

ベンチのデザイン

建築学科 蜂谷研究室



学生が数十のデザイン案
を作成

WG内での議論を経て
デザインを決定



製作するベンチのCG

3Dモデルの作成

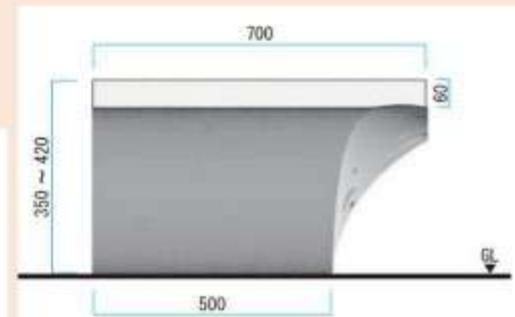
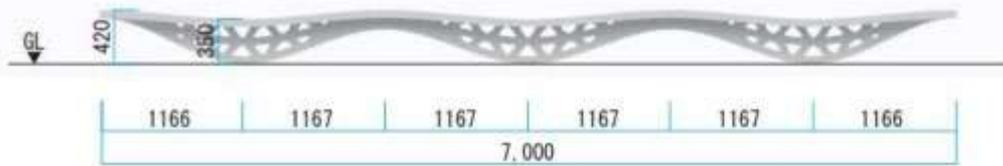
建築学科 下川研究室

ベンチのデザイン案をもとに, BIMモデルを作成

使用ソフト: Rhinoceros (滑らかな自由曲面の作成に適している)

1.1 波型形状

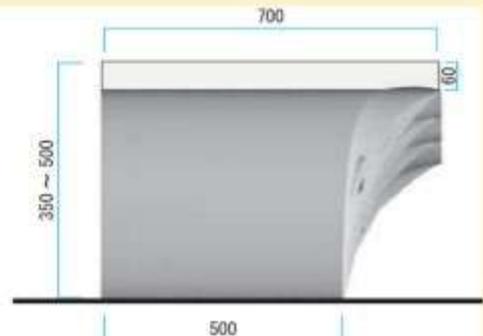
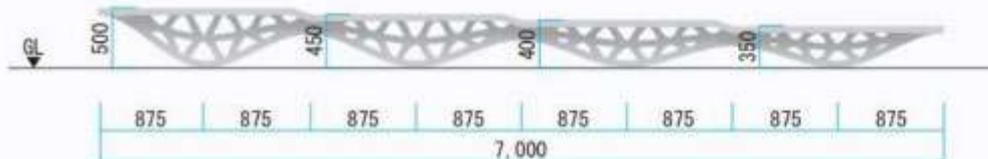
波々のベンチ (長辺方向)



波々のベンチ (短辺方向)

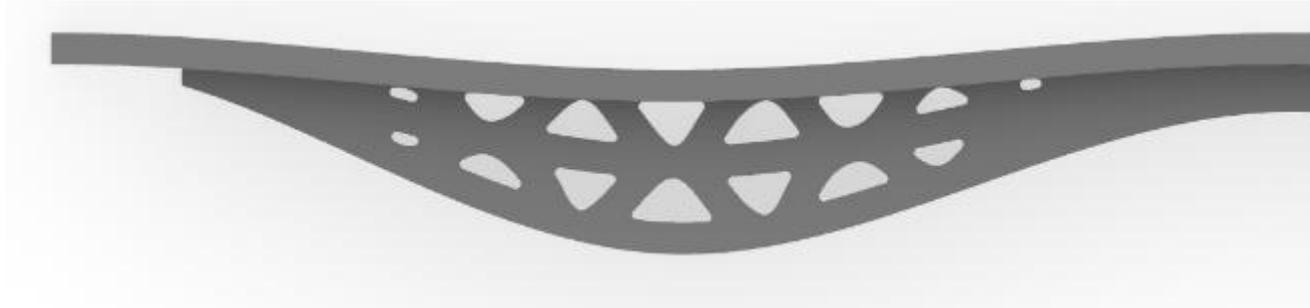
1.2 段差形状

段々のベンチ (長辺方向)

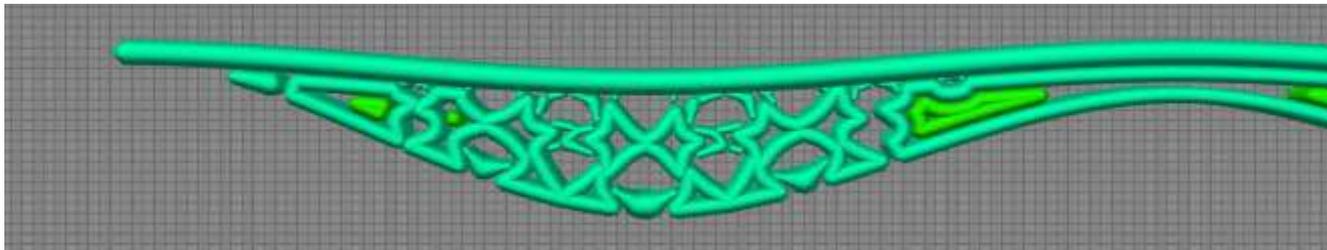


段々のベンチ (短辺方向)

積層実験と設計の往復的プロセス



幾何モデル(建築学科 下川研究室)



スライスモデル(機械工学科 林研究室)

使用ソフト:
Simplify3D



一筆書きであること
を考慮したデザイン
が必要

積層実験結果(機械工学科 林&藤本研究室、環境土木工学科 花岡&宮里&田中研究室)

