

木材圧密加工技術の木質ラーメン構造への応用に関する研究

芝浦工業大学 小澤雄樹



はじめに

・木質ラーメン構造 平面自由度の高い開放的な空間を構成可能

一般的な木造ラーメン 接合部に金物を利用

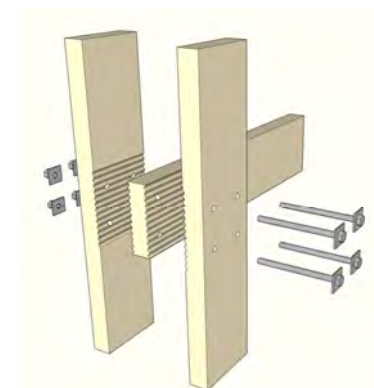
剛性の高い金物を介して応力が伝達されるため、金物と接する部分に応力が集中



局所的な損傷がシステム全体の耐力を決定

研究代表者らは、これまで
柱梁の接触面に設けた溝同士を噛み合わせることで
応力を伝達するシステムを提案

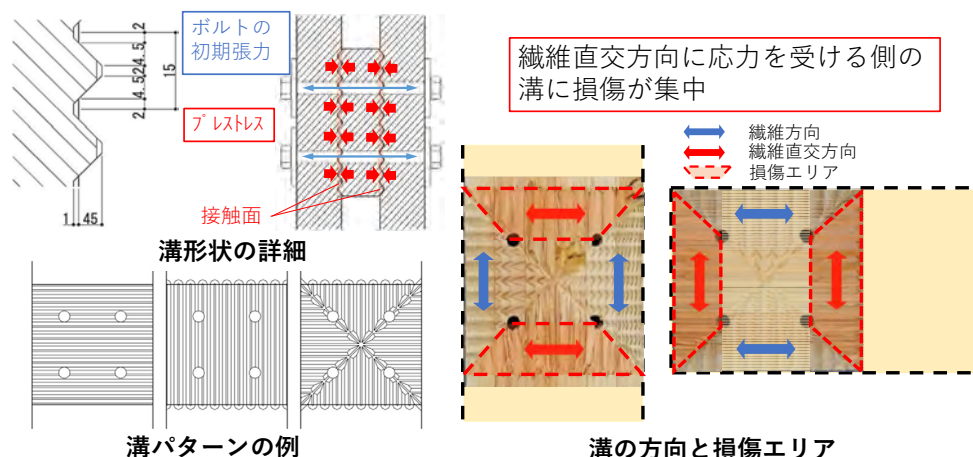
- ・ボルトはプレストレスを導入するために利用
→初期ガタの無い接合部を実現可能
- ・金物を介さず、木材から木材へ直接応力が伝達



接合部に溝を用いたシステム

木材圧密加工技術の木質ラーメン構造への応用に関する研究

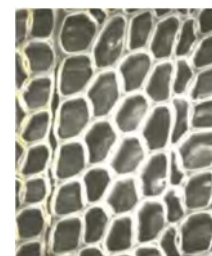
芝浦工業大学 小澤雄樹



木材の繊維直交方向の材料性能の低さがさらなる性能改善を目指す上で障壁となっていた。

圧縮木材とは

木材の細胞壁間にある空隙を圧縮により消失させることで高密度化し、木材の強度や材面の硬さなどの性能向上を図る技術



圧縮木材の細胞壁の様子



圧縮率の異なる圧縮木材

提供：名古屋木材株式会社

日本国内では小物などに使われることが多く、構造材としての利用は殆どない。

木材圧密加工技術の木質ラーメン構造への応用に関する研究

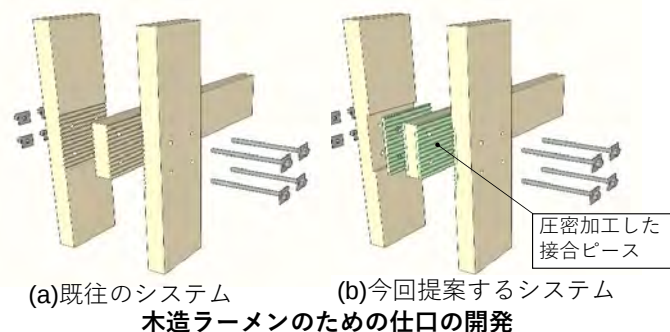
芝浦工業大学 小澤雄樹

木材圧密加工技術の木質ラーメン構造への応用に関する研究

芝浦工業大学 小澤雄樹

研究の目的

圧密加工技術により高強度化した木質ピースを接合部に組み込むことで構造性能の向上を図った新しいタイプの木質ラーメン構造を提案する。



応力の集中する接合部をパースナルに強化することで、高剛性かつ材料効率の良いシステムの実現が可能になる。

研究の方法

- (1) 圧縮木材に関する予備調査
海外視察、関連する実験の概要
- (2) 簡易法による圧縮木材製造と材料実験
マイクロ波照射、材料実験
- (3) 高圧水蒸気プレス法による圧縮木材の構造特性
高圧水蒸気プレス法、圧縮率と強度・ヤング係数の関係
- (4) 接合部曲げ実験
終局時までの挙動の確認、既往研究との比較
- (5) 接合部の非線形解析
接触を考慮した非線形解析、実験結果との比較

圧縮木材に関する予備調査

・海外視察



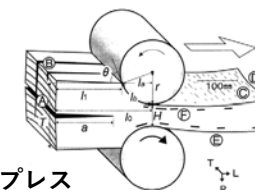
訪問先：ドレスデン工科大学
Prof. Peer Haller
Head of Chair Institute of Steel and Timber Construction



海外視察の様子

圧縮木材の製造工程

- (1) 可塑化
木材の微小細胞構造を破壊せず座屈させるために、軟化処理を施すことであり、薬品を用いた化学処理や、マイクロウェーブオーブンをを用いた加熱や高圧水蒸気を用いた加熱などの物理処理によって達成される。
- (2) 圧縮成形
主には平板プレスとロールプレスがあるが、今回は平板プレスを用いる。
- (3) 形状固定
木材が変形回復しないよう永久固定することである。圧縮変形を与えた木材は乾燥状態では一時的に固定されるが、吸水により弾性回復を示す。一般的に熱処理や水蒸気処理の高温圧縮によって行われる。

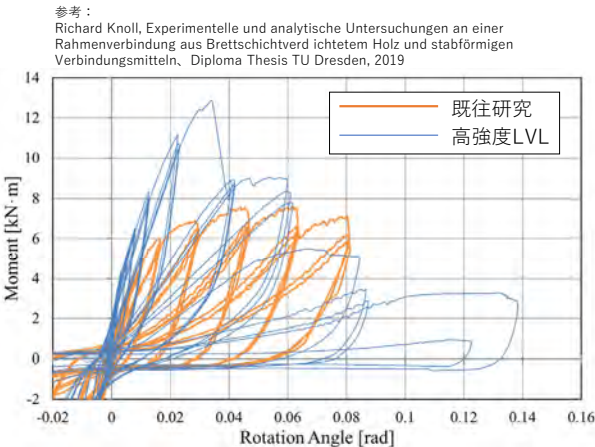


ロールプレス

高強度LVLパネルを用いた実験



高強度LVLパネルの製造



既往研究と高強度LVLパネルを使った実験の比較

圧縮木材の製造方法

本研究では圧縮木材の製造方法として、以下の2種類を検討する。

- ①簡易法
- ②高圧水蒸気プレス法

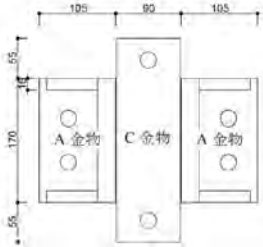
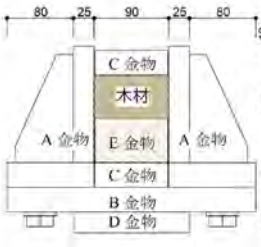
①簡易法
可塑化のための熱処理にマイクロウェーブオープンを用いる方法であり、木材を加熱後ただちに圧縮成形用の治具にセットし、圧縮試験機等で圧縮処理する方法である。汎用のオープンを利用するため、大型の木材は成形できないが、**小部材であれば極めて容易に圧縮木材製造が可能**である。

②高圧水蒸気プレス法
プレス部を内蔵した大型の耐圧容器内で**(1)可塑化と(2)圧縮処理及び(3)形状固定の一連のプロセスを連続的に行う方法**である。可塑化には高圧水蒸気を用い、十分な処理を行うことで、**安定的な品質の圧縮木材を得ることが可能**である。

簡易法による圧縮木材の作成

実験パラメーター一覧

圧縮率	0%	30%	40%	50%
圧縮変位	0mm	31.5mm	42.0mm	52.5mm
加熱		有	無	有
固定時間		24h	24h	72h



圧縮木材製造用治具



Panasonic NE-711G (業務用) 使用したマイクロウェーブ オープン

縦圧縮試験結果

縦圧縮実験結果

	圧縮率								
	0%				30%		50%		
	試験体名	圧縮強度 [N/mm2]	ヤング係数 [kN/mm2]	試験体名	圧縮強度 [N/mm2]	ヤング係数 [kN/mm2]	試験体名	圧縮強度 [N/mm2]	ヤング係数 [kN/mm2]
加熱なし	Hn-C0-1	40.69	9.85	Hn-C30-1	42.60	8.37	Hn-C50-1	47.10	14.08
	Hn-C0-2	44.79	9.69	Hn-C30-2	34.11	10.81	Hn-C50-2	55.62	16.34
	Hn-C0-3	34.98	7.98	Hn-C30-3	48.54	16.75	Hn-C50-3	47.70	20.62
	Hn-C0-4	38.96	8.75	Hn-C30-4	46.14	9.63	Hn-C50-4	59.78	16.62
	Hn-C0-5	43.80	8.40	Hn-C30-5	53.67	11.22	Hn-C50-5	62.69	13.85
	平均	40.64	8.93	平均	45.01	11.36	平均	54.58	16.30
加熱あり				Hy-C30-1	43.82	15.37	Hy-C50-1	54.71	14.63
				Hy-C30-2	49.00	11.95	Hy-C50-2	59.81	18.36
				Hy-C30-3	60.06	13.90	Hy-C50-3	66.09	19.82
				Hy-C30-4	37.18	11.18	Hy-C50-4	52.62	13.35
				Hy-C30-5	83.82	12.21	Hy-C50-5	56.60	25.07
				平均	54.77	12.92	平均	57.97	18.25

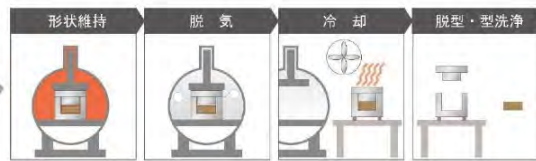
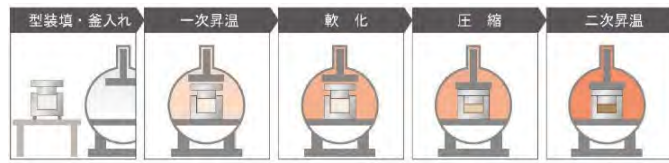


脆性的な破壊性状の例

簡易法による製造のまとめ

圧縮試験機と汎用のマイクロウェーブオープンさえあれば、極めて簡易に製造可能である。ただし、材料の均質性と、終局時に脆性的な破壊性状を示す点で課題を残す。

高圧水蒸気プレス法による圧縮木材

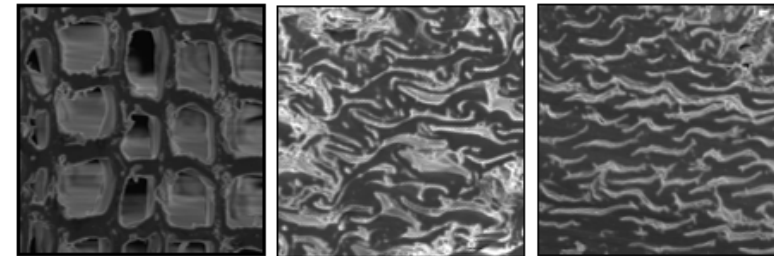


高圧水蒸気プレス法による圧縮木材の製造工程
(名古屋木材HPより)

- (1)可塑性
 - (2)圧縮処理
 - (3)形状固定
- の一連のプロセスを連続的に
行うことが可能
ただし、**材料費は高価**

電子顕微鏡による細胞壁の観察

作成した圧縮木材試験体を薄く切り出し、電子顕微鏡により断面の細胞壁の状況を観察した。



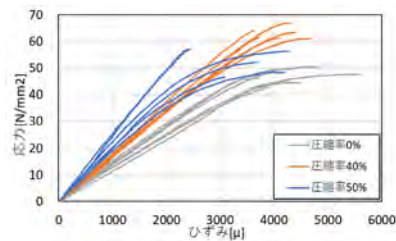
(a)圧縮率0% (b)圧縮率40% (c)圧縮率50%
電子顕微鏡で観察された細胞壁の様子



JEOL/JSM-6010LV
走査電子顕微鏡

細胞壁が座屈変形して畳み込まれ、空隙が減少している様子が観察される。

繊維方向

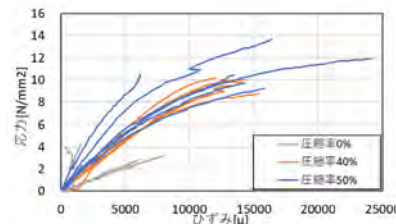


縦圧縮試験結果（応力度-ひずみ関係）

縦圧縮試験結果まとめ

圧縮率		密度	縦圧縮強さ	縦圧縮ヤング係数
		[g/cm ³]	[N/mm ²]	[kN/mm ²]
0%	平均	0.52	47.32	13.28
	標準偏差	0.01	2.12	1.15
	0%に対する倍率	1.42	(1.33)	(1.33)
40%	平均	0.74	63.00	17.69
	標準偏差	0.02	2.12	0.53
	0%に対する倍率	1.42	(1.33)	(1.33)
50%	平均	0.99	52.87	22.26
	標準偏差	0.02	4.24	2.70
	0%に対する倍率	1.90	(1.12)	(1.68)

繊維直交方向

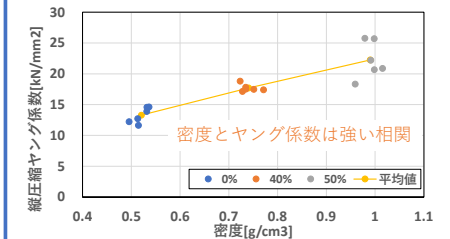
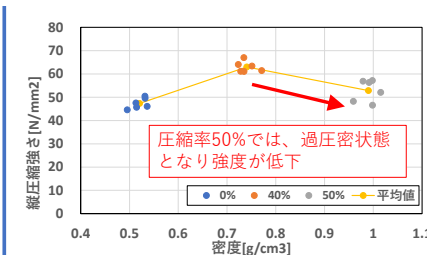


横圧縮試験結果（応力度-ひずみ関係）

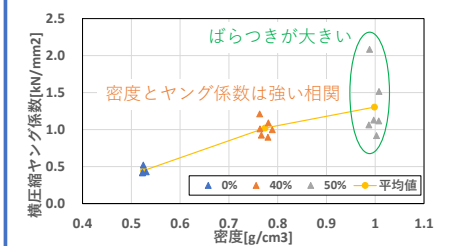
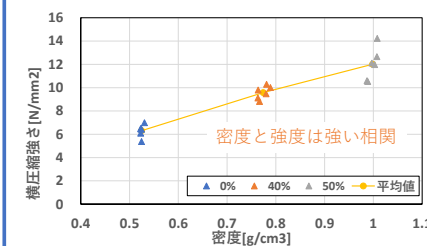
横圧縮試験結果まとめ

圧縮率		密度	横圧縮強さ	横圧縮ヤング係数
		[g/cm ³]	[N/mm ²]	[kN/mm ²]
0%	平均	0.52	6.30	0.45
	標準偏差	0.00	0.49	0.04
	0%に対する倍率	1.48	(1.52)	(2.29)
40%	平均	0.77	9.58	1.02
	標準偏差	0.01	0.51	0.11
	0%に対する倍率	1.48	(1.52)	(2.29)
50%	平均	1.00	12.01	1.30
	標準偏差	0.01	1.26	0.39
	0%に対する倍率	1.92	(1.91)	(2.93)

繊維方向



繊維直交方向



密度-縦圧縮強さ関係

密度-横圧縮ヤング係数関係

接合部曲げ実験

・圧縮木材パネルと柱梁母材の接着

使用接着剤：

水性高分子イソシアネート系接着剤 ピーアイボンド5340W+H50



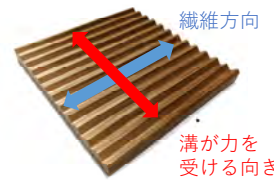
(a)主材と架橋剤を配合し、200～300g/m²を圧縮木材パネルにローラーで塗布する。



(b)硬化を始める時間内ですばやくパネルと母材を順番に重ねていく。

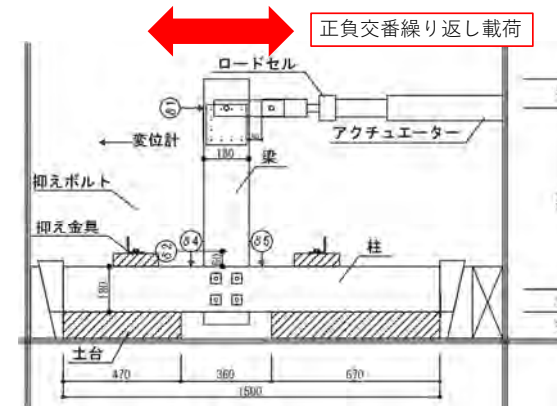


(c)60分以上圧縮を行い、治具を外す。その後、1週間養生。



パネルと母材の接着の様子

柱梁接合部曲げ実験概要



ステップ数	1	2	3	4	5
見かけの変形角	1/300	1/200	1/150	1/100	1/75
変形量[mm]	2.4	3.6	4.8	7.2	9.6
載荷速度[mm/s]	0.04	0.06	0.08	0.12	0.16

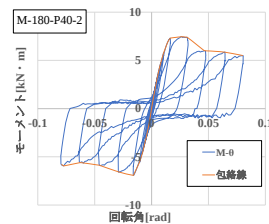
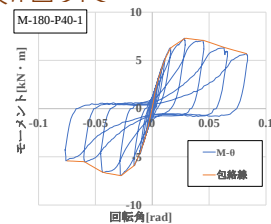
	6	7	8	9	10	押切り
	1/50	1/30	1/20	1/15	1/12	1/6
	14.4	24	36	48	60	120
	0.24	0.4	0.6	0.8	1.0	1.0

載荷スケジュール

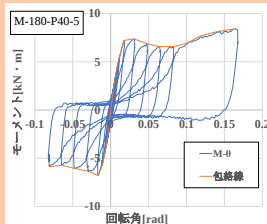
接合部曲げ実験の実験装置概要と載荷スケジュール

実験結果

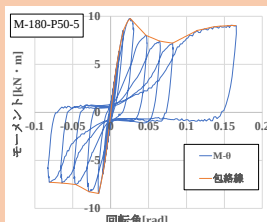
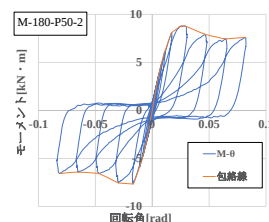
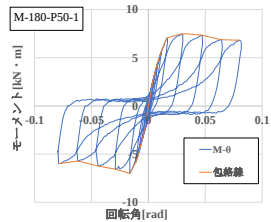
P40



