

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：32657

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24656327

研究課題名(和文)自立する砂を用いたCO<sub>2</sub>エコストラクチャーの創生と展開研究課題名(英文)Generation and Development of CO<sub>2</sub> Eco-Structure by Using "Self-Standing Sand"

研究代表者

今川 憲英 (IMAGAWA, NORIHIDE)

東京電機大学・未来科学部・教授

研究者番号：10328510

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：“自立する砂”を新構造素材として開発することによって、「砂上の楼閣」ならぬ“砂の空間構造”を創生しようとする正に挑戦的基礎研究を推進させてきた。新素材は、砂にCO<sub>2</sub>を注入することで構造強度を確保し、ある応力レベルの構造物を対象とした場合には、鉄筋を使用することなく短い施工期間で構造物を構築できる特徴を有する。

新素材の開発は、混合する試薬の種類によって、Type I～III まで行われた。その成果をもとに、素材の特性を生かした緊急避難住宅への適用を目指し、その構造設計指針のさくていをするための基礎的解析を進めた。特に、耐震性を考慮するために地震応答解析によるデータを収集した。

研究成果の概要(英文)：Development of a new ecological structural material that is essentially made of sand and absorbs carbon dioxide was challenged. Starting from Type I our development has now expanded to Type III in order to maintain structural strength and water resistance. Spatial structure (Top-Shell) using a combination of T-type units by our new structural material was proposed as a temporary housing for refuge from earthquakes. A simple structural design method for determining the scale of T-type units based on allowable stress design was proposed through an earthquake response analysis on the finite element model.

研究分野：建築構造設計

キーワード：エコストラクチャー 構造素材 CO<sub>2</sub> 酸化炭素排出削減 自立する砂 無筋構造 緊急避難住宅 空間構造

1. 研究開始当初の背景

構造物の構築は、それを構成する素材の開発に大きく依存して進展を遂げてきた。今まで、“砂”を構造素材とする考えは非常に少ない。そこで、基本的には砂にCO2を注入することで“自立する砂”が構成できることに着目する正に「挑戦的萌芽」研究として独創的である。さらに、構造素材としての特性が確保できれば、短期間で施工できる構造物の創生が期待される。特に、緊急性を有する避難住宅への適用が考えられる。この展開に対しては、CO2排出削減にも大きく寄与する。

2. 研究の目的

“自立する砂”が構造素材として使用できるためには、構造強度が確保されなければならない。さらに、構造物への適用に際して、耐水性・耐候性・耐火性等の検討も必要である。そこで、素材の開発および空間構造物的一种である“トポシェル”への新素材の適用を意図した構造設計指針の策定を本研究の目的とした。

3. 研究の方法

新素材開発では、構造強度等の特性を改良するために、砂に加える試薬の検討はシリンダー試験体を作成して実験により行なった。試薬の種類およびその配合率の組み合わせに対応して、Type ~ とよび、圧縮試験、耐水試験を行い、データを収集した。特に、圧縮強度を確保するために、本体にエポキシ樹脂を含浸することを行った。さらに、この素材を用いて、構造物に適用するためのT型ユニット模型を作成して、4点曲げおよび引っ張り試験を行い接合部の挙動を把握した。これらの成果に基づき、T型ユニットによるトポシェル形式による緊急避難住宅への展開を意図して、その有限要素モデルを用いて地震応答解析を実施した。

4. 研究成果

“自立する砂”を用いた新構造素材の開発と新素材による空間構造の創生を目指してその基礎的な研究を継続してきた。その過程で

得られた研究成果を(1)素材開発と(2)空間構造の創生に分けて以下に記述する。

(1) 新構造素材の開発

「新素材」の性質についてその概略を述べる。新素材の原料には、鋳物の型に使われる「酸化珪砂(SiO2)」に水ガラスを加えたものを用いる。これに二酸化炭素を注入すると化学反応を伴って瞬時に硬化し、自立した構造部材となる。硬化時間は100mm<sup>2</sup>当たり約20秒であり、コンクリートの1/10以下の時間で硬化するという特徴を有する。これを基本とし、この素材の材料特性を改良するために試薬を加え、硬化後もエポキシ樹脂を含浸させることによって以下の表1に示す特性からType ~ と呼び開発を続けてきた。

