

# 港湾技研資料

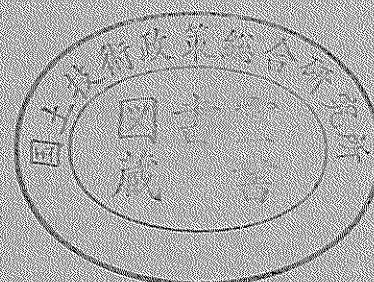
TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 953 Mar. 2000

植栽コンクリートの海洋環境下への適用性の検討

|   |   |       |
|---|---|-------|
| 山 | 路 | 徹     |
| 福 | 手 | 勤     |
| 田 | 中 | 順     |
| 錦 | 織 | 和 紀 郎 |
| 森 |   | 伊 佐 男 |

運輸省港湾技術研究所



## 目 次

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 要 旨 .....                         | 3  |
| 1. はじめに .....                     | 4  |
| 2. ポーラスコンクリートの材料特性 .....          | 4  |
| 2.1 ポーラスコンクリートの達成目標水準 .....       | 4  |
| 2.2 実験概要 .....                    | 4  |
| 2.3 実験結果および考察 .....               | 6  |
| 2.4 結果の評価 .....                   | 7  |
| 3. ポーラスコンクリートの耐海水性の検討 .....       | 7  |
| 3.1 実験概要 .....                    | 7  |
| 3.2 実験結果 .....                    | 8  |
| 3.3 まとめ .....                     | 10 |
| 4. 植物の選定 .....                    | 11 |
| 4.1 ポーラスコンクリートにおける植物の活着の考え方 ..... | 11 |
| 4.2 適用可能な植物の条件 .....              | 11 |
| 4.3 植物の選定 .....                   | 11 |
| 5. 第一次植栽実験 .....                  | 11 |
| 5.1 植栽実験用供試体 .....                | 11 |
| 5.2 植栽条件 .....                    | 12 |
| 5.3 植物の管理方法 .....                 | 17 |
| 5.4 植物の生長状況および考察 .....            | 21 |
| 5.5 第一次植栽実験における問題点 .....          | 21 |
| 6. 充填材の検討 .....                   | 22 |
| 6.1 充填材に必要とされる材料特性 .....          | 22 |
| 6.2 試験の流れ .....                   | 23 |
| 6.3 試験材料 .....                    | 23 |
| 6.4 1次試験 .....                    | 24 |
| 6.5 2次試験 .....                    | 29 |
| 6.6 3次試験 .....                    | 31 |
| 7. 第二次植栽試験 .....                  | 36 |
| 7.1 植栽実験用供試体 .....                | 36 |
| 7.2 植栽条件 .....                    | 36 |
| 7.3 充填材の充填および植栽 .....             | 38 |
| 7.4 植物の管理方法 .....                 | 40 |
| 7.5 測定項目 .....                    | 40 |
| 7.6 植物の生長状況および考察 .....            | 40 |
| 7.7 供試体中の温度・湿度変化 .....            | 43 |
| 7.8 地中部（根）の生長状況 .....             | 44 |
| 7.9 ポーラスコンクリート中の空隙の連続性 .....      | 47 |
| 7.10 第二次植栽実験まとめ .....             | 47 |
| 7.11 今後の改良点 .....                 | 47 |
| 8. 植栽コンクリートの適用範囲 .....            | 48 |
| 9. 結論 .....                       | 49 |
| 謝辞 .....                          | 50 |
| 参考文献 .....                        | 50 |

# **The Study on the Applicability of Green Concrete under Marine Environment**

**Toru YAMAJI\***

**Tsutomu FUKUTE\*\***

**Jun TANAKA\*\*\***

**Wakiro NISHIGORI\*\*\*\***

**Isao MORI\*\*\*\*\***

## **Synopsis**

When concrete port facilities are constructed, land-scape and water front accessibility are becoming important factors to be considered in addition to structural functions. Along this trend, demand of planting or greening port facilities are increasing.

The authors carried out several series of experiments for developing porous concrete in which plants can grow their roots. At first, some experiments were carried out to select an optimum mix proportion of porous concrete. Next, the effect of filling materials in the void of porous concrete on growth of plants was examined using planted porous concrete.

The following results were obtained in this report.

- (1) By using blast furnace slag powder as mineral admixture, porous concrete that has 25% in void ratio and 19.6 N/mm<sup>2</sup> in compressive strength was obtained.
- (2) The alkalinity of porous concrete is decreased on using the blast furnace slag powder as mineral admixture.
- (3) The ability of holding water and the resistance to cracking are needed to the filling material. The mixture of silica sand, Kibushi-clay and black soil is an optimum condition as to the filling material to void in porous concrete.
- (4) It is possible to apply porous concrete as the basement of plants growing under marine environment if the filling material described above is used.

**Keywords** : porous concrete, marine environment , port facilities, greening, filling material, basement of plants growing

---

\* Member of Material Laboratory, Structural Engineering Division  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826, JAPAN

TEL:0468-44-5033; FAX:0468-44-0255; E-mail:yamaji@cc.phri.go.jp

\*\* Director of Planning and Design Standard Division  
(Former Chief of Material Laboratory, Structural Engineering Division)

\*\*\* The Forth District Port Construction Bureau, Ministry of Transport  
(Former Member of Material Laboratory, Structural Engineering Division)

\*\*\*\* TETRA Co., Ltd.

\*\*\*\*\* ECHO Co., Ltd.

# 植栽コンクリートの海洋環境下への適用性の検討

山 路 徹\*  
福 手 勤\*\*  
田 中 順\*\*\*  
錦 織 和紀郎\*\*\*\*  
森 伊佐男\*\*\*\*\*

## 要 旨

コンクリート中に空隙を有し、透水性のあるポーラスコンクリートは、現在透水性コンクリート舗装などに広く用いられてきている。またポーラスコンクリートに植栽を施した「植栽コンクリート」も河川護岸などにおいて実用化されつつある。一方、わが国の港湾整備において、構造物としての力学性能を満足しつつ、かつ景観を考慮したものが必要とされるケースがある。この際、構造物を自然と調和させるために、コンクリート構造物に対して「緑化」の要請がされる場合がある。

このような背景から、本稿では、海洋環境下で植物がコンクリート中に根を張り、生長することが可能となる植栽コンクリートを開発することを目的としている。

筆者らは、まず所要の性能を有するポーラスコンクリートの配合選定実験を行った。次に、実際にポーラスコンクリートを基盤として草本類および木本類を植栽し、植物の成長状況に及ぼすポーラスコンクリート中の空隙における充填材の影響および植栽コンクリートの海洋環境下への適用性を検討した。

一連の実験の結果、以下のような結論を得た。

- (1) 混和材として高炉スラグ微粉末を用いることで、25%の空隙率で圧縮強度の目標値19.6N/mm<sup>2</sup>のポーラスコンクリートを得ることができた。
- (2) アルカリ溶出量に関し、混和材を混合したもの、特に高炉スラグ微粉末を添加した場合、相対的にpHが低下していた。
- (3) 植栽を目的としたポーラスコンクリートにおいては、その空隙を埋める充填材に対して保水性・ひび割れ抵抗性などが必要とされる。今回の検討において、粒状材料である珪砂、保水能力に優れる木節粘土および黒土の3種類を適切な配合で混ぜ合わせたものが最適であることがわかった。
- (4) 上記の充填材を使用することにより、海洋環境下においてポーラスコンクリートを植物（木本類および草本類）の植生基盤として活用できることが示された。

キーワード：ポーラスコンクリート、海洋環境、港湾構造物、緑化、充填材、植生基盤

---

\* 構造部材料研究室

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1

TEL:0468-44-5033; FAX:0468-44-0255; E-mail:yamaji@cc.phri.go.jp

\*\* 計画設計基準部長（元構造部材料研究室長）

\*\*\* 運輸省第四港湾建設局（元構造部材料研究室研究員）

\*\*\*\* ㈱テトラ

\*\*\*\*\* ㈱エコー

## 1. はじめに

近年川岸や海岸の護岸構造物において、安価で効率的であることから大量に作られた直立護岸に対する要請は次第に薄れ、その反面、手間とお金はかかるものの、植物や生物が生息可能である多自然型護岸が増加してきている。また、港湾構造物においても、人が集まるウォーターフロントにおいては景観を無視する事は不可能で、木製ボードウォークや植物を植えるポットを有したものなど、景観を考慮したものに対する要請が高まっている。さらに今後は、港湾構造物のみではなく、海岸施設である離岸堤や突堤などでも、造景岩（擬岩）等を用いた構造物のほか、それらと木材や樹木などの自然材料との調和がより一層重要視されてくると思われる。

一方、砂を使わずに砂利同士をセメントペーストで固結させることで、内部に比較的大きな連続空隙を有する「ポーラスコンクリート」というものがある。写真-1.1にその外観を示す。この空隙を保水性などを有した充填材（数種材料の混合物）で満たし、その土に芝などの背丈の低い草類を植栽したコンクリート（以下「植栽コンクリート」）に関する研究は数年前から行われてきており、既に河川護岸・斜面などに実用化されている<sup>1)2)</sup>。

港湾におけるポーラスコンクリートの適用例は、海中の藻場造成などに一部見られる<sup>3)4)</sup>。しかし潮風を受ける海岸における緑化を目的として、さらにコンクリート自体を植生基盤として適用を試みた事例はほとんど見られない。そこで本研究は、港湾構造物の緑化の一手法として、厳しい海洋環境下でも所要の耐久性を有し、かつポ

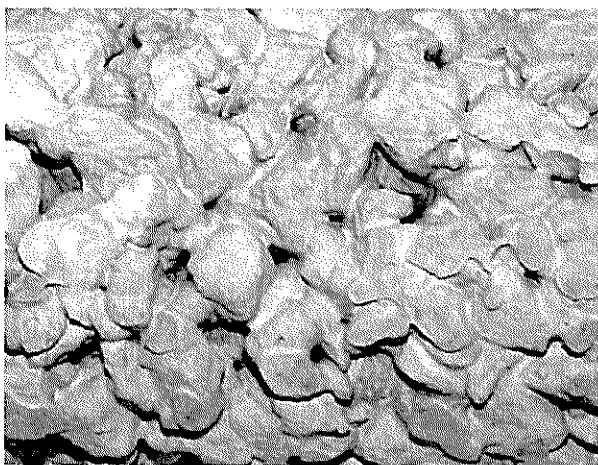


写真-1.1 ポーラスコンクリート

ーラスコンクリート自体が植生基盤になりうる植栽コンクリートの開発を目的としている。本論文ではまず所要の耐久性能を有するポーラスコンクリートの配合選定実験を行った<sup>5)</sup>。そして、その後実際にポーラスコンクリートを基盤として草本類および木本類を植栽し、植栽コンクリートの海洋環境下への適用性を検討している。

## 2. ポーラスコンクリートの材料特性

### 2.1 ポーラスコンクリートの達成目標水準

本実験では植栽を目的とするポーラスコンクリートにおいて考慮すべき項目として空隙率、圧縮強度、アルカリ溶出量を考え、以下の水準を達成目標とした。

#### (1)空隙率

植物の根の生長や雨水の浸透を考慮し、15～35%とした。

#### (2)圧縮強度

空隙率と海洋環境下での使用に耐えうる強度の確保から $19.6\text{N/mm}^2$  ( $200\text{kgf/cm}^2$ ) 以上とした。

#### (3)アルカリ溶出量

わが国の植物の多くは中性～弱酸性土壌に生育するものが多く、コンクリートのような強アルカリ中では健全な生育が困難と思われる。コンクリートをできるだけ中性域に近づけることを目標に、ポーラスコンクリートの空隙を満たす水のpHの上限を9.5とした。

### 2.2 実験概要

ここでは、所要の性能を有したポーラスコンクリートを得るために、①混和材の種類、②W/B（水結合材比）、③B/G（結合材粗骨材比）、④粗骨材の粒度分布がポーラスコンクリートの物性に与える影響について調べている。

#### (1)使用材料

粗骨材に奥多摩産5号碎石（表乾比重2.67、絶乾比重2.66、吸水率0.484%、実積率57.2%）および6号碎石（表乾比重2.67、絶乾比重2.66、吸水率0.432%、実積率57.9%）を用いた。結合材には普通ポルトランドセメント（比重3.16、粉末度 $3,300\text{cm}^2/\text{g}$ ）を用い、混和材としてシリカフューム（比重2.20、粉末度 $100,000\text{cm}^2/\text{g}$ 、 $\text{SiO}_2$ 85%以上）、高炉スラグ微粉末（比重2.91、粉末度 $6,430\text{cm}^2/\text{g}$ ）を必要に応じて内割りおよび外割りで添加した。また混和剤には高性能減水剤（ポリカルボン酸系）を使用した。使用材料一覧および略記号を表-2.1に示す。

#### (2)配合

配合は、W/B=25%および35%、B/G=10%および20%とし、シリカフューム添加率はセメントに対し内割り20%および外割り20%、高炉スラグ微粉末はセメントに対し内割

り45%とした。供試体配合表を表-2.2に示す。なお、今回単位粗骨材量Gは1560kg/m<sup>3</sup>で統一している。

### (3) 供試体と養生

100リットル練り強制パン型ミキサを使用し、1バッチ当たり40リットルを練り混ぜた。セメント、混和材、水、混和剤を投入し3分間練り混ぜ、その後粗骨材を投入して1.5分間練り混ぜ、ポーラスコンクリートを作製した。そしてφ10×20cmの円柱供試体に打設した。この際、締固め

はテーブルバイブレータで振動を与えることにより行った。供試体は脱型後材齢28日まで20℃水中養生を行い、その後試験材齢まで気乾状態で保管した。

### (4) 試験項目と試験方法

空隙率は、φ10×20cm供試体脱型前に供試体重量を測定し、型枠内に水を注入して水中重量の測定を行い、その差より求めた。

圧縮強度は、φ10×20cmの供試体の上面をキャッピングし、JIS A1108に準拠して、材齢3日、7日、28日に圧縮試験を行い求めた。

引張強度はφ10×20cmの供試体を用い、材齢28日に割裂試験を行い求めた。

アルカリ溶出量（pH）は水中養生後のφ10×20cmの供試体を、24時間浸漬した2リットルの水道水を用いて測定した。なお、測定は水中養生供試体に対しては材齢28日から91日まで1回/週の頻度で計10回行った。

透水性は、材齢28日に側面をシールし上下面を解放したφ10×20cmの供試体を用い、上部より5.5リットルの水を流入させた場合の下部よりの流出時間を測定することにより評価した。

表-2.1 使用材料

| 材    | 料                           | 比重   | 記号             |
|------|-----------------------------|------|----------------|
| セメント | 普通ポルトランドセメント                | 3.16 | NC             |
| 骨材   | 5号砕石:粒径10~20mm<br>(東京都奥多摩産) | 2.67 | G <sub>5</sub> |
|      | 6号砕石:粒径5~10mm<br>(東京都奥多摩産)  | 2.67 | G <sub>6</sub> |
| 混和材  | 高炉スラグ微粉末                    | 2.91 | BFS            |
|      | シリカフューム                     | 2.20 | SF             |
| 混和剤  | 高性能減水剤                      |      | SP             |
| 練混ぜ水 | 上水道水<br>(東京都町田市)            | 1.0  | W              |

表-2.2 供試体配合表

単位: kg/m<sup>3</sup>

| No. | セメント・混和材       | W/B | B/G | W     | C     | F     | G <sub>5</sub> | G <sub>6</sub> | SP   |
|-----|----------------|-----|-----|-------|-------|-------|----------------|----------------|------|
| 1   | NC             | 25  | 10  | 39.0  | 156.0 | —     | 1560           | —              | 1.95 |
| 2   |                |     | 20  | 78.0  | 312.0 |       |                |                | 3.12 |
| 3   |                | 35  | 10  | 54.6  | 156.0 |       |                |                | 0    |
| 4   |                |     | 20  | 109.2 | 312.0 |       |                |                | 0    |
| 5   | NC+SF(外割り20%)  | 25  | 10  | 39.0  | 130.0 | 26.0  | 1560           | —              | 1.95 |
| 6   |                |     | 20  | 78.0  | 260.0 | 52.0  |                |                | 3.90 |
| 7   |                | 35  | 10  | 54.6  | 130.0 | 26.0  |                |                | 0.39 |
| 8   |                |     | 20  | 109.2 | 260.0 | 52.0  |                |                | 0.78 |
| 9   | NC+SF(内割り20%)  | 25  | 10  | 39.0  | 124.8 | 31.2  | 1560           | —              | 2.34 |
| 10  |                |     | 20  | 78.0  | 249.6 | 62.4  |                |                | 4.68 |
| 11  |                | 35  | 10  | 54.6  | 124.8 | 31.2  |                |                | 0.39 |
| 12  |                |     | 20  | 109.2 | 249.6 | 62.4  |                |                | 0.78 |
| 13  | NC+BFS(内割り45%) | 25  | 10  | 39.0  | 85.8  | 702.0 | 1560           | —              | 1.17 |
| 14  |                |     | 20  | 78.0  | 171.6 | 140.4 |                |                | 2.34 |
| 15  |                | 35  | 10  | 54.6  | 85.8  | 70.2  |                |                | 0    |
| 16  |                |     | 20  | 109.2 | 171.6 | 140.4 |                |                | 0    |
| 17  | NC             | 25  | 10  | 39.0  | 156.0 | —     | 1560           | —              | 1.56 |
| 18  | NC+SF(内割り20%)  | 25  | 20  | 78.0  | 249.6 | 62.4  | 1092           | 468            | 4.68 |
| 19  |                |     |     |       |       |       | 624            | 936            |      |
| 20  |                |     |     |       |       |       |                | 1560           |      |
| 21  | NC+BFS(内割り45%) | 25  | 20  | 78.0  | 171.6 | 404.0 | 1092           | 468            | 2.34 |
| 22  |                |     |     |       |       |       | 624            | 936            |      |
| 23  |                |     |     |       |       |       |                | 1560           |      |

注) W: 水、C: 普通ポルトランドセメント、F: 混和材、G<sub>5</sub>: 5号砕石、G<sub>6</sub>: 6号砕石、SP: 混和剤  
G: G<sub>5</sub>+G<sub>6</sub>、B: C+F

## 2.3 実験結果および考察

### (1) 空隙率

図-2.1に空隙率の測定結果を示す。B/G=10%, 20%のいずれについても、おおむね目標値15~35%の範囲内にあり、今回選定したB/Gの値が適当なものであったといえる。また、空隙率はB/Gが小さいほど大きくなる傾向にあり、それぞれ平均的に見るとB/G=10%の時に空隙率35%程度、B/G=20%の時に空隙率25%程度であった。これは今回Gを統一しており、B/Gが大きくなれば、コンクリート中の結合材量（ペースト量）Bの量が増え、その結果空隙率は当然小さくなる。また、空隙率の測定値が理論値を上回る結果となった。空隙率の理論値とは、試験に使用した粗骨材の実積率試験結果とBおよびGから計算により求めたものである。この原因としては、粗骨材の実積率試験に用いる測定容器と、本試験で測定に用いたφ10×20cmの円柱供試体型枠寸法の違いが考えられる。すなわち円柱供試体型枠の内径(10cm)が、実積率測定容器の内径(24cm)より小さいため、粗骨材は供試体中に詰まりにくくなり、その結果、ポーラスコンクリートの実際の空隙率が相対的に大きくなっていると考えられる。

### (2) 強度特性

図-2.2に材齢28日の圧縮強度試験結果を示す。目標値19.6N/mm<sup>2</sup>を満足していたのは、W/B=25%・B/G=20%の配合で、混和材無添加および高炉スラグ微粉末を添加した場合の2つであった。しかし、全体の傾向として、混和材の添加によるポーラスコンクリートの圧縮強度の増加は認められず、ほぼ同等あるいは若干低下していた。これは、ポーラスコンクリートの場合はペースト量が通常のコンクリートに比べ少ないことにより、混和材の特性が現われにくいためと思われる。一方、セメント量の影響は明らかであり、W/Bの低下およびB/Gの増加とともに

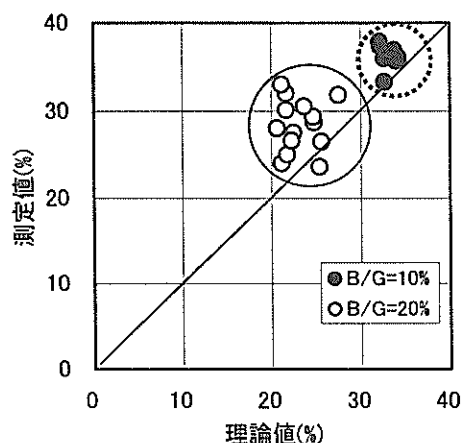


図-2.1 ポーラスコンクリートの空隙率

に強度は増加する傾向にある。

図-2.3に空隙率と圧縮強度および引張強度の関係を示す。空隙率と強度は逆比例の関係にあり、空隙率の増加に伴い強度は低下する。これは、空隙率の増加により、有効断面積が減少したためと考えられる。また、空隙率が35%以上になるとW/Bが圧縮強度に与える影響はほとんど認められない。

図-2.4はシリカフェーム20%内割り混合した場合の、骨材粒度と圧縮強度（材齢3日）の関係である。骨材粒度により空隙率が変化しており、5号砕石70%、6号砕石30%の使用により空隙率が最小、圧縮強度が最大となっている。

### (3) 透水性

図-2.5に空隙率と透水係数の関係を示す。空隙率は透水係数に対して正の相関を与えている。

### (4) アルカリ溶出量

ポーラスコンクリートは、内部表面積が大きいいため、アルカリ分の溶出が多く、特に初期材齢では植生した植物の生育に悪影響を与えることが危惧される。アルカリ

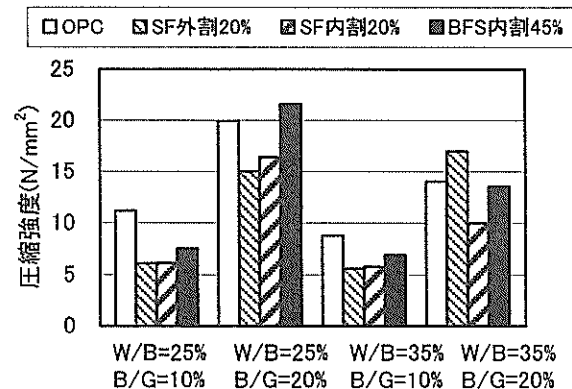


図-2.2 混和材と圧縮強度の関係

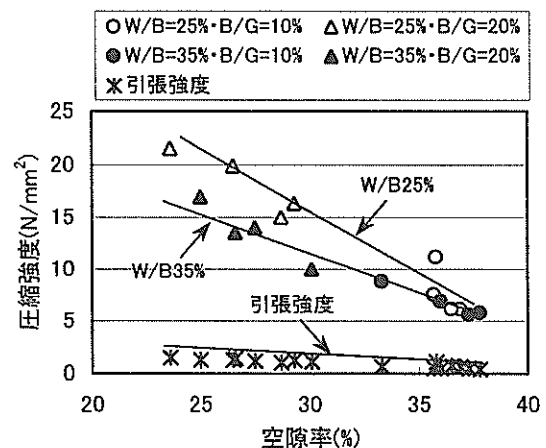


図-2.3 空隙率と強度特性

溶出量試験は様々な方法で実施されているが<sup>1)2)</sup>、本試験では供試体を24時間浸漬した水のpHを測定してアルカリ溶出量の評価を行った。図-2.6に示すように、浸漬水のpHは試験開始時(養生終了時)には高い値を示し、浸漬の繰返しとともに低下する。また、混和材として高炉スラグ微粉末を添加した場合、相対的にpHが低下していることが認められる。これはアルカリの元となる水酸化カルシウム $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を多く含む普通ポルトランドセメントを、アルカリの少ない高炉スラグ微粉末で置換したためであると考えられる。

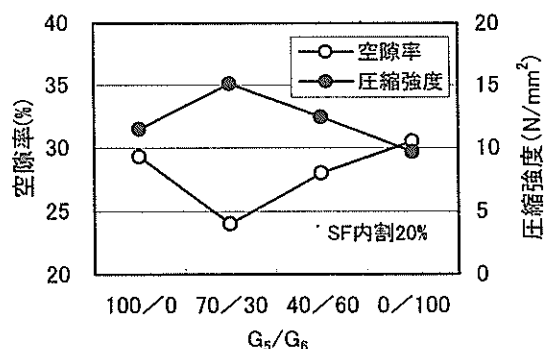


図-2.4 骨材粒度と圧縮強度

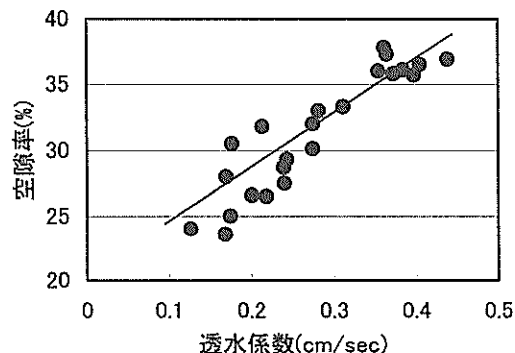


図-2.5 透水性と空隙率

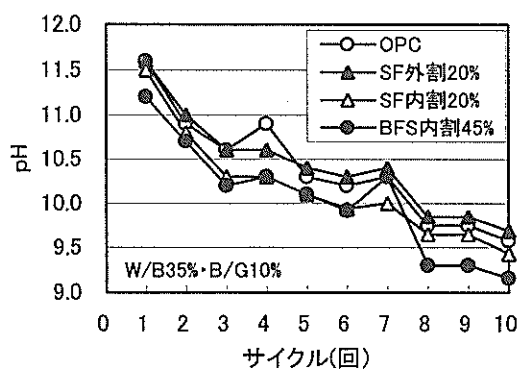


図-2.6 アルカリ溶出量

今回のように、含有アルカリ量の少ない材料を使用したり、材齢初期の養生・保管方法、植生時期等の検討を行うことで、植物の生育に適した低アルカリのポーラスコンクリートの作製は十分可能と思われる。