回転角1/6まで押切り

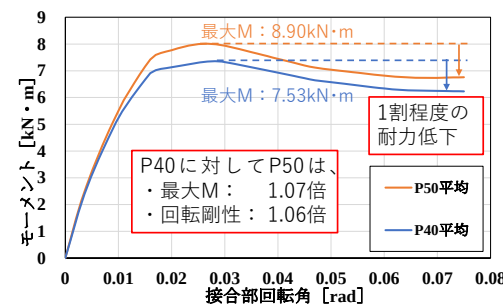


P50



接合部曲げ実験結果（モーメント一回転角関係）

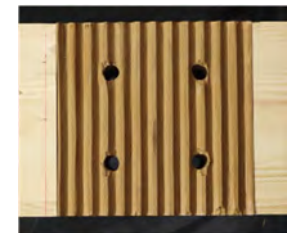
実験結果まとめ



平均化した包絡線による比較

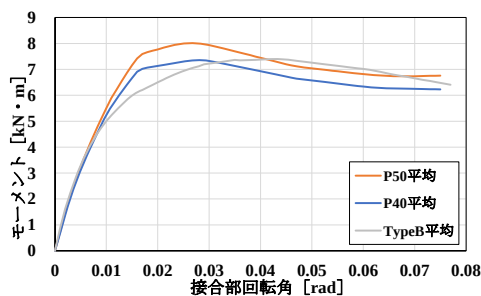
- 両者の実験結果は非常に類似している。
- 終局時には最大耐力時より1割強程度の低下を示すものの、急激な耐力低下は生じなかった。
- 破壊性状そのものはやや脆性的であるものの、接合部全体としては靱性をたもったまま挙動することが分かる。

破壊性状の例（柱側が破壊した場合）



P40、P50共に溝が根元から剥離するような破壊が発生

既往研究との比較

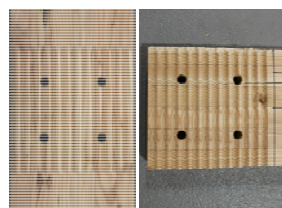


既往研究との比較

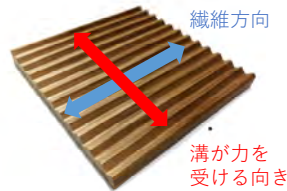
P40の耐力・剛性は既往研究と同等程度、P50は若干上昇

さらなる剛性・耐力の向上を図るために

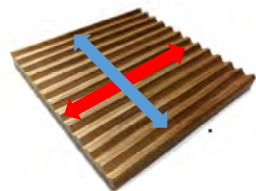
繊維方向と溝の向きを直交させたモデルについては、
2022年10月後半より実施予定。



TypeB (カラマツ集成材)



(a) 今回のモデル



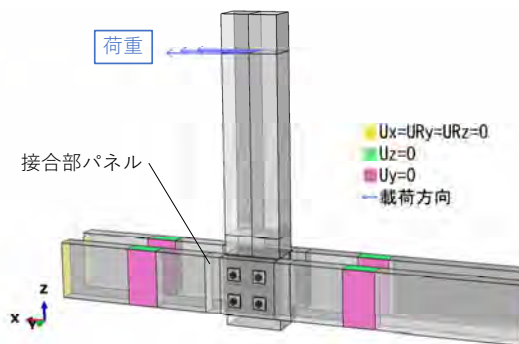
(b) 次回実施予定のモデル

繊維方向と溝の関係

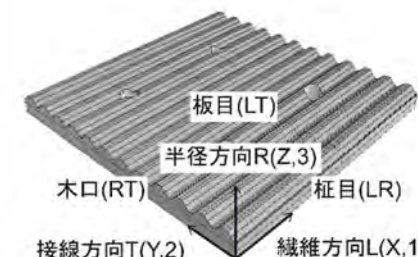
接合部の非線形解析

木材のめり込みと溝斜面の接触・滑り摩擦を考慮した接合部の非線形解析を行う。

・使用ソフト：汎用有限要素法プログラム「Abaqus」



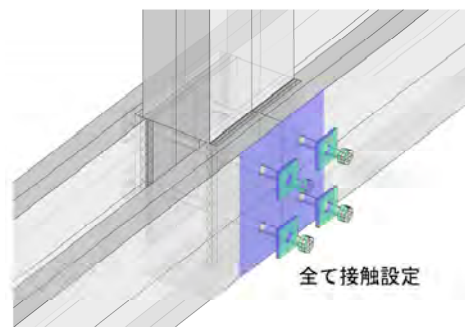
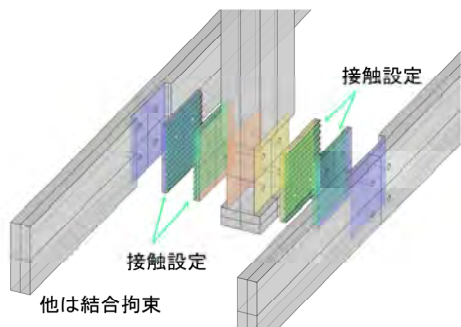
解析モデル



接合部パネルの各方向の設定

解析の諸条件

接触接線方向：ペナルティ法 摩擦係数0.5
接触方向：剛接触
接着箇所：結合拘束を用いて並進・回転自由度を結合

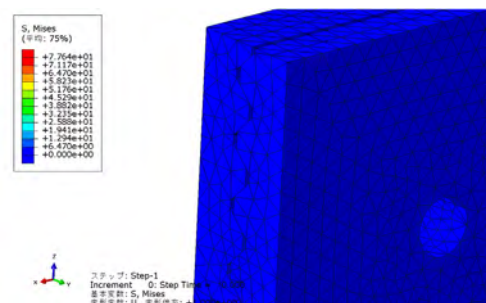


接触条件の設定

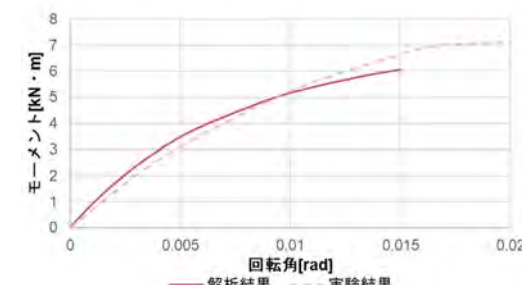
- ステップ1：ボルト荷重8kN
- 初期増分値0.01 最小1E-5 最大1

- ステップ2：24mmの強制変位
- 自動増分機能を用いる

解析結果まとめ



溝部分の解析の様子



解析結果と実験結果の比較

- 実験結果と解析結果はよく一致
- 解析手法は溝形状や溝配置の検討に有効

- モデルの妥当性を確認
- 今後、最適な溝形状・配置を検討

まとめ

本研究では圧密加工技術により製造された圧縮木材パネルを用いた木質ラーメン構造の新しい接合方法を提案し、その有効性を実験的・解析的に検証した。その結果、以下の知見を得た。

- 圧縮木材を製造方法として①簡易法は容易に製造可能であるが、材料が脆性的になり易い点で課題を残した。一方、②高圧水蒸気プレス法は、剛性、強度共に比較的安定した性能を示した。
- 圧縮率40%、50%共に、圧縮なしの試験体と比較して剛性・強度共に大幅に向上した。ただし、圧縮率50%では過圧密状態となり、40%と比較して縦圧縮強度が低下する傾向が見られた。
- 接触・摩擦を考慮した非線形解析により、実験結果を精度よく再現可能である。
- 本手法は応力の集中する接合部を局所的に強化することが出来、現時点では比較的高価な圧縮木材を効率的に利用可能である。

課題と今後の予定

- 曲げ実験結果は靱性的な挙動を示したが、今回の実験ではパネルの溝を繊維と並行な方向としたため、剛性・耐力の向上と言う点では課題を残した。今後、繊維直交方向に溝を掘った場合の実験を実施予定である。
- 今回実施した数値解析手法により、より有効な溝形状・溝配置について検討していく。

最後に

コロナ禍で研究期間の1年延長を認めていただき、3年間の研究期間となりました。木材圧密加工技術の木質ラーメン構造への適用に向けて、多面的に検討することが出来、今後の展開に繋がる有意な知見を得られました。

助成頂いたことにあらためて感謝申し上げます。



ハンドリング荷重を自動多段調整可能な 機械式自重補償上腕アシスト装具

2022年10月14日

法政大学デザイン工学部 システムデザイン学科 准教授

山田泰之

自己紹介

山田 泰之 (ヤマダ ヤスユキ)

専門 : デザインエンジニアリング, 機構学,
人間工学, ソフトロボティクス, 自動車工学

研究 : ハイヒールからロケット技術まで!!
アシストデバイス, 道具や工具, 移動機構, 機構, 日用品,
産業機械, アパレル

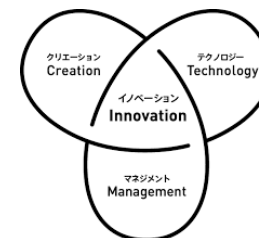
デザインエンジニアリングと社会の融合

・法政大学 デザイン工学部 システムデザイン学科 准教授
兼任: 株式会社ソラリス CTO

・中央大学精密機械工学科助教: ソフトロボット

・Imperial College London
Dyson School of Design Engineering 訪問助教

・日産自動車 R&D



TasKi

バッテリーなしの上腕アシスト

- 片腕 1.2~1.8 kgfの補助(交換可能)
- バッテリー必要なし
- 軽量 2.2 kg
- 簡単脱着

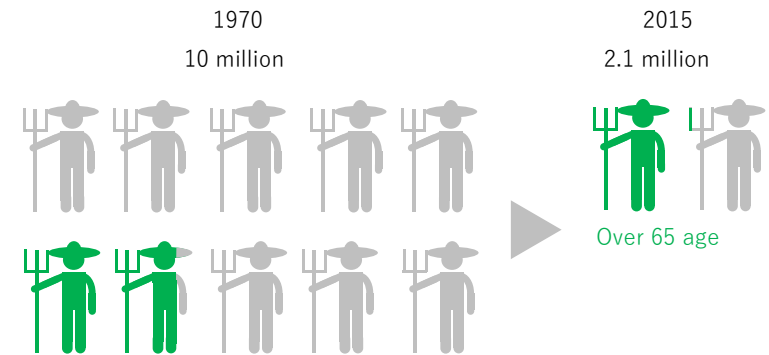


JAMES
DYSON
AWARD
2016

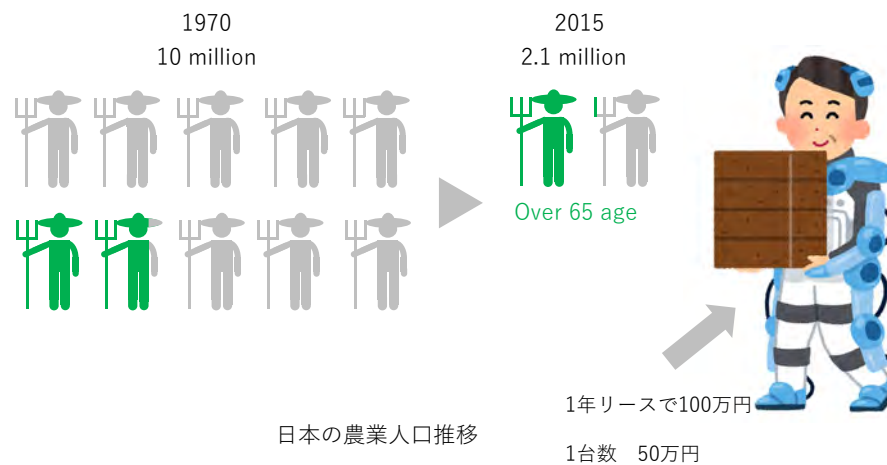
必要最小限のアシスト力を多くの人（リーズナブル）に提供

- ・ 自力作業を後押しする程度の必要最小限アシスト力を提供.
- ・ 電源不要：電池切れの心配，雨風の影響を心配せず継続利用
- ・ 軽量で他の作業の邪魔になりづらい
- ・ 使ってみようと思えるリーズナブル価格

様々なものづくり分野で担い手の減少・高齢化が進んでいる



日本の農業人口推移



様々な現場の聞き取り & 調査

- ・ 1人で使ってたなら，村八分．チーム全員で使える価格
- ・ 他の作業の邪魔になるんだったら，意味ない．
- ・ ダサい．

必要最小限のアシスト力を多くの人（リーズナブル）に提供

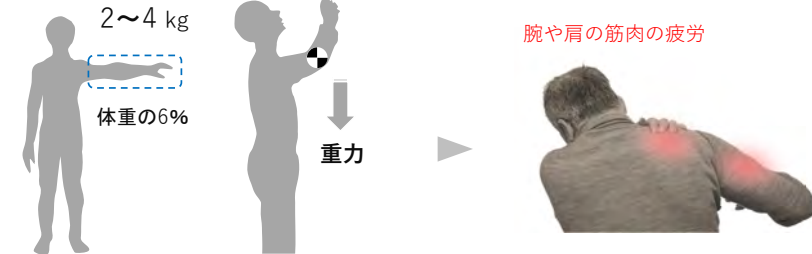
- ・ 自力作業を後押しする程度の必要最小限アシスト力を提供.
- ・ 電源不要：電池切れの心配，雨風の影響を心配せず継続利用
- ・ 軽量で他の作業の邪魔になりづらい
- ・ 使ってみようと思えるリーズナブル価格

上向き作業

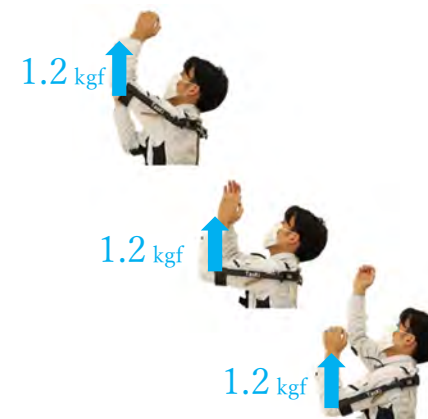
上腕を長時間挙げる，上げ下げする作業

作業例

- | | |
|----------|---------------|
| ・ 農作業分野 | ： 棚栽培，果樹収穫など |
| ・ ものづくり | ： ラインの部品組付けなど |
| ・ 大型製造分野 | ： 上向き溶接工事 |
| ・ 建設分野 | ： 内装工事，天井工事など |

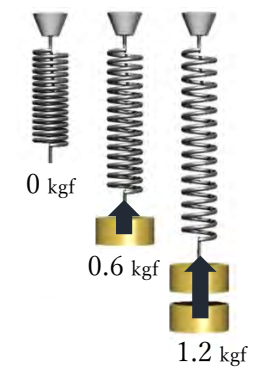


機械式自重補償



腕の重さが仮想的に軽減
どの腕の姿勢でも “ふわふわ”

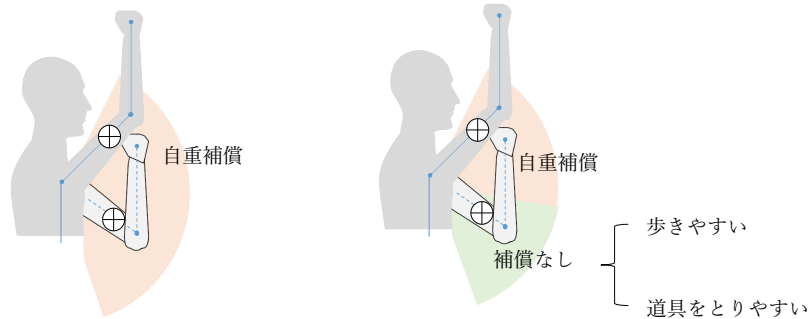
ばね



位置によって，ばね力が変わる
下がるほど強くなる

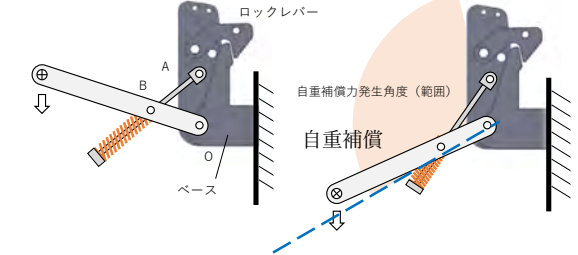
現場に導入してテスト

- ・歩くとき違和感がある.
- ・道具や資材を取る際に抵抗感がある.