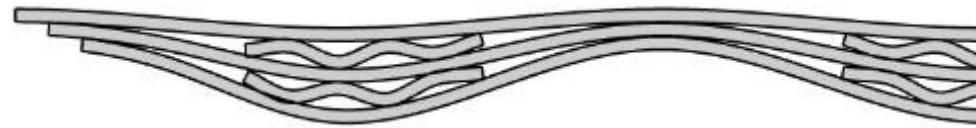
積層実験と設計の往復的プロセス

2022年9月中旬

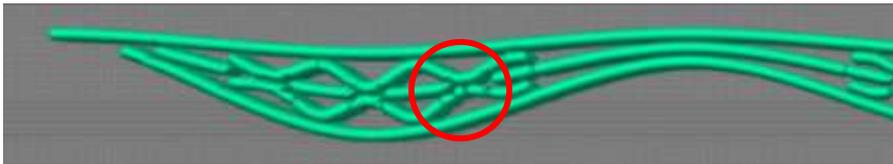


パス誘導モデルとその拡大図

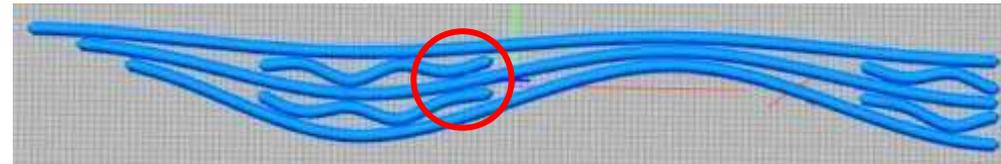
2022年9月下旬



パス誘導モデル



スライスモデル



スライスモデル



積層実験結果



積層実験結果

積層実験と設計の往復的プロセス

2022年10月上旬



パス誘導モデル



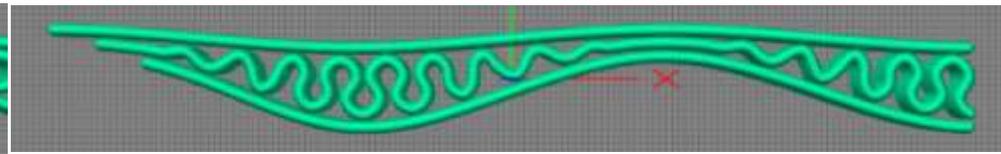
スライスモデル

積層実験結果

2022年10月下旬



パス誘導モデル



スライスモデル

積層実験結果

構造性能評価

□ 構造設計の課題

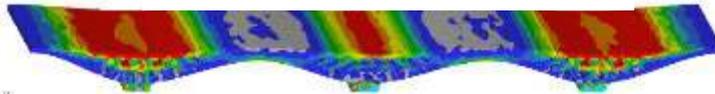
3Dプリンターで制作した構造物の性能照査は、通常のコンクリート構造物と同様に限界状態設計法を用いるが、**3Dプリンターならではの特徴**を考慮する必要がある。

3Dプリンターで積層した構造物



構造解析

有限要素解析

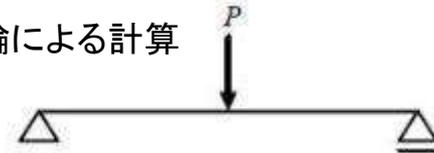


通常のコンクリート構造物



構造計算

はり理論による計算



□ 現時点の課題

- 複雑な形状や最適化を取り込んでいる形状であるため、有限要素解析の適用が必須になる
 - 通常のコンクリート構造物とは異なり、界面が存在するため、力学的異方性の考慮が必要である
- ⇒ **複雑なモデルの構築になるため多くの人手と時間を有する。**

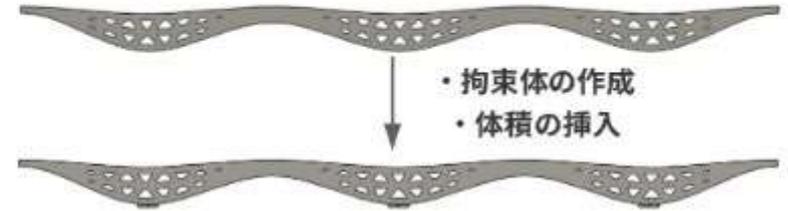
FEMによる構造解析作業を高効率で行うことのできる全自動解析システムが必要!

構造解析プロセス

1. 基本デザイン



2. 詳細デザイン(3D CAD)

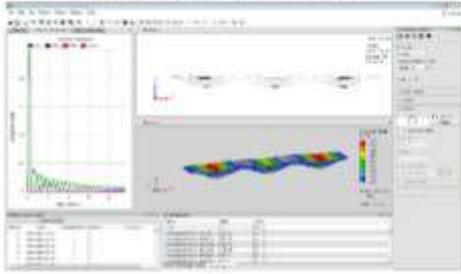


3. 解析モデルの構築(GID)



- ・要素分割
- ・材料特性値
- ・拘束条件

4. 応答解析(ATENA)



5. 解析結果の評価(ATENA)



No

解析モデルと解析条件

解析条件

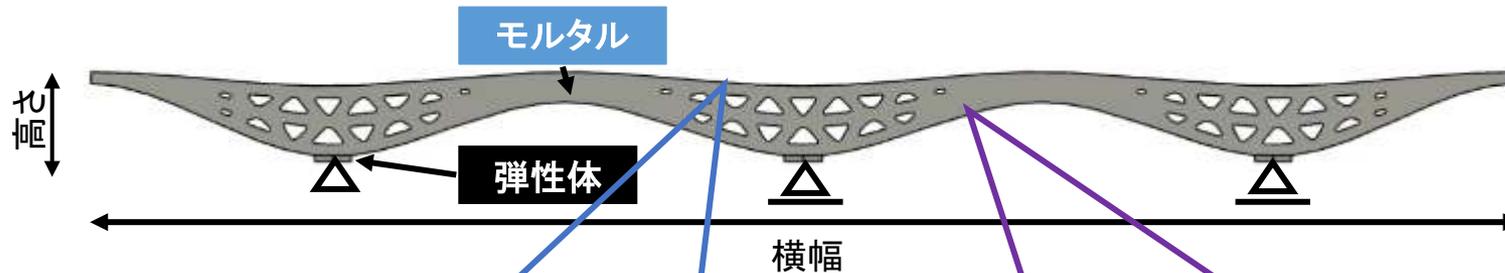
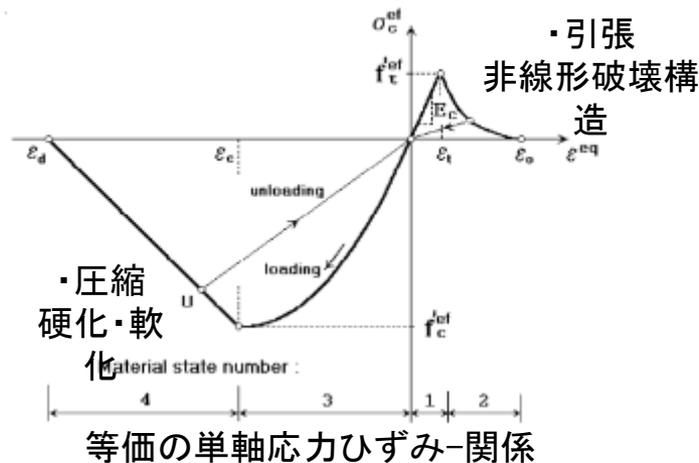