## 2.4 結果の評価

本章では、混和材を用いたポーラスコンクリートの空隙率、透水量、強度特性、アルカリ溶出量について検討を行った。この結果より以下のことが確認された。

- (1) ポーラスコンクリートの空隙率は $B/G=10\sim20\%$ 程度であれば、空隙率はおおむね目標値 $15\sim35\%$ の範囲内となる。また、空隙率は粗骨材の粒度により大きく左右される。
- (2) ポーラスコンクリートの圧縮強度は $W/B$ の低下および $B/G$ の増加とともに増加する。そして目標値 $19.6\text{N/mm}^2$ を満たしたものは、 $W/B=25\% \cdot B/G=20\%$ の配合で、混和材無添加および高炉スラグ微粉末を添加した場合の2つであった。
- (3) 透水係数と空隙率は正の相関を示している。
- (4) アルカリ溶出量に関し、混和材として高炉スラグ微粉末を添加した場合に、相対的にpHが低下した。

以上の結果を踏まえ、強度発現性・アルカリ溶出量などの結果から、3.の耐海水性検討用の供試体および5.および7.の植栽試験用供試体作製において、 $W/B$ を25%とし、混和材として高炉スラグ微粉末を用いることとした。

## 3. ポーラスコンクリートの耐海水性の検討

### 3.1 実験概要

ここでは、2.において選定した配合で供試体を作製し、ポーラスコンクリートの耐海水性の検討を行う。

#### (1) 使用材料

表-3.1に使用材料および略記号を示す。

#### (2) 配合

2.において、強度の発現が良好であった「 $W/B=25\% \cdot B/G=20\%$ (空隙率25%)」の配合を基に、表-3.2に示す配合でコンクリートを作製した。

#### (3) コンクリート作製

5.および7.の植栽試験用供試体も同時に作製したため、量が大量となり、レディーミクストコンクリートプラントにてコンクリートを練混ぜ、試験室で供試体を作製した。まずセメント、混和材、粗骨材を投入後、空練りを10秒間行い、次に水および混和剤を投入して3分間

表-3.1 使用材料

| 材    | 料                            | 比重   | 記号             |
|------|------------------------------|------|----------------|
| セメント | 普通ポルトランドセメント                 | 3.16 | NC             |
| 骨材   | 5号砕石:粒径10~20mm<br>(新潟県姫川流域産) | 2.66 | G <sub>5</sub> |
| 混和材  | 高炉スラグ微粉末                     | 2.91 | BFS            |
| 混和剤  | 高性能減水剤                       |      | SP             |
| 練混ぜ水 | 上水道水<br>(新潟県西頸城郡)            | 1.0  | W              |

表-3.2 コンクリート配合

| No. | 空隙率<br>(%) | W/B | B/G | W    | NC    | BFS   | G <sub>5</sub> | SP    |
|-----|------------|-----|-----|------|-------|-------|----------------|-------|
| 1   | 25         | 25  | 20  | 78.0 | 171.6 | 140.4 | 1560           | 0.858 |
| 2   | 35         |     | 10  | 39.0 | 85.8  | 70.2  |                | 0.429 |

練混ぜを行ってコンクリートを作製した。また打込みはテーブルバイブレータにより振動を与えながら行った。なお、この際過振動によるセメントペーストの脱落に注意して行った。

また養生は、打設翌日脱型した後、乾燥しないようにポリエチレン袋内で湿空養生することにより行った。養生期間は後述の中性化処理を行う供試体は材齢28日まで、中性化処理を行わない供試体は材齢56日までとした。

#### (4) 実験項目

ポーラスコンクリートは空隙が多く、大気との接触面積が広いので、通常のコンクリートよりも中性化しやすい。そこで、①強制的に中性化させた場合（炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)濃度5%の中に材齢28日から約1ヶ月間暴露）と、②無処理の場合の2種類の供試体を、いずれも材齢56日で海洋環境下に暴露した。また暴露場所は港湾技術研究所の暴露施設内の飛沫部、干満部および海岸から数m離れた屋外大気中の3箇所である。また、暴露を行ったのは表-3.2の供試体No.1（空隙率25%）のみであり、供試体No.2（空隙率35%）については暴露は行わなかった。

以下に実施した試験を挙げる。

#### a) 圧縮試験

φ10×20cmの供試体の上面をキャッピングし、JIS A 1108に準拠して行った。

#### b) 粉末X線回折試験

圧縮試験後の供試体から、骨材が混入しないようにセメントペースト分を採取し、アセトンを用いて水和を停止させた後、微粉碎したものを試料として用いた。試験はガイガーフレックス RAD-3C（理学電機(株)製）によ

り行った。また表-3.3に暴露によりセメント水和物に影響を及ぼす要因を挙げる。

#### c) 細孔径分布

圧縮試験後の供試体の一部を2.5~5mmに粗粉碎し、アセトンで水和を停止した後、水銀圧入式ポロシメータにより、硬化体組織の細孔径分布を測定した。

表-3.3 暴露による水和物への影響

|      | 化学式および名称                                                                                  | XRD強度<br>への影響 | 主要因             |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------|
| Ett. | 3CaO・Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ・3CaSO <sub>4</sub> ・<br>32H <sub>2</sub> O : エトリンガイト | 増加            | 海水により結<br>晶化が促進 |
| F    | 3CaO・Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ・CaCl <sub>2</sub> ・10H <sub>2</sub> O<br>: フリーデル氏塩   | 増加            | 海水との化合<br>物生成   |
| CH   | Ca(OH) <sub>2</sub><br>: 水酸化カルシウム                                                         | 減少            | 中性化促進お<br>よび溶出  |
| Ct   | CaCO <sub>3</sub> : 炭酸カルシウム                                                               | 増加            | 中性化促進           |

注) ピーク強度は、物質の量や結晶化の状況など複数の要因によって定められるものである。従って、目安にはできるが、ピーク強度=水和物量とはならない。

## 3.2 実験結果

### (1) 圧縮試験結果

図-3.1および図-3.2に材齢約4年まで暴露された供試体（空隙率25%）における圧縮試験結果を示す。以下に中性化および暴露条件の影響について述べる。

#### a) 中性化の影響（飛沫帯暴露）

中性化処理を施したものは、無処理のものに比べ強度低下が少なかった。これはセメントペースト表面が中性化により緻密となったためと考えられる。ポーラスコンクリートはその特性上中性化しやすいが、強度においては中性化による問題はないといえる。

#### b) 暴露条件の影響（中性化処理せず）

屋外暴露>干満帯>飛沫帯という、一般のコンクリートと同様の傾向となった。また図より、いずれの暴露条件においても、暴露開始後1年の間に劣化が進み、その後劣化状況は緩やかになる傾向が見られた。

### (2) 粉末X線回折試験結果

材齢1年まで暴露された供試体（空隙率25%）の粉末X線回折試験結果を図-3.3~3.8に示す。

#### a) 中性化の影響（飛沫帯暴露）

図-3.3および図-3.4において、暴露前に中性化処理を施すことにより、Ct（炭酸カルシウム）のXRD強度の増加が認められる。これは中性化処理によって、炭酸ガスとCH（水酸化カルシウム）が反応した結果、Ctが生成しているものと考えられる。その他に関しては水和生成物の種類に及ぼす中性化処理による顕著な傾向は認められな

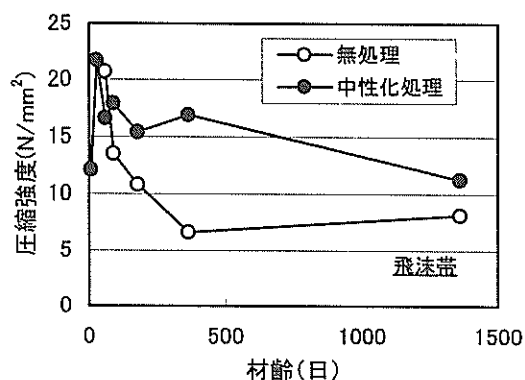


図-3.1 圧縮強度に及ぼす中性化の影響

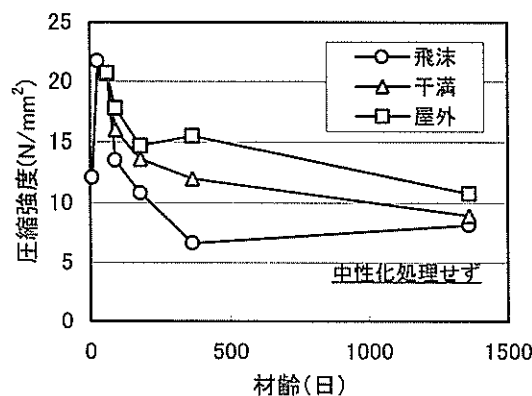


図-3.2 圧縮強度に及ぼす暴露条件の影響  
(中性化処理せず)

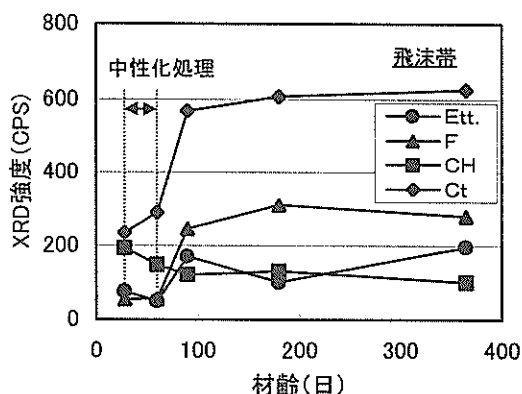


図-3.3 粉末X線回析試験結果  
(中性化処理したもの)

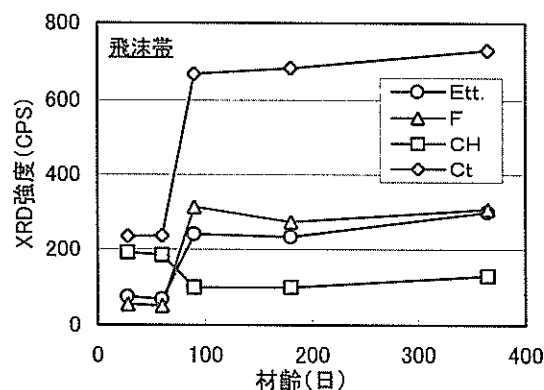


図-3.4 粉末X線回析試験結果  
(中性化処理せず)

かった。

#### b) 暴露条件の影響 (中性化処理せず)

図-3.5~3.8において、飛沫帯・干滴帯暴露供試体よりも屋外暴露供試体の方が、Ett (エトリンガイト)、F (フリーデル氏塩)のXRD強度がやや小さい。Ettは、セメント水和物が海水中の $\text{SO}_3$ との反応などにより生成され、FはClと反応して生成されることから、海水との接触時間が多い方がその生成量は多くなる。よって海水と接触することがほとんど無い屋外暴露供試体では、海水との接触時間の長い飛沫帯・干滴帯暴露供試体と比べてXRD強度が小さくなっていると考えられる。

Ctについては、屋外暴露>飛沫帯暴露>干滴帯という逆の傾向となった。これはCtの生成は炭酸ガスとCHが反応することにより生成するため、炭酸ガスとの接触時間が多い屋外暴露供試体のXRD強度が大きくなったものと考えられる。

#### (3) 細孔径分布

試験結果を図-3.9および図-3.10に示す。全空隙量に関し、径が $10\mu\text{m}$ 以上の領域には空隙の他にセメントペースト中に存在するひび割れが含まれることが多いた

め、粒径 $10\mu\text{m}$ 以上の空隙量は削除した。

#### a) 中性化の影響 (飛沫帯暴露)

図-3.9より、暴露前の中性化処理によりセメント硬化体中の空隙量が減少している。これは炭酸ガスとの接触で、CHが中性化し、Ctが生成されて組織が緻密化したためと思われる。またポーラスコンクリートはセメントペーストが非常に薄層であるため、炭酸ガスの影響が顕著に現れていると考えられる。また、暴露後は中性化処理を施した供試体と施さない供試体の空隙率が徐々に近づき、材齢365日ではほぼ同等となっている。

#### b) 暴露条件の影響 (中性化処理せず)

図-3.10において、暴露条件による大きな差は見られない。セメントペースト組織を緻密化させる要因としては、Ct, Ett, Fの生成が考えられ、Ctの生成しやすさについては炭酸ガスの接触時間に起因するため屋外暴露>飛沫帯暴露>干滴帯暴露となる。一方、EttおよびFについては海水との接触時間に起因することから、飛沫帯暴露・干滴帯暴露>屋外暴露となる。組織構造の変化は、これらの複合条件の影響により変化するため、暴露条件による傾向化は困難である。

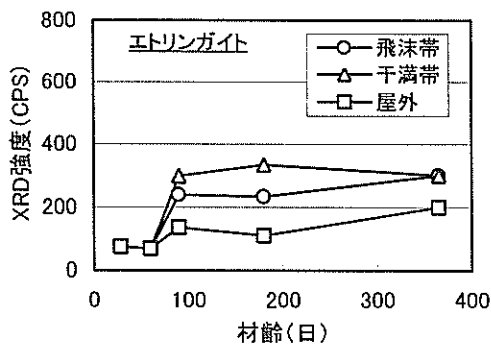


図-3.5 エトリンガイト生成に及ぼす暴露条件の影響

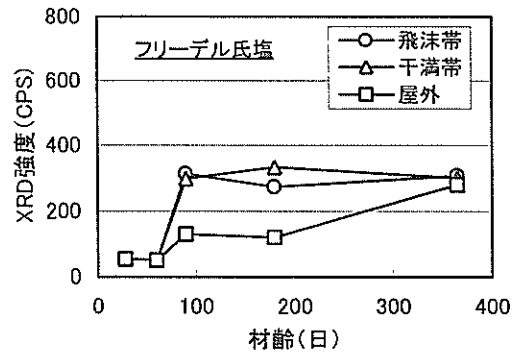


図-3.6 フリーデル氏塩生成に及ぼす暴露条件の影響

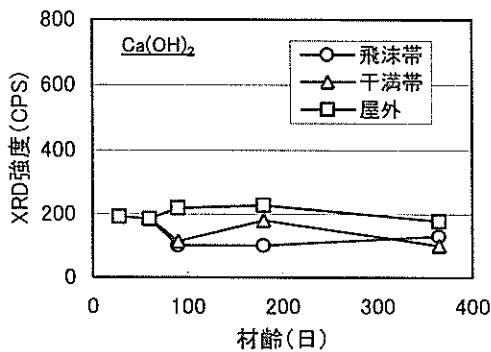


図-3.7 水酸化カルシウム生成に及ぼす暴露条件の影響

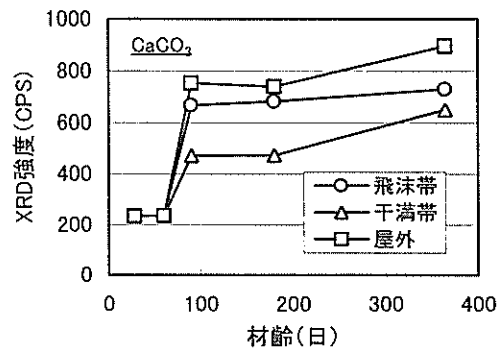


図-3.8 炭酸カルシウム生成に及ぼす暴露条件の影響

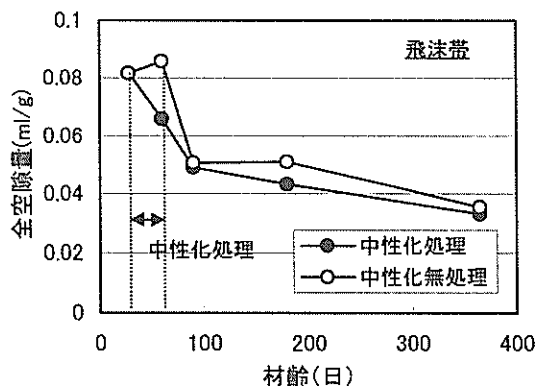


図-3.9 細孔径分布に及ぼす中性化の影響

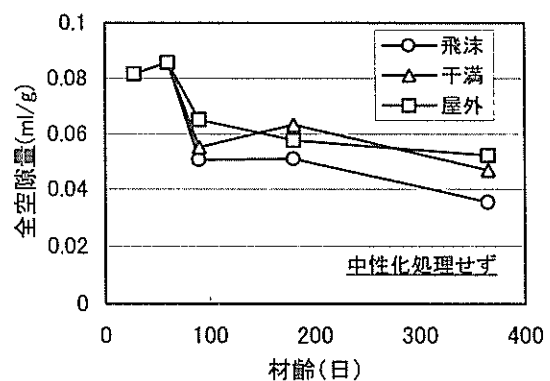


図-3.10 細孔径分布に及ぼす暴露条件の影響  
(中性化処理せず)

### 3.3 まとめ

圧縮強度試験結果より、中性化処理を施したものは、無処理のものに比べ強度低下が少なかった。これはセメントペースト表面が中性化により緻密となったためと考えられる。ポーラスコンクリートはその特性上中性化しやすいが、強度においては中性化による問題はないとい

える。また、中性化処理にかかわらず、圧縮強度の低下は初期でやや大きく低下し、次第に緩やかになる傾向となった。

粉末X線回折試験・細孔径分布測定結果からは特筆すべき結果は得られなかった。

## 4. 植物の選定

### 4.1 ポーラスコンクリートにおける植物の活着の考え方

現在広く適用されつつあるポーラスコンクリートは、その厚さが比較的薄く、植物はポーラスコンクリートを突き抜けて、さらに下層に存在する土層の水と養分を活用して生育しているものである。しかし、本研究はポーラスコンクリート自体を植生基盤として、実際の港湾・海岸環境へ適用を図ることを目的としている。

したがって、今回の試験におけるポーラスコンクリートにおける植物の活着の考え方としては、生長が非常に遅くとも、植物がポーラスコンクリート自体を植生基盤とし、生命を存続させているか否かということに主眼を置いている。つまり、植生基盤としてのポーラスコンクリートの適用性の判断材料としては、植物の生死が主要な問題であり、根毛量や根の伸長度合い、あるいは根端部直径などは、今回の植生基盤用ポーラスコンクリートの効能にとっては主要な問題ではなく、今後の充填材の改良点などを検討するための指標と考えている。

### 4.2 適用可能な植物の条件

塩分雰囲気下であり、かつ乾燥の厳しい海洋環境下において適用可能な植物の選定に当たっては、次のような事項を着眼点とする。

- ①耐塩性が優れているもの
  - ②厳しい乾燥に耐えうるもの
  - ③越年して生育可能で、他種の入り込みに対する抵抗性を有するもの（例：多年草）
- また、実際の港湾構造物に緑化の機能を持たせようとする場合においては、以下の項目にも着目する必要がある。
- ④修景上から、常緑性であること
  - ⑤点在性であっても、ワンポイントとして存在感のあるもの
  - ⑥花がきれいなもの

### 4.3 植物の選定

本ポーラスコンクリートにおいては、今回の実験地が横須賀市久里浜湾に面する港湾技術研究所内であることから、まず地域性を重視して関東地方の海岸付近で適用可能な植物を選定することとした。そして、4.2の条件を考慮し、草本類と木本類から以下のそれぞれ2種類ずつを選定した。

#### a) 草本類

越年して生育可能ということと、他種の入り込みに対

する抵抗性を考慮して、多年草を選定することとし、標準的な多年草の「チガヤ（イネ科：学名 *Imperata cylindrica* var. *koenigii*）」、地下茎植物として「ハマヒルガオ（ヒルガオ科：学名 *Calystegia soldanella*）」を選定した。

#### b) 木本類

常緑樹の「ハマヒサカキ（ツバキ科：学名 *Eurya emarginata*）」、落葉樹の「マルバアキグミ（グミ科：学名 *Elaeagnus umbellata* var. *rotundifolia*）」を選定した。

## 5. 第一次植栽実験

### 5.1 植栽実験用供試体

#### (1) 供試体の大きさ

供試体は、木本および草本用ごとに、以下の2種類とした。

- ・木本用：幅120cm×長さ120cm×高さ50cm
- ・草本用：幅120cm×長さ120cm×高さ30cm

#### (2) ポーラスコンクリートの空隙率

ポーラスコンクリートの空隙率の影響を調べるため、空隙率は25%（ $W/B=25\%$ ・ $B/G=20\%$ ）および35%（ $W/B=25\%$ ・ $B/G=10\%$ ）の2通りとした。

#### (3) 植栽用ポット

植栽用のポットは各供試体とも4個ずつ設け、その諸元の影響を調べるため、以下の3種類の大きさとした。図-5.1にポット概略図を示す。

- ・標準型：φ20cm×深さ10cm
- ・深型：φ20cm×深さ25cm
- ・広型：φ30cm×深さ10cm

#### (4) 供試体作製方法

##### a) 使用材料および配合

使用材料および略記号は表-3.1と同様である。配合についても表-3.2と同様である。

##### b) 型枠

供試体用型枠作製に関しては、以下の条件に留意して行った。

- ①コンクリート硬化後も供試体の側・下面を覆う
- ②供試体側面への日射によるコンクリート内部の過度な温度上昇を防止する
- ③雨・雪などの降水がコンクリート内部に溜まらない
- ④コンクリート内部の温・湿度を永続的に測定可能

図-5.2に型枠図を示す。内面に厚さ10mmの発泡スチロール板を貼付した表面化粧板により側面を覆うとともに、底面にはエクスパンドメタルを用いた。また、水はけを考慮し木製パレットに載せた状態で、供試体の作

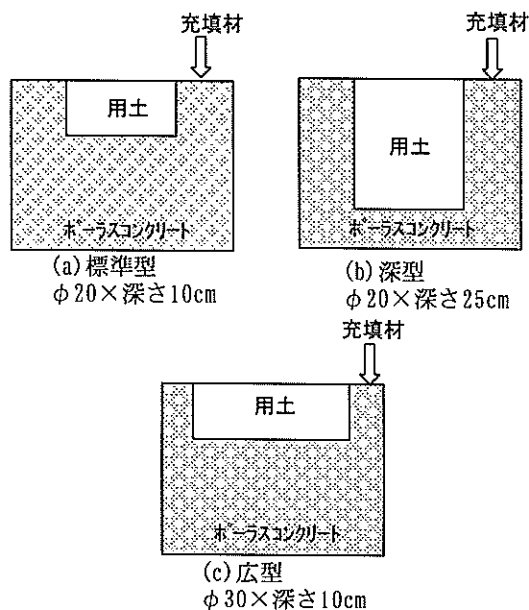


図-5.1 ポット概略図

製から設置までを行った。

また植栽用の穴（ポット）は、同寸法のボイド管（紙製）を埋め込んだ状態でコンクリートを打設することにより作製した。中央の温湿度測定孔も同様にボイド管を埋め込んで作製し、ボイド管の回りにメタルラスを巻き付けることで、根が伸張して測定の障害となることを防止した。

#### c) コンクリート作製

量が大量であるため、コンクリート練混ぜはレディーミクストコンクリートプラントで行った。まずセメント、混和材、粗骨材を投入後、空練りを10秒間行い、次に水および混和剤を投入して3分間練混ぜを行ってコンクリートを作製した。

#### d) コンクリート打設

アジテータ車を用いて搬送（搬送時間約5分）されたコンクリートをコンクリートホッパーに排出し、ホッパーをクレーンで吊り上げて1供試体ずつ打設した。打設は、ホッパーより排出されたコンクリートの敷き均しと電動棒状バイブレーターおよび電動タンパーによる振動締固めを交互に行った。ポット部分には事前に型枠にスケールを設けておき、設定高さまでコンクリートを打設した後、所定のサイズのボイド管を設置し、周辺部にコンクリートを充填した。打設供試体総数は16個である。

#### e) コンクリート養生

コンクリートの凍結や乾燥による劣化を防ぐために、打設終了時から供試体上面をシートで覆い、翌日からはコンクリートに1回/日散水して屋内養生を行った。材

齢28日まで養生を行った後、屋外に設置した。

#### (5) 供試体の設置方法

各供試体ともパレット上に設置し、排水性確保のため、底部は開放状態とした。

#### (6) 完成後の供試体

完成後の供試体外観を写真-5.1に示す。

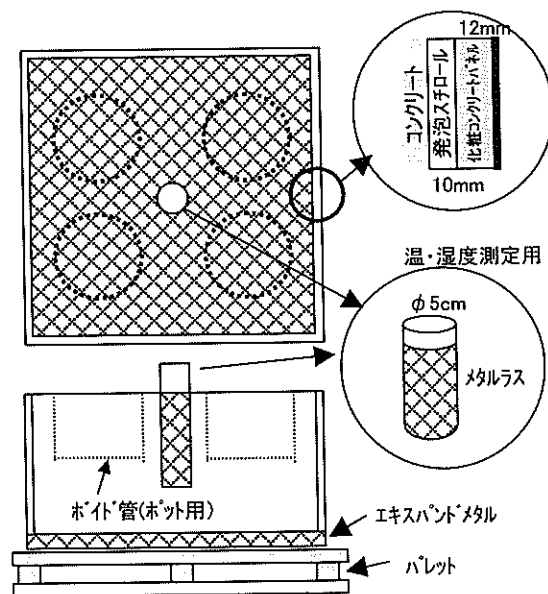


図-5.2 型枠

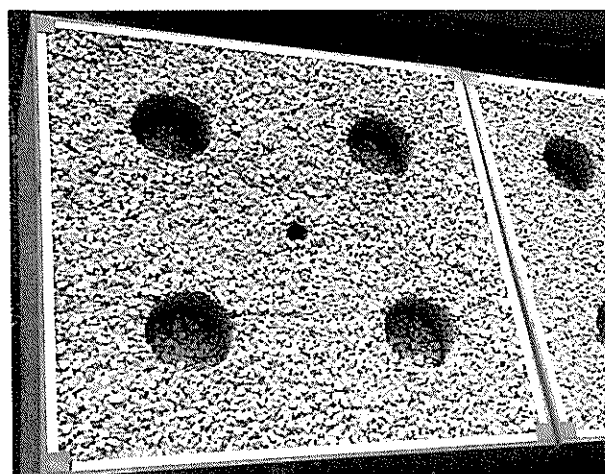


写真-5.1 ポーラスコンクリート供試体外観

#### 5.2 植栽条件

##### (1) 植物および植栽方法の条件

##### a) 植栽場所

横須賀市久里浜湾に面した運輸省港湾技術研究所内において行った。設置場所は海岸線から3m程度陸側に位置している。

#### b) 植物の種類

4. で選定した以下の4種類の植物を使用した。

- ・木本類：ハマヒサカキ（常緑樹）  
マルバアキグミ（落葉樹）
- ・草本類：チガヤ（標準的な多年草）  
ハマヒルガオ（蔓性の地下茎植物）

#### c) 植栽時期

植物の活動が活発となる3月とし、平成8年3月27～28日に植栽を行った。

#### d) 植栽方法

試験に使用する用土の効果を検討するため、植物の根に付着していた土は、水で洗い流してから植栽した。

#### (2) 用土

##### a) 用土の種類

用土の影響を調べるため、用土は「川砂（天然砂礫性）のみ」および「川砂とピートモス（カナダ産、天然植物用土）の混合（容積比1：1）」の2種類とした。

##### b) 用土の使用条件

各供試体に設けた4個の植栽用ポットに対して、上記2種類の用土を用いたものが2個ずつとなるようにした（図-5.3参照）。

#### (3) 充填材

ポーラスコンクリートの空隙からの乾燥の影響が懸念されることから、ポーラスコンクリート空隙に保水性を持たせるため、一部のケースにおいて、空隙に6号珪砂を水で流し込んで充填した。

