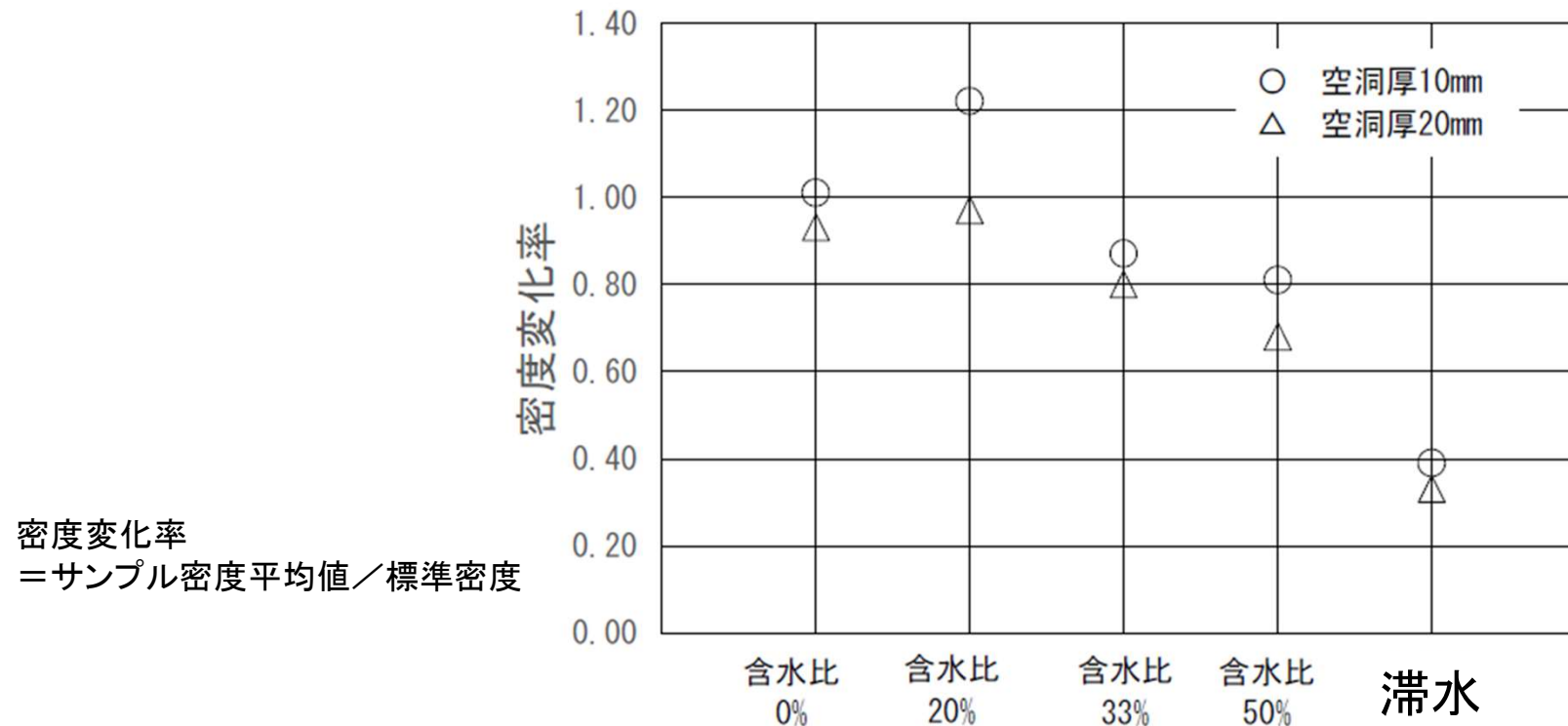
- インターバル方式の場合、1回目充填樹脂は充填点付近で発砲し、2回目以降充填樹脂は外側に形成される傾向がある。
- インターバル方式だと、2回目以降充填樹脂のコントロールが困難である。