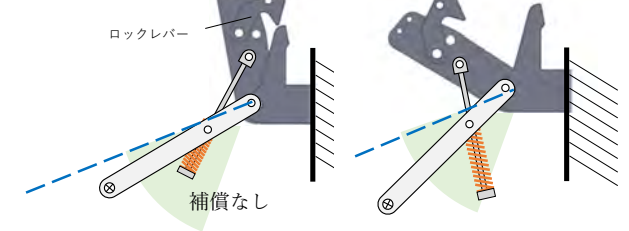


ハンドリング荷重を”自動”多段調整が必要

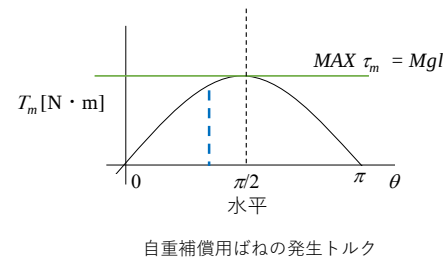
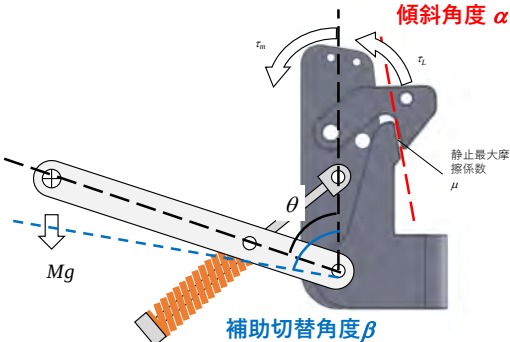
機械式自重補償力発生ON



機械式自重補償力発生OFF



原理



- ・水平より上方の任意角度 β で補助を切り替えたい場合
⇒ 角度 α を適切に設定するだけで、補助力0へ切り替え可能
- ・水平より下方の任意角度 β で補助を切り替えたい場合
⇒ 角度 α に加えて、ロックを動かす追加機構必要

試験機の製作

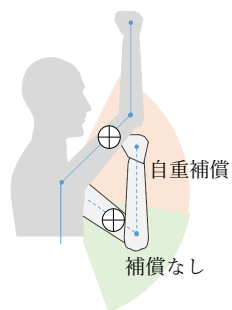


歪みや摩擦があり、理論通りには動かない。
条件を変更しつつ、3Dプリンタ等を利用して、10回以上試作



まとめ

- ・ 自重補償機構に補助力自動切換え機構を提案した
- ・ ロックレバーを用いた補助力切り替え機構とその原理を検討した
- ・ 上腕アシスト装置に搭載できる形式で補助力切り替えを実現した。



- ・ 塗装関係：スプレーガンを持つ作業がづらい
- ・ 壁画アーティスト：壁画をかくのがづらい
- ・ 漆喰壁職人：左官作業がづらい
- ・ ガス関係：検査作業がづらい

ご清聴ありがとうございました。



植物性コンクリートの開発

東京大学生産技術研究所 人間・社会系部門

酒井 雄也

ysakai@iis.u-tokyo.ac.jp
http://r.goope.jp/ysakai

コンクリートの主原料



様々な課題が出てきている

2

From: 日本コンクリート

セメント製造におけるCO₂排出

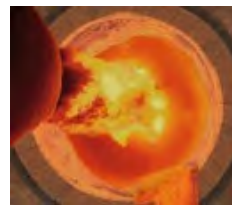
From: 日本コンクリート, ZKG Cement Lime Gypsum



セメントの主原料は石灰石（CaCO₃）



焼成により
多量のCO₂が発生



全世界のCO₂排出の8%がセメント製造で発生している

日本だけで毎年3000~3500万トンのコンクリートがれき
再資源化率は99%（内訳に課題）



出典：Medium

4



廃棄される植物系の資源



廃棄木材

- ・国内だけで年間約600万トン発生。
- ・約3割が焼却処分。

廃棄植物

- ・例えばトマトでは生産量と同量の茎葉が発生 (国内だけで年間70万トン)
- ・ほかにも茶殻など様々



製紙廃液

- ・リグニンを主成分とする廃液が国内だけで年間7000万トン発生
- ・バイオマスに利用されているが発電効率が低い

植物性コンクリートの製造

廃木材の粉末を接着剤としてコンクリートがれきを接着し、新たな土木／建築材料を製造した

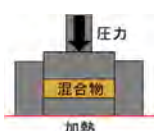


課題と本研究の目的

①コンクリートがれきと
廃木材を粉砕

②2種の粉体を混合して
加熱成形

③成形体として再生

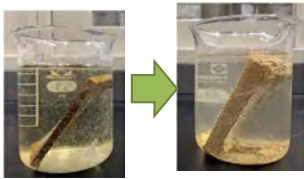


コンクリート粉 木粉

圧力
混合物
加熱

- ・コンクリート粉の代わりに**砂粉**を使った場合の性能が不明
- ・植物性コンクリートの**強度発現機構**の理解が不十分
- ・**耐水性**が低い

本研究の目的：上記の理解や改善

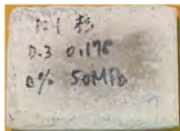
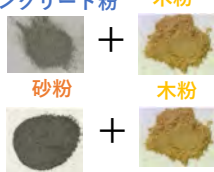


実験方法：コンクリートと砂の違いの理解

①原料を粉砕
コンクリート粉 木粉
砂粉 木粉

②混ぜ合わせて
水を加えて加熱成形

③成形体が完成
(縦5cm、横6.5cm)



加熱
圧力
混合物
加熱

条件	割合 コンクリート or 砂:木	コンクリート粉 砂粉の最大粒径 mm	木粉の 最大粒径 mm	含水率 %	成形 時間 min	成形 温度 ℃	成形 圧力 MPa
1	1:1	0.105-1.18	0.3	10	5	180	50
2	2:1-1:2	0.3	0.3	10	5	180	50

その他に、木粉の最大粒径、含水率、成形時間、成形温度、成形圧力の影響も検討したが省略

$$\text{含水率}(\%) = \frac{\text{水の質量}}{\text{全体の質量}} \times 100$$

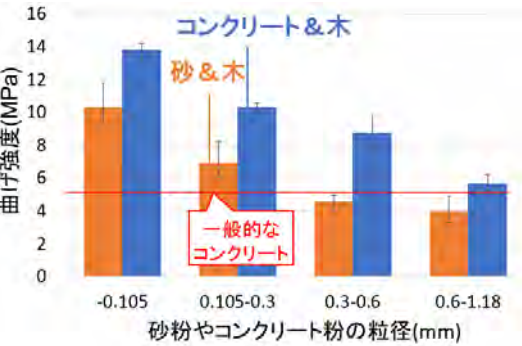


3点曲げ試験により
曲げ強度を評価

結果①：砂やコンクリートの粒径の影響

砂やコンクリートの
最大粒径
0.105-1.18 mm

割合 コンクリート or 砂:木	木粉の 最大粒径 mm	含水率 %	成形時間 min	成形 温度 ℃	成形 圧力 MPa
1:1	0.3	10	5	180	50



コンクリート&木
砂&木
一般的な
コンクリート

・コンクリート粉を用いた場合と
比較して強度が低下

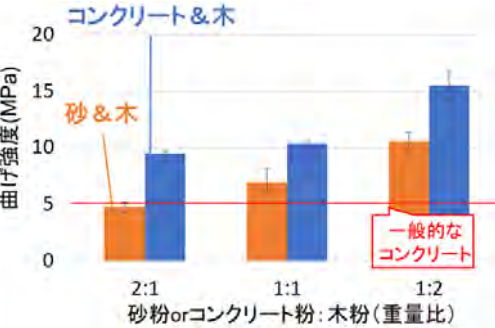
・いずれも粒径が大きくなるにつれて強度が低下

砂を用いるとコンクリートの場合よりも強度が低下することを確認

結果②：混合比の影響

混合割合（重量比）
コンクリート粉 or
砂粉:木粉
2:1, 1:1, 1:2

コンクリート粉 砂粉の最大粒径 mm	木粉の 最大粒径 mm	含水率 %	成形 時間 min	成形 温度 ℃	成形 圧力 MPa
0.3	0.3	10	5	180	50



コンクリート&木
砂&木
一般的な
コンクリート

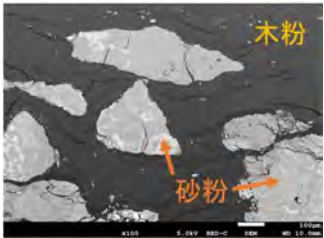
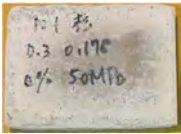
・いずれも**木粉**の割合が
大きいほど強度が増加

木粉に含まれるリグニン
により接着されるためか

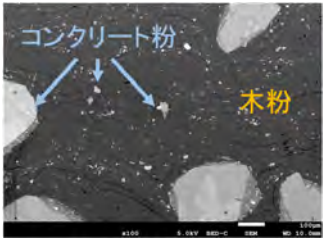
砂を用いるとコンクリートの場合よりも強度が低下することを確認

結果③：SEM観察

割合 コンクリート or 砂:木	コンクリート粉 砂粉の 最大粒径 mm	木粉の 最大粒径 mm	含水率 %	成形 時間 分	成形 温度 ℃	成形 圧力 MPa
1:1	0.3	0.3	10	5	180	50



砂 & 木
間隙の面積率：9.9%



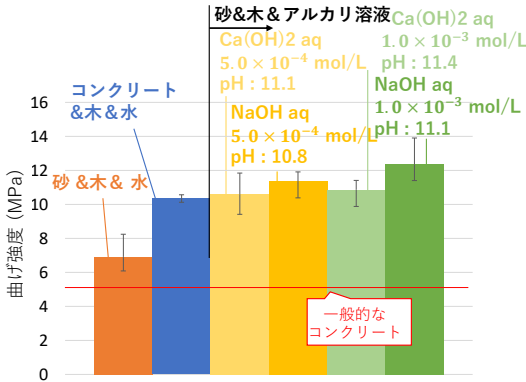
コンクリート & 木
間隙の面積率: 6.2%

- ・ **コンクリート粉**の方が丸みを帯びており微粒子が点在
- ・ 間隙の面積率は**コンクリート粉**の場合に抑制

コンクリート粉と木材の成形体の方が隙間が少ないことを確認

仮説: pHが影響している可能性がある

割合 コンクリート or 砂:木	コンクリート粉 砂粉の 最大粒径 mm	木粉の 最大粒径 mm	含水率 %	成形 時間 分	成形 温度 ℃	成形 圧力 MPa
1:1	0.3	0.3	10	5	180	50



- ・ 水の代わりにアルカリ溶液を使用すると強度が増加

強塩基溶液は成形中に**木材**の化学変化を促進(Song, J. et al. ,2018)

- ・ **砂**を用いてもアルカリ溶液により**コンクリート**の強度を上回った

砂と木粉から製造する場合も、アルカリ溶液の使用で強度改善

検討: 耐水性の改善

①コンクリートがれきと廃木材を粉砕



コンクリート粉 木粉

② 3種の粉体を混合して加熱成形

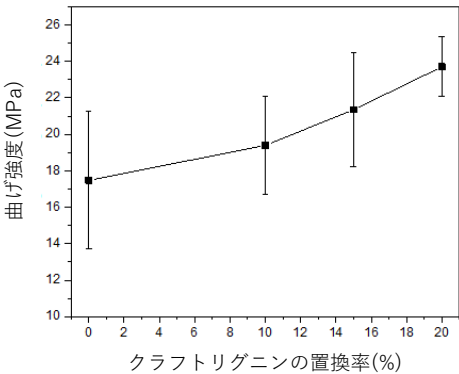
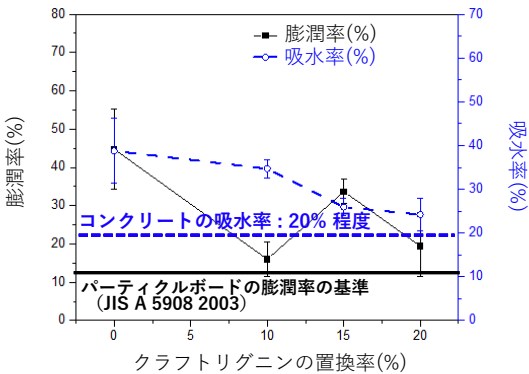


③成形体として再生



結果: 耐水性の改善（クラフトリグニンの置換）

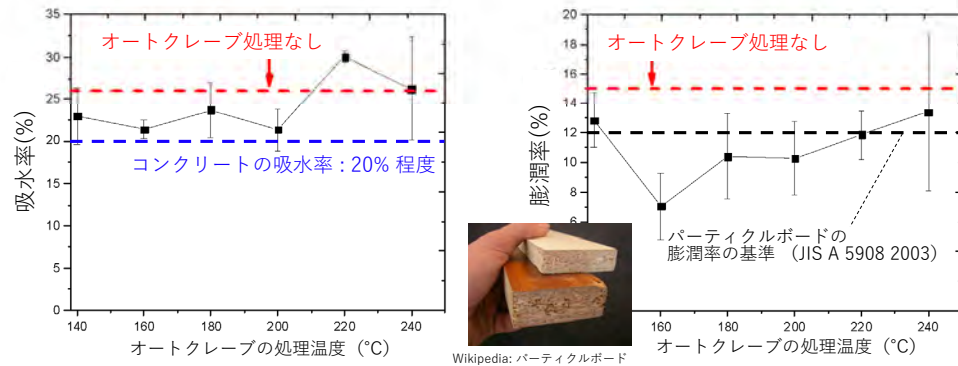
- ・ コンクリートと木材を重量比 1：1 で混合。ホットプレスの条件は220 ° C、5 min、50 MPaで固定
- ・ クラフトリグニンは木粉に対して置換（重量比）



クラフトリグニンの使用により強度と耐水性を同時に改善可能

結果: 耐水性の改善（木粉のオートクレーブ処理）

- ・コンクリートと木材を重量比1：1で混合。ホットプレスの条件は220 ° C、5 min、50 MPaで固定
- ・クラフトリグニンは木粉に対して30%置換（重量比）



オートクレーブの併用により吸水性、膨潤率を他の材料程度に改善可能

17

まとめ

本研究の目的と成果

① コンクリート粉の代わりに砂粉を使った場合の性能の理解

- ・砂粉を使用するとコンクリートの場合と比較して強度低下
- ・アルカリ溶液の使用でコンクリートの場合を上回る強度発現

② 植物性コンクリートの強度発現機構の理解

- ・高pHの環境でリグニンが軟化し、ホットプレス中の変形が促進され、間隙が埋められることで強度が増進か

③ 耐水性の改善

- ・クラフトリグニンの添加、木粉のオートクレーブ処理によりコンクリート程度の吸水率、パーティクルボード程度の膨潤性を付与可

18

原位置での炭酸水注入による 岩盤強度・遮蔽性能向上に関する研究

京都大学 奈良禎太

研究背景

- 地球温暖化抑制を目的として、多孔質な堆積岩に二酸化炭素を貯留する、**二酸化炭素地中貯留(CCS)**が検討されている。
- 放射性廃棄物を地下に閉じ込めることを目的に、堆積岩や火成岩を対象に研究開発が行われている(**放射性廃棄物地層処分**)。
- このような地下岩盤を利用するプロジェクトにおいては、**岩盤の透水性**や、**周辺環境による透水性への影響**について知ることが重要である。

2

研究背景

CCSにおいて二酸化炭素を圧入する際、地下の温度・圧力条件下では、二酸化炭素が**超臨界状態**になることで、岩盤内で破壊を促進し、誘発地震を起こす可能性が問題視されている。(Zoback and Gorelick, 2012)

- 二酸化炭素を直接岩盤に注入するのではなく、**炭酸水(炭酸イオン)**の状態で注入すれば、炭酸イオンが炭酸塩鉱物として固定され、超臨界状態になる二酸化炭素の量が減少することで、誘発地震のリスクが軽減される可能性がある。

3

研究目的

- 原位置岩盤において、炭酸水を注入したときの透水性への影響については十分にわかっていない。



- 幌延深地層研究センターの深度350m調査坑道(泥岩層)にてボーリング孔を掘削し、岩盤に炭酸水を注入する試験を行う。
- その間、原位置透水試験を行うことで透水係数を測定し、炭酸水注入による**岩盤の透水性への影響**を調べる。

4

施設の概要

日本原子力研究開発機構(JAEA) 幌延深地層研究センター



5

実験準備（ボーリング孔掘削）

- 壁面にボーリング孔を掘削した。



6

実験方法（原位置透水試験）

- 透水試験の装置を設置。



7

実験方法（原位置透水試験）

1. ハンドポンプで送水し、試験孔とその周辺岩盤を水で満たす。

2. 試験孔に注水して原位置透水試験を行い、初期状態の岩盤の透水係数を測定する。

3. 炭酸水を緩やかに注入し続ける。（20 mL/min以下）

4. 1,2と同様の手順で原位置透水試験を行い、炭酸水注入中の透水係数を測定する。

繰り返し

8

実験方法（初期の透水係数測定）



9

実験方法（初期の透水係数測定）

- 試験孔に一定流量(30 mL/min)で注水し，注水圧を測定することで定流量透水試験を行い，透水係数を求めた。

- 原位置透水試験における透水係数 $k(\text{m/s})$ は，次の Hvorslev の定常式により求められる。

$$k = \frac{Q}{2\pi L} \frac{\rho_w g}{P} \ln \left(\frac{2L}{D} \right)$$

(Hvorslev, M., 1951)

Q : 注水流量(m^3/s), L : 試験区間長(m), D : 試験孔直径(m)
 ρ_w : 水の密度(kg/m^3), g : 重力加速度(m/s^2), P : 注水圧(Pa)

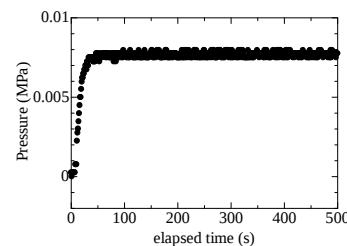
10

実験結果（初期の透水係数測定）

$$k = \frac{Q}{2\pi L} \frac{\rho_w g}{P} \ln \left(\frac{2L}{D} \right)$$

(Hvorslev, M., 1951)

時間の経過とともに，注水圧が一定となった時を定常状態とした。



注水圧の測定結果の例
(初期状態, 30mL/min)

- 岩盤の初期の透水係数は $2.2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 程度と求められた。

11

実験方法（原位置透水試験）

1. ハンドポンプで送水し，試験孔とその周辺岩盤を水で満たす。

2. 試験孔に注水して原位置透水試験を行い，初期状態の岩盤の透水係数を測定する。

3. 炭酸水を緩やかに注入し続ける。（20 mL/min以下）

4. 1,2と同様の手順で原位置透水試験を行い，炭酸水注入中の透水係数を測定する。

繰り返し

12

実験方法（炭酸水の注入）

- 試験孔に炭酸水(pH:4.0, 炭酸イオン濃度:1.8 g/L)を注入する.



13

実験方法（原位置透水試験）

1. ハンドポンプで送水し、試験孔とその周辺岩盤を水で満たす。

2. 試験孔に注水して原位置透水試験を行い、初期状態の岩盤の透水係数を測定する。

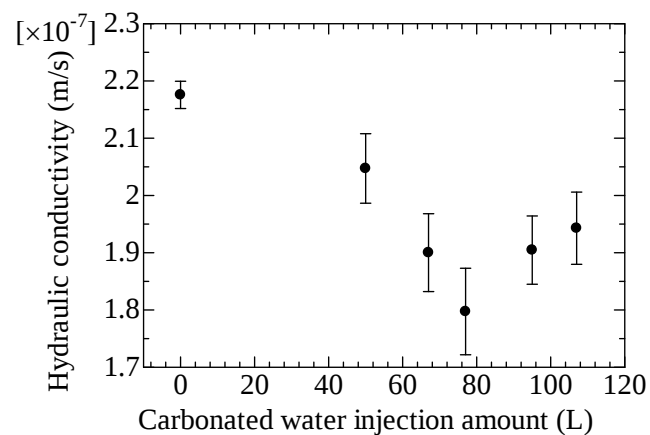
3. 炭酸水を緩やかに注入し続ける。（20 mL/min以下）

4. 1,2と同様の手順で原位置透水試験を行い、炭酸水注入中の透水係数を測定する。

繰り返し

14

試験結果（炭酸水注入後の透水係数）



15

試験結果

- 炭酸水注入後、透水係数が低下傾向を示している。

- 炭酸水中の炭酸イオンが周辺環境中に存在する陽イオンと反応することで鉱物析出が生じ、周辺岩盤のき裂・空隙を充填している可能性がある。

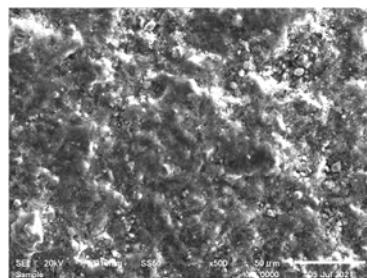
- イオンクロマトグラフィーを用いて同じ深度の地下水中のイオン濃度を測定したところ、カルシウムイオン（濃度 22 mg/L）、マグネシウムイオン（濃度 51 mg/L）が確認された。