#### (4) 肥料

各植物とも、元肥として緩効性肥料マグアンプKを用

土内に10リットル当たり20～30gを植栽時に混合した。

#### (5) 比較の対象

比較の対象として、供試体付近において、上記4種類の植物を露地植えた。

#### (6) 試験ケース

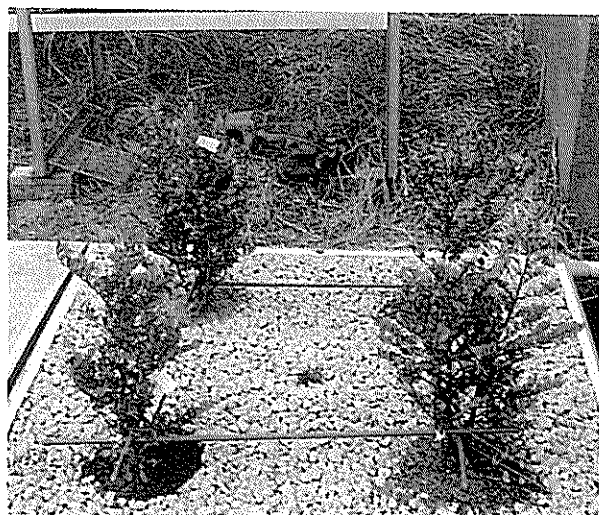
以上のものをまとめた試験ケースを表-5.1に示す。

#### (7) 植栽後の写真

植栽後の写真を写真-5.2に示す。

表-5.1 第一次植栽実験ケース

| No. | 供試体<br>サイズ | 空隙率<br>(%) | ポット<br>サイズ | 充填材<br>の有無 | 植物の種類   |
|-----|------------|------------|------------|------------|---------|
| 1   | 木本用        | 25         | 標準型        | 無          | ハマヒサカキ  |
| 2   |            |            | 深型         | 有          |         |
| 3   |            |            | 広型         | 無          |         |
| 4   |            |            | 標準型        | 有          |         |
| 5   |            | 35         | 標準型        | 無          | マルバアキグミ |
| 6   |            |            | 深型         | 有          |         |
| 7   |            |            | 広型         | 無          |         |
| 8   | 草本用        | 25         | 標準型        | 無          | チガヤ     |
| 9   |            |            | 深型         | 有          |         |
| 10  |            |            | 広型         | 無          |         |
| 11  |            |            | 標準型        | 有          |         |
| 12  |            | 25         | 標準型        | 無          | ハマヒルガオ  |
| 13  |            |            | 深型         | 有          |         |
| 14  |            |            | 広型         | 無          |         |
| 15  | 露地植え       | -          | -          | -          | ハマヒサカキ  |
| 16  |            |            |            |            | マルバアキグミ |
| 17  |            |            |            |            | チガヤ     |
| 18  |            |            |            |            | ハマヒルガオ  |
| 19  |            |            |            |            | ハマヒルガオ  |



(1) 供試体No.1 (標準・充填×)



(2) 供試体No.2 (標準・充填○) ハマヒサカキ

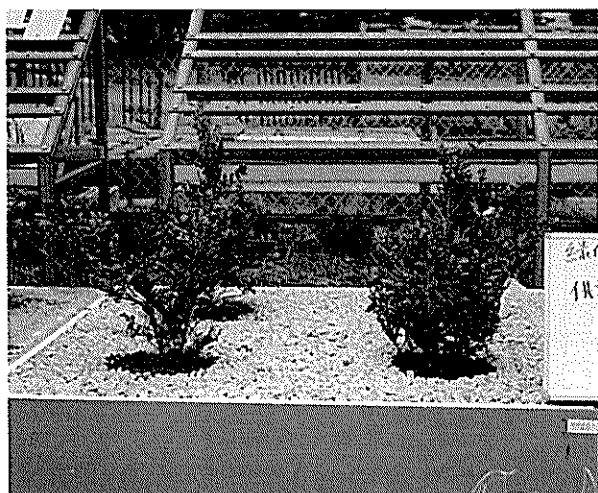
写真-5.2 第一次植栽実験開始時



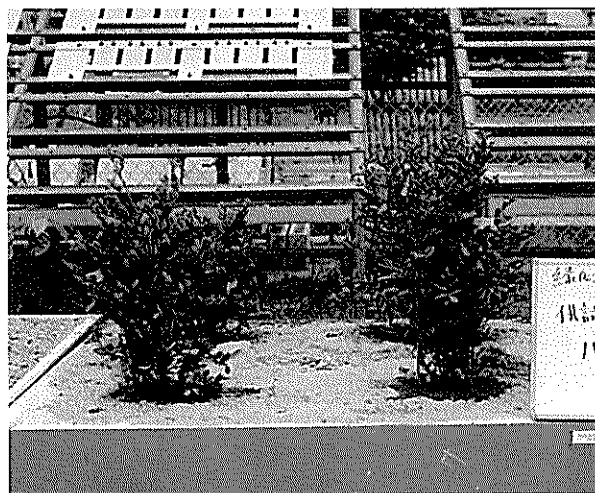
(3) 供試体No. 3 (深・充填×) ハマヒサカキ



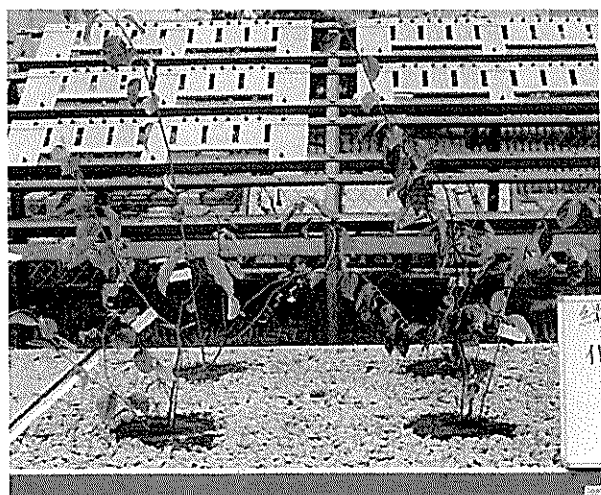
(4) 供試体No. 4 (広・充填×) ハマヒサカキ



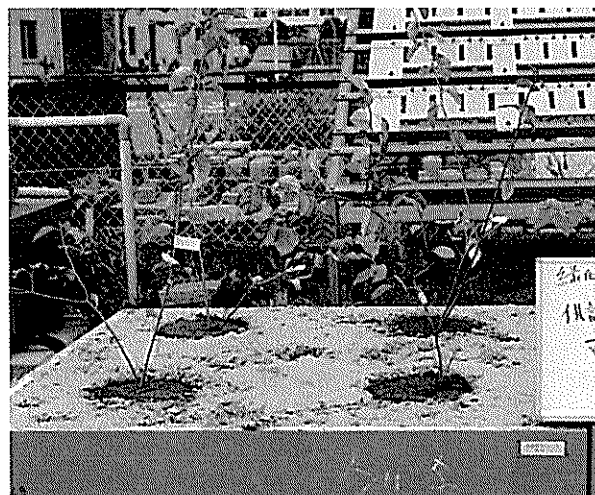
(5) 供試体No. 5 (標準・充填×・35%) ハマヒサカキ



(6) 供試体No. 6 (標準・充填○・35%) ハマヒサカキ

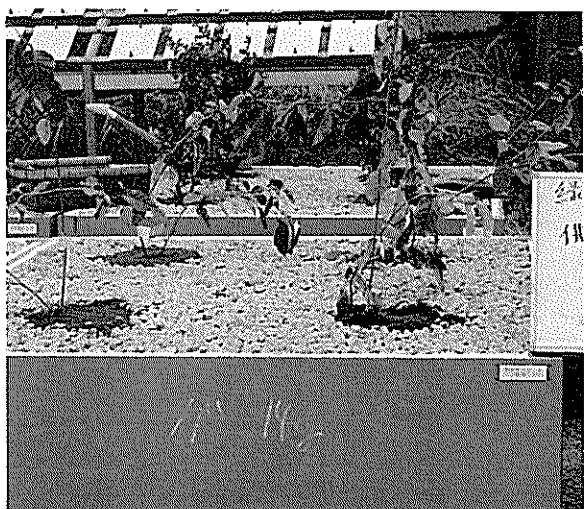


(7) 供試体No. 7 (標準・充填×) マルバアキグミ

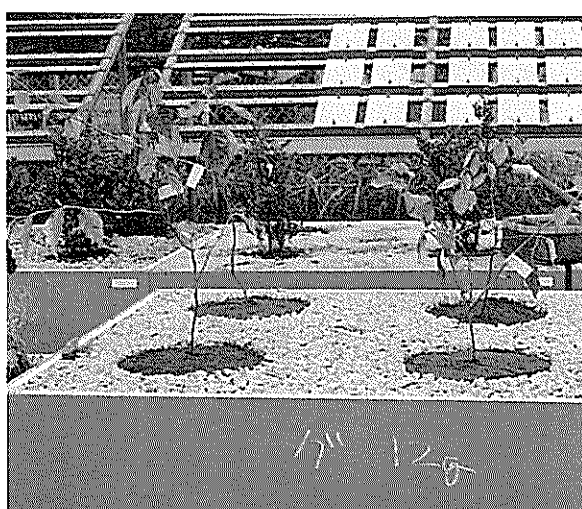


(8) 供試体No. 8 (標準・充填○) マルバアキグミ

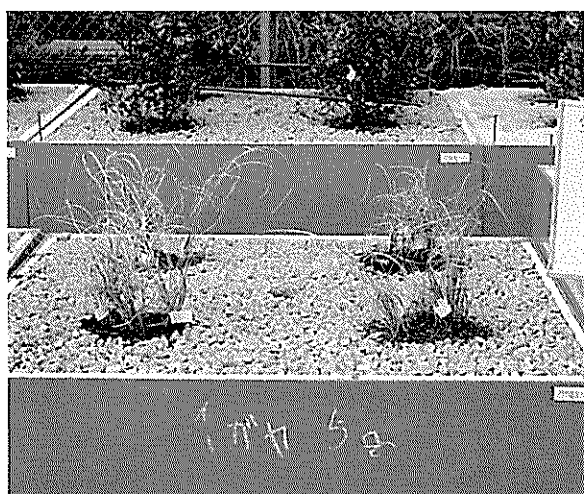
写真-5.2 第一次植栽実験開始時



(9) 供試体No. 9 (深・充填×) マルバアキグミ



(10) 供試体No. 10 (広・充填×) マルバアキグミ



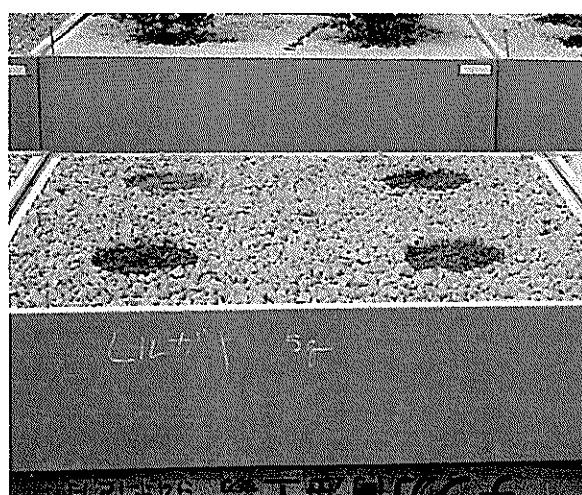
(11) 供試体No. 11 (標準・充填×) チガヤ



(12) 供試体No. 12 (広・充填×) チガヤ

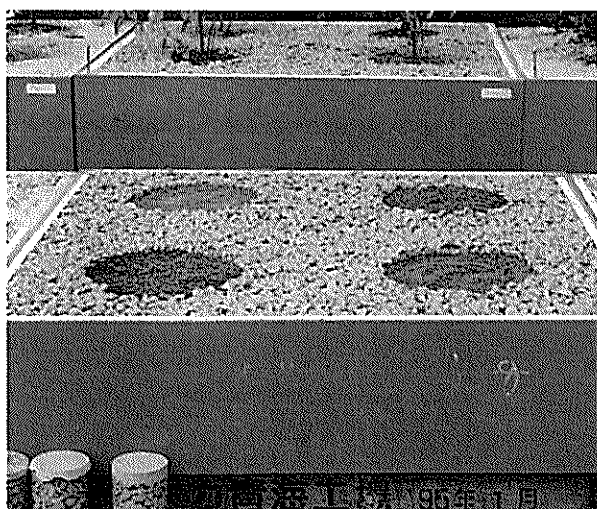


(13) 供試体No. 13 (標準・充填○) チガヤ

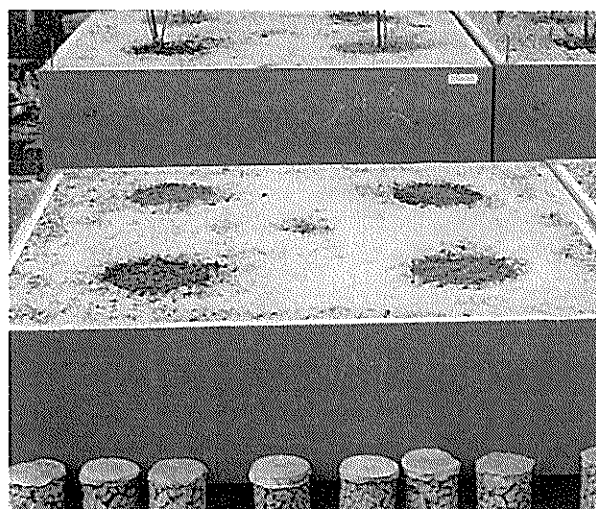


(14) 供試体No. 14 (標準・充填×) ハマヒロガオ

写真-5.2 第一次植栽実験開始時



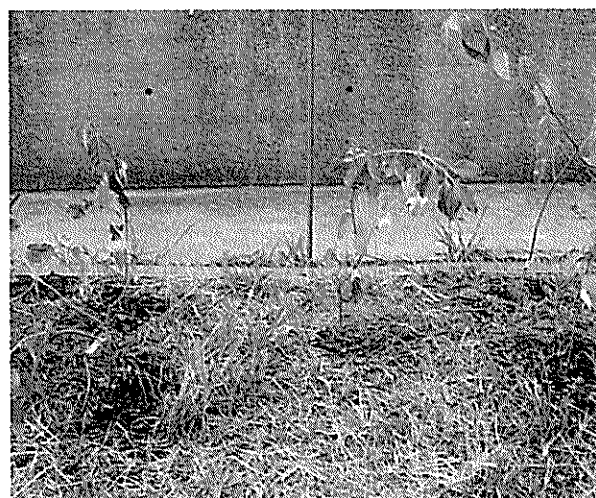
(15) 供試体No. 15 (広・充填×) ハマヒルガオ



(16) 供試体No. 16 (標準・充填○) ハマヒルガオ



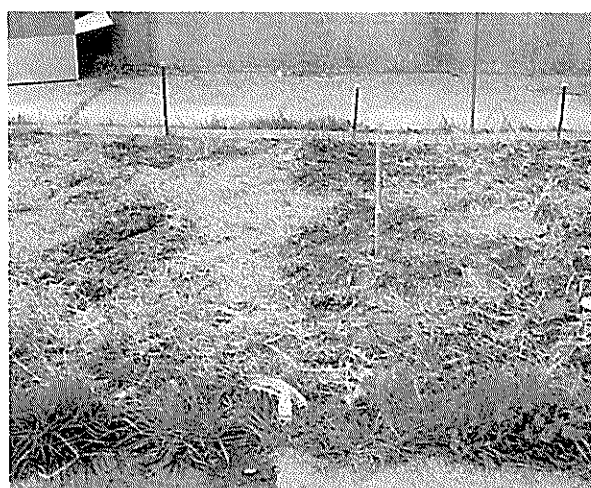
(17) 供試体No. 17 (露地植え) ハマヒサカキ



(18) 供試体No. 18 (露地植え) マルバアキグミ



(19) 供試体No. 19 (露地植え) チガヤ



(20) 供試体No. 20 (露地植え) ハマヒルガオ

写真-5.2 第一次植栽実験開始時

### 5.3 植物の管理方法

根が活着するまで、以下の管理を行うこととした。

#### (1) 灌水

植栽後初期（約1～2ヶ月間）は1週間に2度程度、ブロックの下から水が出るまで灌水した。また乾燥を防止するため、夏場の高温時にも灌水を行った。

#### (2) 肥料

追肥として、液肥・置肥の2種類を施した。

- ・液肥：ハイポネックス500倍希釈液を月2回の割合で、灌水時に実施
- ・置肥：エードボールを用土10リットル当たり1回20粒を3カ月に1回実施

#### (3) 除草

雑草も植生の一部であると考え、除草は基本的に行わなかった。

### 5.4 植物の生長状況および考察

写真—5.3は植栽後約半年が経過した平成8年10月3～4日の時のものである。またその際、一部の植物を取り出し、根の状況の観察も行った。図—5.3は植物の生育状態をまとめたものである。多くの植物において、その生長が思わしくなかったり、枯死したりするものが見られた。これらは夏場の高温と乾燥等が原因と推測される。

#### (1) 植物ごとの生長状況

##### a) ハマヒサカキ

葉が枯れ落ち、枝だけが残っているものが目立つ。図—5.3で生育していると判定しているものについても、葉の数はかなり少なく、繁殖しているとは言えない。また、根について、外観上枯れ死したと判断したものについては、根の発達がほとんど見られなかった。

露地植えについては順調に生育していた。

##### b) マルバアキグミ

葉が枯れ落ち、枝だけが残っているものが目立つ。図—5.3で生育していると判定しているものについても、葉の数はかなり少なく、繁殖しているとは言えない。また、外観上枯れ死したと見られたものについては、根の発達がほとんど見られなかった。

また中に夏場ほぼ枯死状態と見られ、秋になって新葉の出たものがあったが、その根はポットの底面に侵入していた。

露地植えについては順調に生育していた。

##### c) チガヤ

緑色ではなく茶色の葉の方が多いが、ポットいっぱい

のほど、ポーラスコンクリート中に伸張していることが確認された。

露地植えについては順調に生育していた。

##### d) ハマヒルガオ

一部全く発芽しないものもあったが、おおむね生育している。根については、発芽のなかったものは、地下茎が既に腐食していた。また生育状況の良いものは、ポーラスコンクリート中に地下茎が伸張していた。

露地植えについては、全く生育しないものが多く見られた。

#### (3) 植栽条件の影響

##### a) ポットサイズの影響

顕著な傾向ではないが、木本類については「標準型」「広型」に比べ、「深型」のものはハマヒサカキ・マルバアキグミ両者において枯死が少なかった。これは、木本類が鉛直方向に根が伸張するスペースを必要としているためと考えられる。

草本類についてはチガヤは全て同じような状況で生存していたため判断がつかないが、ハマヒルガオにおいては「標準型」よりも「広型」の方がやや生育状況が良好であった。これは草本類が鉛直方向ではなく、水平方向に根が伸張するスペースを必要としているためであると考えられる。

##### b) 用土の影響

用土（川砂のみ、川砂とピートモス1：1混合）による植物の生育の差異は認められなかった。また、いずれの用土も著しく乾燥していた。

##### c) 充填材の影響

ポーラスコンクリート供試体に、充填材を充填したものと無充填のものとの生育の差異は認められなかった。また、今回充填材として、珪砂6号を用いたが、充填が不十分であったため充填材の影響が現れなかったと考える。

#### (4) まとめ

上記のように、第一次植栽試験においては、一部の植物が枯死し、多くの植物も比較の対象とした露地植えの植物と比較して生長が著しく劣っていた。これは、特に夏場の乾燥・高温のためと推定され、植物にとってポーラスコンクリート内はかなり厳しい環境であることが明らかとなった。一部の植物を掘り起こして観察したところ、根の生長も少なく、ポーラスコンクリートの空隙への根が進入したものは一部の植物だけであった。

また、ポット内の用土は内部まで乾燥状態にあり、かつ用土がポーラスコンクリート内の空隙へ流出しているものも見られた。



(1) 供試体No. 1 (標準・充填×) ハマヒサカキ



(2) 供試体No. 2 (標準・充填○) ハマヒサカキ



(3) 供試体No. 3 (深・充填×) ハマヒサカキ



(4) 供試体No. 4 (広・充填×) ハマヒサカキ



(5) 供試体No. 5 (標準・充填×30%) ハマヒサカキ



(6) 供試体No. 6 (標準・充填○・30%) ハマヒサカキ

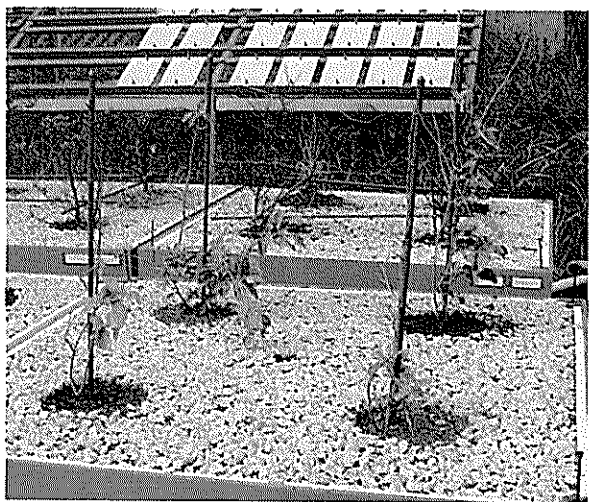
写真-5.3 第一次植栽実験半年経過時



(7) 供試体No. 7 (標準・充填×) マルバアキグミ



(8) 供試体No. 8 (標準・充填○) マルバアキグミ



(9) 供試体No. 9 (深・充填×) マルバアキグミ



(10) 供試体No. 10 (広・充填×) マルバアキグミ



(11) 供試体No. 11 (標準・充填×) チガヤ

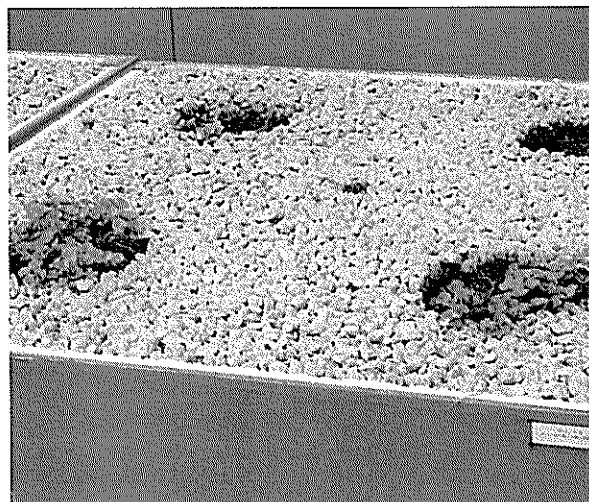


(12) 供試体No. 12 (広・充填×) チガヤ

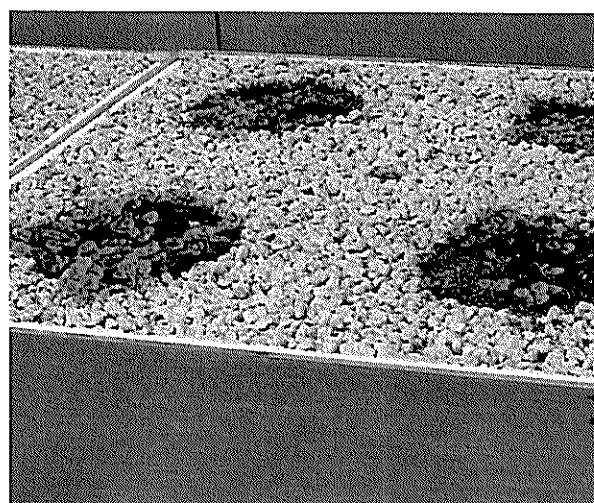
写真-5.3 第一次植栽実験半年経過時



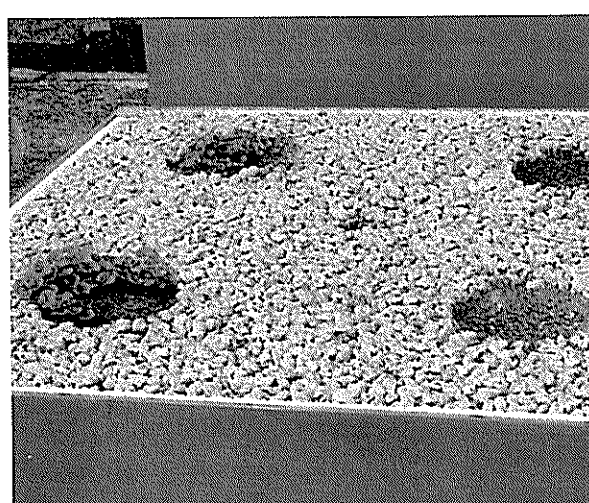
(13) 供試体No. 13 (標準・充填○) チガヤ



(14) 供試体No. 14 (標準・充填×) ハマヒルガオ



(15) 供試体No. 15 (広・充填×) ハマヒルガオ



(16) 供試体No. 16 (標準・充填○) ハマヒルガオ

写真－5.3 第一次植栽実験半年経過時

## 海側(南側)

植物 マルバアキグミ(木) 子ガヤ(草) ハマヒルガオ(草)