3. 充填基礎試験

充填完了後、鉄板を撤去し、密度試験用サンプルを採取して場所ごとの密度を確認した。

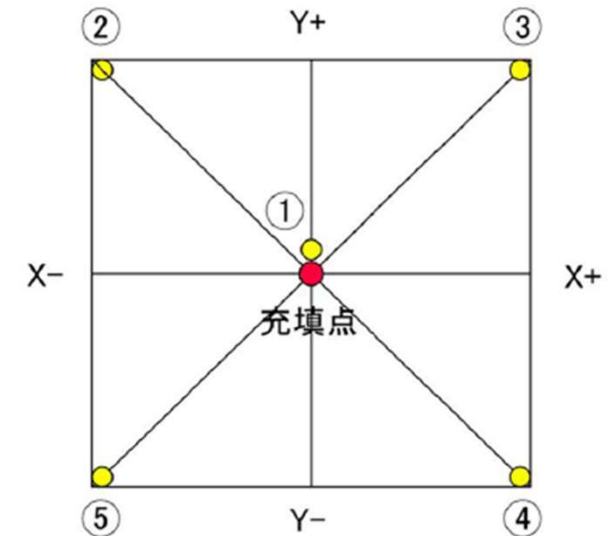
- 1回目充填樹脂の密度が最も高い傾向がある。
⇒1回目充填樹脂は、2回目以降の膨張作用を受けたか？
- 含水比が高くなると密度が低下する傾向がある。
⇒室内試験と同様。
- 空洞厚が薄いほど密度が高い傾向がある。
⇒閉塞効果(狭い空間で膨張した方が高い密度が得られる)の影響か？



3. 充填基礎試験

充填直後および40分後の鉛直変位を確認した。

- ①が1mmに達した時点で充填終了したが結果として最大4mmの隆起。
- 充填点近傍である①以外の変位は軽微。
- 40分後も変化なし。

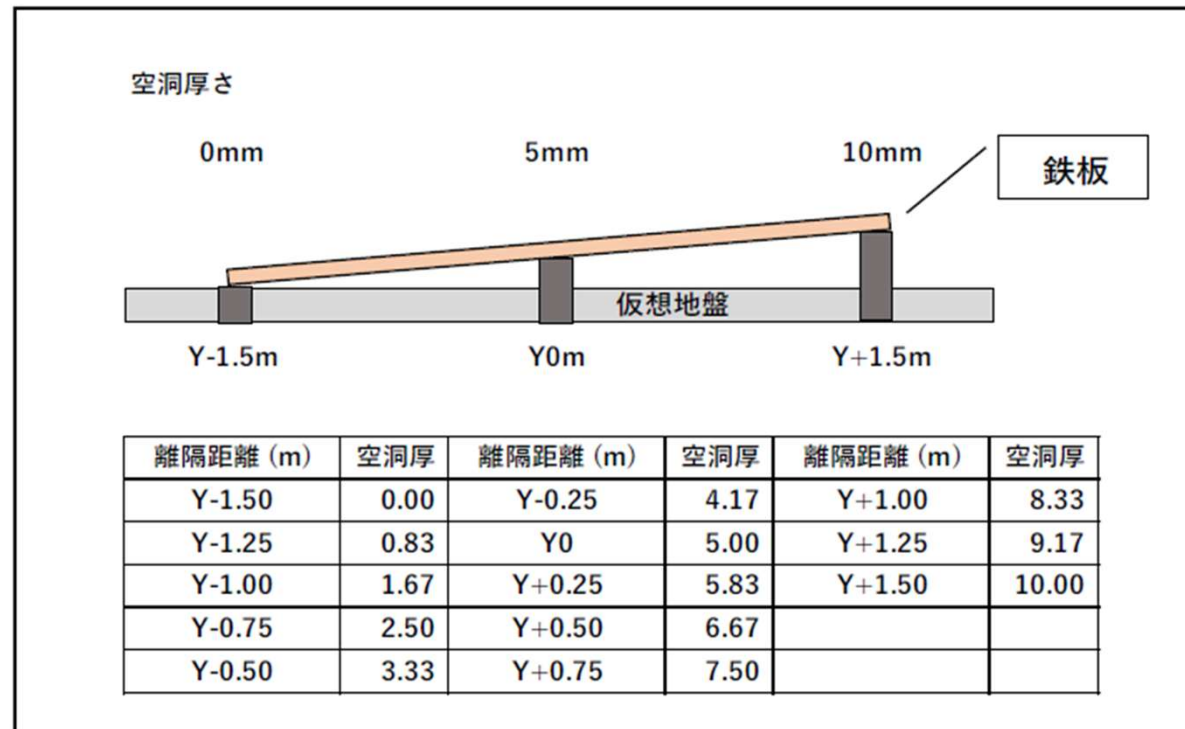


仮想地盤の含水比		0%		20%		33%		50%		100%	
試験 No.		基-1	基-2	基-3	基-4	基-5	基-6	基-7	基-8	基-9	基-10
空洞厚 (mm)		10	20	10	20	10	20	10	20	10	20
樹脂量 (kg)		2.0	4.0	3.0	3.0	2.0	2.0	3.0	4.0	2.0	2.0
充填直後の 鉛直変位 (mm)	測点①	1	1	4	2	4	3	1	2	2	1
	測点②	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0
	測点③	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
	測点④	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0
	測点⑤	0	0	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