表 モデル寸法

	(mm)
横幅	7000
高さ	420
奥行き	700

モルタルの構成則



材料特性値

表 材料特性値

	モルタル	弾性体
ヤング係数(MPa)	30320 (30320)	200000
ポアソン比	0.2 (0.2)	0.3
圧縮強度(MPa)	25.5 (25.5)	
引張強度(MPa)	0.772 (2.317)	

設計荷重(等分布荷重)

□ 等分布荷重

ベンチに人が満載して腰掛ける状況を想定

表 ベンチの諸元

項目	座面の横幅×奥行き(m)	一人が占める幅(mm)	片側の定員(人)	最大定員(人)	体重の設計値(N)
ベンチ1	7×0.7	430	16	32	686

$$\Rightarrow \text{設計荷重(ベンチ1)} = \frac{\text{作用する外力}}{\text{座面の面積}} = \frac{32 \times 0.686}{7 \times 0.7} = 4.48 (\text{kN/m}^2)$$

□ 耐久性の評価

無筋構造であるため

- ・ひび割れ発生荷重 > 設計荷重
- ・破壊荷重 > 設計荷重



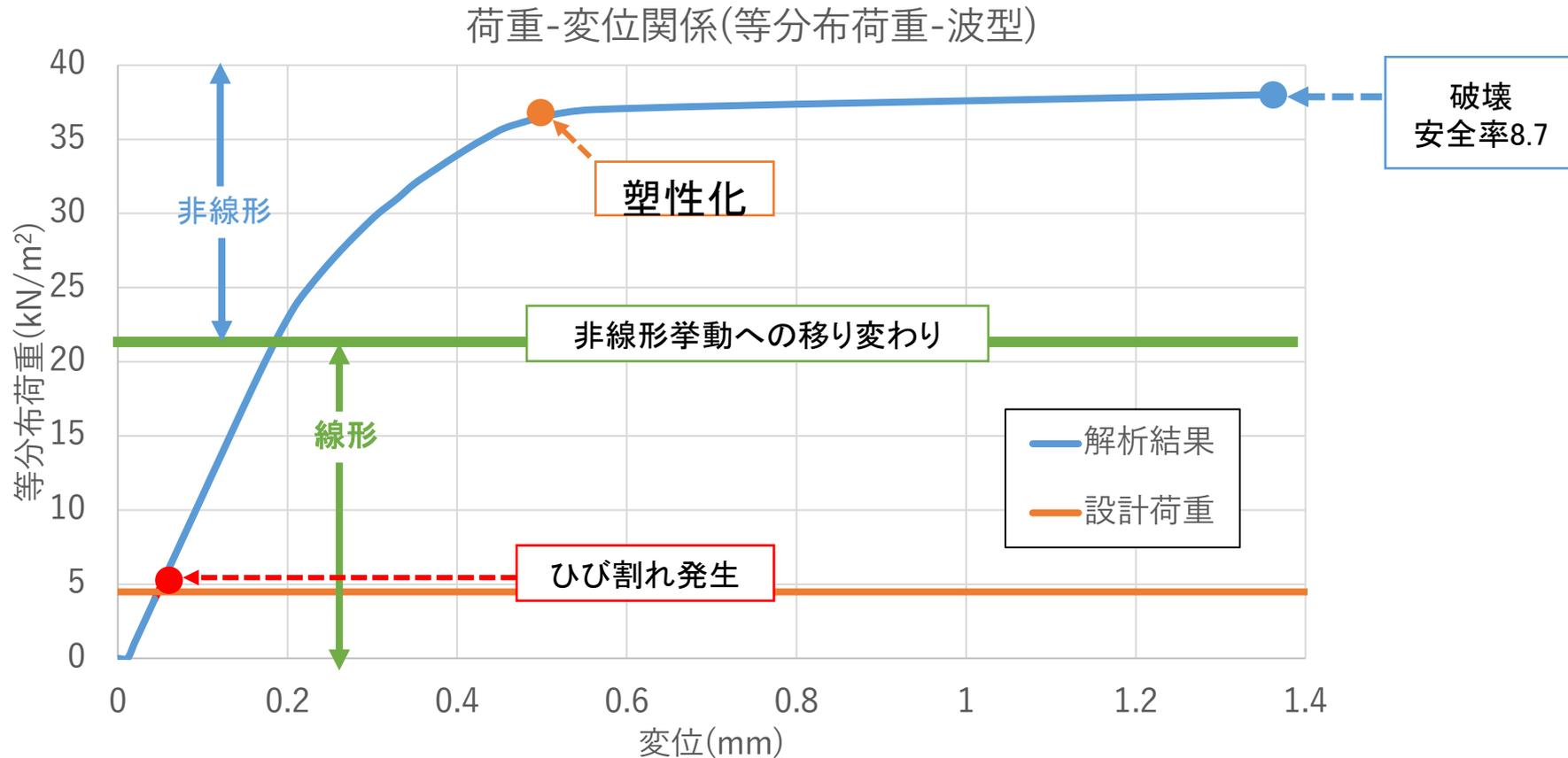
安全率=破壊荷重/設計荷重

↓

安全率 > 1 : 設計上安全である
安全率 < 1 : 解析モデルの検討が必要

設計荷重(等分布荷重)