(生存率:100%) (生存率:75.0%)

供試体No. 9 10 11 12 13 14 15 16

|   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| ○ | × | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

ポット 深型 広型 標準型 広型 標準型 標準型 広型 標準型

充填材 — — — — ○(有) — — ○(有)

空隙率 25% 25% 25% 25% 25% 25% 25% 25%

用土 色無し:川砂のみ 珪砂+ピートモス

---

植物 ハマヒサカキ(木) マルバアキグミ(木)

(生存率:45.8%) (生存率:43.8%)

供試体No. 1 2 3 4 5 6 7 8

|   |   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ○ | × | ○ | △ | × | × | × | × |
| × | × | × | × | × | × | × | × |
| ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

ポット 標準型 標準型 深型 広型 標準型 標準型 標準型 標準型

充填材 — ○(有) — — — ○(有) — ○(有)

空隙率 25% 25% 25% 25% 35% 35% 25% 25%

用土 色無し:川砂のみ 珪砂+ピートモス

記号 ○:生育中 △:半枯れ ×:枯死 ●:発芽せず

## 陸側(北側)

図-5.3 植物の生育状況（植栽半年経過）

### 5.5 第一次植栽実験における問題点

### (1) 問題点

前節の結果を踏まえ、第一次植栽試験において設定した条件の問題点を整理すると、以下のようになる。なお、露地植えにおいては、一部発芽しなかったハマヒルガオを除きいずれの植物とも生長したことから、植物の選定および植栽時期の条件には問題なかったものと考えられる。

### a) 材料の問題

・ポットの用土は一般の培養土ではなく、川砂単味・川砂とピートモスを混合したものをしていたが、ともに乾燥状態にあった。このことより、これらの材料は、港湾・海岸環境下において、植物に必要な保水性を確保することが困難な材料であったものと考えられる。

・ポーラスコンクリートの空隙の充填に使用した6号珪砂は充填性が悪く、ポーラスコンクリートの空隙に保水性を持たせることができなかったため、根の生長が阻害され、またポットの用土の乾燥にも影響したと考えられる。

### b) 構造の問題

・ 供試体の底部を開放状態としたため、下部から乾燥を受けた。実用化においては、下部が開放されていること

はないと考えられるので、底部を開放状態にしたことは、過度に厳しい条件であったと考えられる。

・ポット内の用土がポーラスコンクリートの空隙へ流出している状況が観察された。これは、ポット内において、用土を直接ポーラスコンクリート上に敷設したためと考えられる。

### c) 植栽方法の問題

・一般に、植栽においては植物の生育環境が徐々に変化するようにすることが望ましい。今回、ポットの用土の効果調べるため根に付着していた土を水で洗い流してから植栽したが、このことが植物の生育環境に激しい変化を与えた可能性がある。

## (2) 改良すべき点

以上のことより、改良すべき点をまとめると、以下の4点となる。

- ①ポーラスコンクリートの空隙内の保水性確保
- ②ポットの用土の乾燥抑制
- ③ポットの用土のポーラスコンクリートの空隙への流出防止
- ④植物の生育環境の変化抑制

これらの改良点への具体的な方策を整理すると、以下  
のようになる。これらのうち、材料の改良、特にポーラ

スコンクリート中の空隙を充填する充填材の検討が最重要であるとする。

#### a) 材料の改良

- ・ポーラスコンクリートの空隙の充填には、保水性かつ充填性の高い材料を使用する。
- ・ポットの用土に、保水性に優れた材料を使用する。

#### b) 構造の改良

- ・現地における設置状態を考慮し、底部を塞いだ構造とする。
- ・ポットの底部において、用土とポーラスコンクリートの間に保水性および排水性に優れた材料を敷設する。
- ・表面からの乾燥および風による用土の飛散防止のため、表面を覆土する。

#### c) 植栽方法の改良

- ・植物の生育環境を激変させないように、根に付着した土は落とさずに植栽する。

## 6. 充填材の検討

### 6.1 充填材に必要とされる材料特性

#### (1) 充填材に必要とされる材料特性

5.5で整理したように、植栽コンクリートの港湾・海岸環境下への適用においては、ポーラスコンクリートの空隙内の保水性確保と用土の乾燥防止が最大の課題である。そのためには、良質なポットの用土の選定に加え、ポーラスコンクリートの空隙の充填材として保水性および充填性に優れた材料を選定する必要がある。これらのうち、充填材については以下のような多くの材料特性が必要とされるため、試験により検討を行うこととした。

##### ① 保水性・吸水性

根の生育環境を整えるためには、保水性を確保することが最も必要とされる材料特性である。また、灌水による吸水性も考慮するべきである。

##### ② ひび割れ抵抗性

一般に、土質材料は乾燥により収縮し、著しい場合はひびわれが発生する。ひびわれの発生は根の切断につながる可能性があり、また、乾燥を助長することもある。したがって、ひびわれの生じ難い材料を選定する必要がある。

##### ③ 充填性

ポーラスコンクリートの空隙が充填材で十分に充填されていなければ、充填材の効果が発揮されない。したがって、空隙を十分に充填できる流動性を有することが必要である。

##### ④ 材料分離抵抗性

充填時に材料分離が生じると、部分的に保水性が期待できない可能性が生じる。したがって、材料分離し難いことが求められる。

#### (2) 保水性の確保

一般に、土の中の水には以下の4種類の力（水を保持する力）が作用する。

- ・毛管力：土と水の間に働く力と水の表面張力によるもので、通路径の小さいほど大きくなる。
- ・静電力：水が極性を持っていることによる粘土や有機物の持つ荷電により引きつけられる力。
- ・分子間力：土の粒子と水の粒子の間に働く力で、ほぼ距離の2乗に反比例する。
- ・浸透圧：水がイオンを含んでいることにより生じる力（一般には無視できる）。

また、水粒子が土粒子に引きつけられる強さは、通常  $pF$  というもので表される。これは、土から水を吸引するのに必要な力を水柱の高さ (cm) で表し、それを常用対数値にしたものである。図-6.1は  $pF$  の一例である<sup>6)</sup>。 $pF$  は含水比の影響を受け、比較的水分の多い領域では、 $pF$  は上記の毛管力による毛管ポテンシャルで表される。すなわち、粒子が細かく毛管力の大きい材料は、 $pF$  が大きくなる。図において粘土（関東ローム）の場合に、 $pF$  が大きくなっており、水を引きつける力すなわち保水性が高くなっていることが分かる。一方、植物が利用できる水はおおよそ  $pF 4.2$  以下と言われている<sup>7)</sup>。すなわち、粘土においては含水比が小さくなると、水は粘土のほうに強く引きつけられ、植物は水を取り込みにくくなることがわかる。

砂（砂丘砂）の場合には、 $pF$  が小さく、植物からは水を取りこみやすいが、保水性がかなり劣るということが分かる。

したがって、港湾・海岸環境のようなかなり厳しい乾燥条件の場合には、砂のような粒状材料よりも粘土のように毛管力の大きく、保水性のある材料を用いることが望ましいと考えられる。

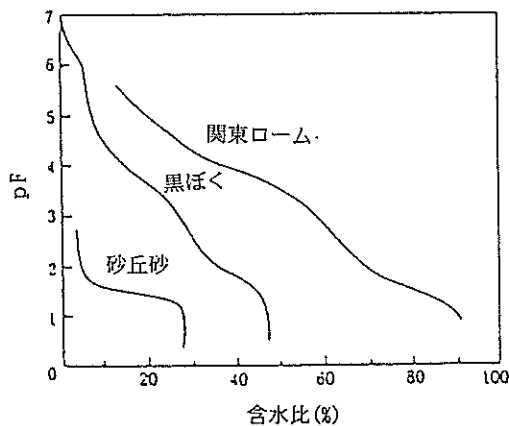
#### (3) ひびわれ抵抗性の確保

一般に、粘性土の場合、水分の減少により収縮が生じる。また、脱水がゆっくりである場合に収縮に伴うひび割れは発生しにくい、急速な脱水はひびわれの原因になると言われている。表-6.1は、粘土の膨潤の例であるが<sup>8)</sup>、比表面積の大きい粘土は体積変化が大きく、ひびわれの懸念があるものと考えられる。すなわち、港湾・海岸環境においては乾燥による急速な脱水が考えられるため、ひびわれの観点からは比表面積が小さく体積変化の少ない材料が望ましいものと考えられる。また、水

分が多いほど脱水によるひびわれが生じ易くなる。

(4) 充填性および材料分離抵抗性の確保

ポーラスコンクリートは狭い連続空隙から成るものであり、空隙を充填するためには高い流動性が要求される。そのためには、充填材の水量割合を高くすれば良いが、水量が過多になると、材料分離が生じ易くなる。したがって、充填できる範囲で水量は少なくする必要がある。また、粘土のように比表面積の小さい材料を用いることにより粘性が向上して材料分離を抑制できるが、粘性が高過ぎると充填が不十分になる可能性もある。



図－6.1 水分特性曲線の例

表－6.1 粘土の膨潤性の例

| 粘土鉱物     | 概略の層厚 (Å) | 最大比表面積 (m <sup>2</sup> /g) | 体積変化 |
|----------|-----------|----------------------------|------|
| モンモリロナイト | 20        | 800                        | 大きい  |
| イライト     | 200       | 80                         | 普通   |
| カオリナイト   | 1000      | 15                         | 小さい  |

6.2 試験の流れ

以上のような材料特性を踏まえ、試験に使用する材料は、粘土をベースとし、珪砂等の粒状材料の使用も考慮することとした。充填材の検討における試験は、以下の流れにより実施した（図－6.2参照）。

(1) 1次試験

第一に要求される特性である保水性に注目し、小型ポーラスコンクリート供試体を用いて各種充填材を充填して保水性を調べ、材料の組合せの方向性を明らかにした。

(2) 2次試験

1次試験で選定した材料（木節粘土+珪砂）の組合せを対象として、充填性および材料分離抵抗性を確認した

上で配合割合を変化させて、保水性およびひびわれ抵抗性の検討を行った。

(3) 3次試験

2次試験において充填材の表面硬化が課題として残った。よって、必要とされる特性を確保しつつ表面硬化を抑制するために、2次試験で使用した珪砂の一部を黒土で置換し、その量を変化させ、諸条件を満たす最適な配合の検討を行い、充填材の配合を決定した。

1次試験：保水性の確保

|                                              |   |                                                             |
|----------------------------------------------|---|-------------------------------------------------------------|
| <b>材料</b><br>粘土材料：2種類<br>粒状材料：3種類<br>粘土、粒状混合 | ➡ | <b>検討方法</b><br>小型供試体に材料を充填し、<br>屋内・屋外に暴露して温度・<br>湿度・水分変化等測定 |
|----------------------------------------------|---|-------------------------------------------------------------|

2次試験：充填性の比較・保水性の向上  
ひびわれ抵抗性比較

|                                 |   |                                                          |
|---------------------------------|---|----------------------------------------------------------|
| <b>材料</b><br>木節粘土+珪砂<br>配合割合を変化 | ➡ | <b>検討方法</b><br>円柱供試体への充填、<br>三連型枠供試体による<br>水分変化測定・外観変化観察 |
|---------------------------------|---|----------------------------------------------------------|

3次試験：充填性の確認・保水性の確認  
ひびわれ抵抗性比較  
材料硬化の抑制

|                                    |   |                                                                        |
|------------------------------------|---|------------------------------------------------------------------------|
| <b>材料</b><br>木節粘土+珪砂+黒土<br>配合割合を変化 | ➡ | <b>検討方法</b><br>円柱供試体への充填、<br>三連型枠供試体による<br>水分変化測定・外観変化観察<br>円柱供試体の内部観察 |
|------------------------------------|---|------------------------------------------------------------------------|

図－6.2 試験の流れ

6.3 試験材料

(1) 粘土材料

粘土には、以下の代表的な2種類を用いた（表－6.1参照）。

a) ベントナイト

モンモリロナイトを主体とする粘土であり、比表面積や液性限界、塑性限界が大きい。したがって、保水性が高く、液状にして充填する際に多量の水を保持させることができると考えられる。ただし、止水材にも用いられるため、吸水性に乏しいという欠点がある。試験には、クニミネ工業製クニゲル－V A Sを用いた。

b) 木節粘土

カオリナイトを主体とする粘土であり、比表面積や液性限界、塑性限界は粘土の中では小さい。したがって、保水性や保持できる水分量はベントナイトと比較して少ないが、扱いは容易である。試験には、富士タルク製本山木節一級を用いた。

## (2) 粒状材料

試験に使用する粒状材料は、珪砂を中心とすることとした。しかしながら、珪砂自体には高い保水性はそれほど期待できない。そこで、多孔質の人工ゼオライトおよび園芸用のピートモスも使用することとした。それぞれの品質を以下に述べる。

### a) 珪砂

東北珪砂製6号、7号混合の珪砂を用いた。

### b) 人工ゼオライト

人工ゼオライトは石炭灰を原料として製造された比表面積70～100m<sup>2</sup>/gの粉末であり、吸水率が50%程度と大きいことに特徴がある。試験には、細粒に造粒したものを使用した(産業振興製)。

### c) ピートモス

園芸用の市販のものを粉砕して用いた。

## 6.4 1次試験

### (1) 試験概要

ポーラスコンクリート供試体の空隙に各種充填材を充填し、温度、湿度および重量の変化を測定した。試験は屋内試験と屋外試験に分けて行い、各々2週間ずつ測定を実施した。屋内試験は材料の充填直後から行った。屋外試験は、屋内試験が終了した2週間後に、同じ供試体に灌水を行い再び保水させた後に実施した。なお、屋外試験では、雨を避けるため雨天および夜間(17:30～9:00)はシートで覆った。

### (2) ポーラスコンクリート供試体

供試体は、ポーラスコンクリートを塩化ビニル管に打込んで作製した。使用材料は表-3.1、配合は表-3.2と同様であり、目標空隙率は、25%(W/B=25%・B/G=20%)および35%(W/B=25%・B/G=10%)の2通りである。供試体の外観を図-6.3に示す。塩化ビニル管の内径は29.6cmで、ポーラスコンクリート天端から下部の水抜き孔までの深さは約35.0cmである。深さの中央には温度および湿度の測定孔、下部には水抜き孔が設けてある。

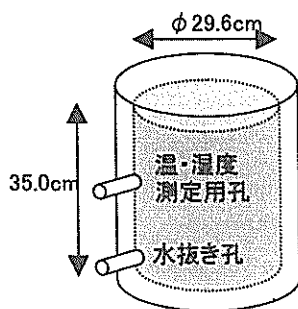


図-6.3 供試体外観

### (3) 測定機器および測定方法

温度・湿度測定は、ヴァイサラ製温度・湿度計HM-36を用い、センサーHMP-36B(直径12mm)を図-6.3の測定孔に差し込んで行った。測定は土日曜日を除く毎日(2次試験においては雨天時も除く)の16時頃から行った。

また、保水性の評価は、初期の水量に対する測定時の保持水量の比を保水率として行っている。これは供試体の重量を測定することにより算定される。

### (4) 試験ケースおよび充填方法

試験ケースおよび充填方法を、表-6.2および図-6.4に示す。ここで、供試体No.の25および35はそれぞれ目標空隙率25%および35%を示す。また、供試体No.25-2および35-2においては表面を湿布で覆ったが、これはポーラスコンクリート表面を覆土で覆った場合を模擬したものである。なお、比較の対象とした土(No.0-1～5)は、土壌のみの状態を再現したものである。これは、ポーラスコンクリート供試体とほぼ同一径の鋼管の下部に2ヶ所直径2cm程度の孔を開けた容器に詰めた。

### (5) 試験結果

#### a) 充填材の表面状態

屋内試験においては、全ての充填材表面が試験開始数日後から乾燥状態となり、ベントナイトを使用した場合(No.25-4～5, 35-4～5)は、表面にひびわれが生じた。一方、屋外試験においても、全ての充填材の表面が試験開始2～3日後から乾燥状態となり、ベントナイトを使用

表-6.2 試験ケース

| 供試体No.       | 充 填 材   |                        | 充填方法  |
|--------------|---------|------------------------|-------|
|              | 分類      | 充填材の種類                 |       |
| 25-1, 35-1   | 粒状材料    | 珪砂                     | 水で流込み |
| 25-2, 35-2   |         | 珪砂+表面湿布被覆              | 〃     |
| 25-3, 35-3   |         | 人工ゼオライト                | 〃     |
| 25-4, 35-4   | 粘土      | ベントナイト:水=1:6.6         | 自己充填  |
| 25-5, 35-5   | 粘土+粒状材料 | ベントナイト:水:珪砂=1:6.3:1.5  | 〃     |
| 25-6, 35-6   | 粘土      | 木節粘土:水=1:2.5           | 〃     |
| 25-7, 35-7   | 粘土+粒状材料 | 木節粘土:水:珪砂=1:3.0:4.5    | 〃     |
| 25-8, 35-8   |         | 木節粘土:水:ゼオライト=1:4.5:5.5 | 〃     |
| 25-9, 35-9   |         | 木節粘土:水:ピートモス=1:5.0:0.3 | 〃     |
| 25-10, 35-10 | —       | なし                     | —     |
| 0-1          | 土壌のみを再現 | 黒土                     | —     |
| 0-2          |         | 黒土:赤玉土=1:1             | —     |
| 0-3          |         | 黒土:腐葉土=1:1             | —     |
| 0-4          |         | 川砂                     | —     |
| 0-5          |         | 川砂:ピートモス=1:1           | —     |

注) 配合割合は各材料の重量割合(土は容積割合)

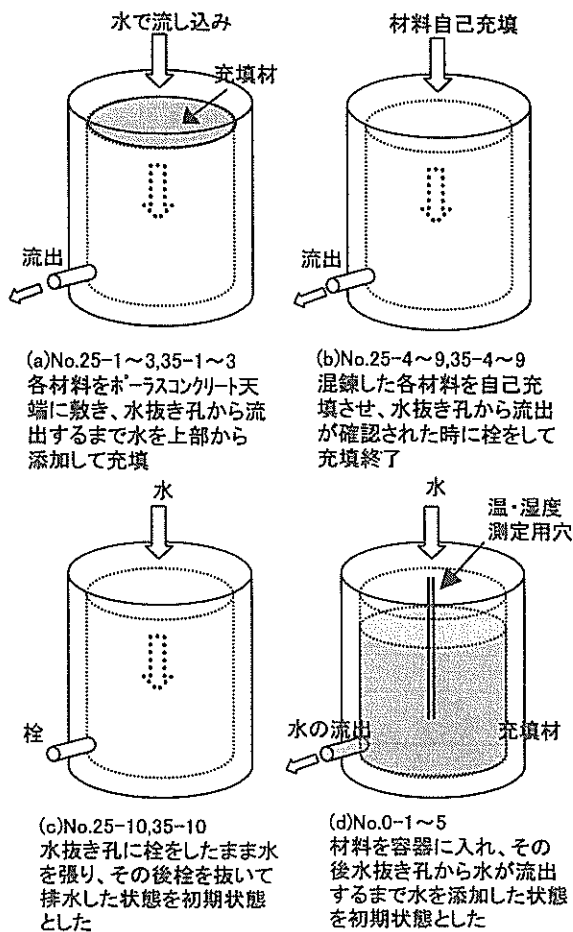


図-6.4 充填方法

した場合(No. 25-4~5, 35-4~5)および木節粘土単味(No. 25-6, 35-6), 木節粘土+粉碎ピートモス(No. 25-9, 35-9)においては、表面にひびわれが生じた。したがって、ひびわれ抵抗性の観点から、充填材の材料としてベントナイトの使用は不適当と判断できる。また、木節粘土の場合にも単味使用はできず、粒状材料との混合が必要と考えられる。

なお、屋内試験および屋外試験とも、湿布で覆ったNo. 25-2, 35-2の表面は、やや湿った状態を保っていた。したがって、表面を被覆することは保水効果があるものと考えられる。

#### b) 温度の測定結果

供試体内部の温度の測定結果を、屋内試験、屋外試験別に図-6.5および図-6.6に示す。

図-6.5および図-6.6より、供試体内部の温度は、屋内試験初期を除いていずれの供試体とも外気温の影響を受けることが分かる。特に、屋外試験においては、外気温が高い場合に供試体の温度は40℃以上と著しく高くなっている。これは、直射日光を受けて、内部温度が上昇

したためと考えられる。

一方、土の場合(No. 0-1~5)も外気温の影響を受けるが、ポーラスコンクリートの場合と比べてやや温度が低く、特に外気温が高いときの温度上昇が少ない傾向にある。

充填材種別による相違を見ると、大きな差は確認されず、充填材なしとの差も少ない。これは、土に比べてポーラスコンクリート自体が高温になり易いためと考えられる。

以上のことより、ポーラスコンクリートの場合、温度が土に比べて高くなることはある程度はやむをえないと考えられる。

#### c) 湿度の測定結果

供試体内部の湿度の測定結果を、屋内試験、屋外試験別に図-6.7および図-6.8に示す。

図-6.7より、屋内試験における供試体内部の湿度は初期において100%程度であり、その後徐々に低下するが、いずれの供試体とも80%程度は保たれていることがわかる。一方、屋外試験においては、図-6.8より外気温の影響を受けて変化が大きい。充填材のある場合(No. 25-1~9, 35-1~9)には概ね70%程度以上であり、土の場合と同等の湿度が確保されているといえる。一方、充填材なし(No. 25-10, 35-10)の場合は特に外気温の影響を大きく受け、外気の乾燥に伴って湿度が40%程度まで低下することもある。したがって、充填材を用いずにポーラスコンクリート内に植物に適した環境とすることは困難なものと判断できる。

また、充填材ありの中では人工ゼオライト(No. 25-3, 35-3), ベントナイト+珪砂(No. 25-5, 35-5)および木節粘土+粉碎ピートモス(No. 25-9, 35-9)の湿度がやや低い傾向にある。

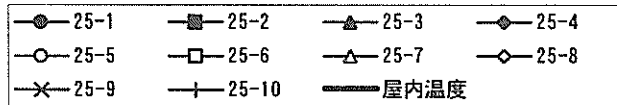
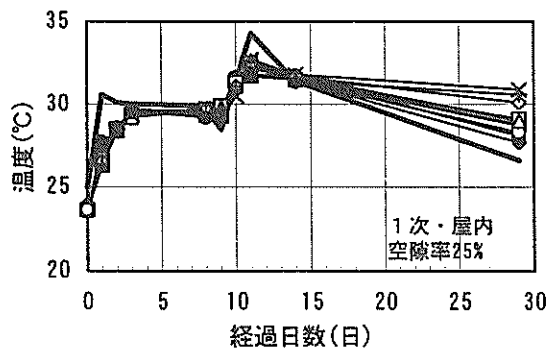
#### d) 保水性

供試体の重量測定結果から算出した保水率の値を、図-6.9に示す。保水率は、屋内試験初期の水量に対する測定時に保持されている水量の比で表したものである。屋外試験開始時に100%でないのは、開始前の灌水により充填材全部に水が浸透しなかったことを意味している。

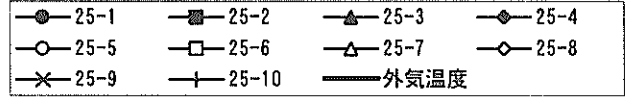
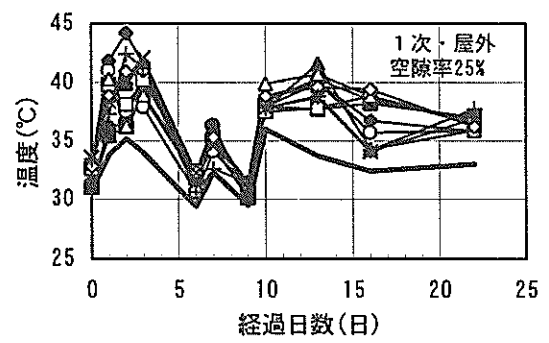
図より、充填材なし(No. 25-10, 35-10)の場合には、保水性が全くないことが分かる。

次に、粒状材料に着目すると、人工ゼオライト(No. 25-3, 35-3)の場合には、屋内試験、屋外試験とも最終的にほとんど含水量が0である(保水率0%)。また、珪砂(No. 25-1, 35-1)の場合にも、高い保水性は期待できない。したがって、粒状材料のみでポーラスコンクリート内の保水性を確保することは困難と言える。

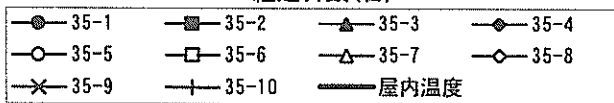
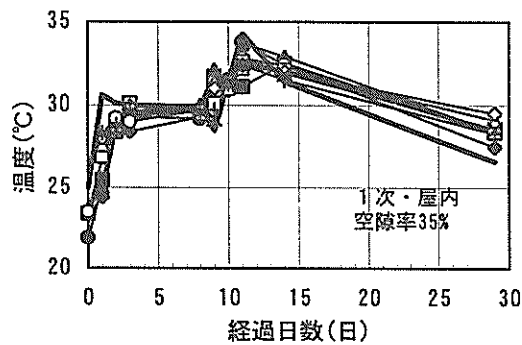
一方、粘土を用いた場合を見ると、ベントナイト(No.