表1 Type ~

Type	珪砂 + 水ガラス + CO2
Type	Type + エポキシ樹脂含浸
Type	Type + カルシウム系試薬

Type

図1に、材齢別圧縮応力度の分布詳細を示す。図1より内部、外部の全試験体の最大応力度と最小応力度の差を比較すると、内部応力度差 3.11[N/mm<sup>2</sup>]、外部応力度差 4.36[N/mm<sup>2</sup>]となり、このように外部の応力度差は大きい。各材齢15体ごとの、圧縮応力度差の平均値でも、内部応力度差 1.97[N/mm<sup>2</sup>]と集中しているのに対し、外部応力度差 2.28[N/mm<sup>2</sup>]と応力度差が大きい。このことから内部常温養生に比べ、外部養生は、圧縮応力度の分布にばらつきが大きいと言える。天候による湿度や温度の影響であると考えられる。

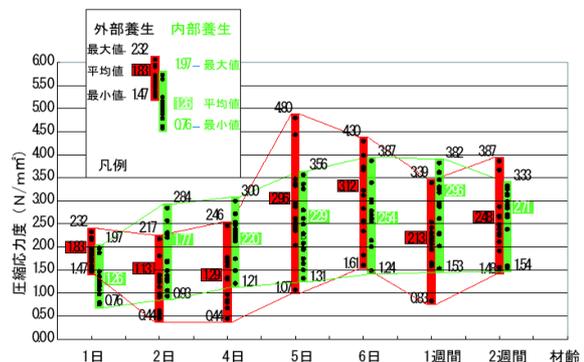


図1 材齢別圧縮応力度の分布詳細

図2に、養生環境で比較する材齢別圧縮応力度を示す。材齢1週間までは、圧縮応力度の分布が上昇しているのに対して、材齢1週間と2週間を比較すると、圧縮応力度の分布に上昇は見られず安定している。この事から、材齢1週間以降の試験体の圧縮応力度が安定すると考える事ができる。