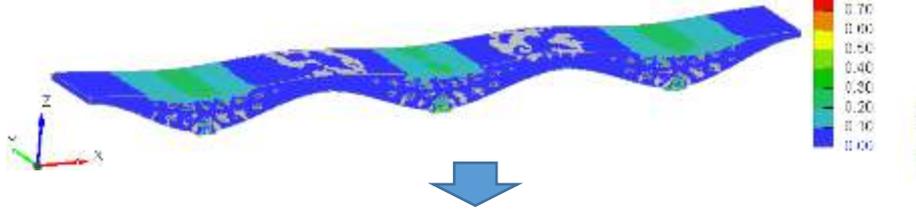
解析結果(荷重-変位関係) ※安全率=破壊荷重/設計荷重



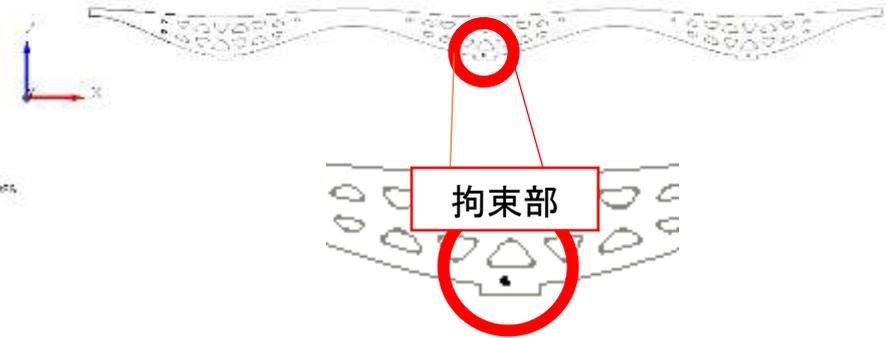
無筋構造であるが、ひび割れ発生後脆性的に強度低下せず、全体破壊に至らなかった。

応力-ひび割れ進展(等分布荷重)

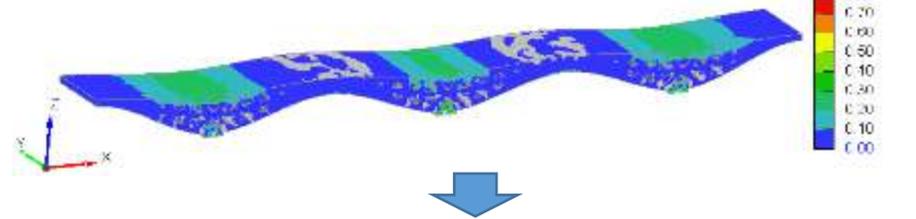
・ひび割れ発生前の引張主応力図(4kN/m²)



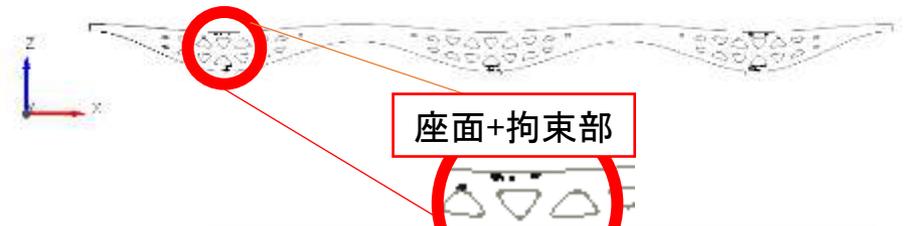
・初期のひび割れ(5kN/m²)



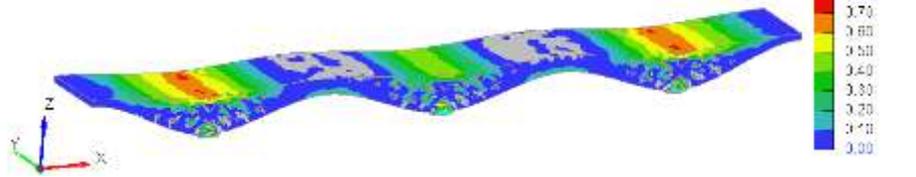
・ひび割れ発生後の引張主応力図(5kN/m²)



・線形時のひび割れ(16kN/m²)



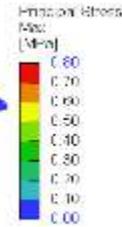
・線形時の引張主応力図(16kN/m²)



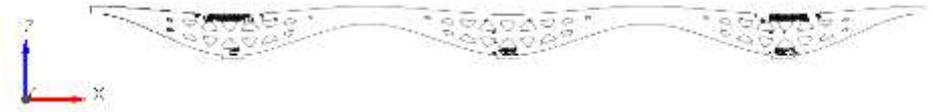
初期時=ひび割れが座面に進展

応力-ひび割れ進展(等分布荷重)

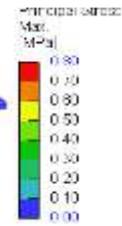
・ 非線形挙動への移行(23kN/m²)



・ 非線形挙動への移行(23kN/m²)



・ 非線形時の引張主応力図(27kN/m²)



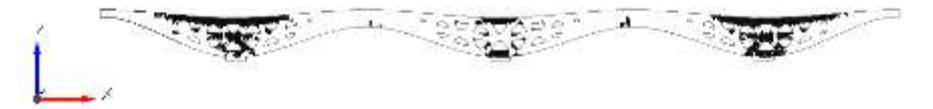
・ 非線形時のひび割れ図(27kN/m²)



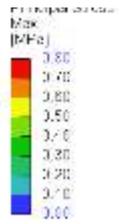
・ 塑性時の引張主応力図(37kN/m²)



・ 塑性時のひび割れ図(37kN/m²)



破壊前の引張主応力図(38kN/m²)



・ 破壊前のひび割れ図(38kN/m²)