4. 充填本試験

基礎試験結果を参考に、本試験では以下のとおりとした。

- ・ インターバル充填方式をやめ、1回の連続充填方式とする。
- ・ 滞水状態(仮想地盤＝水)は実施しない。
- ・ 樹脂200のほか、さらに高い密度・弾性係数・圧縮強度が期待できる樹脂300も使用する。
- ・ さらに薄い空洞での状態を確認すべく、空洞厚一様10mm(以下、水平空洞)に加え、空洞厚0～10mm(以下、傾斜空洞)の試験を行う。



傾斜空洞の断面図

4. 充填本試験

樹脂の挙動

- おおむね充填点近傍に楕円形上になるが、傾斜空洞の場合は、樹脂が拡がりやすい「空洞が厚い方」へ拡がる。
- 含水比が低い場合に「洲」が、含水比が高い場合は「樹枝状」が確認できたが、鉛直変位2mmに達するまで樹脂を充填する(充填樹脂量を多くする)と改善される。

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

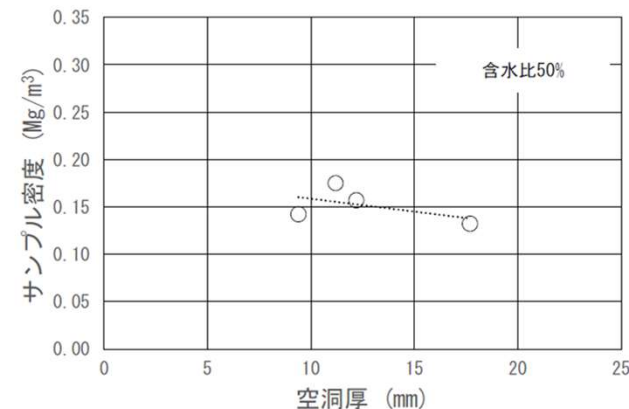
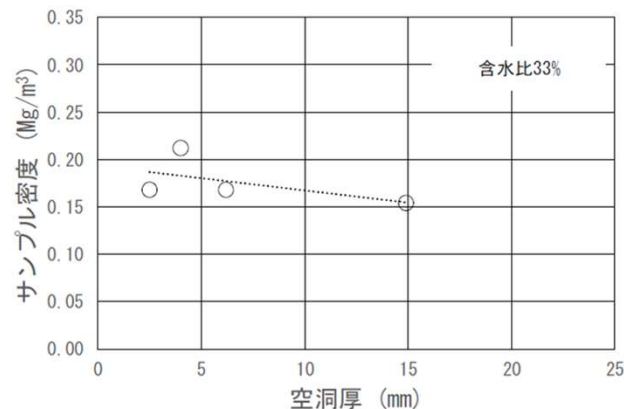
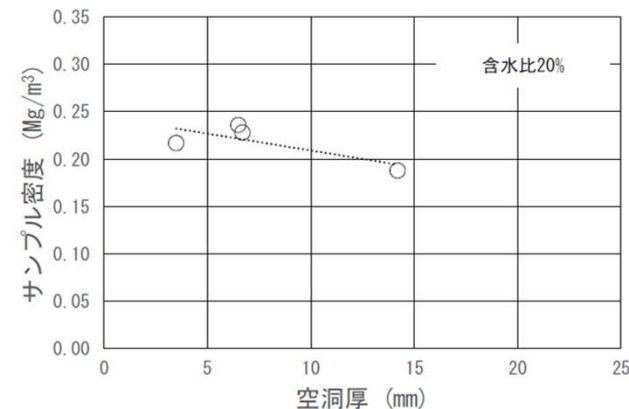
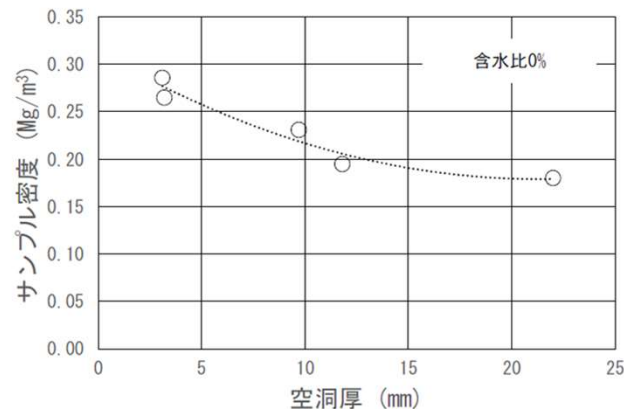
試験 No.	No.7	No.7-②
仮想地盤の含水比	33%	33%
樹脂量 (kg)	1.5	2.2
充填直後の鉛直変位 (mm)	0.5	5.0
形成樹脂図		
洲の有無	赤円内にわずかに洲が発生している	洲は発生していない