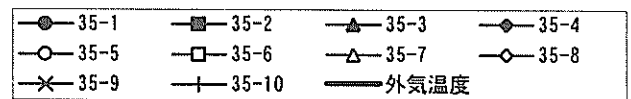
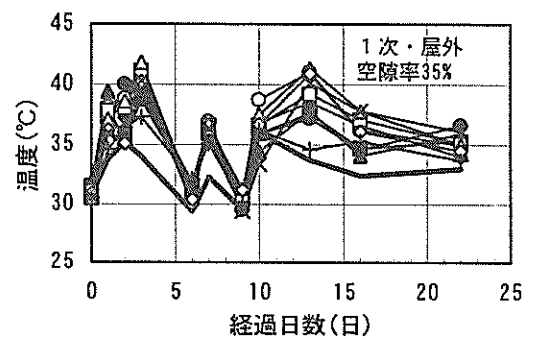
(a) ポーラスコンクリート供試体(目標空隙率25%)



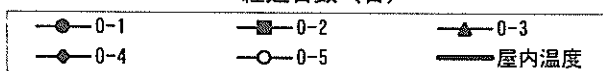
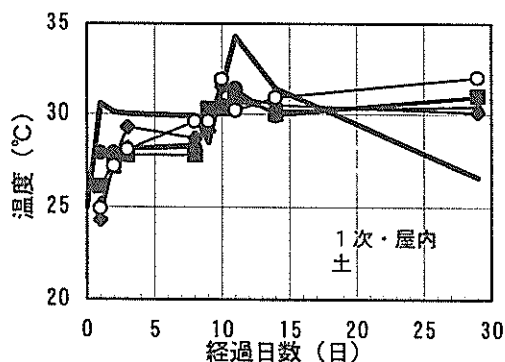
(a) ポーラスコンクリート供試体(目標空隙率25%)



(b) ポーラスコンクリート供試体(目標空隙率35%)

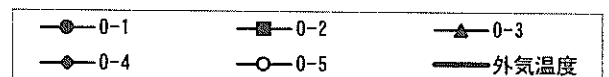
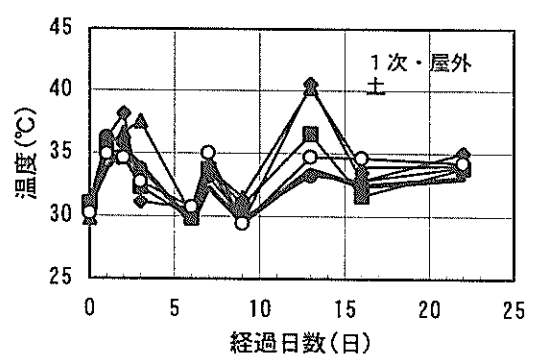


(b) ポーラスコンクリート供試体(目標空隙率35%)



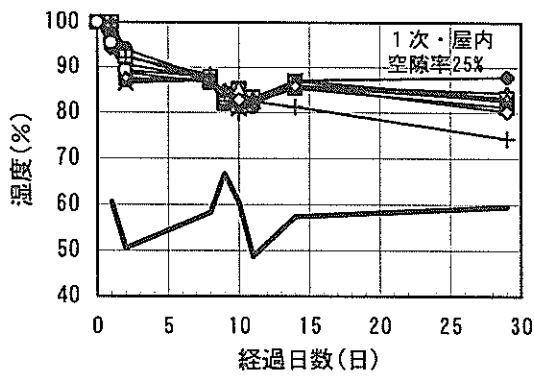
(c) 土

図-6.5 温度の測定結果(屋内試験)

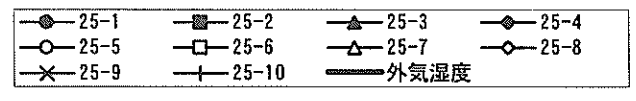
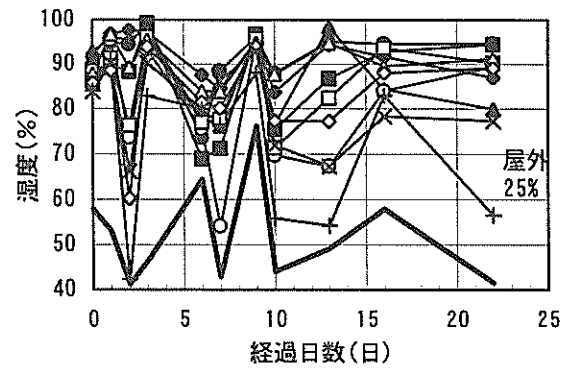


(c) 土

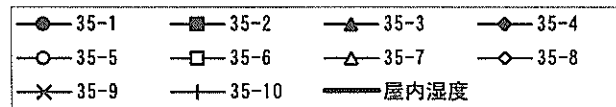
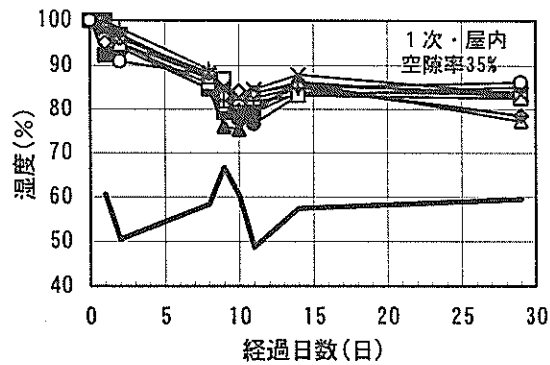
図-6.6 温度の測定結果(屋外試験)



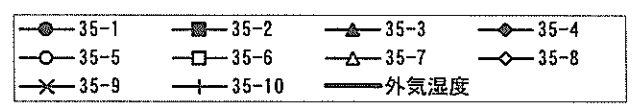
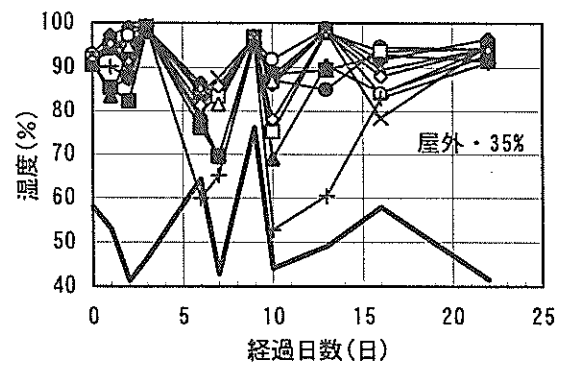
(a) ポーラスコンクリート供試体(目標空隙率25%)



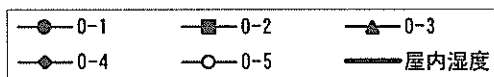
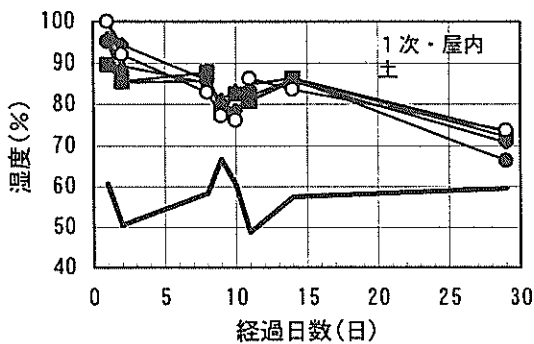
(a) ポーラスコンクリート供試体(目標空隙率25%)



(b) ポーラスコンクリート供試体(目標空隙率35%)

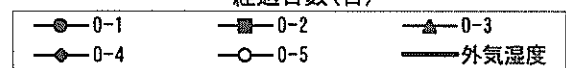
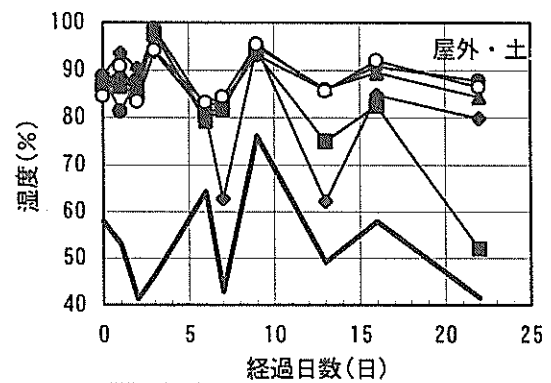


(b) ポーラスコンクリート供試体(目標空隙率35%)



(c) 土

図-6.7 湿度の測定結果(屋内試験)



(c) 土

図-6.8 湿度の測定結果(屋外試験)

25-4, 35-4) の場合が突出して保水性が高く、次いで木節粘土 (No. 25-6, 35-6) の順であり、比表面積の影響が確認される。

また、粘土＋粒状材料の場合、木節粘土＋珪砂 (No. 25-7, 35-7) は保水性が期待できるが、木節粘土＋人工ゼオライト (No. 25-8, 35-8) および木節粘土＋粉碎ピートモス (No. 25-9, 35-9) は保水性に乏しいようである。

なお、湿布を用いた場合 (No. 25-2, 35-2) は、湿布なし (No. 25-1, 35-1) に比べて保水性が高く、表面の被覆には保水の効果があると評価できる。

#### e) 灌水の効果

1 次試験においては、屋外試験開始時に灌水を行っている。したがって、灌水の効果は、図-6.9における屋内試験最終時の保水率と屋外試験初期の保水率の差で評価される。

図-6.9より、いずれのケースでも灌水の効果が見られるが、ひびわれが発生したケース (No. 25-4～5, 35-4～5) では水が吸収されるのではなく、ひびわれの間に水が溜まる状況であった。そのため、No. 35-5のように、屋外試験初期の保水率が100%を越えたケースも見られる (図-6.9(b) 参照)。一方、水の吸収が見られたケースでは、粒状材料 (No. 25-1～3, 35-1～3) および木節粘土＋珪砂 (No. 25-7, 35-7) の場合が良好であった。

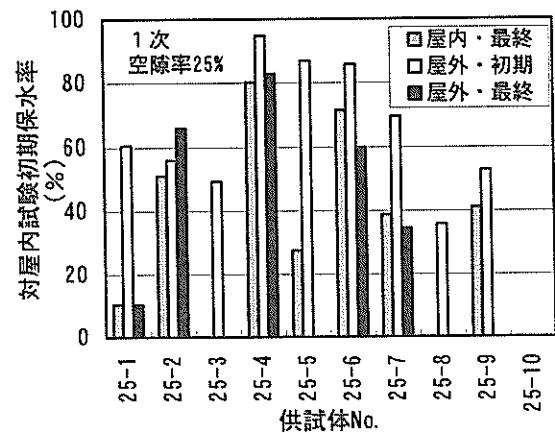
#### f) ポーラスコンクリートの空隙率の影響

図-6.5～図-6.9より、ばらつきはあるものの、ポーラスコンクリートの空隙率の違いが温度、湿度および保水率に及ぼす明確な影響は確認されなかった。

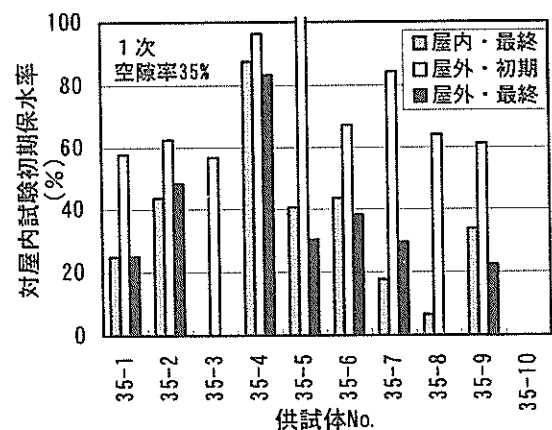
#### (6) 1 次試験の結果のまとめと課題

1 次試験の結果をまとめると、以下の通りである。

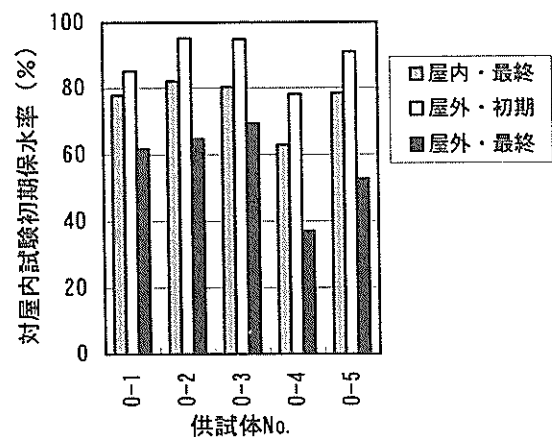
- ・ いずれの充填材を用いた場合にも、ポーラスコンクリート内部の温度は土に比べて高くなる。これはある程度やむをえないと考えられる。
- ・ 充填材の有無によるポーラスコンクリート内部の水分環境の差は大きく、充填材がない場合、外気の乾燥に伴って内部の湿度がかなり低下する。また、保水性は全く期待できない。
- ・ 表面を湿布で覆うことは、保水性確保に効果がある。すなわち、覆土等により表面からの水分蒸発を抑制することができるものと推定される。
- ・ 充填材を粒状材料のみとした場合は、保水性を確保できない。一方、粘土材料のみとした場合は乾燥に伴いひびわれが生じる。したがって、充填材は粘土材料をベースとし、粒状材料を混合することが望ましいものと考えられる。
- ・ 粘土材料にベントナイトを用いると、保水性は高いも



(a) ポーラスコンクリート供試体 (目標空隙率25%)



(b) ポーラスコンクリート供試体 (目標空隙率35%)



(c) 土

図-6.9 保水性の比較

のの粒状材料と混合してもひびわれが発生する。一方、木節粘土の場合は粒状材料との混合によりひびわれを抑制できる。したがって、粘土材料としては、木節粘土が望ましいものと考えられる。

・木節粘土に混合する粒状材料として、人工ゼオライトやピートモスを用いると保水性が期待できない。一方、珪砂を混合した場合は保水性が期待でき、灌水の効果もある。

これらの結果を表に示すと表-6.3のようになり、ポーラスコンクリートの充填材として粘土材料単味ではひびわれ抵抗性に劣り、粒状材料単味では保水性が確保できない。したがって、これらの混合が望ましく、特に木節粘土をベースに珪砂を混合した材料が良いという方向性が確認された。

表-6.3 1次試験結果のまとめ

| 充填材     |                | ひびわれ | 温度 | 湿度 | 保水性 | 灌水 |
|---------|----------------|------|----|----|-----|----|
| 粒状材料    | 1 珪砂           | ○    | △  | ×  | ×   | ○  |
|         | 2 珪砂(被覆有)      | ○    | △  | ×  | △   | ○  |
|         | 3 人工ゼオライト      | ○    | △  | ×  | ×   | ○  |
| 粘土      | 4 ベントナイト       | ×    | △  | ○  | ○   | ×  |
|         | 6 木節粘土         | ×    | △  | △  | △   | ×  |
| 粘土+粒状材料 | 5 ベントナイト+珪砂    | ×    | △  | ×  | ×   | ×  |
|         | 7 木節粘土+珪砂      | ○    | △  | ○  | △   | ○  |
|         | 8 木節粘土+人工ゼオライト | ○    | △  | ×  | ×   | ○  |
|         | 9 木節粘土+粉碎ピートモス | ×    | △  | ×  | ×   | ○  |
|         | 10 充填材なし       | —    | △  | ×  | ×   | —  |

注)ひびわれ:ひびわれが発生しなかったケース○,発生したケース×  
 温度:全ケース差が少なく、土よりも高温になったため、全て△  
 湿度:湿度の最低値80%以上○,70~80%△,70%以下×  
 保水性:保水率の最低値60%以上○,25~60%△,25%以下×  
 灌水:吸水が見られたケース○,吸水が見られなかったケース×

## 6.5 2次試験

### (1) 試験概要

1次試験は材料の方向性を定めることを目的に実施したものであるため、配合的に充分検討したものではない。そこで、1次試験で選定した木節粘土、珪砂および水の配合割合を変化させて、その性状を比較検討した。

なお、以下では木節粘土をC、珪砂をS、水をWとして表す。

### (2) 充填性の検討

#### a) 試験配合

試験項目は、フローおよび充填性とした。試験配合を表-6.4に示す。W/Cを2.0~4.5の間で5水準とし、その各々についてS/Cを変化させた。

#### b) 試験方法

フローは、モルタル用フローコーンを用いて測定した。また、充填性は、実積率60%の碎石をφ10×20 cmのモールドに詰めて模擬ポーラスコンクリート供試体を作製

表-6.4 試験配合(2次試験)

| 配合No. | W/C | S/C  | 単位量(kg/m³) |     |      | 単位質量(g/cm³) | フロー(cm) | 充填率(%) |
|-------|-----|------|------------|-----|------|-------------|---------|--------|
|       |     |      | W          | C   | S    |             |         |        |
| 1-1   | 2.0 | 1.50 | 671        | 336 | 503  | 1.51        | 32.0    | 12.1   |
| 1-2   |     | 1.00 | 715        | 358 | 358  | 1.43        | 31.0    | 10.5   |
| 1-3   |     | 0.50 | 766        | 383 | 191  | 1.34        | 32.5    | 10.0   |
| 1-4   |     | 0.00 | 827        | 413 | 0    | 1.24        | 38.5    | 53.6   |
| 2-1   | 2.5 | 3.75 | 579        | 232 | 869  | 1.68        | 32.0    | 11.6   |
| 2-2   |     | 3.00 | 619        | 248 | 743  | 1.61        | 34.0    | 70.5   |
| 2-3   |     | 2.50 | 625        | 250 | 625  | 1.50        | 36.0    | 100    |
| 3-1   | 3.0 | 5.50 | 559        | 186 | 1025 | 1.77        | 31.0    | 21.1   |
| 3-2   |     | 4.50 | 589        | 196 | 884  | 1.67        | 36.0    | 98.0   |
| 3-3   |     | 3.50 | 628        | 209 | 733  | 1.57        | 39.0    | 100    |
| 4-1   | 3.5 | 6.00 | 563        | 161 | 966  | 1.69        | 32.5    | 10.6   |
| 4-2   |     | 5.50 | 581        | 166 | 913  | 1.66        | 34.5    | 100    |
| 4-3   |     | 5.25 | 585        | 167 | 878  | 1.63        | 36.5    | 100    |
| 5-1   |     | 8.00 | 563        | 125 | 1001 | 1.69        | 33.5    | 61.7   |
| 5-2   | 4.5 | 7.50 | 578        | 128 | 963  | 1.67        | 35.0    | 100    |
| 5-3   |     | 7.00 | 587        | 130 | 913  | 1.63        | 40.0    | 100    |
| 5-4   |     | 6.75 | 595        | 132 | 893  | 1.62        | 40.0    | 100    |

し、そこに充填された充填材の容積を空隙量で除して充填率を算定した。なお、下部からの充填材の流出がないため、天端からオーバーフローしたときを充填終了とした。

### c) 試験結果

フローと充填率の関係を図-6.10に示す。図より、W/C=2.0の条件では高い充填率を確保することは困難であることが分かる。これは、粘土量に対する水量が不足で、粘性が極めて高いためである。また、W/C ≥ 2.5の条件で100%の充填率を確保するためのフローは35cm程度以上である。なお、W/C=4.5のケースは充填性は高いものの材料分離した。したがって、W/C=4.5の条件は粘土量に対して水量過多であると考えられる。以上の結果から、W/Cが2.5~3.5程度であれば、所要のフローを確保することが可能であり、またその範囲内であればW/Cの影響は少ないと考えられる。

次に、単位水量Wと充填率の関係を図-6.11に示す。図より、W/C ≥ 3.0の条件の場合、W=580~590kg/m³で充填率がほぼ100%となるが、W/C=2.5の場合は粘性がやや高いため625kg/m³程度必要となることが確認される。

### (3) 保水性等の検討

#### a) 試験配合

試験配合は、W/C=2.5~3.5の範囲でほぼ100%の充填率が確保された以下の3配合とした。

- ・配合No. 2-3: W/C=2.5, S/C=2.5
- ・配合No. 3-2: W/C=3.0, S/C=4.5
- ・配合No. 4-2: W/C=3.5, S/C=5.5

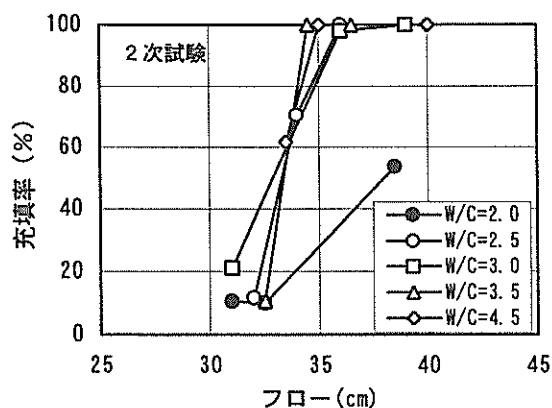


図-6.10 フローと充填率の関係

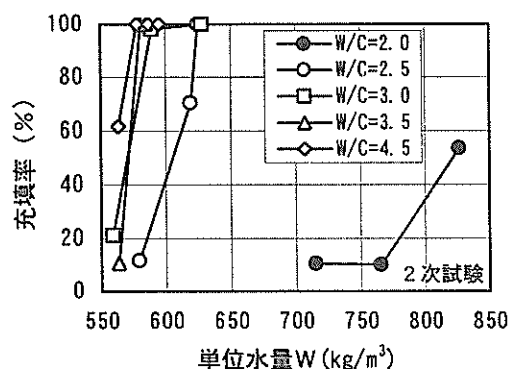


図-6.11 単位水量と充填率の関係

#### b) 試験方法

これらの3配合をモルタル試験用三連型枠（内寸16.0×13.6×4.0cm）の仕切りを取外して流し込み、各配合とも2個ずつの供試体を作製した。これらの供試体を日中屋外に暴露し、1次試験と同じく重量変化を測定することにより保水率の算出を行い、同時に外観の観察も行った。ここで、供試体作製初期においては充填材が軟らかく、測定時に型枠の外へ流出してしまう恐れがあったことから、測定はある程度硬化した充填5日後から開始した。また、充填11日後には、各配合とも一方の供試体に灌水し、吸水の状況を観察した。なお、灌水は、表面において水が吸収され難くなった時点で終了した。

#### a) 試験結果

##### ・外観調査

5日後に配合No.2-3の2つの供試体に大きなひびわれが生じた。配合No.3-2についても、片方の供試体に小さなひびわれが生じた。一方、No.4-2においてはひびわれは生じなかった（表-6.5参照）。これは、水量および粘土量が少ないためと考えられる。また、いずれの供試体とも表面はかなり硬くなった。これは、粘土の乾燥によ

るものと考えられる。

##### ・保水性

保水率の変化を、図-6.12に示す。厚さの薄い供試体を屋外に数日間放置するという厳しい乾燥条件もあり、いずれもかなり保水率が減少しているが、三者で比較すると配合No.2-3、No.3-2、No.4-2の順、すなわち粘土量の多い配合ほど保水性が高いことが分かる。

##### ・灌水の効果

まず、吸水の状況については、配合No.2-3と配合No.3-2およびNo.4-2には差異が見られた。配合No.3-2およびNo.4-2においては比較的容易に吸収され、水がかかった瞬間に表面が軟化したのに対し、配合No.2-3においては水がややはじかれる状況が確認された。また図-6.12より、保水率の回復は配合No.3-2が良好であり、灌水後の保水率は配合No.2-3を上回った。

表-6.5 供試体の表面ひびわれ

| 配合     | 長さ(cm) | 幅(mm) |
|--------|--------|-------|
| No.2-3 | ① 5.9  | 2.3   |
|        | ② 11.2 | 7.2   |
| No.3-2 | ① なし   |       |
|        | ② 5.5  | 2.9   |
| No.4-2 | ① なし   |       |
|        | ② なし   |       |

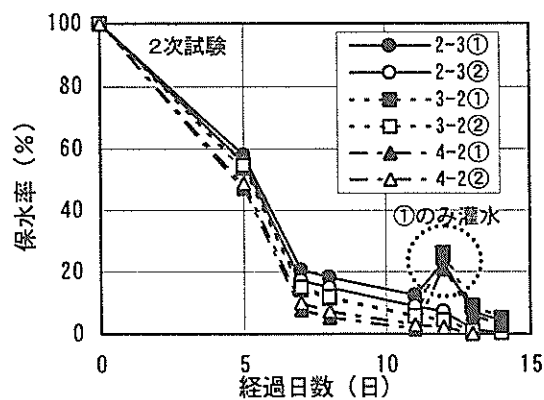


図-6.12 保水率の変化

#### (4) 2次試験の結果のまとめと課題

2次試験の結果をまとめたものを以下に示す。

・充填性：W/Cを2.5～3.5の範囲とし、各々において適切な単位水量Wを定めることにより、材料分離がなく、また充分な充填が行える。このときの所要のフローは、35cm程度以上である。

・保水性：W/Cの小さい配合、すなわち粘土量の多い配合（配合No.2-3）が保水性に優れる。

・ひびわれ抵抗性：配合No. 2-3，すなわち粘土量の多い場合収縮が著しく，顕著なひびわれが生じる．それに対し，配合No. 3-2およびNo. 4-2であれば，発生するひびわれは実用上問題ないと評価できる．

・灌水の効果：配合No. 3-2およびNo. 4-2は，粘土量の多い配合No. 2-3に比べて水の吸収に優れる．

・表面硬化：いずれの配合とも乾燥により表面がかなり硬化する．灌水により軟化するものの，硬化時の植物への考えると改良の必要がある．

これらの結果より，充填材として配合No. 3-2が優れるものと評価できる．ただし，表面の硬化は課題であり，灌水により軟化するものの，硬化時の植物への影響を考えると改良の必要がある．