終局状態=ひび割れが断面方向に貫通

載荷試験状況

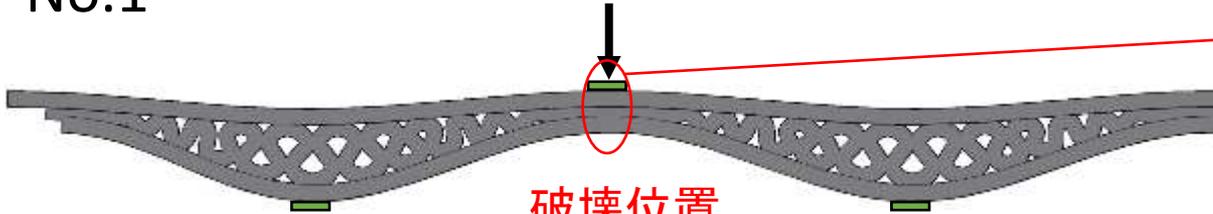


載荷試験計画

No.1

荷重

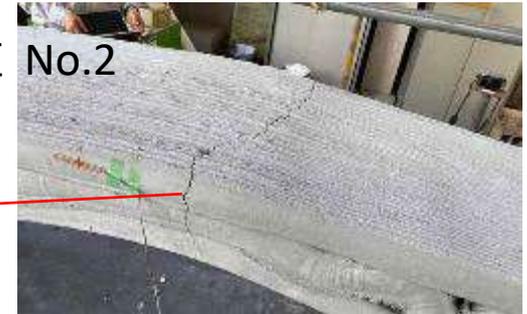
破壊位置



No.2

破壊位置

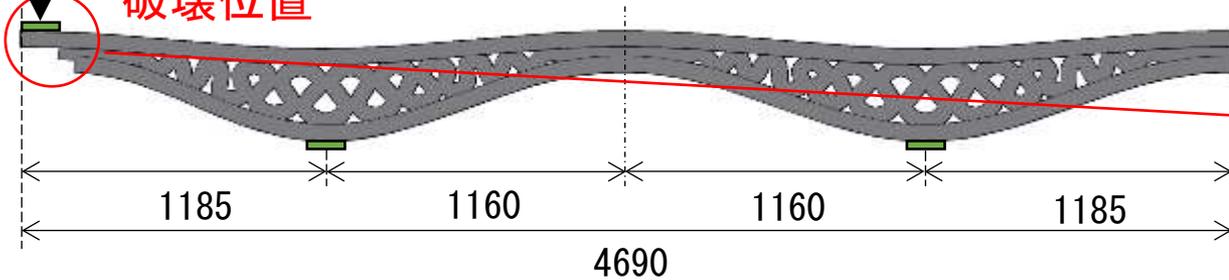
荷重



No.3

荷重

破壊位置



載荷試験結果

試験体一覧

試験体 No.	寸法 (mm) 長さ, 高さ, 奥行	重量 (t)	予想破壊荷重 (kN)	破壊荷重 (kN)	着目点
No.1	4690 × 426 × 300	1.0	3	5.6	支間中央の正曲げ耐力
No.2	4690 × 426 × 480	1.5	4	9.6	支点の負曲げ耐力
No.3	4690 × 426 × 650	1.6	4	5.4	張り出し部の押抜き耐力

