

樹木対応型壁面緑化システムの開発

バーティカルフォレスト[®]

佐久間 護

建物の外壁壁面上に安全に植物を植えると同時に、植物を健全に育てることに関心が高まっている。筆者らは従来適用が困難とされた樹木を建物壁面に植栽するために、固定ボード、水分保持と根張りのための不織布を用いた植栽基盤、断熱材、外壁面のためのガラス繊維補強セメント（GRC）の4層からなる緑化パネルを用いた工法を開発した。建築物の外壁に適用するため安全性及び耐久性は特に重要である。FEM解析の結果から、GRCパネル全体に設定した風荷重（300 kg/m²）が作用しても壊れない強度であることを確認した。本システムは構造的な安全性と樹木の健全性に関する機能を保有していることが示唆された。

キーワード：壁面緑化、緑化パネル、耐久性、安全性、樹木、生育特性

1. はじめに

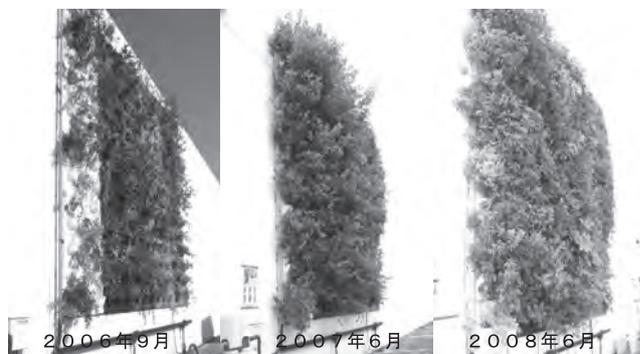
壁面緑化への取り組みは1999年5月に調査研究でスタートした。当時壁面緑化の成功事例はほとんどがツタ植物によるもので、造園植物を用いた恒久的な壁面緑化は皆無であった。壁面の緑化では屋上とは異なる様々な植物育成上の困難がある。施工面に傾斜が付くと植物体を維持する植栽基盤が風雨により流失するため、生育の維持が困難な場合が多く見られる。また、垂直面に近づくほど降雨を利用できなくなるため灌水が必要となり、傾斜の厳しい植栽基盤に均質に水分供給することは難しい課題だった。これらの理由からツタ植物以外での壁面緑化はなかなか現れなかった。

壁面緑化は2001年4月施行の東京都条例による建物緑化の義務化や2005年の愛知万博「バイオラング」の展示などで、社会的に急速に関心が高まった。以来屋上緑化の普及とともに壁面緑化の事例も増えている。建物の緑化は環境配慮技術の一つとしても重視され、いまでは緑化提案の無いプロジェクトはないほどである。壁面緑化は屋上緑化と異なり多くの人目に触れるので、美しさと同時に安全性と耐久性が必要となる。

建物の外壁、土木構造物の壁面等に樹木を用いて緑化する、「バーティカルフォレスト」（以下「本システム」という）（商標登録第5378567号）2010年12月取得は、植物と植栽パネルが一体化したものを壁面に取り付けの工法である。適用する植物は、平地で用い

る植物は全て植栽可能である。特に長期間にわたり観賞価値を有する樹木類の植栽で壁面緑化の永続性を確保している点が従来の壁面緑化技術に見られない大きな特徴である。

本システムは樹木を本格的に壁面緑化に取り入れた



写真—1 2年間の生育状況



写真—2 満開のヒラドツツジ

従来に見られない緑化工法である。年間を通して多様な樹木が健全に育成し、意匠性の高い緑化景観を維持すると共に、緑化の目的の1つとされるヒートアイランド対策にも貢献することを狙いとしたものである。写真-1に植栽樹木の生育状況を、写真-2に満開のヒラドツツジを示す。

2. 本システムの構成と特徴

本システムの主な構成は、植物を生育させる緑化パネルと自動灌水装置及び植栽樹木である。緑化パネルは、図-1に示す四層から成る。植栽ポット付きの表面パネルは、ガラス繊維補強セメント (GRC) 製で、地震や強風でも壊れない強度があり、断熱材は、植物の根の温度環境変化を和らげる。不織布は、上部から来る灌水の養・水分を適度に保持して根に供給する。