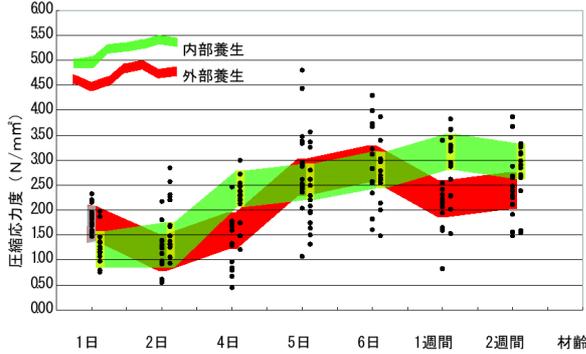


図2 養生環境で比較する材齢別圧縮応力度

本研究の試験結果から、材齢1週間以上の試験体の圧縮強度が安定する事がわかった。よって、珪砂の圧縮試験を行う際に、材齢1週間以上の試験体を使用する事が適している。

Type

圧縮強度試験、曲げ強度試験、せん断強度試験の結果をグラフにし、図3-1~3に示す。

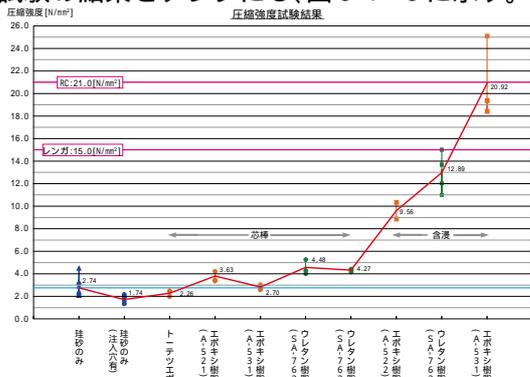


図3-1 圧縮強度実験結果一覧

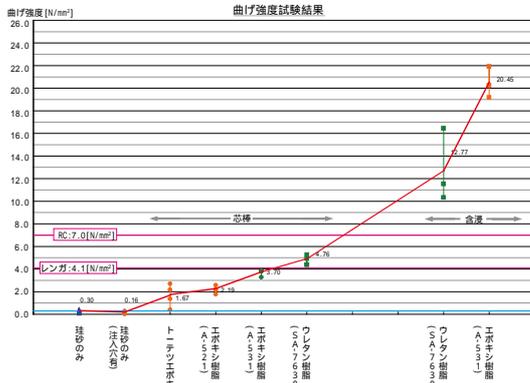


図3-2 曲げ強度試験結果一覧

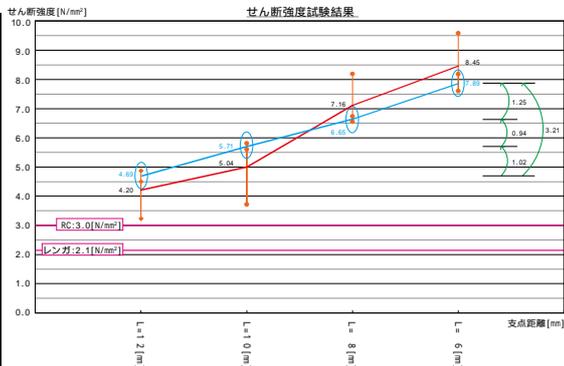


図3-3 せん断強度試験結果一覧

エポキシ樹脂(A-531)の含浸注入の結果から、各強度(圧縮強度・曲げ強度・せん断強度)を決定した(表2)。本試験の目的でもある炭化珪砂に対してどれくらい性能が向上したのか、また一般的建築素材であるコンクリートに対しどの程度異なるのかの比較を行った。炭化珪砂に対し圧縮強度では約10倍、曲げ強度に至っては約68倍の向上が確認された。またコンクリートに対しては、圧縮強度がほぼ同等、曲げ強度・せん断強度では3倍という結果を得た。

表2 材料強度

	圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	曲げ強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	せん断強度 [N/mm <sup>2</sup> ]
CO2エコストラクチャー	20.9	20.5	7.4
炭化珪砂(自立する砂)	2.7	0.3	-
コンクリート(Fc=21)	21.0	7.0	3.0
レンガ	15.0	4.1	2.1

Type

- ・第一回配合比の検討

試験体を製作するに当たり使用する珪砂、水ガラス、水、カルシウム系試薬の配合の割合、その混合の手順を図4に示す。

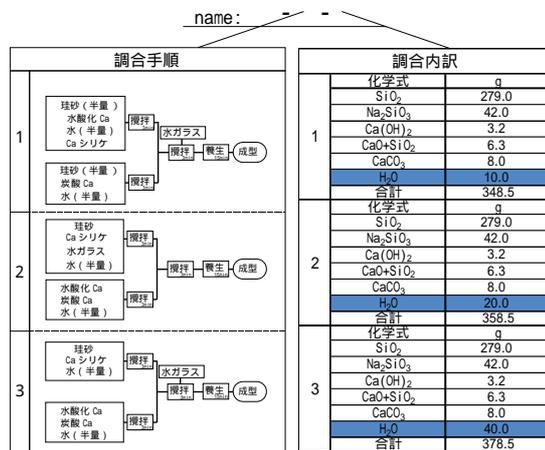


図4 配合の割合と手順の一覧

圧縮試験結果を強度と材令に対して図5に

示す。

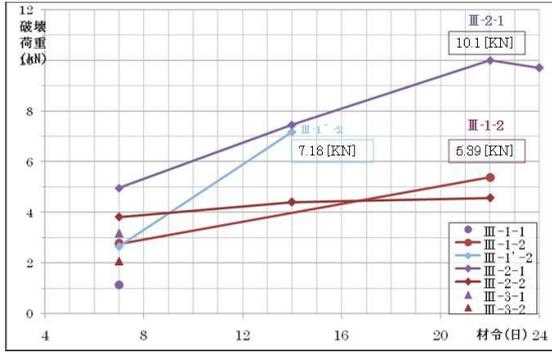


図5 破壊強度・材令グラフ

圧縮強度低下の原因として混合材料の H<sub>2</sub>O が薬品と反応しきらず、試験体内部に残留したからと考える。H<sub>2</sub>O は CaSiO<sub>2</sub>の重合反応促進のために適量必要だが、量が多く CaSiO<sub>2</sub>との反応が不完全ならば水ガラスと反応してしまい素材としての強度低下を招く事になる。また、養生期間を経て圧縮強度が上昇した理由として、残留した未反応の H<sub>2</sub>O が成型後ゆっくりと CaSiO<sub>2</sub>と重合反応を起こしたため、もしくは残留した H<sub>2</sub>O が時間を経て蒸発したためと推測する。