## 6.6 3次試験

### (1) 試験概要

2次試験において，乾燥による表面硬化が課題として残った．これは，粘土の乾燥による硬化と考えられる．そこで，保水性等を確保しつつ粘土量を低減することを目的に，珪砂の一部を黒土に置換えることを考慮して検討を行った．

試験においては，珪砂と黒土の割合を変化させてまず予備練りを行い，所定のフローを確保するための水量を決定した．次に，本試験でその水量に基づく配合で保水性や表面硬化の程度を調べた．

なお，以下では，粘土をC，珪砂をS，黒土をT，水をWで表す．

### (2) 予備練り

#### a) 試験配合

粘土量に対する珪砂+黒土の量を規定し，珪砂と黒土の割合および水量を変化させ，フロー＝35cm程度を目標に試験を行った．粘土量に対する珪砂+黒土の量の比(S+T)/Cは6.0を標準とし，一部8.0についても試験を行った．また，珪砂の量に対する黒土の量の比T/(S+T)については0.25，0.5，0.75，1.00の4種類設定した．試験配合を表-6.6に示す．ここで，黒土の含水率は47.2%であり，以下の図表においては黒土の含水量を水量に算入している．なお，予備練りでの測定は，フローのみである．

### b) 試験結果

単位水量Wとフローの関係を図-6.13に，フローが35cmとなるWを図-6.14に示す．これらの図より，珪砂の量に対する黒土の量の比T/(S+T)が大きいほど所定のフローを確保するための水量が増えることが確認される．また，粘土量に対する珪砂+黒土の量の比(S+T)/Cが水量に及ぼす影響は少ない．

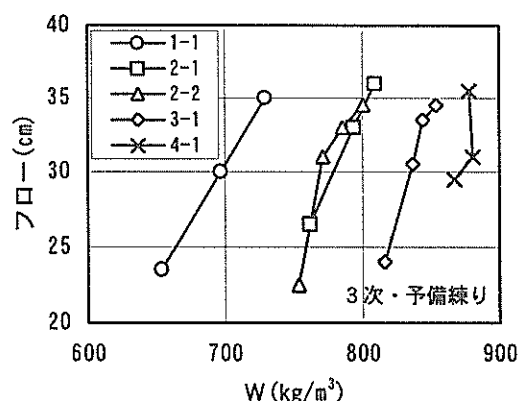


図-6.13 単位水量とフローの関係

表-6.6 予備練り配合（3次試験）

| No.   |       | 配合条件    |         | 配合割合 |      |     | 単位量(kg/m³) |     |     |     |     | 単位重量<br>(g/cm³) | フロー<br>(cm) |
|-------|-------|---------|---------|------|------|-----|------------|-----|-----|-----|-----|-----------------|-------------|
|       |       | (S+T)/C | T/(S+T) | C    | S    | T   | W          | C   | S   | T   | W   |                 |             |
| 1     | 1-1-1 | 6       | 0.25    | 1    | 4.5  | 0.8 | 4.7        | 139 | 625 | 110 | 653 | 1.53            | 23.5        |
|       | 1-1-2 |         |         |      |      |     | 5.7        | 122 | 549 | 97  | 697 | 1.47            | 30.0        |
|       | 1-1-3 |         |         |      |      |     | 6.7        | 109 | 489 | 86  | 729 | 1.41            | 35.0        |
| 2     | 2-1-1 | 6       | 0.50    | 1    | 3.0  | 1.6 | 7.4        | 103 | 308 | 163 | 761 | 1.33            | 26.5        |
|       | 2-1-2 |         |         |      |      |     | 8.4        | 94  | 283 | 149 | 794 | 1.32            | 33.0        |
|       | 2-1-3 |         |         |      |      |     | 9.4        | 86  | 258 | 136 | 809 | 1.29            | 36.0        |
|       | 2-2-1 | 8       |         | 1    | 4.0  | 2.1 | 8.9        | 85  | 339 | 179 | 753 | 1.36            | 22.5        |
|       | 2-2-2 |         |         |      |      |     | 9.9        | 78  | 312 | 165 | 771 | 1.33            | 31.0        |
|       | 2-2-3 |         |         |      |      |     | 10.9       | 72  | 289 | 152 | 786 | 1.30            | 33.0        |
|       | 2-2-4 |         |         |      |      |     | 11.9       | 67  | 269 | 142 | 800 | 1.28            | 34.5        |
|       | 3     | 3-1-1   |         | 6    | 0.75 | 1   | 1.5        | 2.4 | 9.1 | 89  | 134 | 213             | 816         |
| 3-1-2 |       | 10.1    | 83      |      |      |     |            |     | 124 | 196 | 837 | 1.24            | 30.5        |
| 3-1-3 |       | 11.1    | 76      |      |      |     |            |     | 114 | 180 | 844 | 1.21            | 33.5        |
| 3-1-4 |       | 12.1    | 70      |      |      |     |            |     | 106 | 167 | 854 | 1.20            | 34.5        |
| 4     | 4-1-1 | 6       | 1.00    | 1    | 0.0  | 3.2 | 11.8       | 73  | 0   | 232 | 867 | 1.17            | 29.5        |
|       | 4-1-2 |         |         |      |      |     | 12.8       | 69  | 0   | 217 | 881 | 1.17            | 31.0        |
|       | 4-1-3 |         |         |      |      |     | 13.8       | 63  | 0   | 201 | 878 | 1.14            | 35.5        |

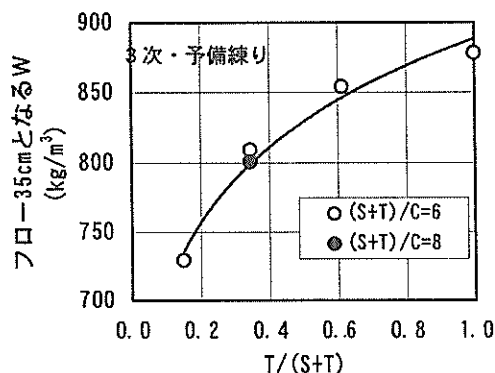


図-6.14 フロー35cmとなる単位水量

### (3) 本試験

#### a) 試験配合

試験配合を表-6.7に示す。これらの配合は予備練りにおいて所要のフロー(35cm)を確保できた配合である。ここで、配合No.0-1は、2次試験で選定した粘土と珪砂のみを用いたもの(黒土なし)である。

#### b) 試験方法

試験項目は、フロー・充填率・保水性とし、2次試験と同様の測定を行った。なお、保水性については、三連型枠供試体に加え、2次試験で充填率の評価に用いた模擬ポーラスコンクリート供試体(以下「充填供試体」)についても検討を行った。これは、供試体内部の水分環境については充填供試体で評価し、ポーラスコンクリート表面部分にある充填材の乾燥やひびわれ抵抗性を三連型枠供試体で評価するためである。

#### c) 試験結果

##### ・充填性

表-6.7に示すように、充填率は全ケースともほぼ100%であった。このことより、黒土を用いる場合にも、フローは35cm程度以上であれば良好に充填が行えることが明らかとなった。

##### ・保水性

充填供試体において失われた水量および保持されてい

る水量(保水量)の変化を、各々図-6.15および図-6.16に示す。

図-6.15より、配合No.4-1は他の配合に比べて失われた水量が多く、保水性に劣ることが確認される。これは、粘土量が少なく、保水性を黒土に多く依存しているためと考えられる。一方、粘土量の多い配合No.0-1(黒土なし)は失われた水量が最も少ない。また、配合No.1-1, 2-1, 2-2, 3-1の結果はほぼ同等で、配合No.0-1よりやや多い程度である。

一方、保水量については、配合No.4-1を除けば失われた水量がほぼ同等であったため、初期水量の差がそのま

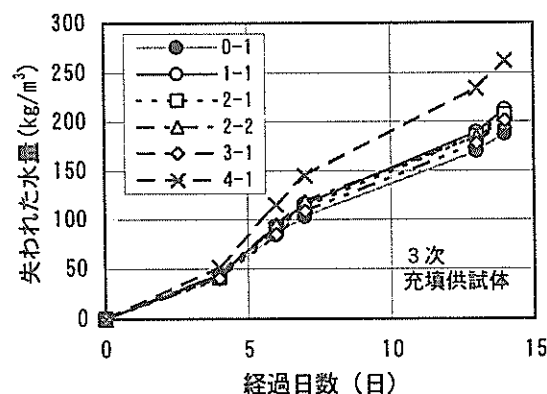


図-6.15 失われた水量の変化

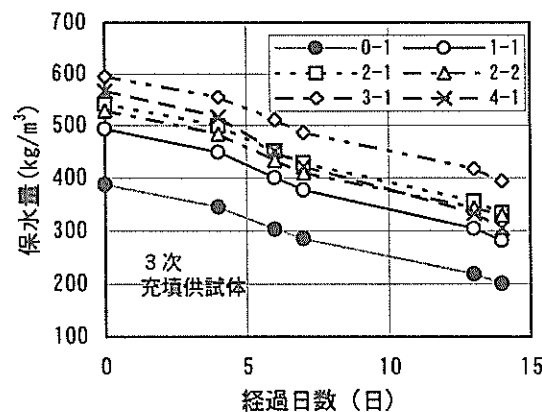


図-6.16 保水量の変化

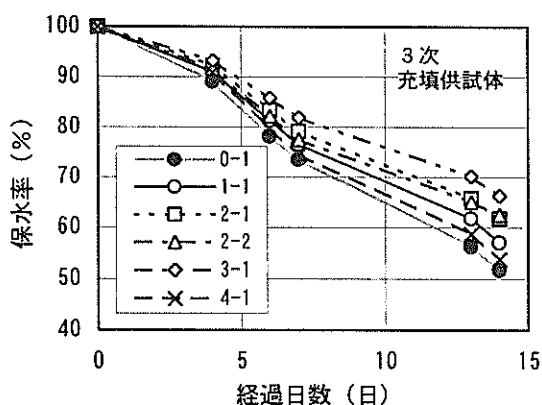
表-6.7 本試験配合(3次試験)

| 配合No. | 配合条件    |         | 配合割合 |     |     |      | 単位量(kg/m³) |     |     |     | 単位重量(g/cm³) | フロー(cm) | 充填率(%) |
|-------|---------|---------|------|-----|-----|------|------------|-----|-----|-----|-------------|---------|--------|
|       | (S+T)/C | T/(S+T) | C    | S   | T   | W    | C          | S   | T   | W   |             |         |        |
| 0-1   | 4.5     | 0.00    | 1    | 4.5 | 0.0 | 3.0  | 194        | 872 | 0   | 581 | 1.65        | 34.5    | 100    |
| 1-1   | 6       | 0.25    | 1    | 4.5 | 0.8 | 6.7  | 109        | 492 | 87  | 734 | 1.42        | 34.5    | 99.2   |
| 2-1   | 6       | 0.50    | 1    | 3.0 | 1.6 | 9.4  | 86         | 257 | 136 | 807 | 1.28        | 36.5    | 100    |
| 2-2   | 8       | 0.50    | 1    | 4.0 | 2.1 | 11.9 | 67         | 268 | 142 | 798 | 1.28        | 40.5    | 100    |
| 3-1   | 6       | 0.75    | 1    | 1.5 | 2.4 | 12.1 | 70         | 105 | 166 | 848 | 1.19        | 42.0    | 100    |
| 4-1   | 6       | 1.00    | 1    | 0.0 | 3.2 | 13.8 | 64         | 0   | 203 | 886 | 1.15        | 42.5    | 100    |

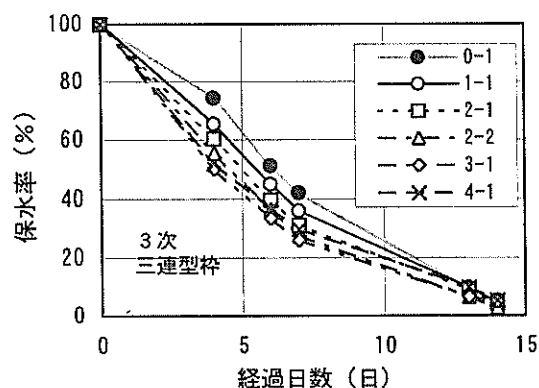
ま保水量の差となり、黒土の量が多い配合の方が保水量が多い結果となった(図-6.16参照)。

次に、保水率の変化を図-6.17に示す。ここで(a)は充填供試体、(b)は三連型枠供試体の試験結果である。

充填供試体の場合は、図-6.15の初期水量と保水量の関係から、配合No.4-1を除き初期水量が多いほど保水率が高い結果となった。一方、三連型枠供試体の場合は厚さの薄い供試体を屋外に数日間放置するという厳しい乾燥条件もあり、2週間後の保水率はいずれの配合ともほぼ0%となっている。しかしながら、4~7日後においては差が見られ、粘土量の多い配合、すなわち充填材自体の保水性が高い配合ほど保水率が高いことが確認される。



(a) 充填供試体



(b) 三連型枠供試体

図-6.17 保水率の変化

#### ・三連型枠供試体の外観変化

三連型枠供試体の2週間後の外観寸法を表-6.8に、長さの変化率(初期値に対する長さおよび幅の減少率の平均値)を図-6.18に、収縮やひびわれの状況を写真-6.1に示す。ここで、初期値は長さ16.0cm、幅13.6cmである。

これらの結果より、配合No.2-1, No.2-2, No.3-1, No.

4-1は長さおよび幅とも初期値より10%以上収縮し、その程度は水量が多いほど著しいことがわかる。

また、全ケースとも乾燥による硬化が見られたが、黒土なしの配合No.0-1の硬化が著しかったのに対し、黒土を用いた場合は指で押すと跡が付く程度であり、問題とはならないものであった。なお、配合No.2-2, No.3-1, No.4-1にはひびわれが生じた。

#### ・充填供試体内部の状況

充填供試体内部の状況を、写真-6.2および写真-6.3に示す。乾燥は充填供試体天端付近のみで生じており、内部は水分を保っていることが確認できる。また、内部の充填材は硬化していないことが確認された。

#### (4) 充填材の選定

(3)本試験の結果をまとめたものを以下に示す。

##### a) 充填性

いずれの配合においても十分な充填性を有している。

##### b) 内部の水分環境

保水性の高い粘土量を低減しても黒土を用いることにより、粘土のみの場合以上に保水性が確保できることがわかった。ただし、配合No.4-1のように粘土量をかなり少なくした場合は保水性に劣る。

##### c) 表面の性状

以下の3つの観点から比較検討する。

#### ・ひびわれの防止

充填材のひびわれは根の切断や内部の乾燥の助長につ

表-6.8 2週間後の外観寸法

| No. | W(kg/m <sup>3</sup> ) | 長さ(cm) | 幅(cm) | 備考     |
|-----|-----------------------|--------|-------|--------|
| 0-1 | 581                   | 15.2   | 13.0  |        |
| 1-1 | 734                   | 14.5   | 12.2  |        |
| 2-1 | 807                   | 14.1   | 11.6  |        |
| 2-2 | 798                   | 14.1   | 11.4  | ひびわれ発生 |
| 3-1 | 848                   | 13.0   | 10.9  | ひびわれ発生 |
| 4-1 | 886                   | 12.6   | 10.1  | ひびわれ発生 |

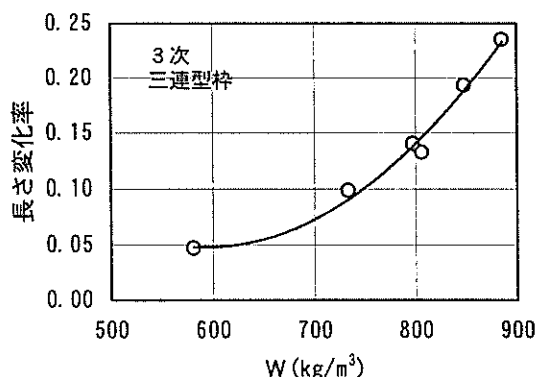
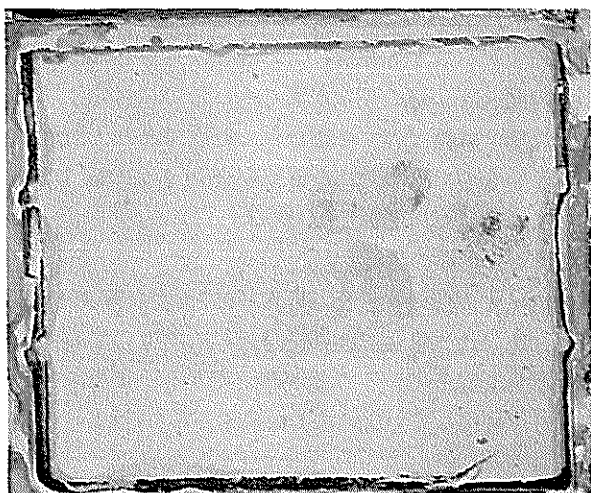
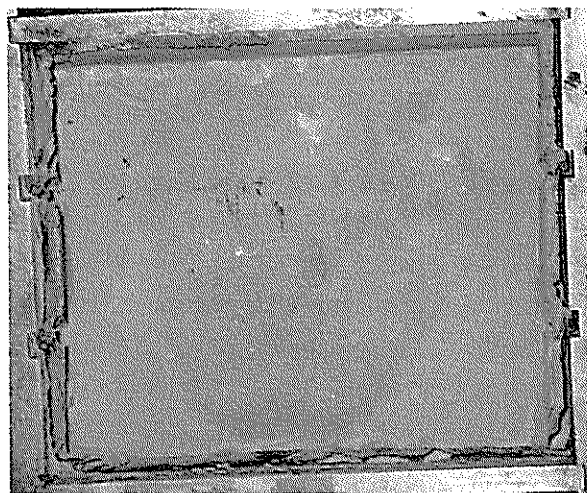


図-6.18 長さ変化



(a) 配合No. 0-1



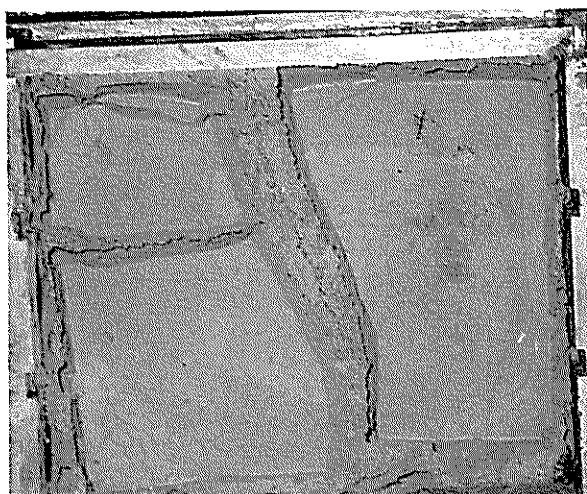
(b) 配合No. 1-1



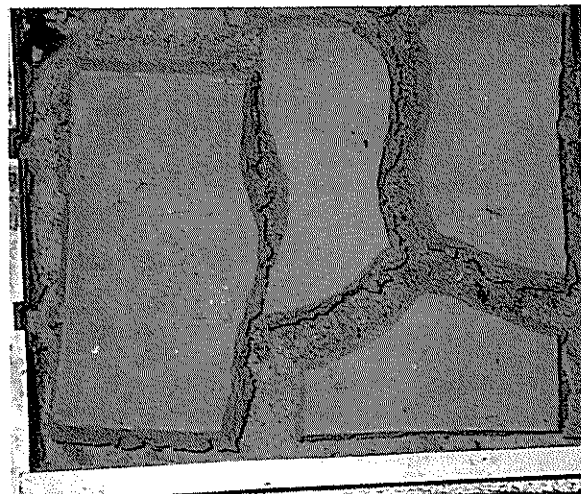
(c) 配合No. 2-1



(d) 配合No. 2-2

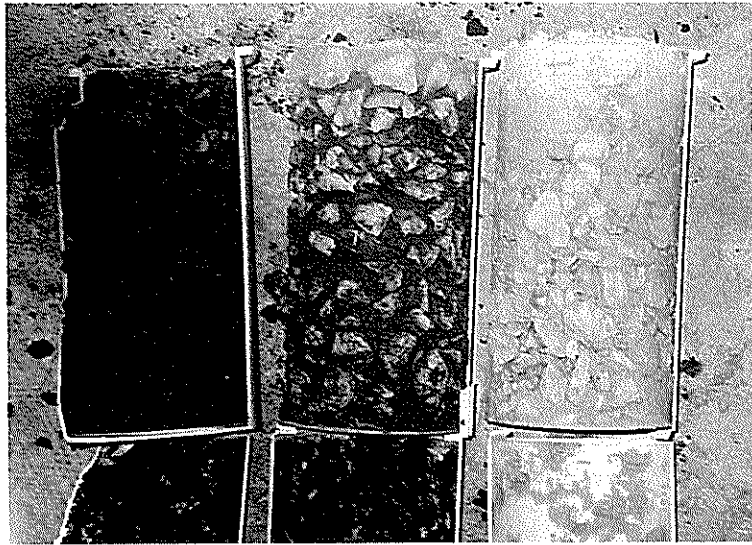


(e) 配合No. 3-1

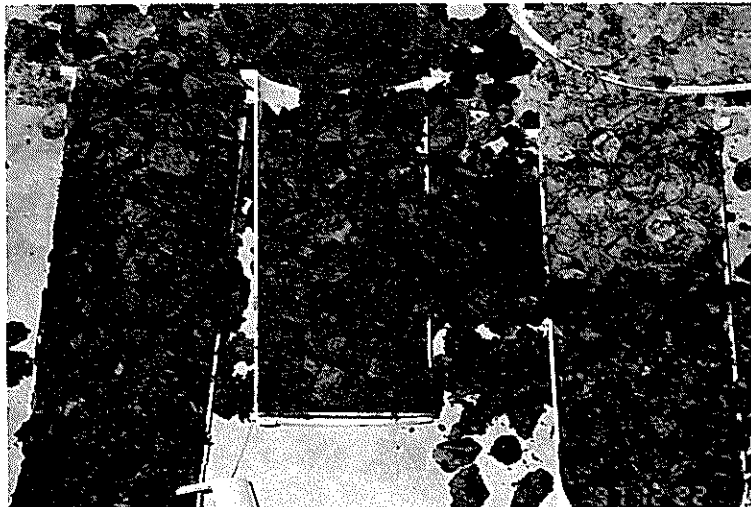


(f) 配合No. 4-1

写真-6.1 2週間後の供試体の状況



写真－6.2 供試体内部（右からNo. 0-1, No. 1-1, No. 2-1）



写真－6.3 供試体内部（右からNo. 2-2, No. 3-1, No. 4-1）

ながるため、発生を避ける必要がある。したがって、収縮が大きく、ひびわれの生じた配合No. 2-2, No. 3-1, No. 4-1は使用できない。また、配合No. 2-1はひびわれは生じなかったものの、長さ変化率は配合No. 2-2と同等であり、室内よりも乾燥が厳しくなると予想される実際の港湾・海洋環境においては、ひびわれの発生が懸念されるため好ましくない。

#### ・著しい表面硬化の防止

充填材の著しい硬化は根の生長、すなわち植物の生長を阻害する可能性が高いため、抑制しなければならない。今回、黒土を用いない配合No. 0-1の硬化が著しかったのに対し、黒土を用いた場合の硬化は問題とならない程度のものであった。このことから、黒土を用いて粘土量を低減することが必要である。

#### ・保水性の確保

特に植栽初期の環境を考慮すると、表面部分においても保水性を確保しなければならない。表面部分の保水性は内部とやや異なり、充填材自体の保水性が高い配合、すなわち粘土量の多い配合の方が好ましい結果となった。

これらの結果をまとめたものが表－6.9である。充填材としては配合No. 1-1が良好であると評価され、7. においては、この配合の充填材を用いる。

表一6.9 充填材の選定

| 配合<br>No. | 充填性 | 内部の<br>水分環境 | 表 面 性 状 |    |     | 備 考  |
|-----------|-----|-------------|---------|----|-----|------|
|           |     |             | ひびわれ    | 硬化 | 保水性 |      |
| 0-1       | ○   | ○           | ○       | ×  | ○   | 黒土無  |
| 1-1       | ○   | ○           | ○       | ○  | ○   |      |
| 2-1       | ○   | ○           | △       | ○  | △   |      |
| 2-2       | ○   | ○           | ×       | ○  | △   |      |
| 3-1       | ○   | ○           | ×       | ○  | △   |      |
| 4-1       | ○   | △           | ×       | ○  | △   | 粘土最少 |

## 7. 第二次植栽試験

### 7.1 植栽実験用供試体

植栽実験用供試体は、第一次植栽試験に使用した供試体から植物およびポットの用土を除去して利用することとし、表一7.1に示す2種類の供試体を2個ずつ使用した。

#### a) 植栽用ポットサイズ

木本用は、第一次植栽試験において枯死のなかったものとして深型（ $\phi 20\text{cm} \times 25\text{cm}$ ）、草本用は、植物の広がり considering して広型（ $\phi 30\text{cm} \times 10\text{cm}$ ）の各々1種類とした。

#### b) 供試体の設置方法

第一次植栽試験においては、ポーラスコンクリート供試体をパレット上に置いたため底部が開放状態となり、下部から乾燥を受けた。今回の試験では供試体をパレットから降ろし、ベニヤ板上に置いて底部を塞いで底部からの乾燥を防ぐこととした。なお、5.で述べたように、供試体底部を開放状態とすることは、現地での設置を考えると過度に厳しい条件であり、底部を塞いだ今回の条件の方が現地条件により近いと考える。

表一7.1 第二次植栽実験用供試体

| 種類              | 空隙率 | ポットサイズ                                          | 個数 |
|-----------------|-----|-------------------------------------------------|----|
| 木本用<br>(厚さ50cm) | 25% | 深型<br>( $\phi 20\text{cm} \times 25\text{cm}$ ) | 2  |
| 草本用<br>(厚さ30cm) |     | 広型<br>( $\phi 30\text{cm} \times 10\text{cm}$ ) | 2  |