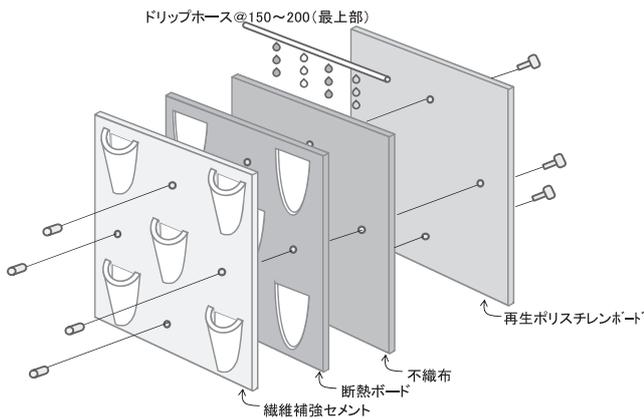


図-1 緑化パネルの構成

根は不織布内を上下左右に伸張してパネル間で連続するため、植物を健全に大きく生育させる。リサイクルボードでサンドイッチしてパネルは一体化する。標準の大きさは600×900×70である(図-2)。植栽された状態で重量は約45kg/枚である。施工は、RC構造建物に乾式工法で取り付ける。灌水は最上部に設置したドリッホースによる自動灌水で、灌水量や灌水頻度は制御盤で年間設定する。施肥は液体肥料を灌水タンク内で希釈し適宜供給する。樹木の選定により、自然風、花壇風、生け垣風などのバリエーションができる。写真-3は樹木に営巣したキジバトのヒナの様子である。鳥や蝶など多くの生き物が集まってくる。



写真-3 クスノキで生育するキジバトの雛

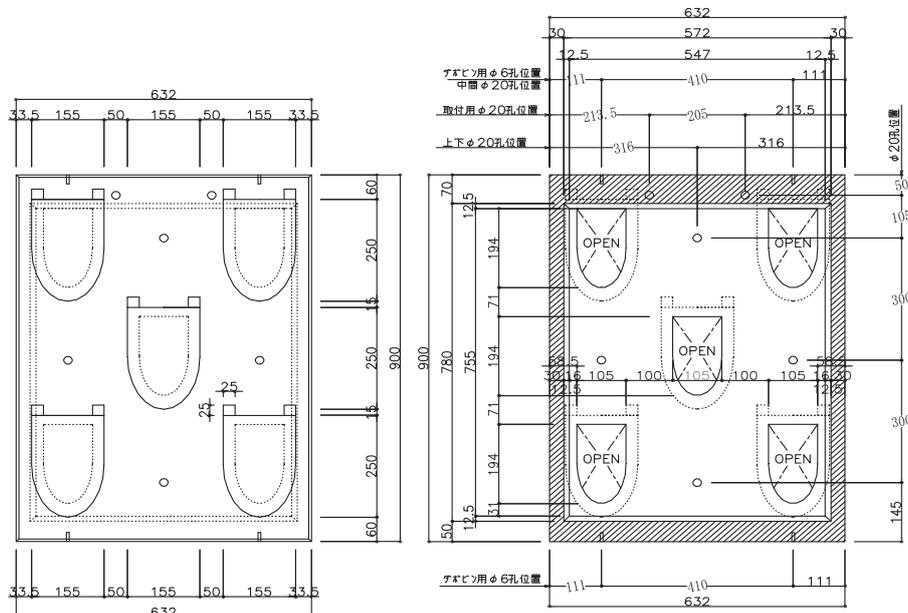


図-2 GRC 緑化パネル

3. 本システムの構造検討および不燃性試験

外壁からものを落としてはいけない、燃えるものを外壁につけてはいけない。これは建設会社の常識であり、本システムも同様の要求品質の確保が求められた。

以下に構造検討の結果と不燃性試験の結果を示す。

(1) 構造検討

壁面緑化の適用範囲を高所作業車の一般的な高さ12mを想定し、その時のGRC植栽パネルに自重および風荷重が作用した際の構造検討をFEM解析を行った。解析の結果、パネル全体に1,000 N/m²の分布荷重が作用したとき、パネル全体は面外に曲げ変形を生じ、パネル前面応力が0.5 N/mm²程度になること、支持部およびポット・パネル取り付け部で応力集中により1.8 N/mm²程度の応力が発生することがわかった。パネルの短期許容曲げ応力度が2.3 N/mm²であることから、1,256 N/m²の風荷重に対してパネルに発生する最大応力は短期曲げ許容応力度以内になることがわかった。

GRCの材料特性は次の通りである。E(ヤング係数) = 8.55×10^4 (N/mm²)、G(せん断弾性係数) = 3.56×10^4 (N/mm²)、 ρ (質量密度) = 1.97×10^{-6} kg/mm²