* 予想破壊荷重は、非線形FEMによる計算値(引張強度は $0.8\text{N}/\text{mm}^2$ を仮定)。自重を考慮

No.1



No.2



No.3



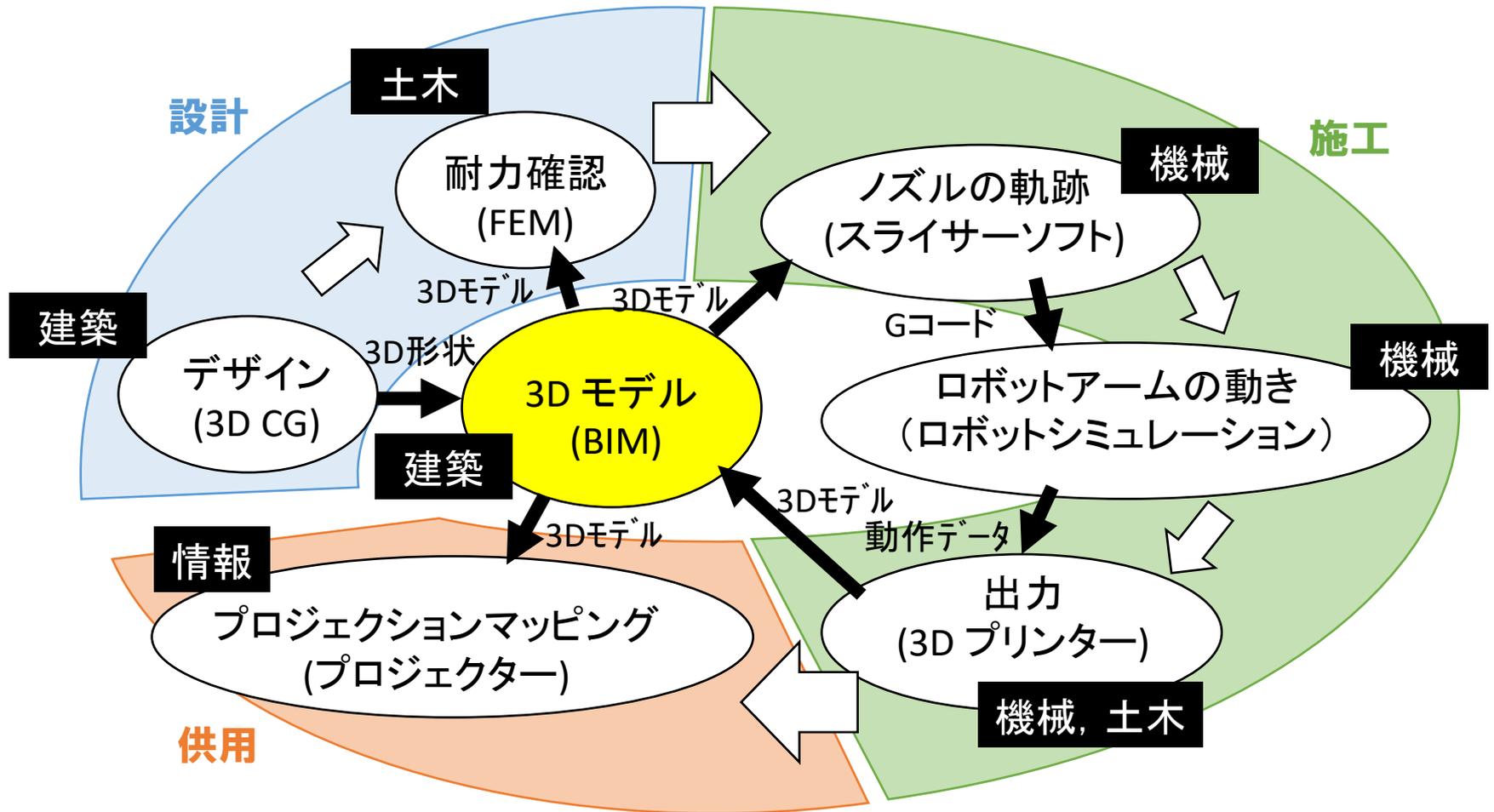
試作品



プロジェクションマッピング



データの流れ



積層時における課題

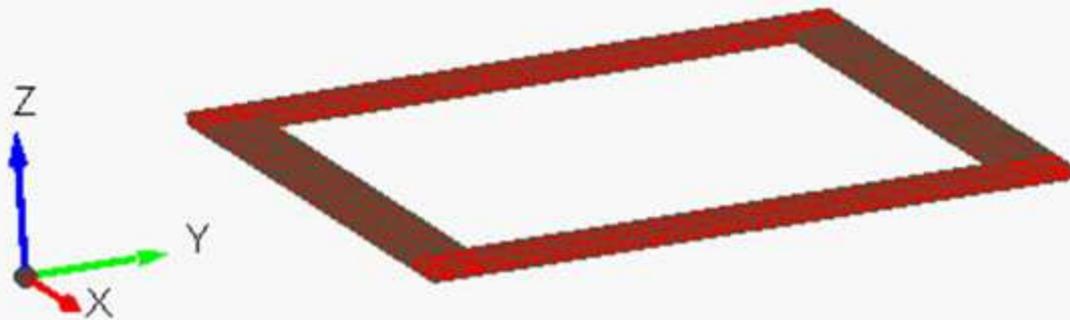


積層時における構造崩壊

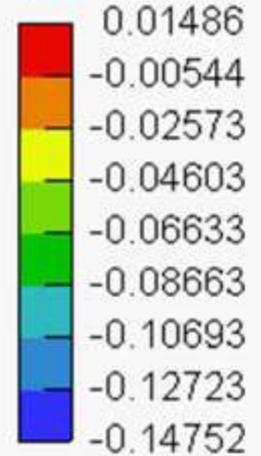
- ・材料や時間の浪費
- ・1度積層してみないと造形可能か分からない

積層シミュレーション

○積層パラメータ



Max.
[MPa]



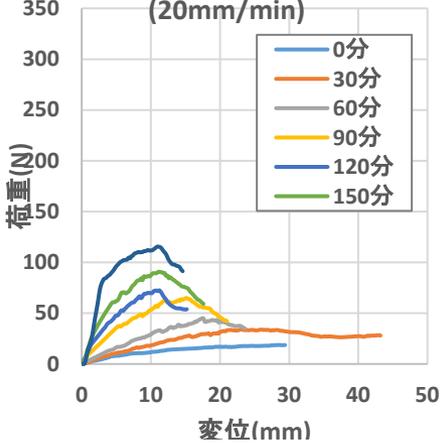
Deformation scale:
0.005

Time: 24.0000

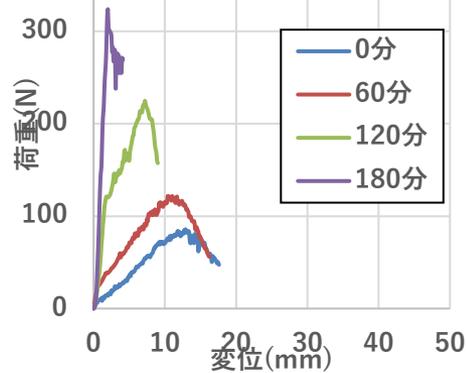
ATENA
x64 V. 5.9.2.22722
License 770
Kanazawa

一軸圧縮試験

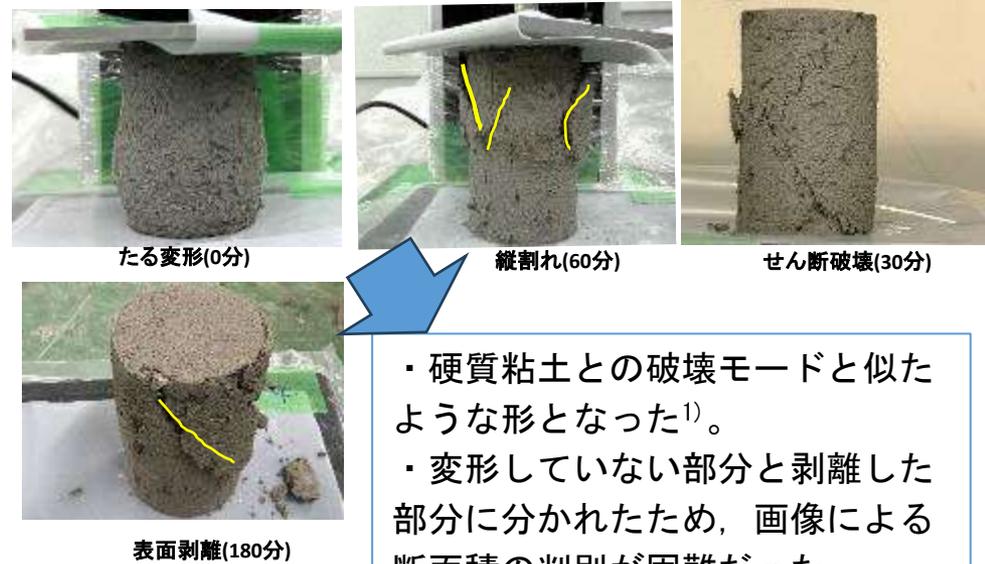
荷重-変位曲線
(20mm/min)



荷重-変位曲線
(0.01mm/s)

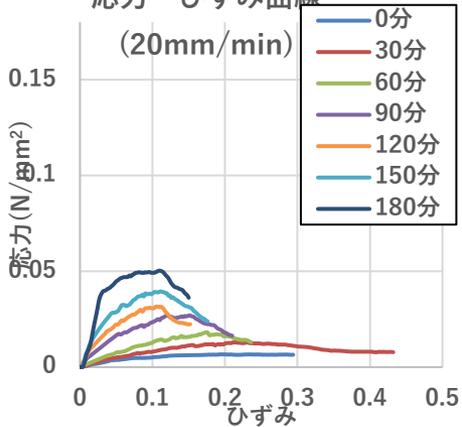


・破壊モード

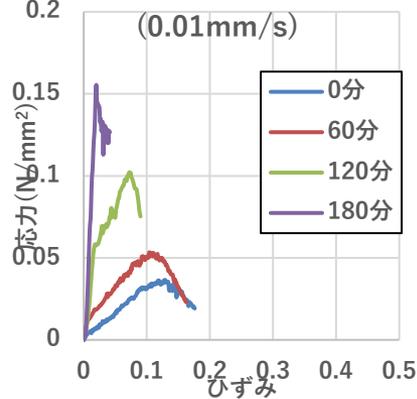


・硬質粘土との破壊モードと似たような形となった¹⁾。
 ・変形していない部分と剥離した部分に分かれたため、画像による断面積の判別が困難だった。

応力-ひずみ曲線
(20mm/min)