16

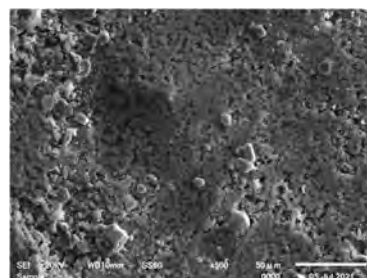
SEM-EDS 分析

- SEM（走査型電子顕微鏡）で撮影した二次電子像の比較。
- 炭酸水注入実験前後で表面の形状に変化があった。

↑ 析出鉱物によって被膜が形成されている。



炭酸水注入前の泥岩試料

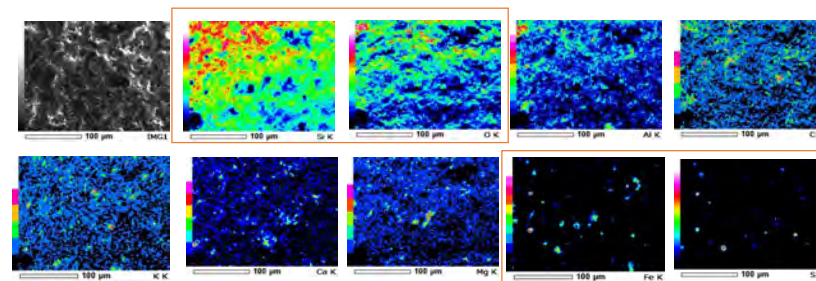


炭酸水注入後の泥岩試料

17

SEM-EDS 分析

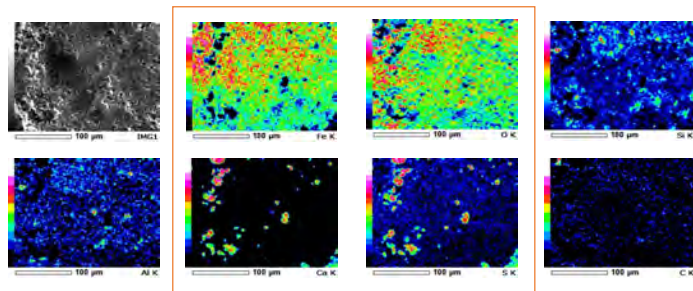
- 炭酸水注入前の泥岩試料（500倍）の元素マッピング結果。
- SiやO, Alなどの元素が満遍なく分布する（石英、クリストバライト、斜長石類など）。FeやSの分布は局所的であり、黄鉄鉱（ FeS_2 ）と考えられる。



18

SEM-EDS 分析

- 炭酸水注入後の泥岩試料（500倍）の元素マッピング結果。
- 全体的にFe, Oで主に構成される鉱物の被膜が形成されている。また, Ca, Sで構成される鉱物がまばらに存在する。



19

まとめ

- 幌延深地層研究センターの深度350m調査坑道にて原位位置透水試験を行い、炭酸水注入による岩盤の透水性への影響を調べた。
- 岩盤の初期の透水係数は $2.2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 程度と求められた。周辺岩盤にき裂がよく発達し、水みちとなっていると考えられる。
- 炭酸水の注入後に透水係数が低下した。
- 炭酸水注入により析出した鉱物が岩盤内のき裂や空隙を充填し、透水係数の低下が生じたと考えられる。

20

最近の研究成果と今後の展望

- カルシウムリッチな水中では、蒸留水中よりもき裂進展速度が低下する
 - カルシウム化合物の析出によるき裂進展の抑制
- セメント系材料を炭酸水と同時に注入すると、岩盤の透水係数がより顕著に低下する。
 - カルシウム化合物の析出による遮蔽性能の上昇

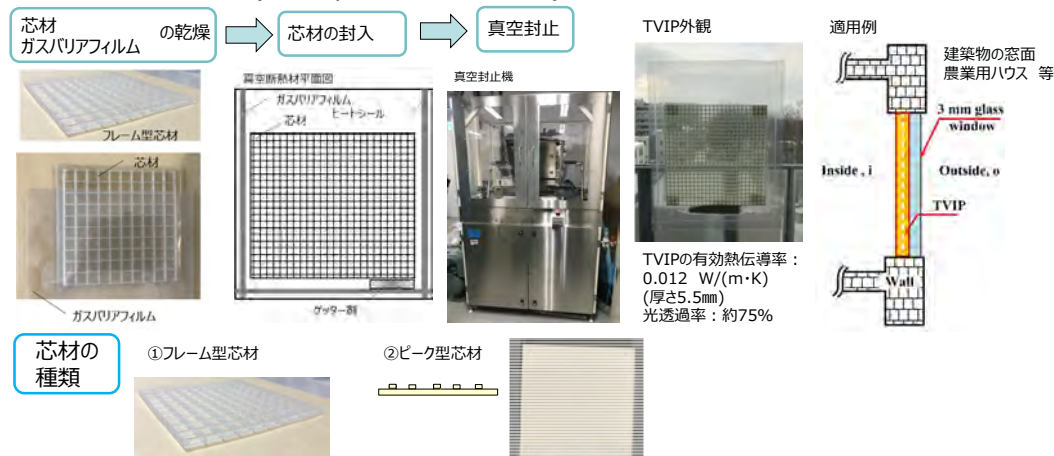
カルシウム化合物（特に炭酸カルシウム）が析出しやすい環境下では、岩盤の破壊抑制や遮蔽性能上昇が期待でき、岩盤の長期安定性確保に好都合である。

ZEB化改修に寄与する光透過型真空断熱材の開発

北海道大学大学院工学研究院
葛 隆生

光透過型真空断熱材の概要と特長

光透過型真空断熱材(Transparent VIP, TVIP)の製作方法と適用例



光透過型真空断熱材の概要と特長

光透過型真空断熱材の特長…高性能、軽量、安価

TVIPと他の光透過性のある断熱改修技術の比較

Design	TVIP	Low-Eペアガラス	真空断熱ガラス	シリアエアロゲル断熱材
Photo				
熱貫流率	1.5 W/(m²K) (3mm窓ガラスに設置した場合)	1.9 W/(m²K) (一般的な市販品の値を採用)	0.5~1.4 W/(m²K) (市販品の値を採用)	1.5 W/(m²K) (厚さ10mmを想定)
改修方法	簡易設置可(軽量)	要工事(重い)	要工事(重い)	簡易設置可(軽量)
製造コスト [円/m²]	1万円以下(目標)	2万円以上	3万円以上	10万円以上

光透過型真空断熱材の課題と本研究の内容

光透過型真空断熱材の課題

1. 真空封止直後のTVIP内部の圧力の上昇
→芯材からのガス放出の抑制(目下の最大の課題となっている)
2. TVIPに適した芯材形状の検討
3. 長期的なTVIPの断熱性能の維持
4. TVIPの建築適用時の外観の検討

本研究の内容

- ・蓄積法を応用したガス放出定量試験とTVIP芯材からのガス放出低減方法の検討
- ・スループット法によるTVIP芯材のガス放出測定試験
- ・3DプリンタによるTVIP芯材の作製とTVIPの有効熱伝導率の評価



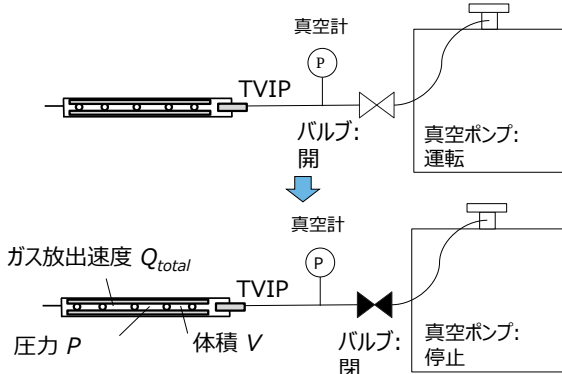
ガス放出定量試験とTVIP芯材からのガス放出低減方法の検討

蓄積法によるガス放出速度定量化試験

外観



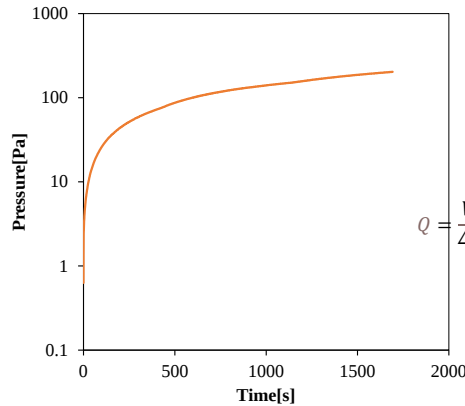
試験概念図



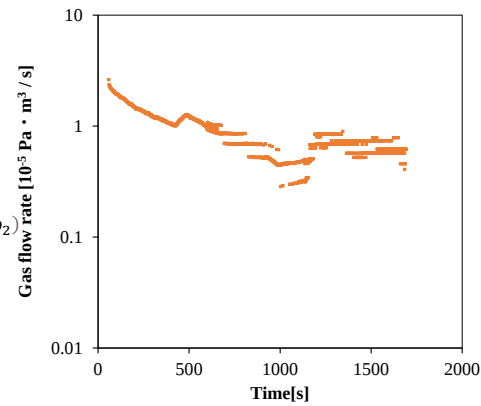
ガス放出定量試験とTVIP芯材からのガス放出低減方法の検討

蓄積法によるガス放出速度定量化試験

圧力変化の一例



ガス放出速度の一例

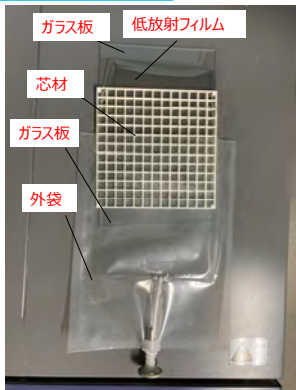


Q : ガス放出速度 [Pa·m³/s], V : 体積 [m³], Δt : 時間 [s], $(p_1 - p_2)$: Δt における圧力差[Pa]

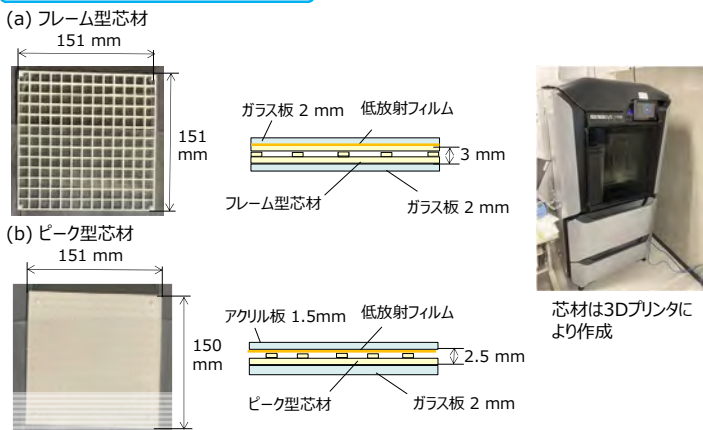
ガス放出定量試験とTVIP芯材からのガス放出低減方法の検討

実験で使用したTVIPの概要

TVIPの基本構成



基本的なTVIPの芯材等の使用



ガス放出定量試験とTVIP芯材からのガス放出低減方法の検討

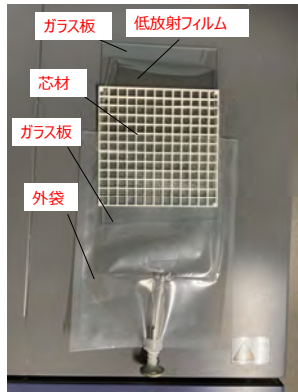
実験条件

	圧力2 Pa到達後の真空引き 時間 [h]	同時加熱	コーティ ング	ゲッター材
A. 芯材なしの空の条件	0.5			
B. 標準条件	0.5			
C. ガラス板を二重延伸PETに変更	0.5			
D. 真空引きと同時に加熱(同時加熱)	0.5	○		
E. 芯材コーティング	0.5		○	
F. ゲッター材の同封	0.5			○
G. 同時加熱+コーティング+ゲッター材の同封	0.5	○	○	○
H. 芯材なしの空の条件、4時間真空引き	4			
I. 同時加熱(4時間)+コーティング+ゲッター材の同封	4	○	○	○
J. 芯材なしの空の条件、8時間真空引き	8			
K. 同時加熱(8時間)+コーティング+ゲッター材の同封	8	○	○	○
L. コーティング+ゲッター材の同封、8時間真空引き	8		○	○
M. 同時加熱(8時間) + コーティング	8	○	○	
N. 芯材をピーク型に変更、同時加熱(8時間)+コーティング +ゲッター材の同封	8	○	○	○

ガス放出定量試験とTVIP芯材からのガス放出低減方法の検討

実験条件

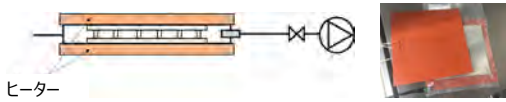
標準条件



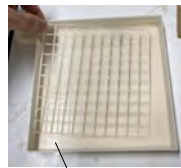
基本構成のTVIP+2Pa到達後の真空引き時間：0.5 h

ガス放出低減方法

真空引きと同時に加熱



芯材のコーティング



有機ポリシラザン

ゲッター材の同封



ゲッター材

芯材

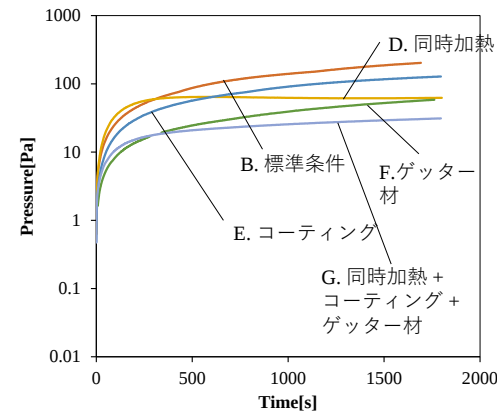
酸化カルシウム+合金ゲッター材



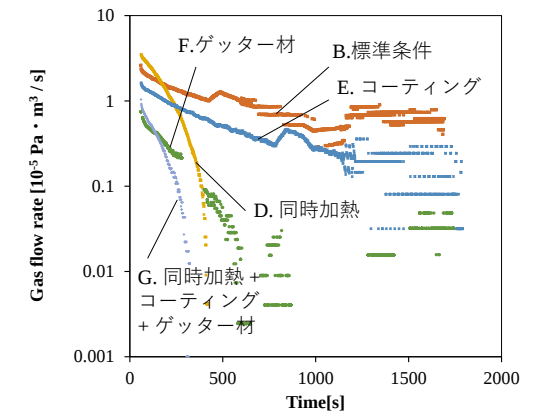
ガス放出定量試験とTVIP芯材からのガス放出低減方法の検討

実験結果および考察(ガス放出低減方法の効果)

圧力の変化



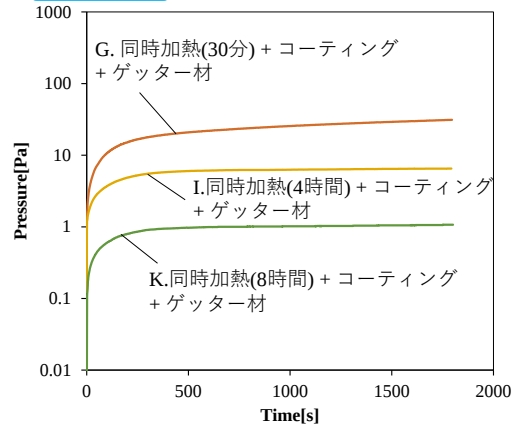
ガス放出速度



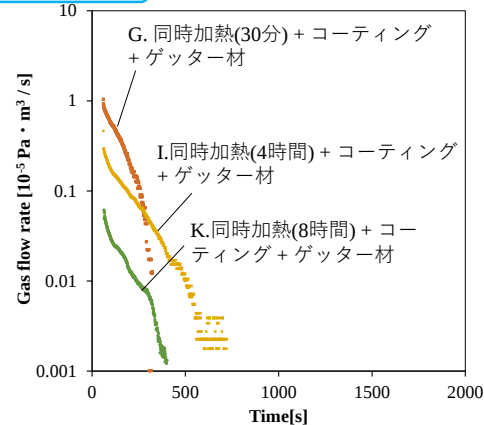
ガス放出定量試験とTVIP芯材からのガス放出低減方法の検討

実験結果および考察(長時間真空引き + 加熱の効果)

圧力の変化



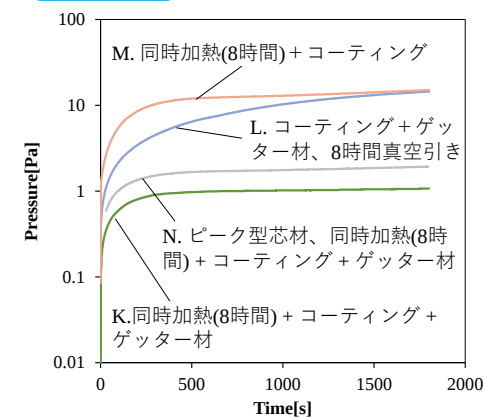
ガス放出速度



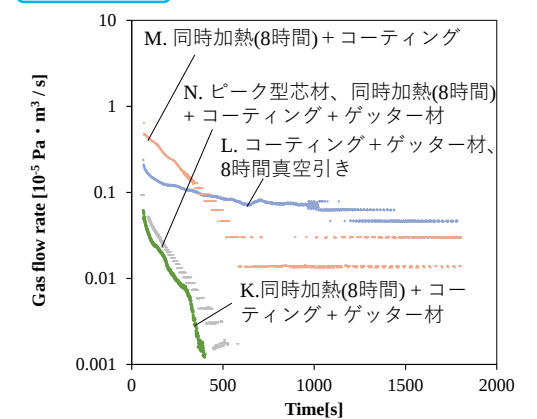
ガス放出定量試験とTVIP芯材からのガス放出低減方法の検討

実験結果および考察(その他条件の変更)

圧力の変化



ガス放出速度



ガス放出定量試験とTVIP芯材からのガス放出低減方法の検討

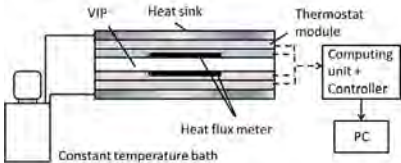
長期間の圧力測定と有効熱伝導率測定結果についての考察

真空引き停止後数日後の圧力測定結果

	ポンプ停止後の経過時間	圧力 [Pa]
K.同時加熱(8h) + コーティング + ゲッター材	4 days 17.5 hours	2.04
L.コーティング + ゲッター材、8h真空引き	2 days 20 hours	70.2
M. 同時加熱(8h) + コーティング	3 days 17 hours	250
N.ピーク型芯材 時加熱(8h) + コーティング + ゲッター材	4 days 17.5 hours	3.69

条件Kについて、3日経過後の有効熱伝導率を測定
→ 真空引き後の最も低い値である
8.9 mW/(m・K)が得られた

熱流計法による熱伝導率測定



まとめ

- 1) 蓄積法を応用したガス放出定量化試験により、真空引きと同時加熱、芯材のコーティング、ゲッター材の同封それぞれに芯材からのガス放出による圧力上昇を低減する効果があることが確認できた。また、全てを組み合わせることで、圧力上昇が最も低くなることを確認した。
- 2) 全実験条件のうち最も良い結果の得られた8h同時加熱真空引き + コーティング + ゲッター材の条件の圧力は30分後経過時点で1 Pa、3日経過後でも2 Paであり、圧力が2 Pa以下となる断熱性能の高いTVIPを実現できることが示された。さらに3日経過時点での真空層の有効熱伝導率を測定したところ0.0089 W/(m・K)となり、直接真空引き中を除き最も低い有効熱伝導率が得られたことを確認した。

動作と生理的薬物動態を再現する数値人体モデルの開発と 室内空気質制御への応用

九州大学 大学院総合理工学研究院 環境理工学部門

劉 城準(ユ ソンジュン)