(2) 解析結果

FEM解析により得られたGRC緑化パネル表面のMean Stress分布を図-3に示す。緑化パネル全体では面外曲げ挙動が支配的で、局所的に支持部およびポットとパネルの取り付け部分で応力が集中していることがわかる。緑化パネルおよび樹木・不織布等の重量のみを作用させたときのパネル表面のMean Stress分布を図-4に示す。図-4より自重によりパネルに発生する応力の全体への影響は小さいことがわかる。

(3) 不燃性試験

現在、法律的には壁面緑化は不燃の認定は必要とされていないが、安全性を確保するため自主判断で壁面緑化パネルの不燃性を確認する実験を行った。GRC緑化パネルの不燃性能を確認する試験方法としては、不燃性試験と発熱性試験の二つの方法があるが、ここでは発熱性試験により性能を確認した(写真-4)。

試験体は、GRCパネル、GRCパネル(塗装あり)、GRCパネル(本仕様)の3種類とし、いずれの試験体についても3回試験を行った。試験は、財団法人建材試験センターの防耐火性能試験・評価業務方法書に従って行った。判定基準は、財団法人建材試験センター

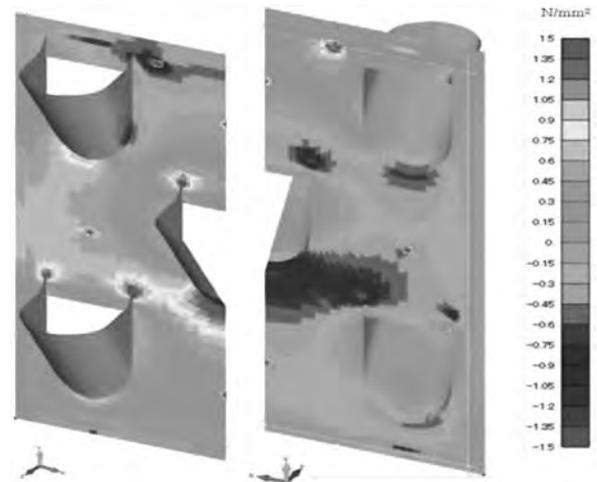


図-3 Mean Stress 分布 (全体)

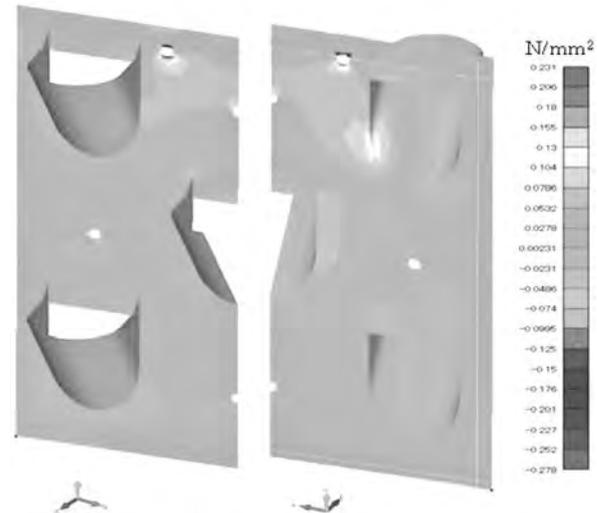


図-4 Mean Stress 分布 (自重のみ作用)



写真-4 発熱性試験 (上) と試験後のサンプル (下)

表一 試験体一覧

No.	供試体	(1)総発熱量 (MJ/m ²)		(2)亀裂、穴		(3)最大発熱量 (kW/m ²)			判定
		値	OK	なし	OK	値	OK	OK	
1	GRCパネル	0.40 ≤ 8	OK	なし	OK	6.27 ≤ 200	OK	OK	
2		1.55 ≤ 8	OK	なし	OK	7.96 ≤ 200	OK	OK	
3		2.28 ≤ 8	OK	なし	OK	6.14 ≤ 200	OK	OK	
1	GRCパネル (塗装あり)	2.67 ≤ 8	OK	なし	OK	15.96 ≤ 200	OK	OK	
2		3.39 ≤ 8	OK	なし	OK	6.19 ≤ 200	OK	OK	
3		2.79 ≤ 8	OK	なし	OK	18.29 ≤ 200	OK	OK	
1	GRCパネル (本仕様)	2.18 ≤ 8	OK	なし	OK	8.78 ≤ 200	OK	OK	
2		2.99 ≤ 8	OK	なし	OK	9.23 ≤ 200	OK	OK	
3		2.47 ≤ 8	OK	なし	OK	12.27 ≤ 200	OK	OK	