応力-ひずみ曲線
(0.01mm/s)

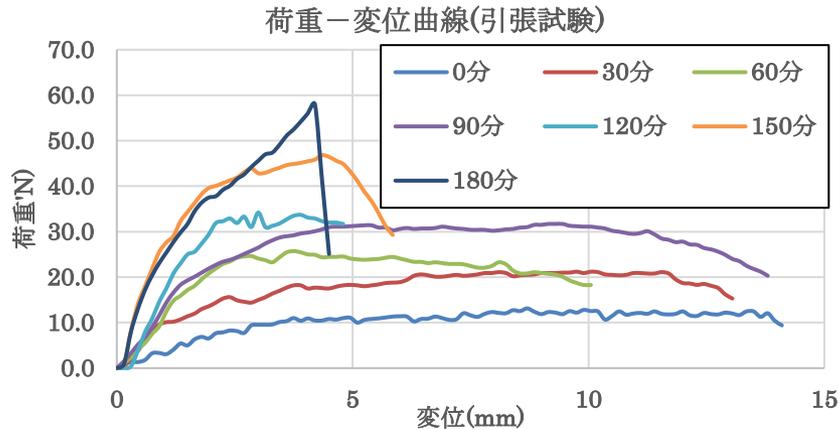


FEM解析に用いる圧縮強度、弾性係数の算定方法

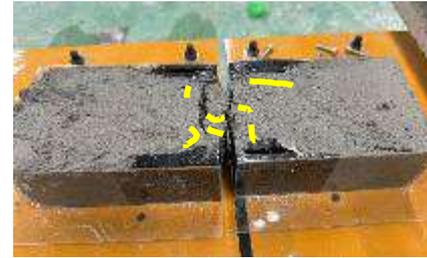
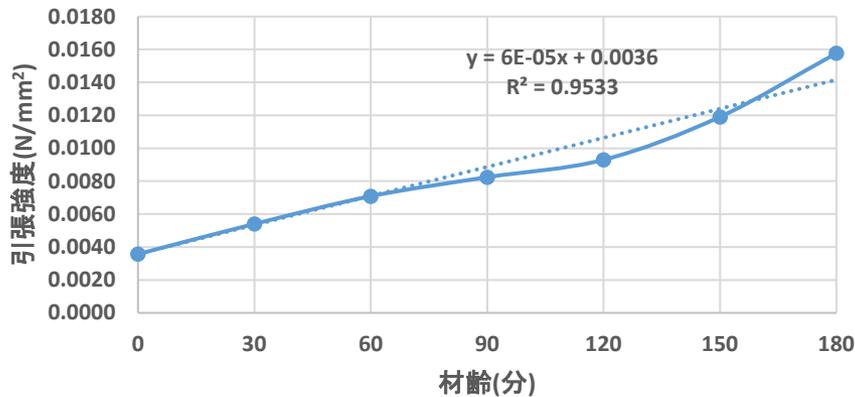
$$E = \frac{\sigma_{50}}{\varepsilon_{50}} \quad (\delta_{50}: \text{最大応力の半分}, \varepsilon_{50}: \delta_{50} \text{の時のひずみ})$$

$$f'_{ck} = \frac{P_{max}}{A_0} \quad (P_{max}: \text{最大荷重}, A_0: \text{変形後の断面積})$$

一軸引張試験



材齢と引張強度



靱性を持った破壊(材齢0分)



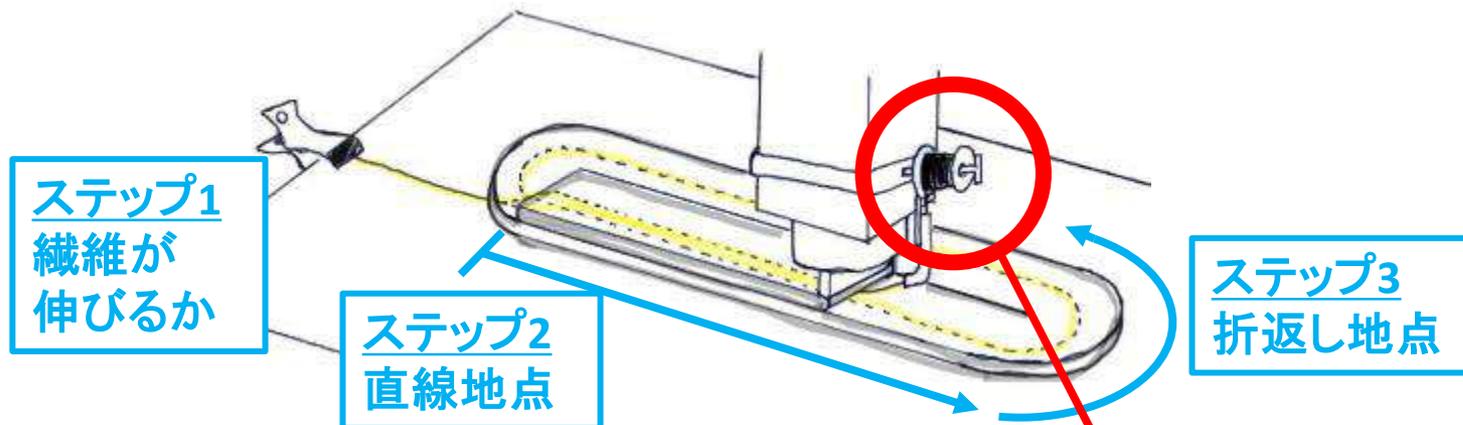
脆性的な破壊(材齢180分)

引張強度算定方法

$$f_t = \frac{P_{max}}{A} \left(\begin{array}{l} P_{max}: \text{最大荷重} \\ A: \text{ひび割れが生じた付近の断面積} \end{array} \right)$$

- ・引張試験によって、経時変化する引張強度を取得できた。
- ・練り混ぜ直後は流動しやすいため、多数のひび割れが生じた靱性を持った破壊をした。
- ・練り混ぜ後しばらくたってからは固体のような挙動を示し、単一のひび割れが生じて脆性的な破壊をした。

連続繊維補強方法の開発



連続繊維埋設装置

連続繊維の種類，径の影響を確認する

カーボン繊維



アラミド繊維



載荷試験結果(破壊状況)