・第二回配合比の検討

カルシウムシリケートの加水分解を進める為、珪砂の攪拌時期を遅らせて図6に示すような8通りの配合手順で圧縮試験を行った。

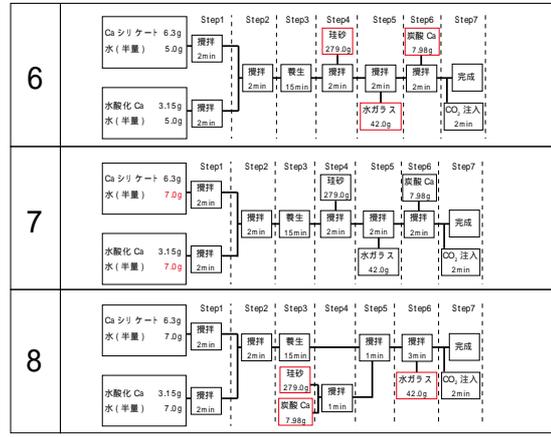
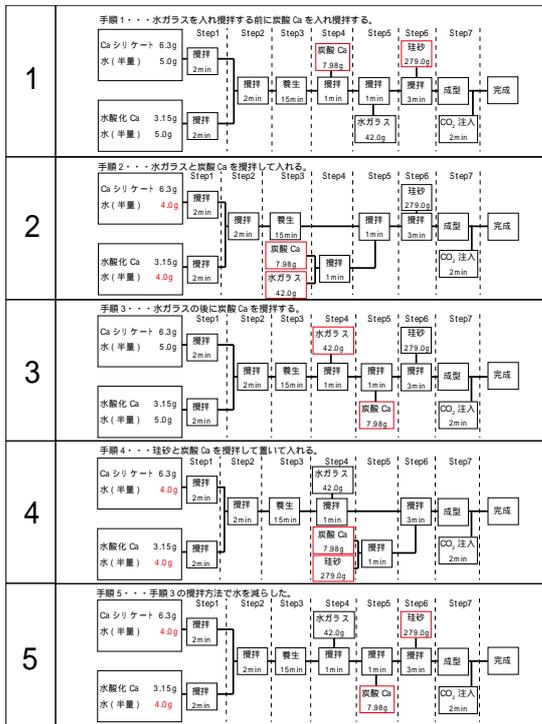


図6 配合手順一覧

本実験では混合材配合の主に混合手順を変更し試験体を作製、圧縮試験と耐水試験を行った。実験結果より6番の配合手順方法で破壊荷重 9.16[kN], 応力度 4.7[N/mm<sup>2</sup>]の結果が得られた。各配合手順に対する特性を表3に示す。

表3 各配合手順の性質

配合手順	応力度 [N/mm <sup>2</sup> ]	施工性	均質性
1	1.5		
2	1.8		
3	2.2	x	
4	2.0		
5	2.1		
6	4.7		
7	3.7		
8	2.5		

圧縮強度については6と7番の配合手順が良い。圧縮強度が向上した理由として考えられる事は、カルシウムシリケートの加水分解を進めるために必要な水の量が 10g、14g と多めに配合されている事と、水を配合してその後水ガラスを配合するとカルシウムシリケートの重合が進みすぎ硬化速度が上がり、固定化が出来ないので水と水ガラスの配合時期は遠ざけ攪拌を行った事と、水ガラスを配合する前に炭酸カルシウムを配合すると、水を吸収するためカルシウムシリケートの重合が進まず強度が出ないので炭酸カルシウムは水ガラスの後に配合をする事と考えられる。耐水性に関しては図7に示すように Type は自壊を起こさず、Type からある程度の変化は確認できる。しかし、試験体を水へ入れると白く濁り自壊はしないものの表面の砂が少し崩れる事が分かった。

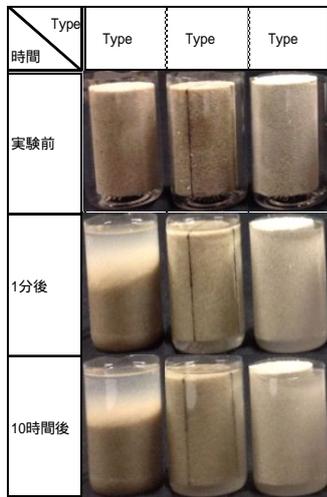


図7 耐水性実験

(2) 新素材による空間構造の創生  
解析モデル

新素材による空間構造物の創生として、緊急避難住宅を想定した。図8に示すような開口部を1つとした“トポシェル”とよぶ構造形式を用いた。モデルの高さは3150mm、開口部の高さは2250mmとした。また、この解析モデルは図9のようなT型のユニットを組み合わせることにより構成されている。ユニットの高さは450mm、ユニット同士の接合幅は120mmとし、ウェブとフランジは同じ厚みとしている。