の防耐火性能試験・評価業務方法書に従った。試験結果は表一に示す通り、GRCパネル、GRCパネル（塗装あり）、GRCパネル（本仕様）のいずれの試験体も不燃材料と同等の性能を有することを確認した。

4. 本システムの適用事例

(1) 味の素スタジアム外壁への適用（写真一5）

東京都「味の素スタジアム」改修工事に適用された事例について紹介する。「味の素スタジアム」は平成25年度開催の東京国体のメイン会場として、第1種公認陸上競技場とするために改修を行った。設計のコンセプトは、「武蔵野の森」にふさわしい緑の再現とそれに囲まれた美しい緑の陸上競技場である。壁面緑化の植栽は武蔵野にふさわしい在来種約300種の中から選定されている。樹木を用いることで、年を経るごとにより良く生育する「森のような景観」を形成する狙いがある。

様々な形状のスタジアムの窓や開口部を既存のまま残すという設計コンセプトを実現するため、5つのパターンの植栽用パネルを特別に製作し、パズルのように隙間なく配置した。樹木は「味の素スタジアム」が位置する武蔵野に自生しているシラカシ、シロダモ、ヒイラギなど、今後形成される予定の“武蔵野の森”



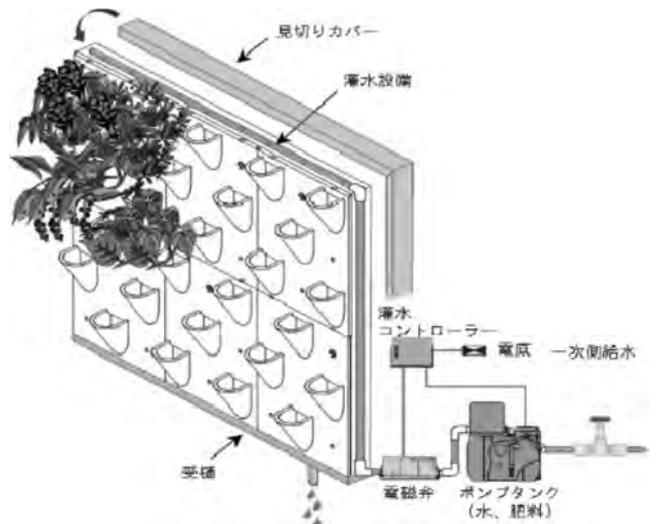
写真一5 2012年7月現況写真

にふさわしい32種類の樹木を選定した。一年を通して緑を確保するために、常緑樹を多くし残りは彩を加える季節ごとの花木や紅葉樹等の落葉樹とした。32種の樹木それぞれが最も生育しやすい環境を築くために、どの位置にどの樹木を植えるべきか最適な植栽レイアウトを検討した。

緑化パネルの面積は約1,450m²であるが、枝葉の拡がり考慮した実質的な緑化面積は2,000m²になる。緑化工事は施工期間2011年8月28日～11月4日であった。

(2) 本システムの構成

適用した緑化システムの模式図を図一5に示す。緑化パネルの標準の大きさは600×900×70mmとした。植栽された状態で重量は約45kg/枚である。施工はRC構造壁面に乾式工法で取り付けした。灌水は最上部に設置したドリップホースによる自動灌水である。灌水量や灌水頻度は年間の降雨量に応じた設定を行った。施肥は液体肥料を灌水タンク内で希釈し適宜供給している。



図一5 緑化システムの模式図

(3) 樹木選定のコンセプト

「味の素スタジアム」が位置する武蔵野に自生しているシラカシ、シロダモ、モチノキ、アセビ、ヤマツツジ（写真一6～8）などを用いて、“武蔵野の森”にふさわしい樹種の選定と植栽レイアウトを実施した。常緑樹は19種、落葉樹は13種である。樹種配置は原則として、各スパン全て常緑樹70%落葉樹30%で構成した。さらに植栽配置で以下の点に留意した。落葉樹は常緑樹の中にばらばらに配植し、両端および下端に用いる樹種の内部への植栽は避けるようにし