3点曲げ載荷試験を実施



カーボンロービング 12k



ひび割れ後アラミド



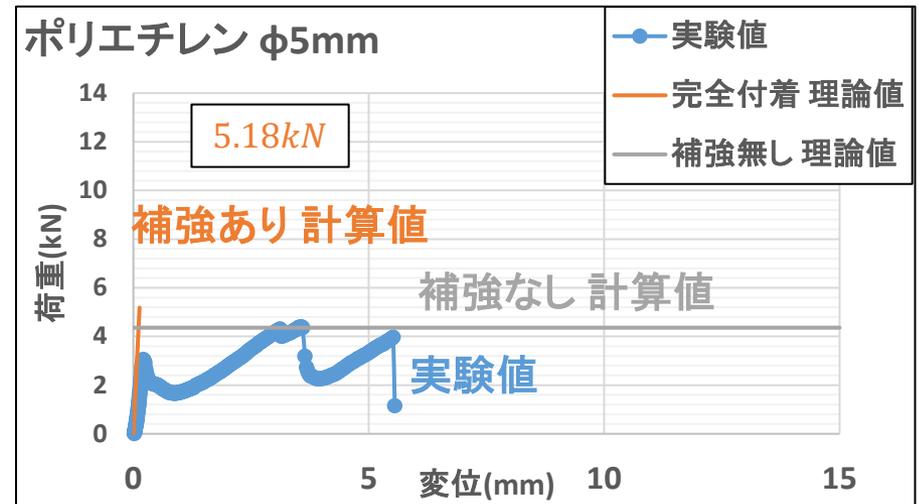
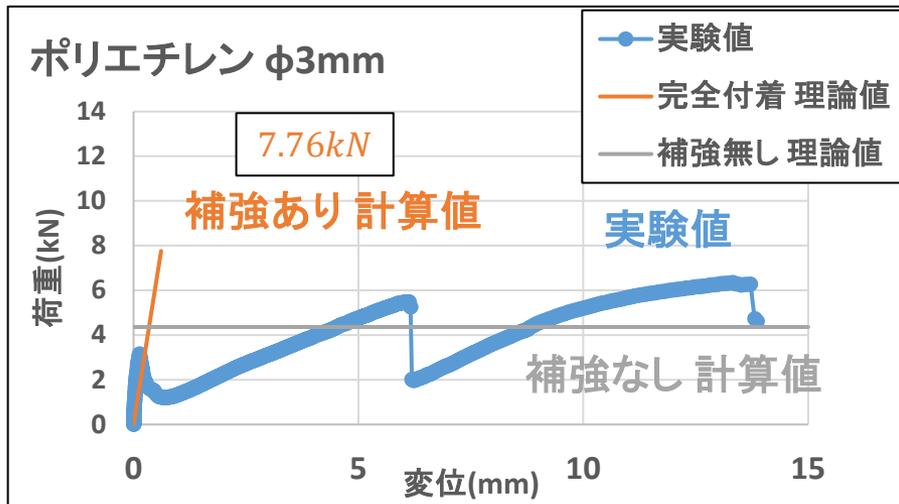
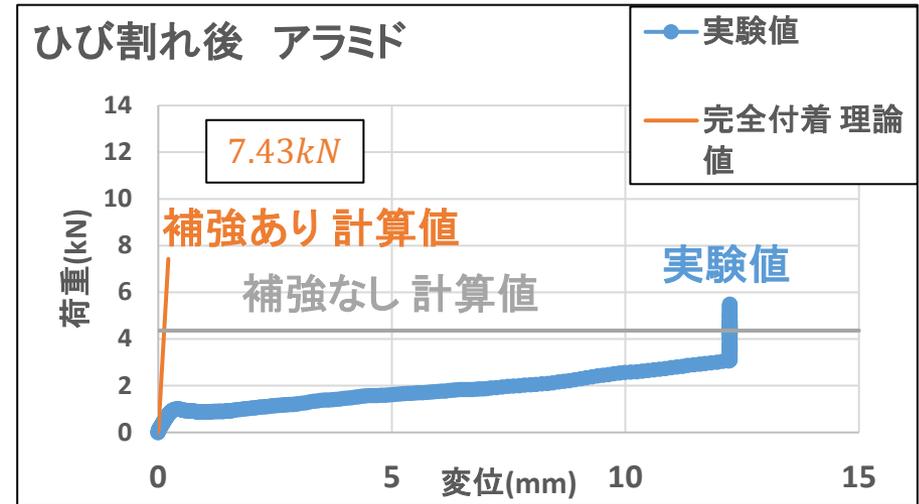
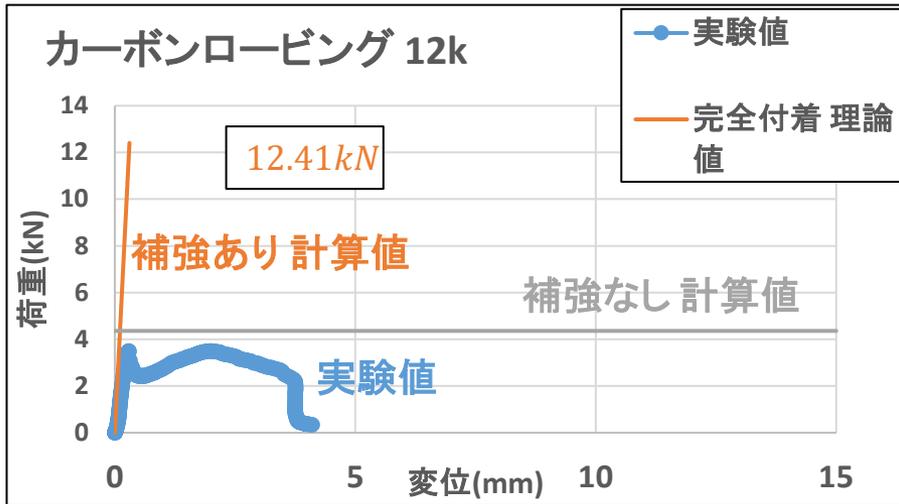
ポリエチレン ϕ 3mm



ポリエチレン ϕ 5mm

ひび割れの分散性が悪い

載荷試験結果(荷重—中央変位関係)



付着が悪いので補強効果が少ない

おわりに

スマートシティ、Society5.0、SDGs...



内閣府、スマートシティガイドブックより

様々な分野の人がインフラに関わる時代

土木が先導役となって、より良い未来を