研究目的

- ✓ 室内環境設計の最適化には、環境中の居住者の生理反応を詳細かつ精緻に予測・評価することが必須
→ その情報を建築物の設計プロセスや運営段階にて導入

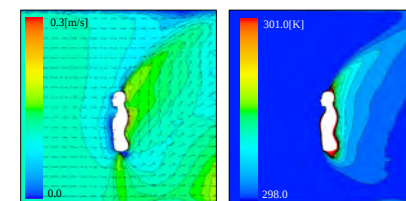
實驗的方法

- ✓ 時間・コスト等の制約が存在
- ✓ 被検者実験の場合、倫理的な制約より一般的な環境条件から大きく逸脱した環境下での実験は許されない



数値シミュレーション

- ✓ 人体の詳細幾何形状を始め、人体の各機能をコンピュータ上に詳細に再現した数値人体モデルの開発と、その室内環境設計への活用が期待される

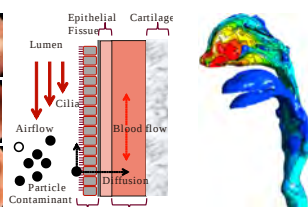


研究内容

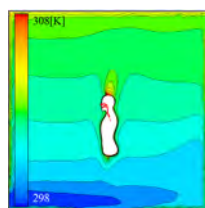
数値人体モデルを使用した室内環境評価の高度化



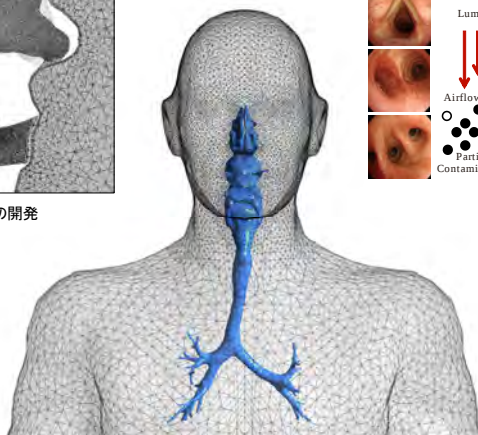
呼吸器系を統合した数値人体モデルの開発



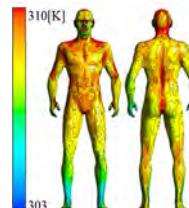
経気道曝露リスク評価



室內環境解析

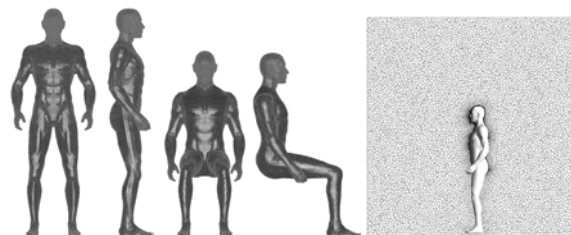


統合数値人体モデル (Computer Simulated Person)



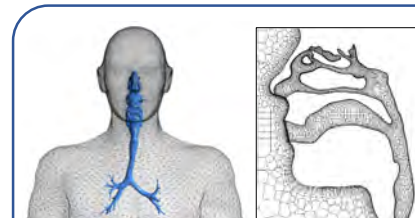
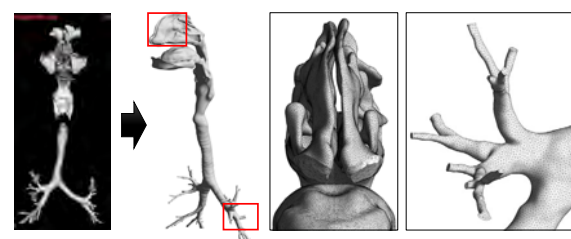
人体熱快適性評価

呼吸器系を統合した数値人体モデルの開発



数値人体モデルの開発

数値気道モデルの開発



統合数値人体モデル (Computer Simulated Person)

室内空間 — 居住域 — 呼吸域 — 呼吸器内を含む
連続空間を再現



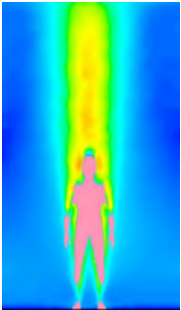
室内汚染物質の人体周辺領域および
呼吸器内輸送現象の詳細な予測が可能

人体熱生理モデルを導入した熱快適性予測

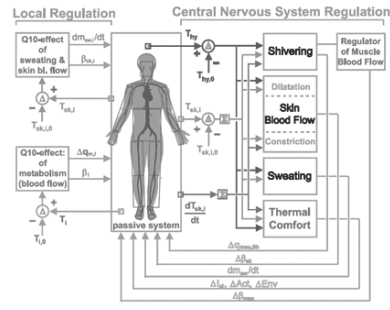
✓ 室内熱環境－人体熱生理の連成解析手法

➢ 人体の熱バランス式

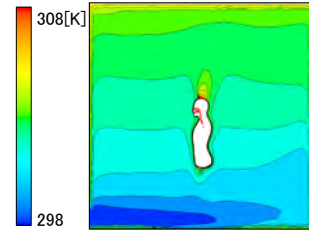
$$M = Q_{sk} + Q_{res} + S$$
$$= (Q_{cv} + Q_r + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + S_{cr} + S_{sk}$$



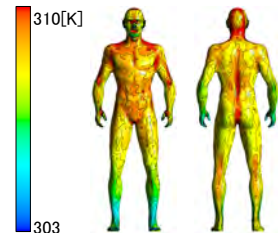
室内熱環境と人体



Multi-Node 人体熱生理モデル



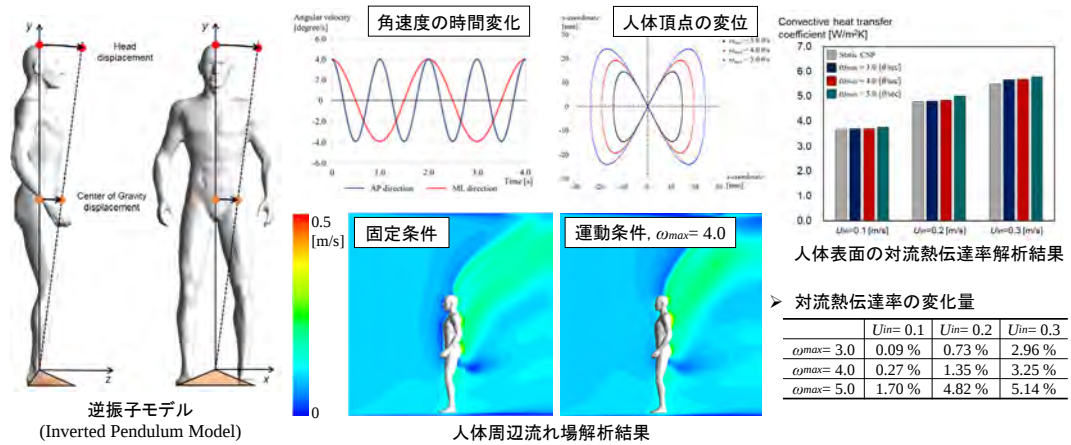
室内熱環境予測



人体熱快適性評価

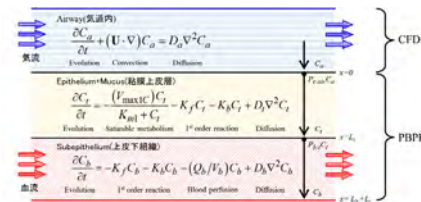
人体微細運動の再現と熱快適性への影響評価

- ✓ 逆振子モデル(IPM)を導入、前後・左右方向の微細運動を再現し、人体周辺微気候および熱損失に及ぼす影響を評価
- ✓ 健康で若い成人男性を想定し、振動周期および振動幅を設定、緩やかな室内気流条件下でパラメトリック解析を実施



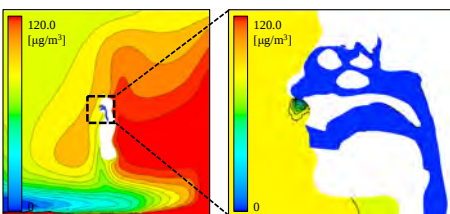
生理的薬物動態解析による汚染物質吸入曝露リスクの定量評価

- ✓ 生理的薬物動態解析(Physiologically Based Pharmacokinetic, PBPK) モデル
→ 気道内壁面の汚染物質の吸着から体内に輸送される現象まで予測可能
- ✓ 粘膜上皮・上皮下組織内の代謝分解、1次反応、血流輸送量などの健康リスクの定量的データを出力可能

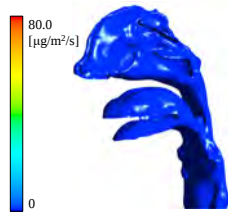


PBPK-CFD連成解析モデル(ホルムアルデヒド対象)

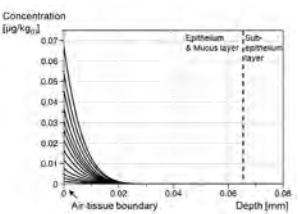
PBPK－CSP連成解析手法は、制御対象や規制対象とすべき経気道暴露の参照濃度(Reference Concentration)の合理的決定に貢献可能



室内汚染物質分布および呼吸域内濃度分布



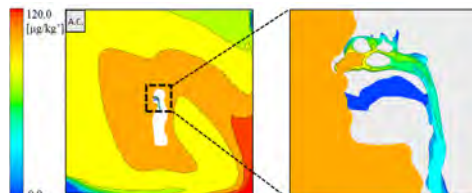
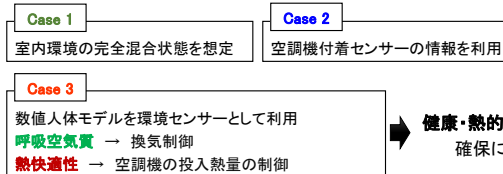
気道内汚染物質吸着分布



鼻腔組織内汚染物質濃度プロファイル

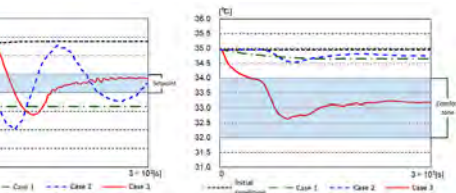
数値人体モデルを使用した空調制御の最適化

- ✓ 空調時に形成される室内の環境場には不均一性が存在
- ✓ 数値人体モデルを環境センサーとして利用した空調制御手法を構築
→ 人体をターゲットとした空調制御への適用可能性を予備的に検討



✓ 室内汚染物質分布の不均一性

✓ 人体快適性を直接考慮した空調制御アルゴリズム



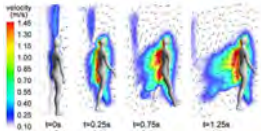
✓ 数値人体モデルによる空調制御手法の効率性・有効性

今後の展望

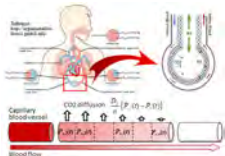
- 1) 実人体の着衣状態を想定し、衣服の詳細幾何形状ならびに衣服を中心とした熱・水分・物質同時移動解析モデルを構築し、衣服の人体熱快適性への影響を解明する。
- 2) 本研究で検討した人体微細運動の再現の他、歩行などの動作の再現とその影響を人体－室内環境の相互作用の観点から検討する。
- 3) 室内空気質制御の重要な対象物質となる二酸化炭素に着目し、被験者実験および数値人体モデルを使用した数値解析手法により体内からの二酸化炭素発生メカニズムを解明すると共に、呼吸域濃度分布と吸入濃度の関係について調査する。



衣服の詳細幾何形状の再現



歩行時の人体周辺気流 (Y.Tao et al., 2017)



肺内ガス交換モデル

発表論文

[1] Sung-Jun Yoo and Kazuhide Ito, Validation, verification, and quality control of computational fluid dynamics analysis for indoor environments using a computer-simulated person with respiratory tract, *Japan Architectural Review*, Accepted

[2] Sung-Jun Yoo, Akira Kurokawa, Kazuhiko Matsunaga, and Kazuhide Ito, Spatial distributions of airborne transmission risk on commuter buses: Numerical case study using computational fluid and particle dynamics with computer-simulated persons, *Experimental and Computational Multiphase Flow*, Accepted

[3] Kei Murota, Yujin Kang, Sena Hyodo, Sung-Jun Yoo, Kazuki Takenouchi, Shin-ichi Tanabe and Kazuhide Ito, Hygro-thermo-chemical transfer analysis of clothing microclimate using three-dimensional digital clothing model and computer-simulated person, *Indoor and Built Environment*, 2022.1

その他、本研究成果と関連した論文発表実績：7件

ご清聴ありがとうございました。



東京理科大学

工学研究科建築学専攻

大成学術財団
研究成果発表会

納豆型バクテリアを用いた コンクリート構造物の自己修復技術の開発

清原 千鶴

今本 啓一

Nguyen Ngoc Tri Huynh

はじめに

本研究の特徴

実験方法

実験結果

まとめ

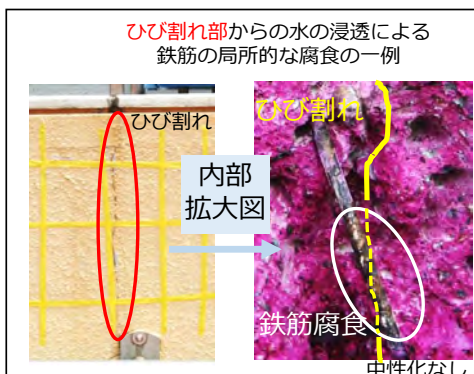
2

建築構造物に求められる耐用年数は長い

強度特性・構造性能・**耐久性**

鉄筋コンクリート構造物の耐久性に及ぼす劣化要因の1つ

ひび割れ



ひび割れの補修工法：被覆工法・注入工法・充填工法

- ・ひび割れ発生後に人手による外的な補修が必要
- ・補修後に拡大したひび割れの追従性が劣る



予めコンクリートに組み込まれた機構によって自動的に修復を行う

自己修復コンクリートに着目

はじめに

本研究の特徴

実験方法

実験結果

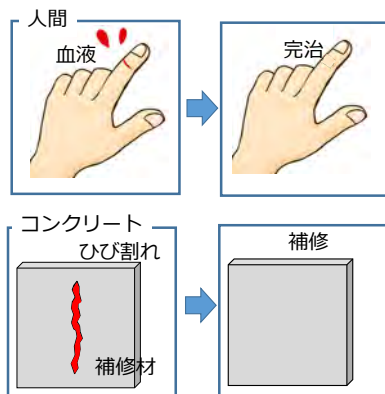
まとめ

3

建築構造物に求められる耐用年数は長い

強度特性・構造性能・**耐久性**

自己修復システム



ひび割れの補修工法：被覆工法・注入工法・充填工法

- ・ひび割れ発生後に人手による外的な補修が必要
- ・補修後に拡大したひび割れの追従性が劣る



予めコンクリートに組み込まれた機構によって自動的に修復を行う

自己修復コンクリートに着目

はじめに

本研究の特徴

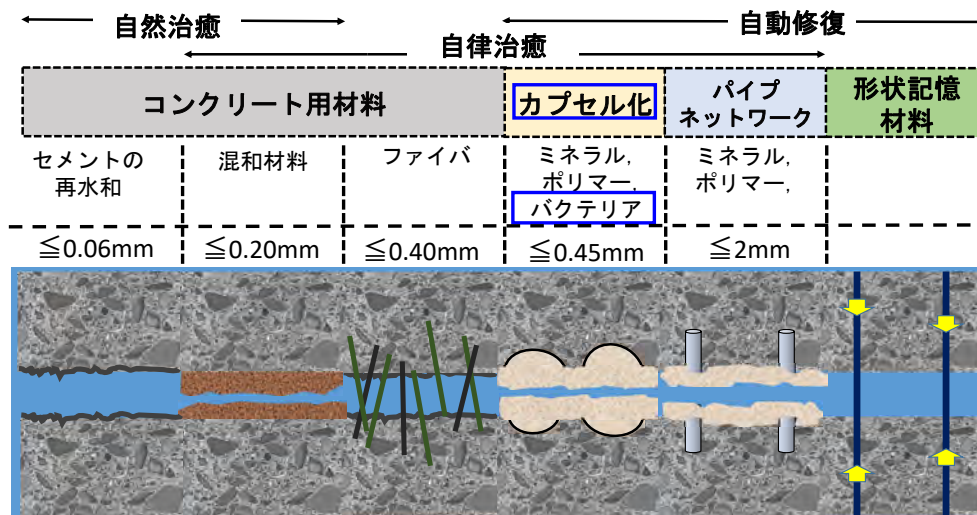
実験方法

実験結果

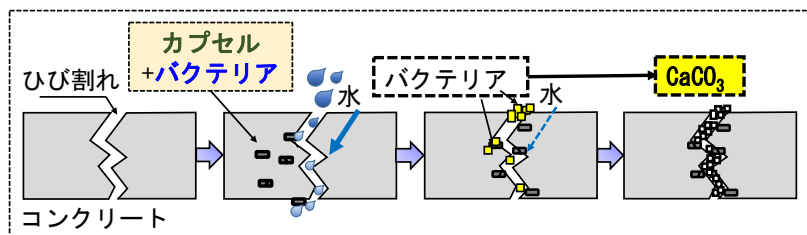
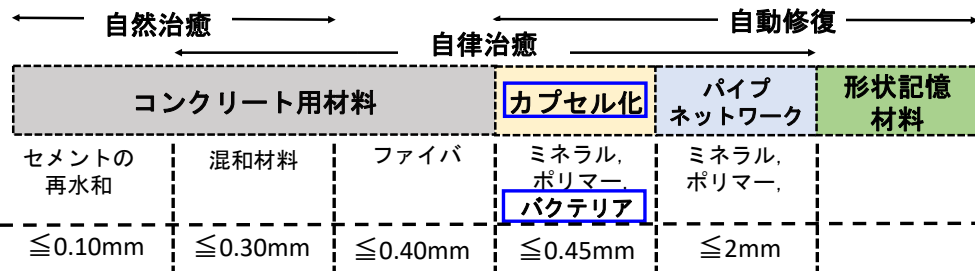
まとめ

4

自己修復システムの種類



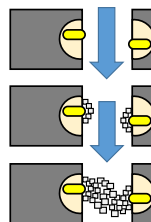
自己修復システムの種類



バクテリアを用いた自己修復システムの既往研究の一例

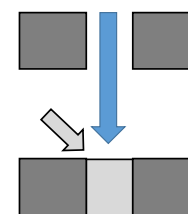
・ **本研究の特徴**: 身近で **安価な** バクテリアである納豆菌を使用

・ **バクテリアを用いた既往研究**



Prof. H. Jonkers
(Delft Univ.)

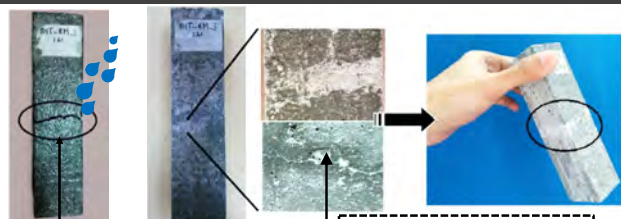
- ・ 強力が高価なバクテリアを使用
- ・ 豊富な栄養素が必要
- ・ バクテリアをコンクリートの中に入れるため高価なペレットを使用



Prof. Ujike
(Ehime Univ.)