### 7.2 植栽条件

#### (1) 植物および植栽方法の条件

##### a) 植栽場所

第一次植栽実験と同様、横須賀市久里浜湾に面した運輸省港湾技術研究所内において行った。設置場所は海岸線から3m程度陸側に位置している。

##### b) 植物の種類

植物は、第一次植栽試験と同様、木本としてハマヒサカキおよびマルバアキグミ、草本としてチガヤおよびハマヒルガオとした。

#### c) 植栽時期

植物の活動が活発となる3月とし、平成10年3月19日および30日に植栽を行った。なお、充填材の充填は先行して平成9年12月18～19日に実施した。これは、選定した充填材および以下に示すポットの用土等の効果を予め確認するためである。

#### d) 植栽方法

植物は苗の状態、生育環境の変化を少なくするため、根に付着していた土は落とさずに植栽した。

#### (2) 植栽用ポット内の構造

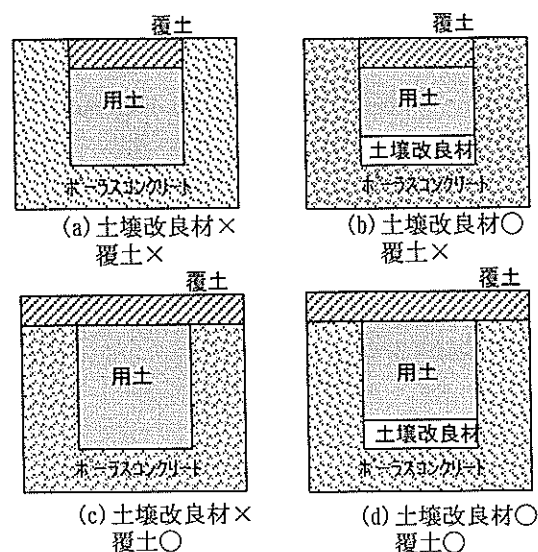
今回、植栽用ポット内は用土だけでなく、その下層に用土流出防止・保水を目的として土壌改良材（黒曜石パーライト）を敷設した。

#### a) 用土

第一次植栽試験においては、川砂単味および川砂とビートモスの1：1混合の2種類を用いたが、夏場に乾燥状態となり、植物の生長不良や枯死につながった。そこで、今回の試験においては、有効土層としての植栽用ポットの用土に、通気性、保水性のある材料として、芙蓉パーライト杜製ビーナスソイルを用いることとした。

#### b) 土壌改良材（黒曜石パーライト）

第一次植栽試験においては、ポットの用土をポーラスコンクリートに直接敷設した。その結果、ポーラスコンクリート内への水分あるいは用土の流出が起こっていたようであった。そこで、今回の試験では、図一7.1のようにポットの底部に保水性に優れ、通気性もあるため根



図一7.1 ポットの構造

腐れの懸念も少ない土壌改良材（黒曜石パーライト：芙蓉パーライト社製ビーナスライト）を敷設することとした。本試験では、土壌改良材の有無の影響を調べるため、土壌改良材無しおよび有り（木本用 5 cm厚、草本用 2 cm厚）の 2通りの条件を設定した。

### (3) 覆土

6. で述べたように、充填材の選定試験において表面を湿布で覆ったケースも試験したところ、乾燥防止に効果のあることが分かった。そこで、同様の効果が期待できる方法として覆土を考え、覆土あり・なしの 2条件を設定した。覆土には良質の土を用い、その厚さは 5cm とした。なお、ポットの用土は軽いことから、覆土なしのケースにおいても用土の押さえとしてポット部分のみ覆土を行うものとした（図-7.1 参照）。また、植栽までの間に覆土等が飛散することを避けるため、全供試体とも寒冷紗で表面を被覆した。

### (4) 充填材

充填材は、6. で決定した木節粘土、珪砂および黒土を混ぜ合わせたものとした。その配合割合（質量）は表-7.2 を基本とし、フローは 35cm 程度を目標とした。

### (5) 肥料

第一次植栽試験と同様のものとした。

### (6) 比較の対象

第一次植栽試験と同様に、供試体付近において上記 4 種類の植物を露地植えた。

### (7) 試験ケース

供試体の配置を図-7.2 に、試験条件の一覧を表-7.3 に示す。

表-7.2 充填材の配合割合（木節粘土を 1）

| 材料 | 木節粘土 | 珪砂  | 黒土  | 水   |
|----|------|-----|-----|-----|
| 割合 | 1    | 4.5 | 1.5 | 5.0 |

注) 黒土は水分を含む

|            |        |         |        |         |
|------------|--------|---------|--------|---------|
|            | 海 側    |         | 陸 側    |         |
|            | 供試体①   |         | 供試体②   |         |
| ・植物の種類     | ハマヒサカキ | マルバアキグミ | ハマヒサカキ | マルバアキグミ |
| (土壌改良材 あり) | 1      | 3       | 5      | 7       |
| (土壌改良材 なし) | 2      | 4       | 6      | 8       |
| ・供試体サイズ    | 木本用    |         | 木本用    |         |
| ・空隙率       | 25%    |         | 25%    |         |
| ・ポットサイズ    | 深型     |         | 深型     |         |
| ・覆土        | ○(有)   |         | ×(無)   |         |
|            | 草本用    |         | 草本用    |         |
|            | 25%    |         | 25%    |         |
|            | 広型     |         | 広型     |         |
|            | ○(有)   |         | ×(無)   |         |

図-7.2 供試体の配置

表-7.3 第二次植栽実験ケース

| 供試体No. | No. | 供試体サイズ | 空隙率(%) | ポットサイズ | 土壌改良材厚さ | 覆土の有無 | 植物の種類   |
|--------|-----|--------|--------|--------|---------|-------|---------|
| ①      | 1   | 木本用    | 25     | 深型     | 5cm     | 有り(○) | ハマヒサカキ  |
|        | 2   |        |        |        | なし      |       | マルバアキグミ |
|        | 3   |        |        |        | 5cm     |       |         |
|        | 4   |        |        |        | なし      |       |         |
| ②      | 5   | 木本用    | 25     | 深型     | 5cm     | 無し(×) | ハマヒサカキ  |
|        | 6   |        |        |        | なし      |       | マルバアキグミ |
|        | 7   |        |        |        | 5cm     |       |         |
|        | 8   |        |        |        | なし      |       |         |
| ③      | 9   | 草本用    | 25     | 広型     | 2cm     | 有り(○) | チガヤ     |
|        | 10  |        |        |        | なし      |       | ハマヒルガオ  |
|        | 11  |        |        |        | 2cm     |       |         |
|        | 12  |        |        |        | なし      |       |         |
| ④      | 13  | 草本用    | 25     | 広型     | 2cm     | 無し(×) | チガヤ     |
|        | 14  |        |        |        | なし      |       | ハマヒルガオ  |
|        | 15  |        |        |        | 2cm     |       |         |
|        | 16  |        |        |        | なし      |       |         |
| 露地植え   | 17  | 露地植え   | —      | —      | —       | —     | ハマヒサカキ  |
|        | 18  |        |        |        |         |       | マルバアキグミ |
|        | 19  |        |        |        |         |       |         |
|        | 20  |        |        |        |         |       | チガヤ     |
|        | 21  |        |        |        |         |       |         |
|        | 22  |        |        |        |         |       | ハマヒルガオ  |
|        | 23  |        |        |        |         |       |         |
|        | 24  |        |        |        |         |       |         |

### 7.3 充填材の充填および植栽

#### (1) 充填材の充填

##### a) 充填材の作製

充填材は、4個の供試体分を6回に分けて作製した。練混ぜは、各材料をバケツに投入し、ハンドミキサにより行った。ここで、充填材の配合は表-7.2を基本としたが、供試体が第一次植栽試験で使用したものであるため、空隙が一部目詰まりしており、表-7.2の配合ではやや充填し難い状況にあった。そこで、充填性を向上させるため、水量を増加させ、表-7.4の配合で練混ぜを行った。この際、材料分離抑制のため黒土の量も増加させた。また、フローは6回目の練混ぜにおいて測定し、37.5cmであった。

##### b) 充填材の充填方法

充填材の充填および用土の投入等は、以下の手順で行った(図-7.1参照)。

- ①練り混ぜた充填材を供試体天端から流し込む
- ②充填材をポット底部のレベルまで充填
- ③ポット内に土壌改良材敷設(土壌改良材有りのケースのみ)
- ④ポット内に用土投入
- ⑤ポットの天端を覆土(覆土無しのケースのみ)
- ⑥供試体天端からやや溢れるまで充填材を再度充填
- ⑦供試体天端全体を覆土(覆土有りのケースのみ)
- ⑧表面を寒冷紗で被覆

##### c) 充填材の充填結果

各供試体へ充填した充填材の質量および充填率を、表-7.5に示す。ここで、充填容積は充填材の質量を単位質量で除して算定した。充填率は、充填容積を供試体の空隙容積で除して算定したものである。また、供試体の空隙容積は、ポット部を除いた植栽用供試体の全体積に目標空隙率25%を乗じて算定した。

表-7.5より、充填率は25~45%である。これは、空隙の目詰まりによる空隙の減少や一部空隙の不連続化によるものと考えられる。また、木本用供試体①および②に比べて草本用供試体③および④の方がやや充填率が高いことが確認されるが、木本用供試体の方が厚いため、目詰まりの影響が生じ易かったためと推定される。一方、目詰まりのほとんどない箇所においては充填材は良く流

表-7.5 充填質量および充填率

| 供試体 | 充填質量(kg) | 単位質量(kg/l) | 充填容積(l) | 供試体空隙(l) | 充填率(%) |
|-----|----------|------------|---------|----------|--------|
| ①   | 77.6     | 1.45       | 53.6    | 172.2    | 31.2   |
| ②   | 62.5     | 1.46       | 42.9    | 172.2    | 24.9   |
| ③   | 67.0     | 1.46       | 45.7    | 100.9    | 45.3   |
| ④   | 46.8     | 1.46       | 32.0    | 100.9    | 31.7   |

注)①・②空隙容積 $= (120^2 \times 50 - 10^2 \times \pi \times 25 \times 4) \times 0.25 = 172,146 \text{ cm}^3$

③・④空隙容積 $= (120^2 \times 30 - 15^2 \times \pi \times 10 \times 4) \times 0.25 = 100,931 \text{ cm}^3$

れ込んだことから、未使用の供試体であれば、充填率は向上するものと考えられる。

#### (2) 植栽作業

##### a) 植栽方法

植栽は、以下の手順で行った。このとき、苗の根に付着している土は落とさずにそのまま植栽した。

- ①覆土および用土を一部(植栽部分のみ)除去
- ②植物を植える
- ③覆土および用土を埋戻し(元肥を所定量混合)
- ④植物を添え木、針金等で固定

##### b) 植栽数量

各ケースとも、ハマヒサカキおよびマルバアキグミは1本ずつ、チガヤは3株ずつ植栽した。また、ハマヒルガオは発芽しておらず地下茎の状態であり、市販されるポットの状態のまま各ケース4ポットずつ植栽した。一方、露地植えについては、ハマヒサカキおよびマルバアキグミは各3本、チガヤは2株、ハマヒルガオは5ポットずつ植栽した。植栽後の状況を写真-7.1に示す。

表-7.4 充填材各材料の計量値(質量単位:kg)

| 材料 | 木節粘土 | 珪砂    | 黒土   | 水     | 合計    |
|----|------|-------|------|-------|-------|
| 質量 | 3.66 | 16.42 | 8.22 | 20.00 | 48.30 |
| 割合 | 1    | 4.5   | 2.3  | 5.5   |       |

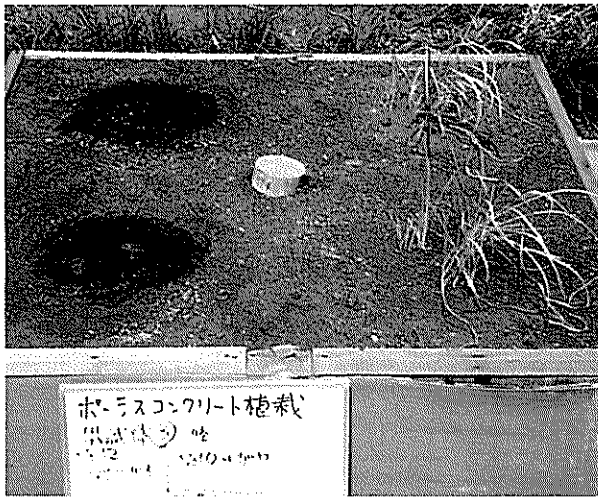
注)黒土は水分を含む



(1) 供試体① (深・覆土) 左: マルバアキグミ、右: ハマビサカキ



(2) 供試体② (深) 左: マルバアキグミ、右: ハマビサカキ



(3) 供試体③ (広・覆土) 左: ハマビサカキ、右: チガヤ



(4) 供試体④ (広) 左: ハマビサカキ、右: チガヤ



(5) 露地植え 左からハマビサカキ・ハマビサカキ・チガヤ・マルバアキグミ

写真-7.1 第二次植栽実験開始時

#### 7.4 植物の管理方法

植物が活着したと判断されるまでは5.3と同様の方法で行った。その後はメンテナンスフリーを目標として、基本的に手は加えないこととした。

##### (1) 灌水

植えつけ後初期（約半年間）は1週間に2度程度、ブロックの下から水が出るまで灌水した。その後（植物が活着した後）はできるだけ自然状態とするよう、特に雨の少ない時期以外は、灌水は行わないようにした。

##### (2) 肥料

追肥として、液肥・置肥の2種類を実施した。

- ・液肥：ハイポネックス500倍希釈液を月2回の割合で、灌水時に実施
- ・置肥：エードボールを土10リットル当たり1回20粒を3カ月に1回実施

##### (3) 除草

雑草も植生の一部であると考え、除草は基本的に行わなかった。しかし、明らかに対象植物の生育を妨げていると判断される時はポット内の土が取り除かれないうに注意して、除草を行った。

#### 7.5 測定項目

ここでは今回の実験における測定項目およびその方法について述べる。

##### (1) 植物の生長度

木本類では定期的に植物の樹高 $h$ および枝張 $w$ （東西・南北の2方向）を測定した。そして植物の生長度は、鉛直方向および水平方向の広がりを含めて評価するため、樹高 $h$ と枝張 $w$ の平均値 $w_0$ を乗じた「 $h \times w_0$ 」で評価するこ

ととした。

草本類はチガヤとハマヒルガオで異なった方法を用いた。チガヤは樹高 $h$ のみで評価を行った。ハマヒルガオは四方八方に這うようにして広がるため評価がしづらいため、寸法を用いず、「繁殖率」で評価することとした。これはポット面積（約700cm<sup>2</sup>）においてハマヒルガオが占有している割合を表すものである。繁殖率が「1」だとハマヒルガオがポット全面を覆っていることを意味し、「0」だと全く存在していないことを意味している。

なお、4.で述べているように、今回の植栽コンクリートにおいては、植物の生死が主要な問題であり、これらの値は今後の充填材の改良点などを検討するための指標と考えている。

##### (2) 温度・湿度

供試体に設けた温度・湿度測定用の穴（図-5.2および写真-5.1参照）に温・湿度計を挿入し、ポーラスコンクリート供試体高さの約半分の位置で温度・湿度を測定した。すなわち木本類では供試体天端から約25cmの深さの位置で、草本類では約15cmの深さの位置で測定を行った。また比較として露地植え・大気中についても測定を行った。

#### 7.6 植物の生長状況および考察

##### (1) 木本類（ハマヒサカキ・マルバアキグミ）

写真-7.2および写真-7.3は植栽して約半年後および約1年半後の木本類の生長状況を撮影したものである。

図-7.3および図-7.4は植物の樹高×枝張（ $h \times w_0$ ）についての変化を示したものである。ハマヒサカキ・マルバアキグミともに乾燥の厳しい冬場、高温となる夏場も



(1) 供試体①（深・覆土）左：マルバアキグミ、右：ハマヒサカキ



(2) 供試体②（深）左：マルバアキグミ、右：ハマヒサカキ

写真-7.2 植栽後半年経過時（木本類）



(1) 供試体① (深・覆土) 左: マルバアキグミ、右: ハマビサカキ



(2) 供試体② (深) 左: マルバアキグミ、右: ハマビサカキ



(3) 露地植え 左: ハマビサカキ、右: マルバアキグミ

写真-7.3 植栽後1年半経過時 (木本類)

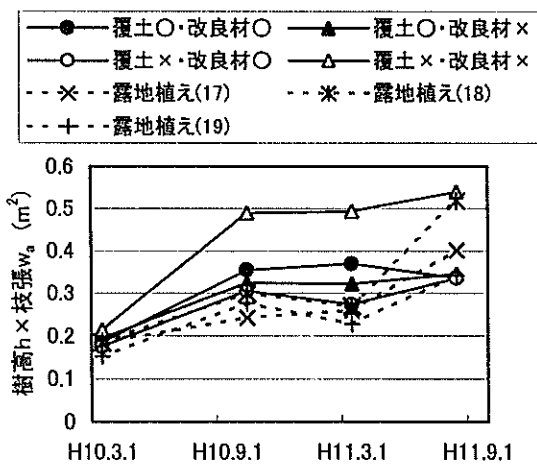


図-7.3 ハマビサカキ成長変化

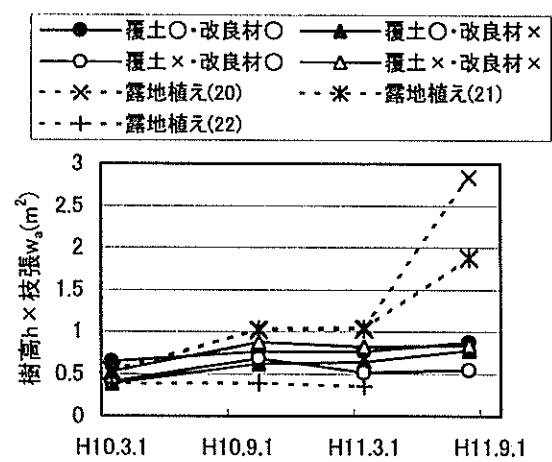


図-7.4 ハルバアキグミ成長変化

生き残って順調に生育しており、充填材など植栽条件の改良の効果が認められる。ハマヒサカキについては、花・実をつけた時期もあった。

露地植えと比較すると、ハマヒサカキについては1年後くらいまではほぼ同等であるが、1年半後になると、露地植えの方が2～3割程度生長の度合いが高くなっている。また、マルバアキグミについては初期の頃から露地植えの方が生長の度合いが高く、時間が経つにつれてその格差は2～3倍程度に開いた。

次に植栽条件の影響について述べる。

#### a) 覆土の影響

途中で覆土が風などの影響により徐々に少なくなったこともあり、特に影響は認められなかった。

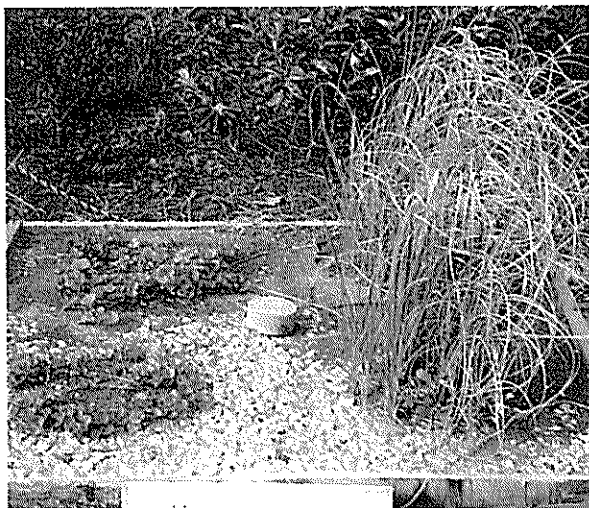
#### b) 土壌改良材の影響

特に影響は認められなかった。

#### (2) 草類 (チガヤ・ハマヒルガオ)

写真-7.4および写真-7.5は植栽して約半年後および約1年半後の草本類の生長状況を撮影したものである。

図-7.5はチガヤの樹高について、図-7.6はハマヒルガオの繁殖率についての変化を示したものである。チガヤ・ハマヒルガオともに灌水を定期的に継続していた半年後までは順調に生育していたが、灌水が無く、また高



(1) 供試体③ (広・覆土) 左: ハマヒルガオ、右: チガヤ



(2) 供試体④ (広) 左: ハマヒルガオ、右: チガヤ

写真-7.4 植栽後半年経過時 (草本類)



(1) 供試体③ (広・覆土) 左: ハマヒルガオ、右: チガヤ



(2) 供試体④ (広) 左: ハマヒルガオ、右: チガヤ

写真-7.5 植栽後1年半経過時 (草本類)

温で雨が少ない時期になると、生育状況はかなり悪い状況となっている。

露地植えについては雑草化してしまい、判別が難しい状況であった。

次に植栽条件の影響について述べる。

#### a) 覆土の影響

半年後の状況において、ハマヒルガオについては覆土の効果が認められる。これはハマヒルガオが地を這うように生育するため、覆土により温度低減・保水効果が発揮されたためと考えられる。チガヤについては特に影響は認められない。

#### b) 土壌改良材の影響

いずれについても特に影響は認められない。

草本類については、第一次植栽実験と比較して、やや生育状況が悪い結果となった。これについては、第一次植栽実験の際は雑草がほとんどポット内に生えなかったのに対し、今回は梅雨などの雨の多い時期においては、

ポット内に雑草がかなり繁殖し、チガヤおよびハマヒルガオの生長を明らかに妨げているような状況が見られた。生育状況が悪い原因として、これらの雑草の影響もあると考える。よって、実際の適用においては、雑草を管理する必要性が生じてくる可能性がある。

### 7.7 供試体中の温度・湿度変化

ここでは供試体中の温度・湿度の季節変動および日時変動について考察を加える。また日時変動においては、充填材による保水性の改善効果を確認するため、第一次植栽供試体の値との比較も行う。

#### (1) 季節変動

図一7.7に温度、図一7.8に湿度の季節変動を示す。

##### a) 温度

大気中よりも低く、露地植えと同程度となっており、温度上昇は抑制されていると言える。また覆土の有無の影響は特に認められなかった。

木本・草本用供試体による影響については、木本用供試体(①②)の方が低くなる傾向にあった。木本用供試体(①②)は木本類が繁っており、測定部分が若干日陰となっていることが主な原因と思われる。これは当然の結果ではあるが、植物が育つことにより日陰ができ、より植物が生育しやすい環境を生み出しているということもできる。

##### b) 湿度

大気中よりも高く、露地植えと同程度となっており、保水性は良好に確保されていると言える。また覆土の有無・供試体による影響については、特に認められなかった。

#### (2) 日時変動

ここでは温度・湿度の日時変動において、第一次植栽実験供試体(以下「一次供試体」と)との比較を行う。

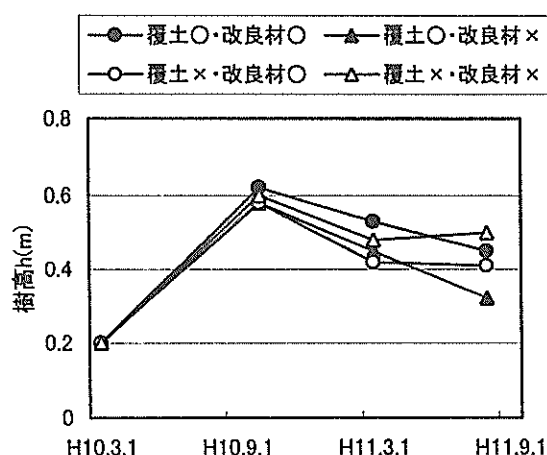
図一7.9に温度、図一7.10に湿度の日時変動を示す。

##### a) 温度

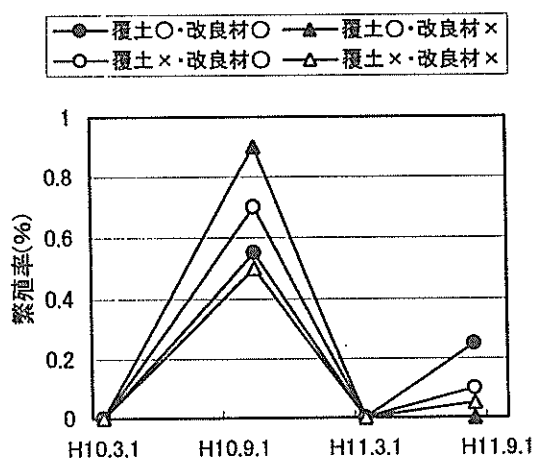
一次供試体の木本類用供試体が他と比較してかなり高くなっている。それに対し、今回の供試体の方は、概ね大気中の温度を下回る傾向にある。

##### b) 湿度

今回の供試体が外の影響をあまり受けず、一定値を保っているのに対し、一次供試体は大気の影響を顕著に受けている結果となっている。これは、今回の供試体が保水能力を十分有しているのに対し、一次供試体は保水性が劣るということであり、保水性については充填材の影響がはっきりと現れているということができる。