図8 トポシェル

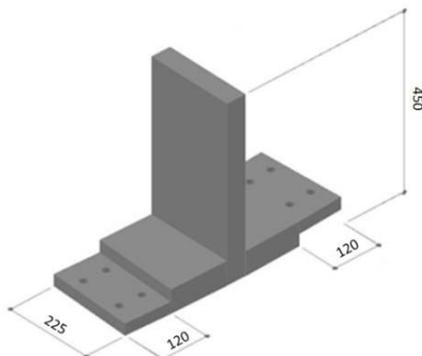


図9 T型ユニット

解析結果

設計式を提案するにあたり構造の安全性評価は、強度および剛性の2つの観点から検討することとした。ここで強度の評価とは、地震応答解析により得られた各応力度が、新素材の各応力度を上回らないこととした。なお本研究の特徴は動解析による設計手法の提案であることから、荷重(外力)の対象は地震力であり、新素材の各応力度は短期のものを対象とした。また剛性の評価は、地震応答による変形について弾性範囲であることを考慮し、軒部分での変形において1/200以下とした。具体的には、本研究でのモデルの軒高が3150mmであり、その1/200である15.75mmを変形の上限值とした。上記で設定した条件に基づき、5種類の地震波に対する地震応答解析を実施した。解析の対象としたモデルは、柱の分割角度を変更し正多面体の頂点の数が異なる場合と、直径を変化させ空間の大きさが異なる場合とした。合計80パターンのモデルについて解析を行った。なお本研究で提案する構造物の目的から、屋根や壁は比較的簡易に施工できる必要があるため、直径の最大を15mと設定した。80パターンのモデルに対してウェブとフランジの厚みを変化させ、各地震波の応答が許容値以下となる最小の部材幅を決定した。

設計式の提案

本研究では変位と応力度の2つの要素により解析をしている。ここでは、応答変位に着目した場合の設計式と応力度に着目したときの設計式の2つの式を提案し、より安全な構造物となるよう配慮した。

・ 応答変位による手法

地震応答の最大変位が許容値以下となるときのモデルの分割角度と厚みの関係を式で表すと次式となる。

$$y = (1.3 l - 1.0) d$$

$$\text{切片} = 63 \quad 0.8 l$$

ここで、 $y$  は部材の厚み[mm]、 $l$  は直径[m]、

d は分割角度[deg]を表す．さらにこの 2 式を加法結合すると，変位に基づく設計式が次式の通りとなる．

$$y = (1.3 l - 1.0) d + (63 - 0.8 l)$$

なお，この式により設計した構造物に対する，いずれのモデルにおいても安全な結果となっていることが分かった．

・曲げ応力度による手法

次に同様の方法で曲げ応力度について検討した結果を以下の設定式として提案した。

$$y = (3.0 l - 3.6) d + (128.8 - 1.4 l)$$

## 5．主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 5 件)

D. AKAIWA, N. IMAGAWA, N. TOSAKA;  
Development of New Eco-Structural Materials Serendipity between Architecture and Chemistry. IASS WORKING GROUPS 12+18 International Colloquium 2015, 2015.4.11, 東京電機大学(東京都足立区)

N. IMAGAWA, Y. IKEDA, R. ENDOU, N. TOSAKA;  
Structural Design Method on Topo Shell Constructed with New Material, IASS WORKING GROUPS 12+18 International Colloquium 2015, 2015.4.12, 東京電機大学(東京都足立区)

N. IMAGAWA; Structural Design of Double Topological Shell Using Inverted T CO2 Eco-Structure Units, IASS International Symposium 2013, 2013.9.26, Wroclaw Univ. of Technology (Wroclaw, Poland)

〔図書〕(計 0 件)

## 6．研究組織

### (1)研究代表者

今川憲英 (IMAGAWA Norihide)  
東京電機大学未来科学部・教授  
研究者番号： 10328510

### (2)研究分担者

登坂宣好 (TOSAKA Nobuyoshi)  
東京電機大学未来科学部・客員教授  
研究者番号： 00059776

(3)連携研究者  
なし

### (4)研究協力者

遠藤龍司 (ENDOU Ryuji)  
職業能力開発総合大学校能力開発院・教授