- ・ 納豆菌, イースト菌を使用
- ・ ひび割れ発生後にバクテリア溶液を注入

納豆菌による修復メカニズム

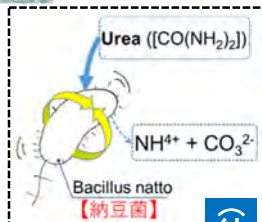


ひび割れ

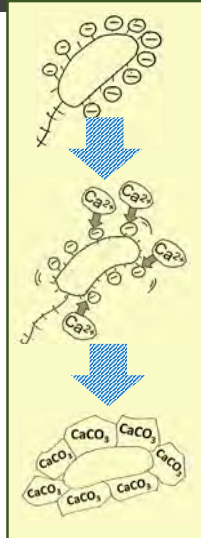
水の浸入

バクテリアの活性化

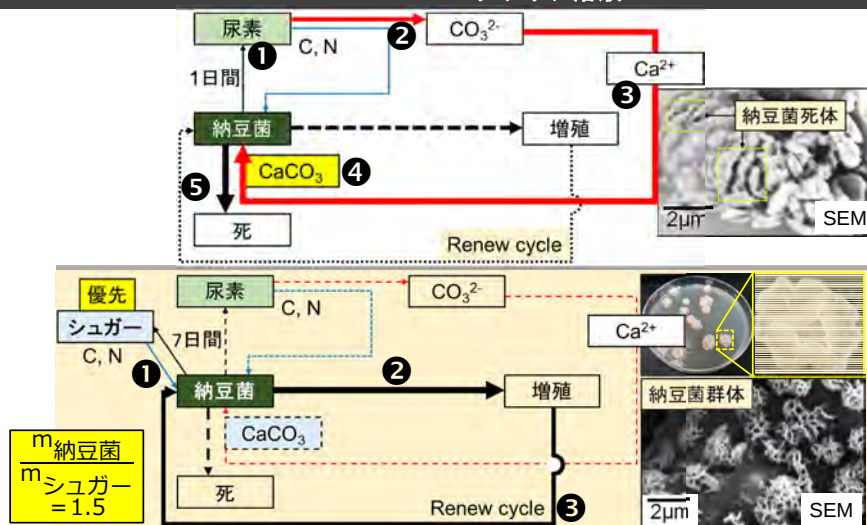
CaCO₃の形成



(納豆菌)

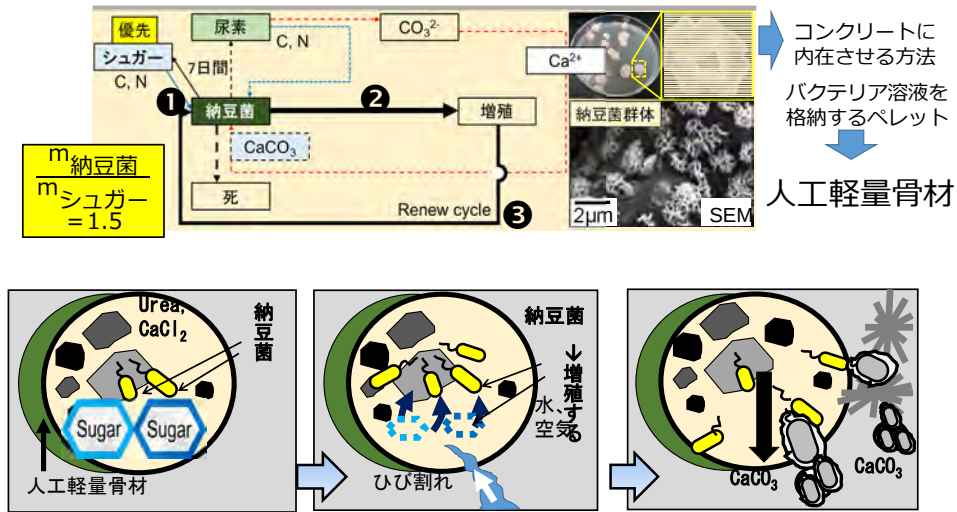


バクテリア溶液

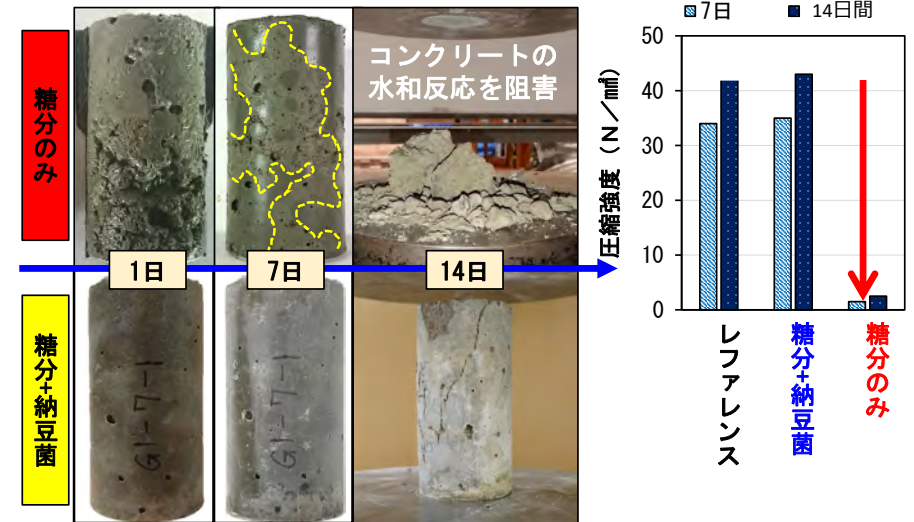


コンクリートに
内在させる方法
バクテリア溶液を
格納するペレット
↓
人工軽量骨材

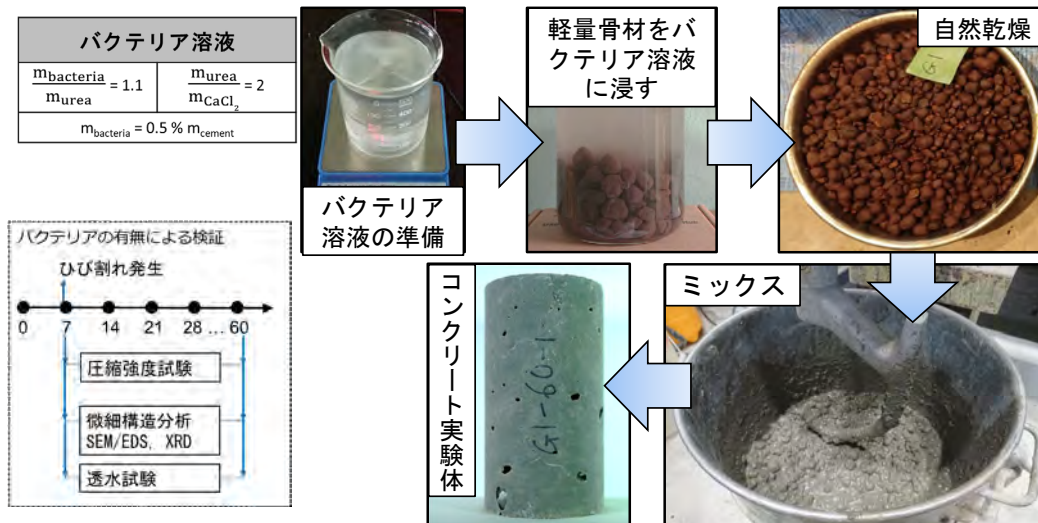
バクテリア溶液を格納した人工軽量骨材を用いた自己修復システムのイメージ



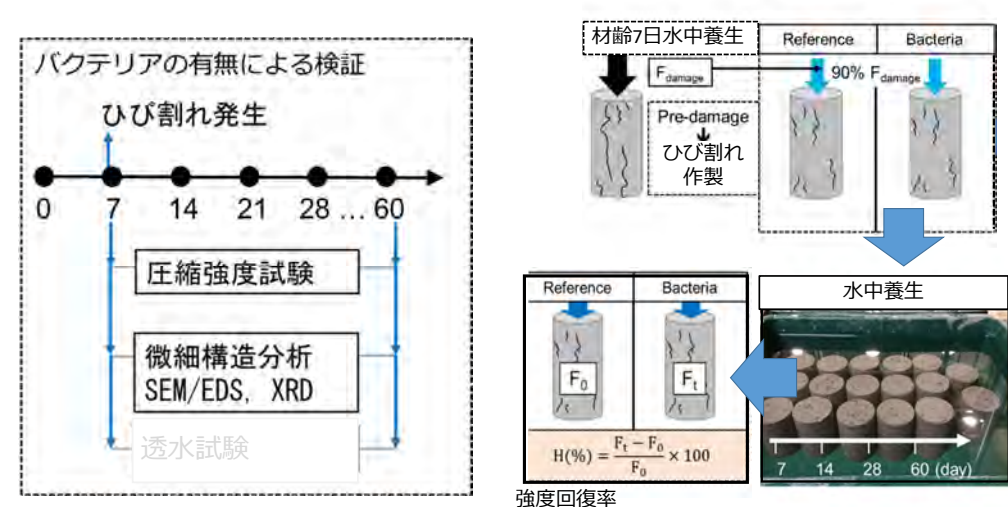
糖分によるコンクリートへの影響



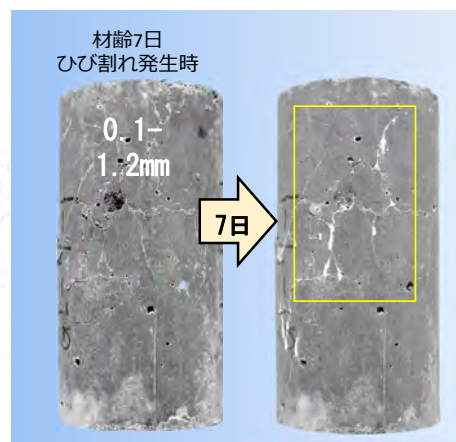
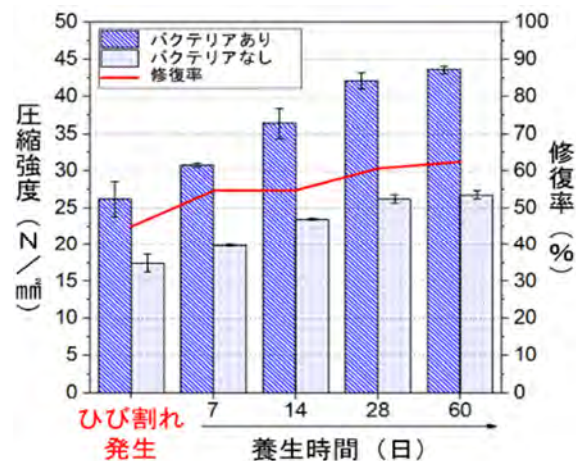
試験体作製方法



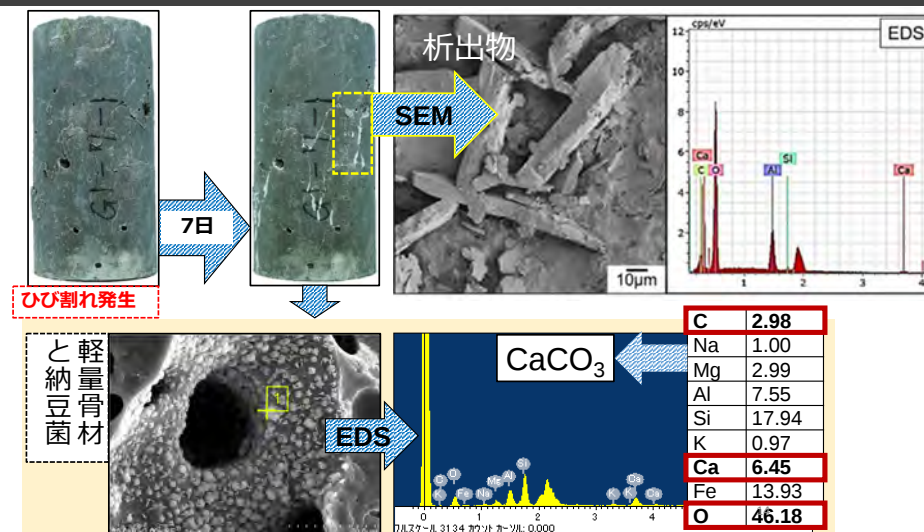
圧縮強度および微細構造分析



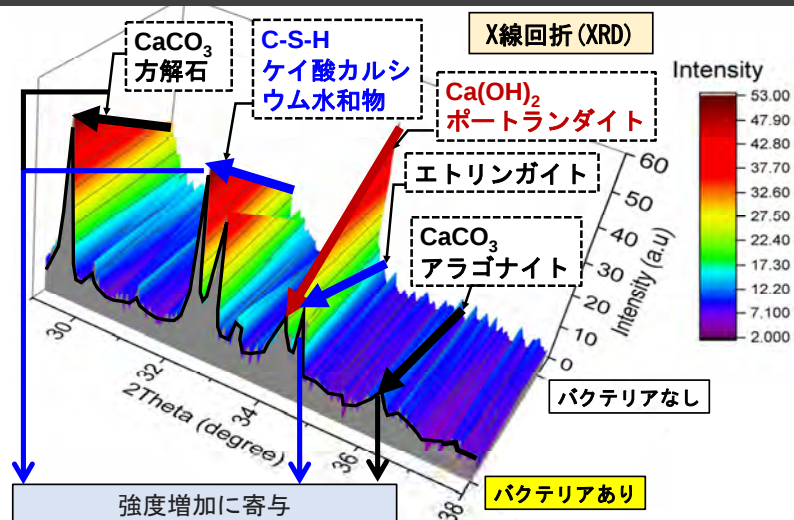
圧縮強度試験結果



微細構造分析 (SEMおよびEDS)



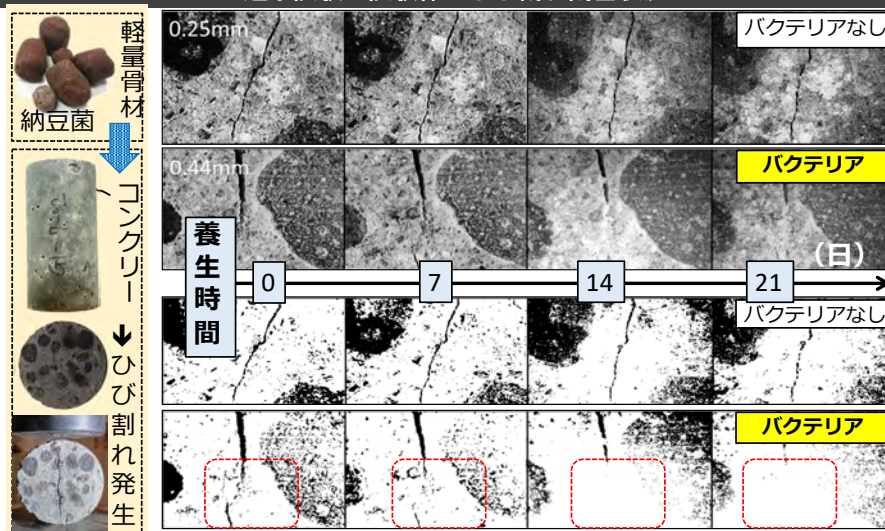
微細構造分析 (SEMおよびEDS)



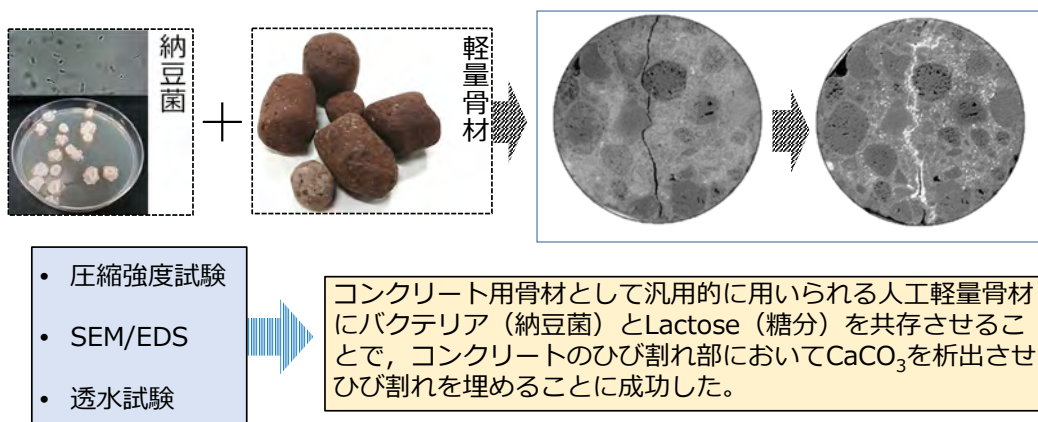
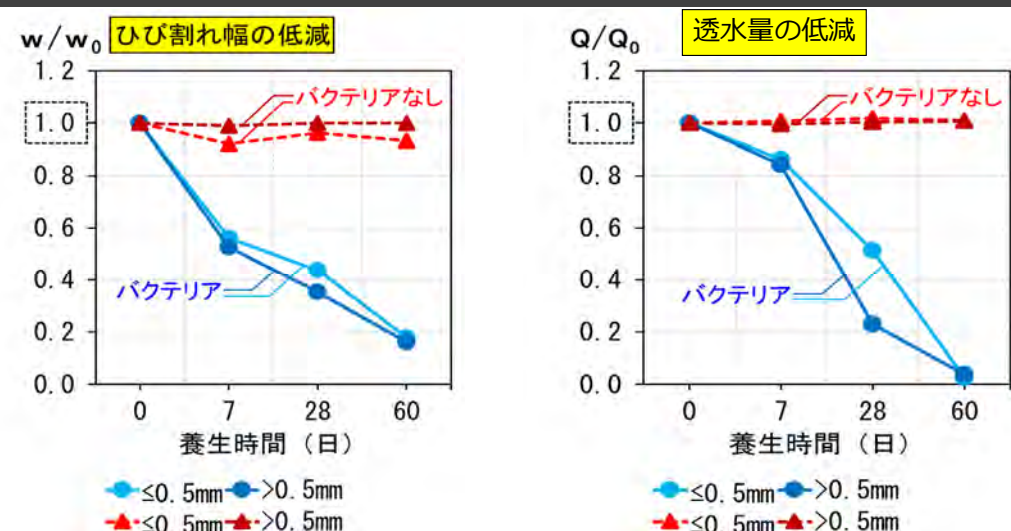
透水試験