※写真の円形の孔はサンプル採取により生じた。

4. 充填本試験

樹脂の密度

- 樹脂200では空洞厚が薄いと「閉塞効果」により密度が高くなる。
- 樹脂300では、含水状態の場合に限り逆の傾向を示す。これは密度が高くなる「閉塞効果」と密度が低くなる「過大な水和反応」が影響していると考えられ、空洞厚が薄い場合は「水和反応」による影響が強く、密度は低くなる。

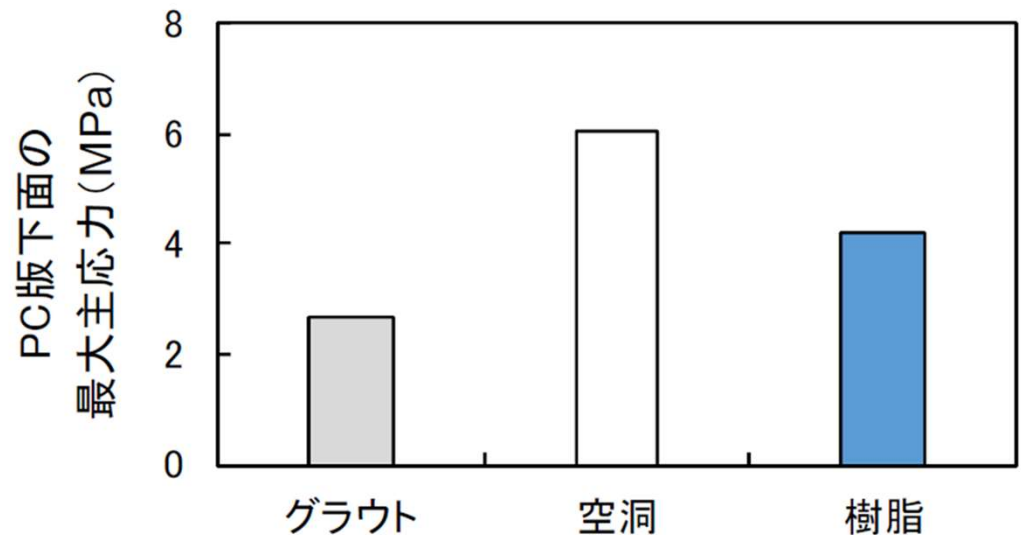
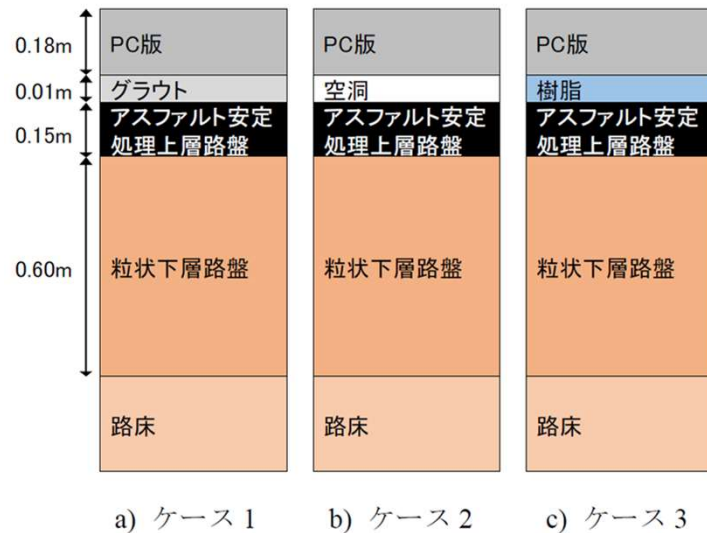


樹脂200の密度と空洞厚の関係

5. 応力解析

PC版下を「グラウト」「空洞」「ウレタン樹脂」とした場合、PC版下面に発生する応力を多層弾性解析により確認した。

- 断面は下図のとおり。
- 航空機荷重はB777-300ERの輪荷重とした。
- ウレタン樹脂層は樹脂300の弾性係数を使用した。
- グラウトが欠損した状態では応力が非常に大きくなるものの、樹脂を充填することにより、空洞のままの状態よりも大きく改善される。



6. 標準工法の提案

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いため、連続充填方式とする。

②充填終了設定

鉛直変位1mmでは洲・樹枝状の拡がりが確認されたため、2mmで終了とする。

③空洞内の湿潤状態の確認

湿潤状態の場合は密度が低下するため、極力、水分を排除する。

④充填間隔

おおむね1m²程度の拡がりであるため1孔/1.0m²とする。

⑤樹脂の選定

変形係数が高い樹脂300を使用するのが妥当。

7. 結論

室内試験で把握した樹脂の基本特性を基に充填試験を実施し、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。