図一7.5 チガヤ成長変化



図一7.6 ハマヒルガオ成長変化

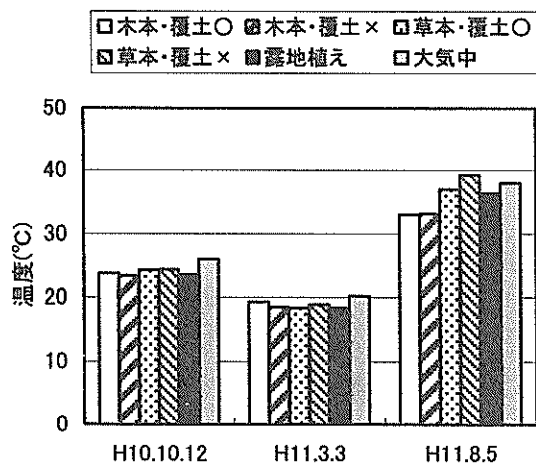


図-7.7 温度の季節変動

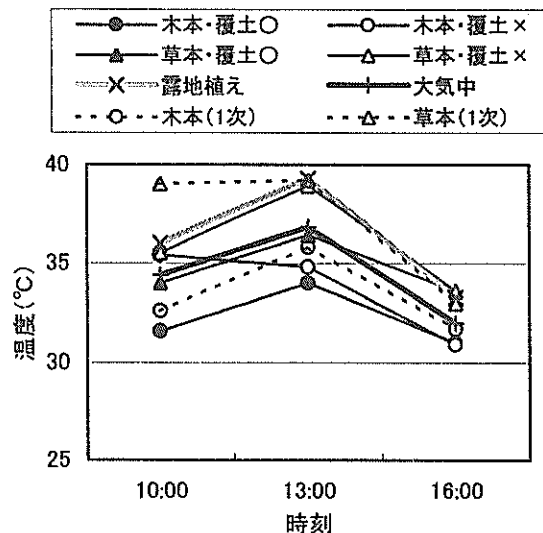


図-7.9 温度の日時変動

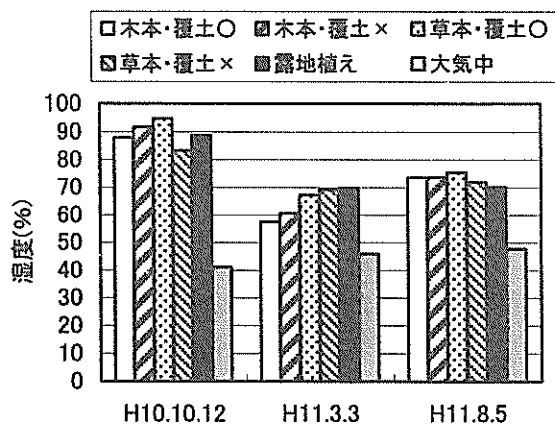


図-7.8 湿度の季節変動

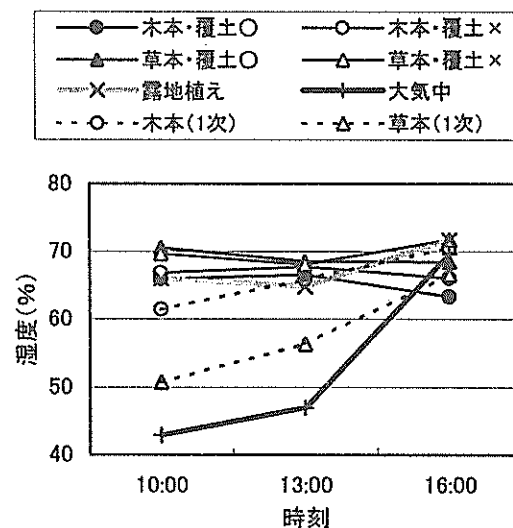


図-7.10 湿度の日時変動

## 7.8 地中部（根）の生長状況

以上のような植物の生育状況に対し、最終的な結論を得るため、ポーラスコンクリートをブレイカーにより徐々に解体し、地中部（根）の生長状況の観察を行う。そして、ポーラスコンクリート中の植物と露地植えの植物との生育状況の比較検討を行う。

### (1) 地中部（根）の生長状況の評価方法

当実験では、ポーラスコンクリートを基盤とした場合に、植物が活着出来るかどうか重要なポイントとして考えている。このため、根および地上部の生長状況の評価する方法として、簡便に次のような視点で行うこととした。当初、根の重さについても測定する予定であったが、木本類については根から完全に用土を除去することができず、また、草本類については他の植物が混生しており、根の部分を取り出すことができなかったため、計量を断念した。

#### a) 地上部

供試体解体後の植物の幹直径・重さについて、露地植えとポーラスコンクリートを比較する。

#### b) 地中部

根毛量・根の張り方・根の太さ・細根（毛根）の出方などについて露地植えとポーラスコンクリートを比較する。

### (2) 地上部および地下部の観察結果

供試体解体時に、上記のような視点で調べた結果を表-7.6に示す。また、根の生長状況を写真-7.6に示す。また、今回解体を行ったのは、木本用供試体①（覆土有り）と草本用供試体③（覆土有り）である。

供試体解体による調査結果から、ポーラスコンクリートを植生基盤とすることに対して、次のような知見が得

られた。

a) ハマヒサカキ (木本類)

地上部においてその生長状況をその重量で比較すると、露地植えの方がポーラスコンクリート中のものより2～3割生育状況が良好であった。一方、地下部(根)に関してはほぼ同様な生長状況であった。また、一般に関東ローム層ではハマヒサカキは、樹齢10年で根元直径が2cm、樹高1.5m、根系の最大深さ35cmと報告されている<sup>9)</sup>。今回の幹直径においてはこの値とほぼ同様であり、ポーラスコンクリートに植栽したハマヒサカキの生長状況は非常に良好であったといえる。

また、今回のポーラスコンクリート中での根の中には、側方の空隙へ10cm程度伸長しているものもあった。ハマヒサカキにおいては、地上部および地下部においてもほぼ露地植えと同様な生長状況であり、ポーラスコンクリートが十分に植生基盤として機能したといえる。

b) マルバアキグミ (木本類)

地上部において、露地植えはポーラスコンクリート中のものと比較して、重量において約8倍、幹直径において2倍程度に生長しており、大きく生長状況が異なる結果となった。この差が生じた要因としては以下の2点が考えられる。

① ポーラスコンクリートの連続空隙の大きさ

ポーラスコンクリート中のマルバアキグミは側方および下方の空隙に最大4mm程度の径の根を伸張させており、ポーラスコンクリートが植生基盤として機能していることが確認された。一方、露地植えの場合の主根の直径は1cmにも及んでいた。すなわち、露地植えと同等に生長

するためには、直径1cmに及ぶ根をポーラスコンクリートの中に進入させねばならないが、それは非常に困難である。このことは適用する植物に限界があることを意味し、植物を選定する際にはポーラスコンクリートの空隙の大きさと植物の根の生長度を比較検討する必要がある。

② ポーラスコンクリート中の充填材の量

表一7.5において今回の充填材はポーラスコンクリートの目標空隙率25%の半分程度しか充填されておらず、すなわち充填材が存在しているのはポーラスコンクリート全体積の約1～2割程度と推測される。すなわち、ポーラスコンクリートにおける生育可能な範囲は露地植えの場合の約1～2割程度ということになる。この植生基盤の絶対値の差が生長度合いの差として現れているものと考えられる。

c) 草本類(チガヤ・ハマヒルガオ)

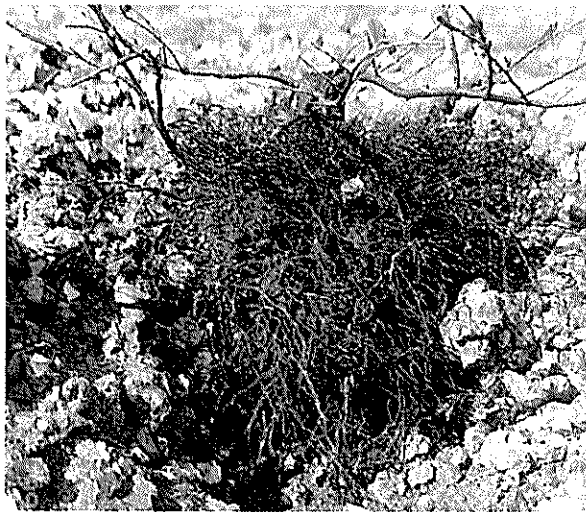
露地植えは雑草化して判別が難しい状況であったため、ポーラスコンクリート中の植物についてのみ考察する。

チガヤ・ハマヒルガオのいずれについても、直径2mmの主根や、細根がポーラスコンクリートの側面に向かって伸長していることが確認された。このことは、ポーラスコンクリートの植生基盤としての有効性を示すものである。

ただし、直径2mmの主根が鉢の中の外周をとぐるを巻くように伸張し、かつ瘤状に屈曲した箇所が多く見られ、根をポーラスコンクリートの空隙へ伸張させることが容易ではなかったことが確認された。

表一7.6 地上部と地中部の成長状況のまとめ

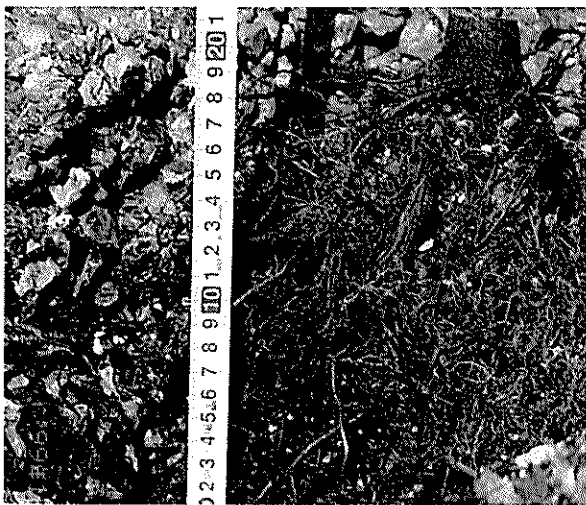
|     |     |         | ポーラスコンクリート                                        |                        | 露地植え                      |
|-----|-----|---------|---------------------------------------------------|------------------------|---------------------------|
|     |     |         | 土壌改良材有り                                           | 土壌改良材無し                |                           |
| 地上部 | 木本類 | ハマヒサカキ  | 重量 259.0g<br>幹直径 2.0cm                            | 重量 214.4g<br>幹直径 1.9cm | 重量 338.7g<br>幹直径 1.2cm    |
|     |     | マルバアキグミ | 重量 575.7g<br>幹直径 2.5cm                            | 重量 605.2g<br>幹直径 3.5cm | 重量 4611.2g<br>幹直径 4.8cm   |
|     | 草本類 | チガヤ     | —                                                 | —                      | 雑草化し、判断が困難                |
|     |     | ハマヒルガオ  |                                                   |                        |                           |
| 地下部 | 木本類 | ハマヒサカキ  | ポット側方の空隙へ10cm程度根が伸張しているものが見られた。また下方への伸張はない。       |                        | ポーラスコンクリート中のものとほぼ同様な成長状況。 |
|     |     | マルバアキグミ | ポット側方・下方の空隙へ根が伸張していた。下方へ伸張している根の直径が4mmに及ぶものも見られた。 |                        | 直径1cmに及ぶ根が四方に伸張           |
|     | 草本類 | チガヤ     | 直径2mmの根が側方伸張                                      | 他の植物が混生し、判断困難          | 雑草化し、判断が困難                |
|     |     | ハマヒルガオ  | 直径2mmの主根がポット内を屈曲しながら回り込み、側方へ伸張                    | 側方・下方ともに伸張せず           | 雑草化し、判断が困難                |



(1)No. 1 ハマビサカキ (土壌改良材有り) : 取り出し前



(2)No. 2 ハマビサカキ (土壌改良材無し) : 取り出し前



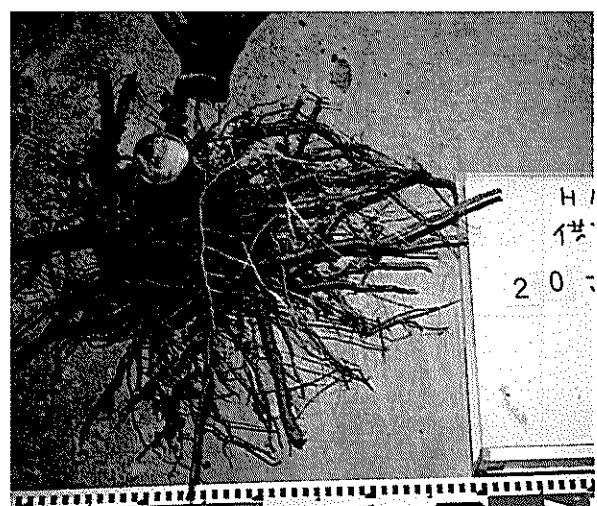
(3)No. 3 マルバキアケミ (土壌改良材有り) : 取り出し前



(4)No. 4 マルバキアケミ (土壌改良材無し) : 取り出し前



(5)No. 5 ハマビサカキ (露地植え) : 取り出し後



(6)No. 6 マルバキアケミ (露地植え) : 取り出し後

写真-7.6 植栽後1年半経過時の根の成長状況



(7)No. 7 ハマヒルガオ (土壌改良材有り) : 取り出し前  
写真-7.6 植栽後1年半経過時の根の成長状況

#### 7.9 ポーラスコンクリート中の空隙の連続性

今回充填材がポーラスコンクリート中の空隙の半分程度しか充填できなかった結果(表-7.5参照)について、再利用した一次供試体が目詰まりを起こしていたためと考えていた。しかし、ポーラスコンクリートの解体作業の際に、空隙の連続性が十分に確保されていないことが確認された。目視で判断する限り、実際の空隙率は10~20%程度であった。

ポーラスコンクリートの空隙の連続性を確保し、充填材がしっかりと空隙中に充填されることで、より良好な植生基盤を生み出すことができ、植物のより一層の生長が期待できると思われる。

#### 7.10 第二次植栽実験まとめ

ポーラスコンクリートに充填材を施した第二次植栽実験の結果をまとめると次のようになる。

##### (1)木本類

ハマヒサカキ・マルバアキグミともに乾燥の厳しい冬場、高温となる夏場も生き残り、さらに根もしっかりと活着しており、現状の植栽条件で十分植栽基盤として機能することが確認できた。また、マルバアキグミにおいては、露地植えのものに比べると生育状況はやや劣っているが、これは植物の根がポーラスコンクリートの空隙より大きくは生長できないため、生長の限界が存在していることを意味している。すなわち、植栽を行う植物の種類は、ポーラスコンクリートの空隙の大きさと同程度以下の径を有する樹種を選定する必要がある。

##### (2)草本類

チガヤ・ハマヒルガオにいずれも、直径2mmの主根か

ら細根がポーラスコンクリートの側面に向かって伸長しているのが確認された。したがって、ポーラスコンクリートの植生基盤としての有効性が示されたといえる。

しかし、チガヤ・ハマヒルガオともに灌水を定期的に継続していた半年後までは順調に生育していたが、灌水を行わず、高温で雨が少ない時期になると、生育状況はかなり悪い状況となった。これについては、雑草が周囲に繁殖してしまったことがその要因の1つと考えられ、実際の現場でポーラスコンクリートに草本類を適用する際、場合によっては雑草の管理が必要とされる可能性がある。

#### 7.11 今後の改良点

以上のように、当ポーラスコンクリートの植生基盤としての有効性が示されたが、さらに植生基盤としての改良を行う場合の留意点について簡単に述べる。

植物の生育は、一般に固相、液相、気相がそれぞれ1/3であることが良いとされているが、光と降雨を除けば、やはり土壤の物性に大きく左右されるものと考えられる。今回の実験であれば充填材の物理的特性である。したがって、その改良点のパラメータとしては、次の検討項目が考え得る<sup>10)</sup>。

##### (1)土壌硬度

土壌硬度の増大は、根の伸長に悪影響を及ぼす。

##### (2)粗間隙

粗間隙は、土壤の透水性や通気性と密接な相関があり、土中に10%以上必要とされている。

##### (3)気相率

気相率は、土壤中の気体の占める容積割合である。こ

の値は同一の土壌でも降雨や乾燥により増減するが、一般的に気相率が15%以下になると土壌中の空気が不足して植物の根の伸長に影響が現れ、10%以下になると根の伸長は止まり枯死するものが多いと言われている。

#### (4) 透水係数

透水係数は土壌中の水の移動の難易を表す。また降雨後の重力水の排水性の良否と強い関係がある。少なくとも $10^{-4}$ cm/sec以上であることが望ましく、 $10^{-6}$ cm/sec以下では極端に排水性が悪くなり、根腐れの原因になる。

#### (5) 土壌酸度 (pH)

土壌酸度は、土壌溶液の水素イオン濃度を表す。これは、根に対しての直接的な影響を与えるとともに、土壌養分の溶解度を支配しているため、土壌の養分供給量を介して植物に対して間接的にも影響を与えるものである。日本に生育する大部分の緑化植物はpH5.0~6.8の範囲で良好な生育を示す。したがって、コンクリートから溶出されるアルカリには注意が必要である。

#### (6) 腐植

腐植は、土壌の黒味の成分であり、肥沃度の目安ともされているものである。土壌として優良と判定される場所の腐植含量は、農林水産省の基準では5%以上とされている。植栽基盤としては、少なくとも3%以上であることが望まれる。

#### (7) 全窒素

窒素は、植物の三大栄養素の一つで、主に、アンモニア態、硝酸態の形で吸収される。土壌中の窒素の大部分は有機態で存在していて植物は直接利用することはできない。しかしこれは微生物の活動によってアンモニア態窒素や硝酸態窒素に分解されていくため、全窒素は土壌の無機態窒素の供給能力を表す指標の一つと考えられる。多くの緑化植物は、全窒素が0.12%以上含まれていると正常な生育を示し、それ以下では生育が悪化する傾向がある。植生基盤としての土壌には、少なくとも全窒素含量が0.1%以上であることが望まれる。

以上のような着眼点で、さらに充填材の改良を行えば、植生の活着率はさらに向上され、種々の植生の導入が可能になって行くものと考ええる。

また、コンクリートであるがゆえに必然的に起こる温度上昇は、根の伸長に悪影響を及ぼす。したがって、ポーラスコンクリートの表面温度を低減させれば、内部の温度上昇およびそれに伴う水分蒸発を押さえることが可能となる。したがって、表面を被覆する材料ならびにその厚さ等もポーラスコンクリートの改善の着眼点になると思われる。

## 8. 植栽コンクリートの適用範囲

ここでは、植栽用ポーラスコンクリートの活用場所について考察する。具体的には、以下のような順序で検討を進めていくことにより適用範囲を次第に絞り込むことにする。

### (1) ポーラスコンクリート自体の特性

ポーラスコンクリート自体の特性としては以下のことが挙げられる。

- ・ 透水性が高く、コンクリートの中を水が通水する。そのため、背面からあるいは背面への水の透水、地下水の涵養等が可能である。
- ・ 圧縮強度は配合上の工夫をすることにより、通常のコンクリートのレベルに近づけることが可能である。
- ・ 空隙があるので、土壌の混入・生物の侵入が容易であり、植物や微生物が生育・生息しやすい環境創出、微生物等による水質浄化、魚類・甲殻類が生息する空間の創出などが可能である。

### (2) 植生基盤としての活用効果の認識

上記特徴を有するポーラスコンクリートを、植生基盤として活用することを目的とした今回の実験において、植物は良好に生長し、その根はポーラスコンクリート中の空隙に活着していることが確認された。したがって、ポーラスコンクリート中に充填材を充填し、そして植生基盤として活用することは、十分に可能と判断される。

### (3) ポットを有するポーラスコンクリートの特性

法面に適用する場合、降雨時などにおいてポーラスコンクリート表面での水の流下流速が早いと、ポット部分の土が侵食されやすく、植生基盤が流失する危険性を有する。しかし、このような土の流動が起こる前に、根がポーラスコンクリート中に伸張し、その根の緊縛力で十分に土を抱きかかえれば、これらの懸念は薄れるものと想定される。

### (4) ポーラスコンクリートの設置箇所

ポーラスコンクリートを植生基盤として活用するにあたって、上記のような背景を考慮し、海洋環境において適用可能と考えられるポーラスコンクリートの設置箇所を巨視的な観点で列挙すると次の通りである。

#### a) 物理的観点

法面に適用した場合、植生基盤が流失する危険性を有するため、平坦地利用が望まれる。また、波力等を直接受けるところにおいても、土の流亡があるため避けることが望まれる。

#### b) 景観的観点

突堤等の人工物の景観的修景が考えられる。但し、人

表-8.1 港湾における具体的活用例

| 適用箇所    | 適用例                                            | 必要とされる耐久性                                    |
|---------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 突堤平坦部   | 植栽の面積を小さくして景観上に溶け込ませる。<br>(例: 列植により誘導的機能をもたせる) | 高い耐久性は必要なし<br>(安定した基礎の上に存在し、かつ上載荷重は人のみであるため) |
| 突堤先端    | 突堤先端部に低草が茂っている空間を創出<br>(例: 沖縄・万座毛)             | 〃                                            |
| 護岸エプロン部 | 広い連続した面で低層の草を繁茂させ、緑にあふれた空間を創出                  | 〃                                            |
| 擬岩      | 擬岩自体をポーラスコンクリートとし、植物が自生する本物の岩に見せる。             | 岩の形を保持し続けることのできる高い耐久性が必要とされる。                |
| 消波ブロック  | 消波ブロック自体をポーラスコンクリートとし、藻や海藻類等の生物の生育基盤とする。       | 波浪に耐え得る高い耐久性・重量が必要とされる。                      |

工物と認識される突堤等の港湾施設において、むやみに樹木等違和感のあるものを入れることは、景観上に混乱を招く恐れがあり、適用の際には十分な配慮を要する。

具体的には、岩場に若干の草が生えているように、小型の木本類や草本類の導入が適当と考えられる。

#### c) 生態的観点

生態的に植生基盤が望まれる箇所において、植栽を施すことは、生息する生物にとってだけでなく、自然が周りから徐々に失われつつある現代社会にとっても非常に重要であると考ええる。

#### d) その他

植栽を施すことにより、コンクリート表面温度が低減されれば、より快適な空間を創造することが可能である。

こうした観点をふまえ、表-8.1に港湾における具体的活用例を示す。

## 9. 結論

本論文ではまずポーラスコンクリートの配合選定実験を行った。そして、その後実際にポーラスコンクリートを植生基盤として草本類および木本類を植栽し、植栽コンクリートの海洋環境下への適用性の検討を行った。

まず、ポーラスコンクリートの配合選定実験の結果得られた知見を以下に示す。

(1) ポーラスコンクリートの空隙率はB/G=10~20%程度であれば、空隙率はおおむね今回の目標である15~35%

の範囲内となる。また、空隙率は粗骨材の粒度により大きく左右される。

(2) ポーラスコンクリートの圧縮強度はW/Bの低下およびB/Gの増加とともに増加する。そして今回の目標値(19.6 N/mm<sup>2</sup>)を満たしたものは、W/B=25%・B/G=20%の配合で、混和材無添加および高炉スラグ微粉末を添加した場合の2つであった。

(3) 透水係数と空隙率は正の相関を示している。

(4) アルカリ溶出量に関しては、混和材として高炉スラグ微粉末を添加した場合に、相対的にpHが低下した。

次に植栽実験(第一次・第二次)の結果およびその過程で実施したポーラスコンクリートの空隙を埋める充填材の検討結果より得られた知見を以下に示す。

(5) ポーラスコンクリートの空隙を埋める充填材は植栽を行う際には非常に重要である。ポーラスコンクリートの充填材としては保水性・ひび割れ抵抗性などが必要とされ、今回の検討において、粒状材料である珪砂、保水能力に優れる木節粘土および黒土の3種類を適切な配合で混ぜ合わせたものが最適であった。

(6) 上記のものをものをポーラスコンクリートの充填材として使用すれば、ポーラスコンクリートを植物(木本類および草本類)の植生基盤として活用できることが確認された。

(7) 本植栽実験において、木本類のマルバアキグミは、露地植えのものに比べると生育状況がやや劣る結果と

なった。これは植物の根がポーラスコンクリートの空隙より大きくは生長できないため、生長の限界が存在していることを意味している。すなわち、植栽される植物の種類は、ポーラスコンクリートの空隙の大きさにおいて、根が生育できる樹種を選ぶことが重要と考えられる。

- (8)草本類においては、雑草が周囲に繁殖し、その結果草本類の生育状況が悪化する場合があった。よって、実際の現場でポーラスコンクリートに草本類を適用する際に、場合によっては雑草処理の管理が必要とされる可能性がある。

(1999年11月30日受付)

## 謝辞

本稿は(株)テトラとの共同研究の成果を取りまとめたものである。研究開始時においては元(株)テトラ谷本正和氏に多大なるご尽力をいただきました。またポーラスコンクリート作製に当たっては、(株)電気化学工業の真下昌章氏に多大なるご尽力をいただきました。また植物の観察においては元材料研究室非常勤職員野村年世氏、中込みどり氏、元材料研究室研修生伊藤正憲氏(現(株)東急建設)、現材料研究室研修生早川健司氏(現(株)東急建設)、現材料研究室客員研究員渡辺弘子氏、広島大学の萩野和憲氏(平成10年度夏季実習生)、九州工業大学の庫本知香氏(平成11年度夏季実習生)、東京都立大学大学院博士過程の三栖幸彦氏に多大なるご尽力をいただきました。また本論文の作成に当たっては、現材料研究室長濱田秀則氏、現構造部主任研究官阿部正美氏、現材料研究室非常勤職

員五十嵐麻子氏に貴重なご助言および多大なるご尽力をいただきました。これらの多くの方々に対して、ここに厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 柳橋邦夫ほか：緑化コンクリートに関する研究および施工、コンクリート工学年次論文報告集, vol. 16, No. 1, 1994
- 2) 玉井元治ほか：緑化コンクリートの研究, セメント・コンクリート論文集, No. 48, 1994
- 3) 玉井元治・河合 章ほか：ポーラスコンクリートへの海洋生物付着に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No. 44, 1990
- 4) 片倉徳男・金子文夫ほか：付着生物による海水浄化に関する研究, 大成技術研究所報, No. 22, 1989
- 5) 福手勤ほか：海洋環境下における植栽を目的としたポーラスコンクリートの材料特性, 港湾技研資料, No. 819, 1995
- 6) 地盤工学会：土質試験の方法と解説, 1990
- 7) 三好洋等編著：土壌肥料用語事典, 社団法人農山漁村文化協会, 1983
- 8) 山内豊聡等監訳：新編土質工学の基礎, 鹿島出版会, 1978
- 9) 荻住 昇著：樹木根系図説, 誠文堂新光社
- 10) 住宅・都市整備公団・日本土壌検定(株)：植栽工事の品質管理の基準作成に関する研究(その2)報告, 1985

港湾技研資料 No. 953

2000. 3

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 有限会社つばさ印刷技研

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan

Copyright © (2000) by P.H.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。