透水試験：試験体のひび割れ閉塞状況



透水試験



通常のコンクリート

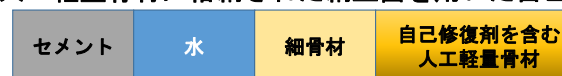


自己修復コンクリート 既往研究のアプローチ



本研究

人工軽量骨材に格納された納豆菌を用いた自己修復システム



- コンクリート混合物の変化を最小限に抑える
- コンクリート特性への悪影響を防ぐ

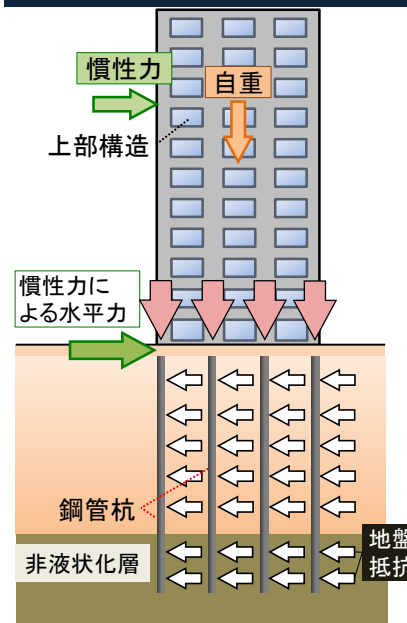


群発巨大地震動に対する高層建築物直下の杭の動座屈崩壊機構の解明と累積損傷評価

東北大学大学院 都市・建築学専攻
教授 木村祥裕

1

研究背景



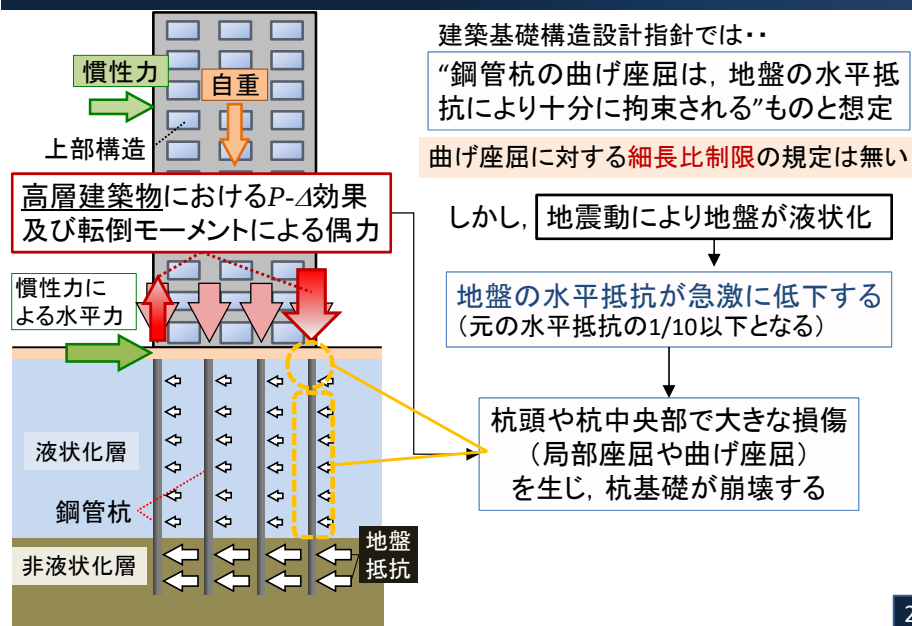
建築基礎構造設計指針では・・

“鋼管杭の曲げ座屈は、地盤の水平抵抗により十分に拘束される”ものと想定

曲げ座屈に対する細長比制限の規定は無い

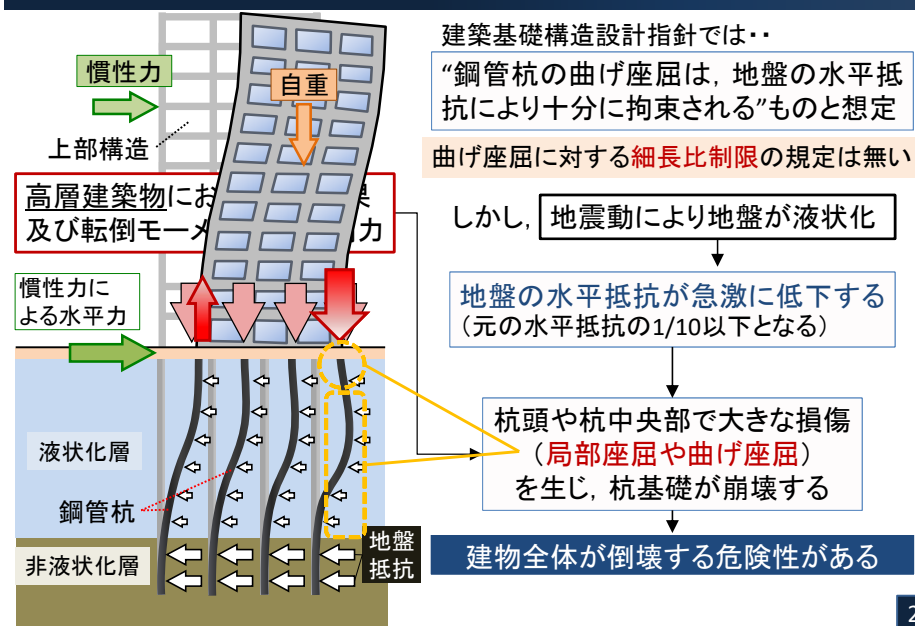
2

研究背景



2

研究背景



2

研究目的

①液状化地盤における高層建築物下の鋼管杭基礎の終局耐力と崩壊メカニズムの解明

②局部座屈を生じる鋼管杭頭部の終局耐力・塑性変形能力評価

3

研究背景

既往の研究

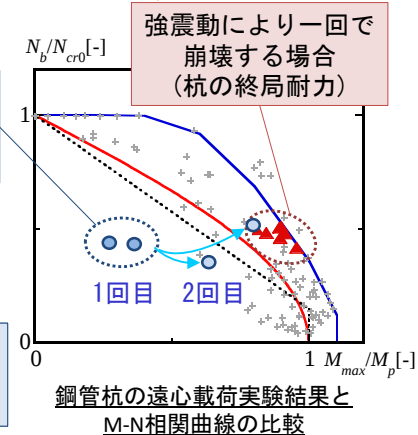
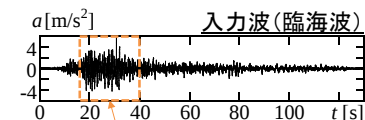
強震動により早期に終局状態となる場合の鋼管杭の終局耐力評価法の確立

本研究の対象

杭に損傷が蓄積するものの1回目加振時には上部構造が倒壊せず損傷が顕在化しない場合

1回目と同レベルの地震動を短期間に複数回経験する場合

鋼管杭に蓄積した損傷が増加し、最終的に杭が崩壊するとき、杭の終局耐力はM-N設計耐力曲線に到達しない可能性がある



4

研究背景



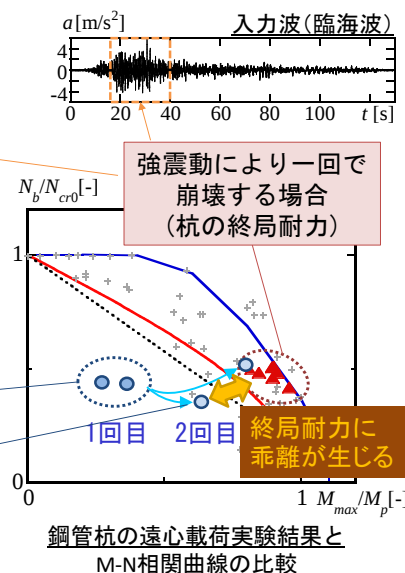
加振1回で倒壊



加振1回目(塑性化のみ)



2回目で倒壊



4

研究目的

既往の研究

1回の強震動により終局状態となる場合について杭基礎の崩壊メカニズムの解明、及び杭の終局耐力評価

本研究

● 上部構造・杭基礎—地盤系の遠心载荷実験により、長時間または複数回地震動を受けて崩壊する鋼管杭基礎のメカニズムおよび終局耐力を明らかにする

● 複数回地震動により、損傷が蓄積し疲労破壊する場合の鋼管杭の累積損傷評価法を確立する

・塑性変形能力評価では考慮できない低振幅時も対象
・累積損傷過程における鋼管杭の崩壊時刻の検討

5

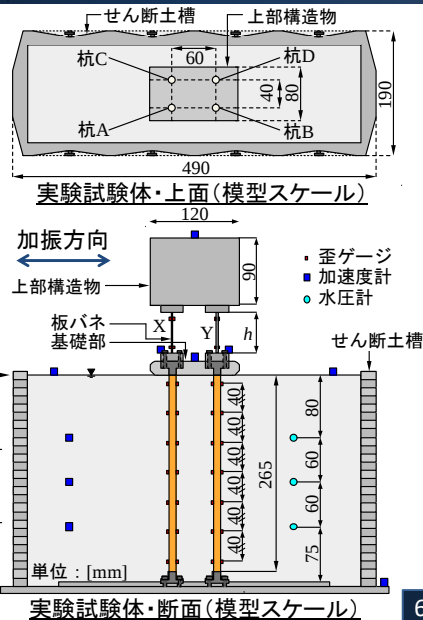
上部構造物・鋼管杭基礎―地盤系の遠心载荷実験

◆試験体概要(1/40縮小模型)

- ・上部構造物-杭基礎-飽和地盤系
- ・杭材:真鍮(C2680)

試験体諸元

項目	模型 スケール	実大 スケール
上部構造物 重量 m_1g [N]	66.7	4.26×10^6
基礎部 重量 m_2g [N]	13.0	8.30×10^5
杭材	外径 D [mm]	10
	板厚 t [mm]	0.2
	材長 l [mm]	265
地盤材料	全層飽和豊浦砂	

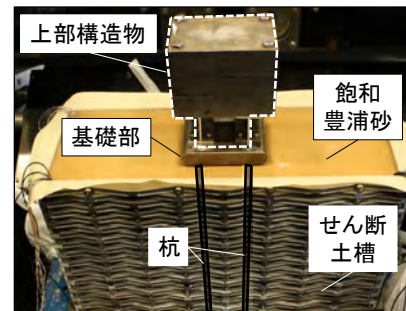


6

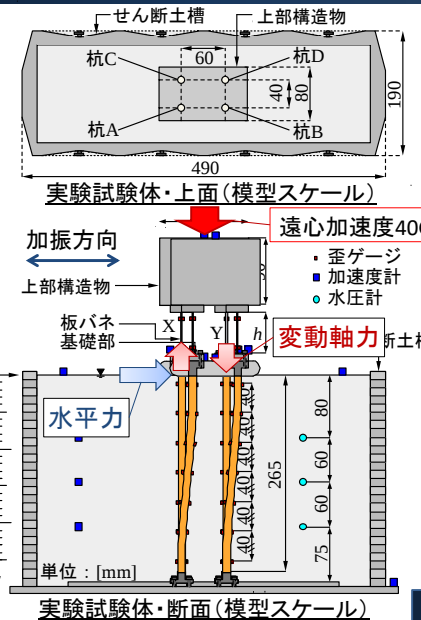
上部構造物・鋼管杭基礎―地盤系の遠心载荷実験

◆試験体概要(1/40縮小模型)

- ・上部構造物-杭基礎-飽和地盤系
- ・杭材:真鍮(C2680)



実験試験体全体



6

複数回加振により崩壊する鋼管杭の終局耐力

◆試験体パラメータ

※板バネ長さ以外実大スケール

試験体	杭径 D [mm]	板厚 t [mm]	初期 軸力比 N_0/N_y [-]	地盤 相対密度 Dr [%]	板バネ 長さ h [mm]	塔状比 [-]	上部構造物 固有周期 T_s [s]	加振 回数 [-]
Case 2-1	400	8	0.33	30	35	2.4	0.53	3
Case 2-2 ¹⁾					55	2.8	1.08	1
Case 2-3	440	8	0.30		70	3.0	1.51	2
Case 2-4 ¹⁾	400	8	0.33		90	3.3	2.20	1
Case 2-5 ¹⁾				55	2.8	1.08	2	
Case 2-6	400	8	0.33	60	70	3.0	1.51	1
Case 2-7 ¹⁾					90	3.3	2.20	1
Case 2-8 ¹⁾								

杭に損傷が蓄積するものの1回目加振時には
上部構造物が倒壊せず損傷が顕在化しない場合

1) 木村祥裕, 的場前子, 田村修次: 塔状比の大きい上部構造物・杭基礎―地盤系の遠心载荷実験に基づく液化地盤における鋼管杭の終局メカニズム, 日本建築学会構造系論文集, 第86巻, 第779号, 2021.1

7

複数回加振により崩壊する鋼管杭の終局耐力

◆試験体パラメータ

※板バネ長さ以外実大スケール

試験体	杭径 D [mm]	板厚 t [mm]	初期 軸力比 N ₀ /N _y [-]	地盤 相対密度 Dr [%]	板バネ 長さ h [mm]	塔状比 [-]	上部構造物 固有周期 T _s [s]	加振 回数 [-]
Case 2-1	400	8	0.33	30	35	2.4	0.53	3
Case 2-2 ¹⁾					55	2.8	1.08	1
Case 2-3	440	8	0.30		70	3.0	1.51	2
Case 2-4 ¹⁾	400	8	0.33		90	3.3	2.20	1
Case 2-5 ¹⁾				55	2.8	1.08	2	
Case 2-6	400	8	0.33	60	70	3.0	1.51	1
Case 2-7 ¹⁾					90	3.3	2.20	1
Case 2-8 ¹⁾								

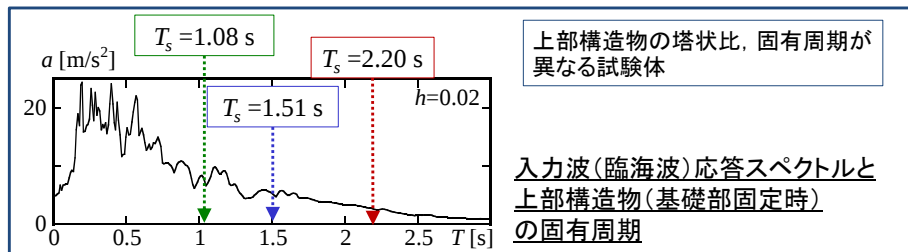
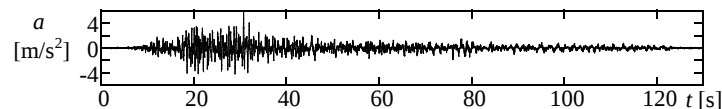
杭に損傷が蓄積するものの1回目加振時には
上部構造物が倒壊せず損傷が顕在化しない場合

同じ地震波を複数回加振することで, 杭が終局状態となる

7

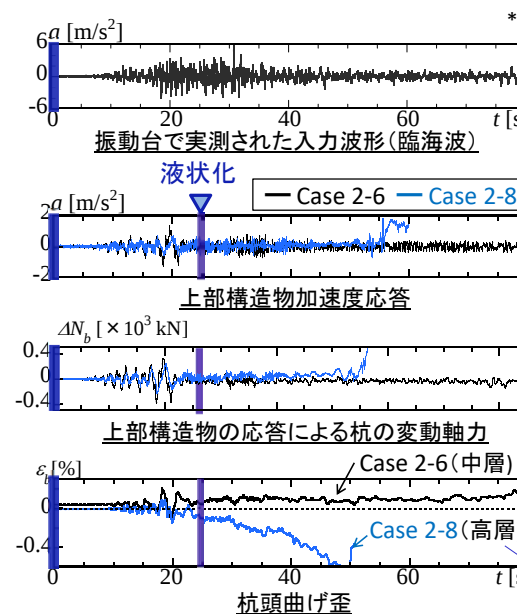
上部構造物・鋼管杭基礎—地盤系の遠心载荷実験

・振動台で実測された入力波形(臨海波):最大加速度を 5.0 m/s^2 に調整

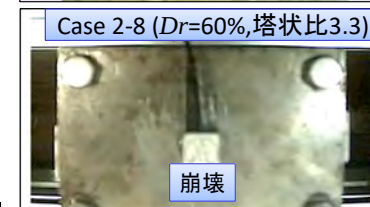
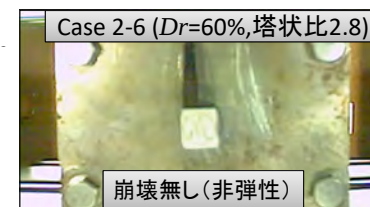


8

応答時刻歴・実験動画



*倒壊: 杭基礎の崩壊により, 傾斜した状態(上部構造物の変形は弾性範囲内)



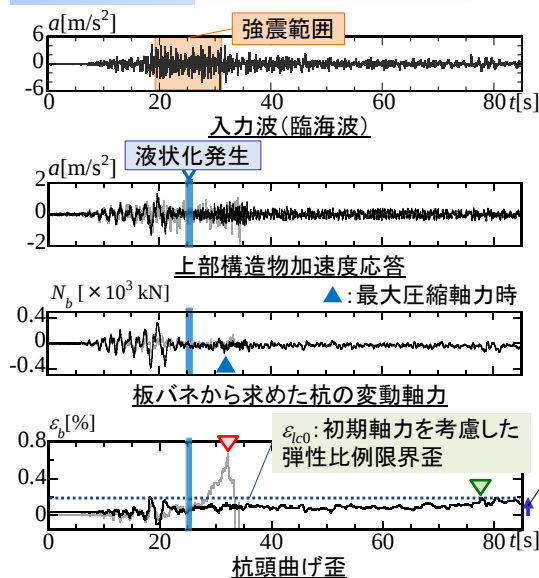
Case 2-6: 残留歪を生じるものの崩壊無

Case 2-8: 液状化後, 曲げ歪が徐々に増大し, 上部構造物が倒壊*

9

複数回加振により崩壊する鋼管杭の終局耐力

■ 加振1回目 — Case 2-2 — Case 2-6



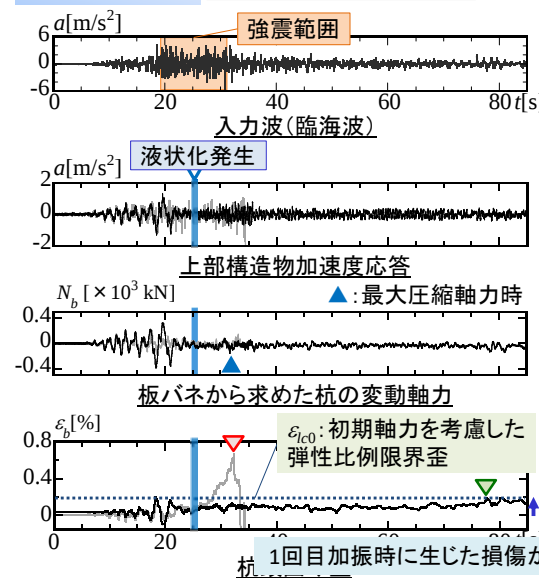
加振1回目(塑性化のみ)