写真一六 モチノキ



写真一七 アセビ



写真一八 ヤマツツジ

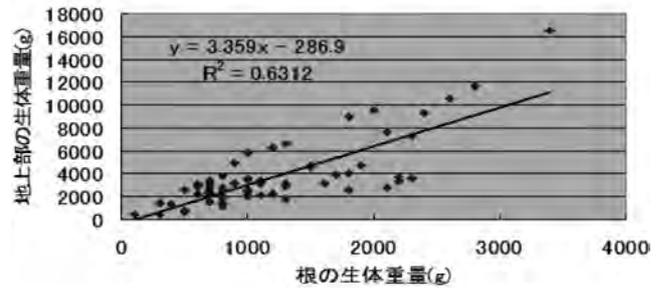
た。全体的に高木、中木、低木をバランスよく植栽した。また樹木により季節感を演出すると同時に、1年を通して花が見られるよう樹種選定を行った。

5. 緑化パネル CO₂ 固定量の推定

(1) 根系容積の固定した樹木生体総重量推定

壁面で樹木を生育させる場合、樹木が大きくなりすぎないか、また根が肥大成長して緑化パネルを破壊しないかという問い合わせが多い。樹木の地上部重量は根の生長量に比例することが、植栽樹木の根と地上部の生体重量に関するアクロス福岡での植栽実験(1995.03-1997.03)で明らかになっている(図一六)。そこで

樹木の根と地上部の生体重量調査結果



図一六 樹木の根と地上部の生体重量調査結果

実験で得られた計算式をもとに、緑化パネルで成長する樹木の重量を以下のように求めた。

(a) 根の重量

根の生長する空間は、不織布の厚み(15 mm)から、1 m² 当たり 15 リットルの容積となる。根の比重(生体重量)は、ほぼ 1.0 なので根の重量は最大で 15.0 kg と考えてよい。

したがって単位面積当たりの根の最大生育重量 (a) は 15,000 g/m² となる。

(b) 地上部重量

根の重量に対して地上部重量は次式に従い計算できる。1 m² 当たりの地上部の最大生体重量 (b) は、根系の総重量を 15 kg/m² とすると次のようになる。

$$(b) = 3.359 \times 15,000 (\text{根系総重量}) - 286.9 = 50,098 \text{ g/m}^2$$

(c) 予想される GRC 緑化パネルでの樹木総重量 (MAX) は次のとおりである。

$$\text{樹木総重量 (MAX)} = a + b = 50.1 + 15.0 = 65.1 \text{ kg/m}^2$$

10年 で根系容積が最大となったと仮定すると、年平均 6.5 kg/m² 増加となる。木質部の C 含有量は多くの分析結果から、樹種に限らず樹木重量比で 50% である。CO₂ と C の分子量比 (44/12) を乗じることで CO₂ 量に換算可能である。また生体樹木の約 50% は水分である。したがって正味の CO₂ 固定量は上記重量の二分の一相当と考える。

以上から当該樹木対応型壁面緑化工法の CO₂ 年間固定量は次のように推定できる。

$$\text{年間増加量} (6.5 \text{ kg/m}^2) \times \text{C 含有量} (0.5) \times (44/12) \times 1/2 = 5.95 \text{ kg/m}^2$$

したがって味の素スタジアムでは 1,450 m² × 5.95 kg/m² = 8,628 kg/m² 年の CO₂ を固定すると考えられる。

6. おわりに

壁面緑化パネルを用いた樹木生育特性に関する実験、FEM 構造解析及び不燃性試験などにより、壁面

で永続的な植栽景観を確保する樹木の健全な生育と緑化パネルの耐久性に関する安全性が確認できた。またプロジェクト適用の結果、樹木を用いた壁面緑化ならではの CO₂ 年間固定量の効果が確認できた。

今後は維持管理に関する諸特性、つまり樹木生長に伴う緑化パネルの耐久性評価や灌水計画のための年間水収支評価、さらには病虫害防除の効率化等を研究する予定である。

JICMA

《参考文献》

- 1) 佐久間護, 武藤浩, 奥水肇: 建築物の壁面緑化に関する研究 (その1) 緑化の目的と緑化手法の現状, 日本建築学会大会梗概集, 2001.9
- 2) 佐久間護, 三坂育正, 小島倫直: 樹木が植栽可能な壁面緑化に関する研究—緑化システムと生育特性の評価—, 日本建築学会大会梗概集, 2008.9
- 3) 佐久間護, 川畑茂男, 奥水肇: 人工地盤植栽実験における植物の生育要因分析について, 竹中技術研究報告 No.52 1996

【筆者紹介】

佐久間 護 (さくま まもる)
株竹中工務店 技術研究所
エコエンジニアリング部門 緑化生態環境グループ
主任研究員