残留歪を生じるものの杭は鉛直支持力を保持しており, 上部構造物は倒壊しない

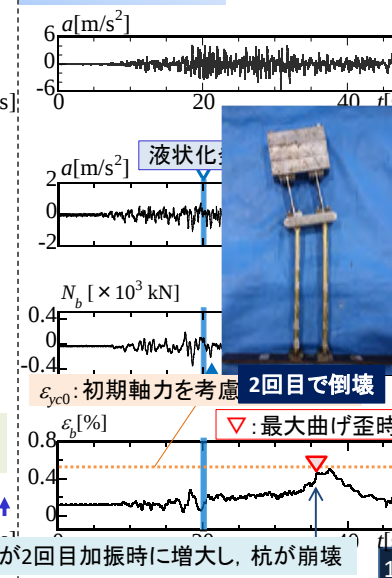
10

複数回加振により崩壊する鋼管杭の終局耐力

■ 加振1回目 — Case 2-2 — Case 2-6



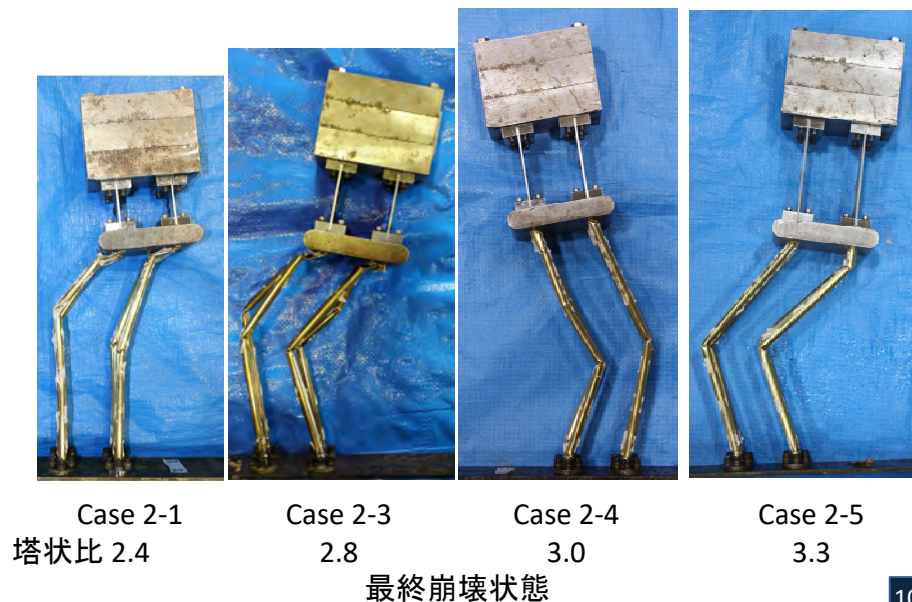
■ 加振2回目



1回目加振時に生じた損傷が2回目加振時に増大し, 杭が崩壊

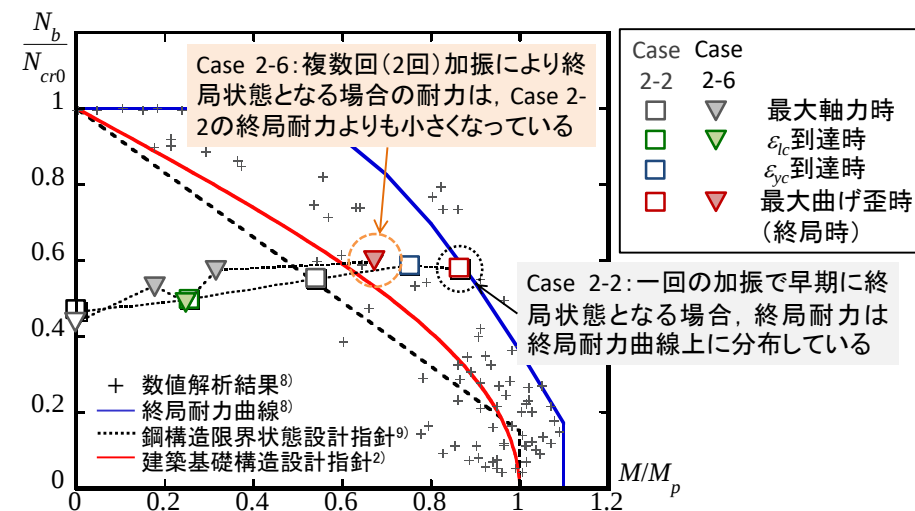
10

複数回加振により崩壊する鋼管杭の終局耐力



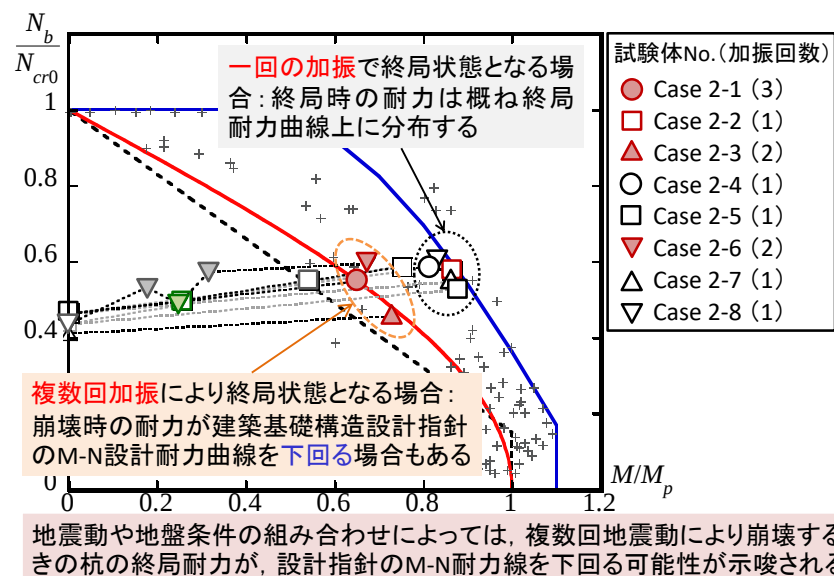
10

複数回加振を経験した杭の終局耐力



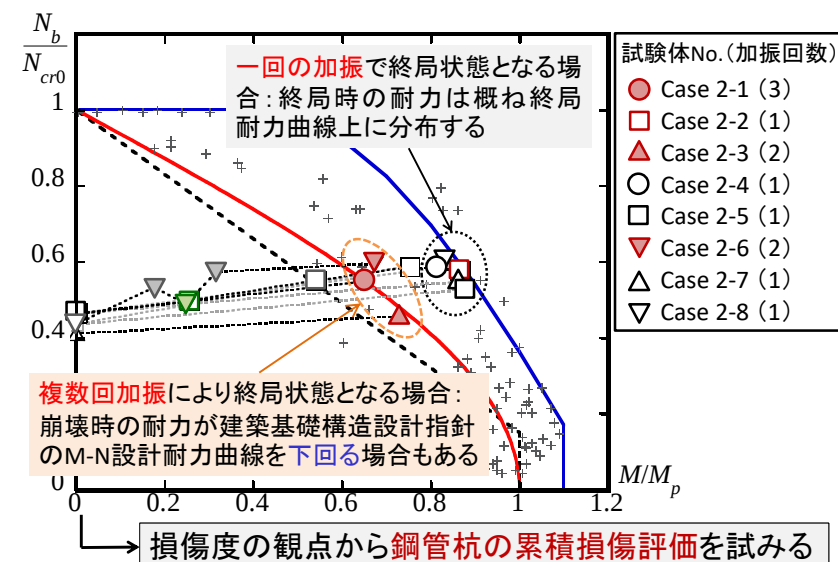
11

複数回加振を経験した杭の終局耐力



11

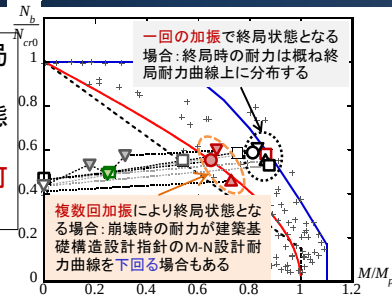
複数回加振を経験した杭の終局耐力



11

結論

- 1) 複数回の地震動を経験し鋼管杭が終局状態となる場合、
 - ・杭の終局耐力は1回加振により終局状態となる場合よりも小さくなる
 - ・設計指針のM-N設計耐力曲線を下回る可能性があることが示唆された



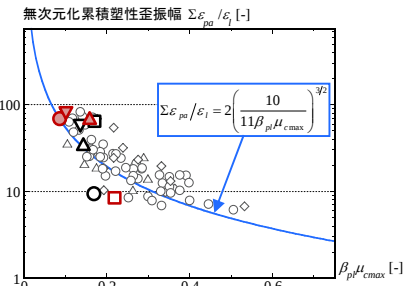
- 2) 遠心载荷実験及び有限要素解析より得られた局所軸歪履歴

↓ レインフロー法の適用

杭終局時の無次元化累積塑性歪振幅 $\Sigma \varepsilon_{pd} / \varepsilon_l$ - 塑性変形倍率 μ_{cmax} 関係を明らかにした

↓

回帰式を構築し、 $\Sigma \varepsilon_{pd} / \varepsilon_l - \mu_{cmax}$ 関係を概ね捉えられることを示した



第四期火山噴出物を用いた地産地消低炭素型 高性能コンクリート用混和材の開発

友寄 篤
2022.10.14



©BME Lab @ The Univ. of Tokyo
本資料の再配布はご遠慮ください。

はじめに

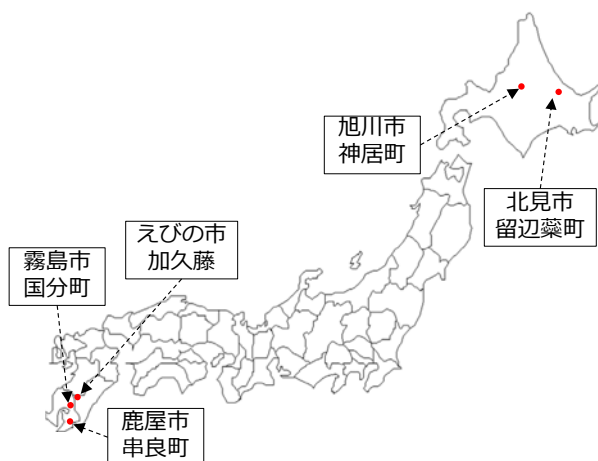


コンクリートの構成材料

- セメント製造に伴うCO₂排出
 $\text{CaCO}_3 + \text{熱エネルギー} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- 反応性を有する混和材をセメントに置換する
- シラスから高性能混和材を製造する技術確立
- コンクリートの低炭素化・高耐久化に寄与
→火山ガラス微粉末のJIS制定（2020年3月）
- 高性能な混和材を製造する技術の各地の原鉱への適用可能性を検証

©BME Lab @ The Univ. of Tokyo
本資料の再配布はご遠慮ください。

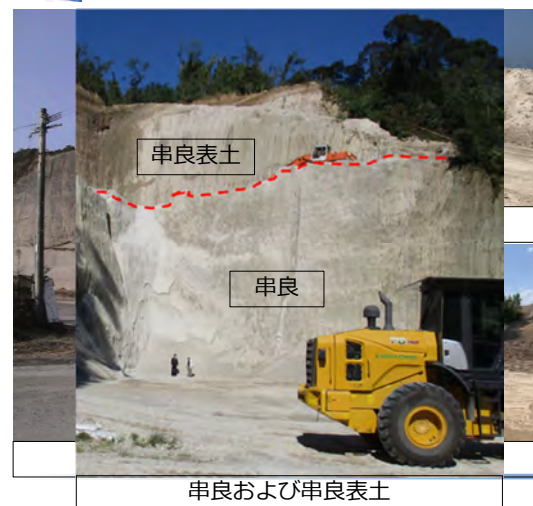
使用した原鉱



- 北海道、宮崎県、鹿児島県の5ヶ所
- 鹿屋市から北見市=約1800km
- 母マグマや噴出・堆積形式の違い
- 物性の安定、各地の変動が課題

©BME Lab @ The Univ. of Tokyo
本資料の再配布はご遠慮ください。

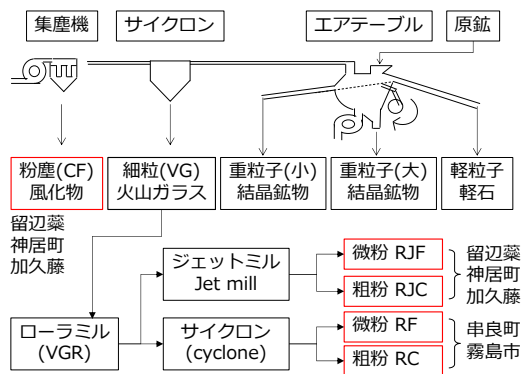
使用した原鉱



- エアテーブルによる選別・粉砕
- 焼成の必要ない簡易な動力

©BME Lab @ The Univ. of Tokyo
本資料の再配布はご遠慮ください。

VGPの製造と試験概要



6種類の原鉱に対してJIS適合性試験

- 化学組成
- 強熱減量
- 比表面積
- 活性度指数試験

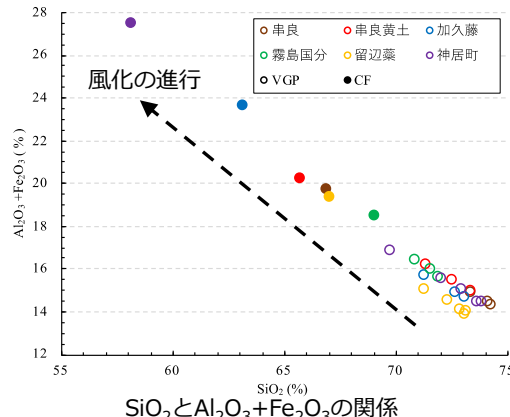
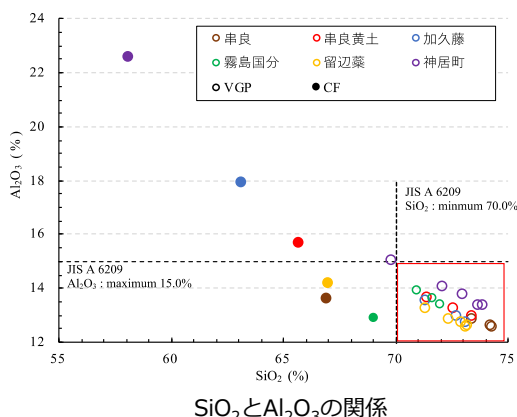
北海道産2種類に対してコンクリート試験

- 強度
- 凍結融解抵抗性
- 促進中性化

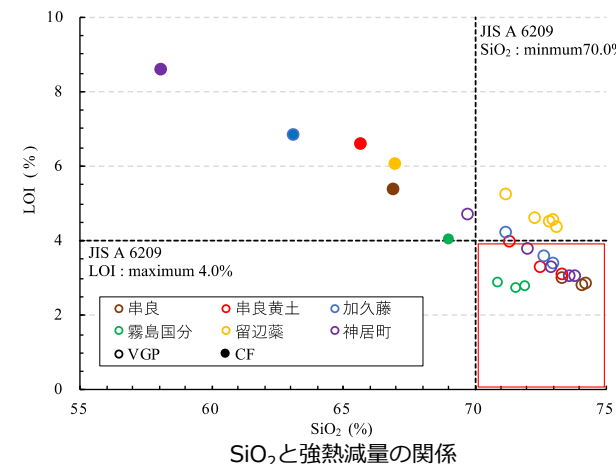
実験結果 (JIS適合性試験)

		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	比表面積 (cm ² /g)	活性度指數 (%)	
													7日	28日	
留辺蘂	RjF	69.5	0.11	12.9	1.77	0.06	0.43	0.88	3.35	5.59	0.02	5.45	215000	100.4	111.6
	VGR	71.1	0.08	12.4	1.38	0.05	0.27	0.76	3.54	5.79	0.01	4.60	93900	99.7	103.8
	RjC	71.4	0.07	12.3	1.34	0.05	0.25	0.75	3.55	5.81	0.01	4.42	73500	99.3	102.8
	CF	66.2	0.20	14.1	5.18	0.08	0.91	1.21	1.75	5.08	0.02	5.28	367900	80.9	87.4
神居町	RjF	69.8	0.23	15.0	1.86	0.09	0.49	0.80	3.10	3.92	0.02	4.71	212300	107.4	108
	VGR	73.0	0.17	13.7	1.28	0.07	0.30	0.76	3.30	4.11	0.02	3.29	82200	93.1	101.5
	RjC	73.7	0.15	13.3	1.13	0.07	0.26	0.74	3.36	4.17	0.02	3.03	65600	101.9	106.7
	CF	58.1	0.37	22.6	4.92	0.11	0.81	0.67	1.29	2.57	0.02	8.56	393400	87.3	94.9
加久藤	RjF	71.3	0.25	13.5	2.2	0.05	0.39	1.63	3.38	3.1	0.04	4.22	166000	103.3	107.5
	VGR	72.7	0.22	12.9	2.00	0.05	0.36	1.52	3.48	3.13	0.04	3.59	72400	99.7	101.8
	RjC	73.1	0.22	12.7	1.96	0.05	0.36	1.53	3.53	3.13	0.04	3.36	42900	97.1	98
	CF	63.1	0.43	17.9	5.73	0.08	0.72	1.11	1.47	2.64	0.06	6.81	334300	84.1	86.7
霧島	RF	70.9	0.27	13.9	2.52	0.06	0.57	2.35	3.28	3.15	0.07	2.89	110017	100.17	104.00
	VGR	71.6	0.27	13.6	2.37	0.06	0.6	2.22	3.28	3.2	0.06	2.73	65700	96.75	98.79
	RC	72.0	0.27	13.4	2.22	0.06	0.58	2.08	3.28	3.30	0.06	2.81	42900	94.22	99.38
	CF	69	0.21	12.9	5.63	0.06	0.48	1.33	2.33	3.98	0.05	4.05	140292	-	-
串良	RF	73.4	0.2	12.8	2.07	0.05	0.29	1.45	3.36	3.31	0.03	3.00	115800	99.01	102.27
	VGR	74.2	0.19	12.6	1.86	0.05	0.25	1.4	3.35	3.28	0.03	2.81	69400	84.35	101.61
	RC	74.3	0.19	12.5	1.78	0.05	0.26	1.36	3.38	3.32	0.03	2.84	45000	84.37	96.51
	CF	66.9	0.26	13.6	6.12	0.06	0.66	1.41	2.1	3.51	0.03	5.39	412280	-	-
串良 黄土	RF	71.4	0.23	13.6	2.55	0.06	0.37	1.53	3.21	3.08	0.02	3.94	126500	103.03	108.10
	VGR	72.6	0.22	13.2	2.25	0.06	0.34	1.44	3.34	3.23	0.02	3.3	76220	97.22	98.83
	RC	73.4	0.21	12.9	2.07	0.06	0.31	1.42	3.35	3.18	0.02	3.09	40790	94.67	97.59
	CF	65.7	0.29	15.7	4.57	0.08	0.62	1.35	2.11	3.03	0.02	6.58	390800	-	-
JIS A 6209															
I 種	70.0	以上	15.0	以下								4.0	80000 以上	100 以上	105 以上
II 種													40000 以上	95 以上	100 以上
III 種													10000 以上	90 以上	95 以上

実験結果 (JIS適合性試験)



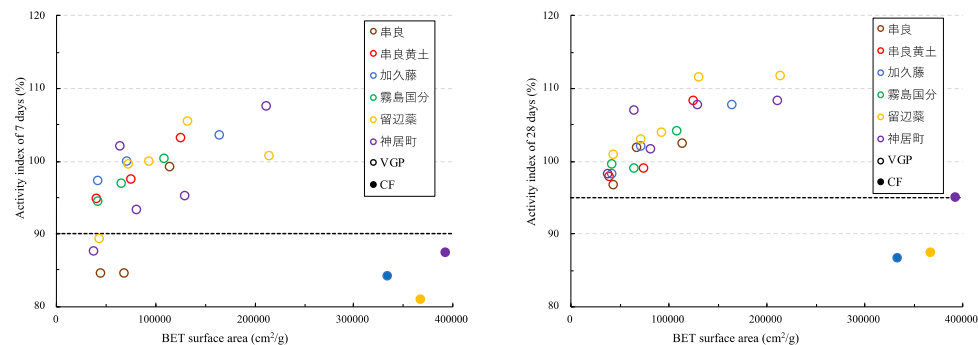
実験結果 (JIS適合性試験)



JIS適合性 (強熱減量、SiO₂)

- 加久藤、留辺蘂、神居町の原料を用いた場合にJISを満たさない
- 風化物CF (原鉱に含まれる微粒子) では、いずれも満たさない

実験結果（JIS適合性試験）



比表面積と7日活性度指数の関係

比表面積と28日活性度指数の関係

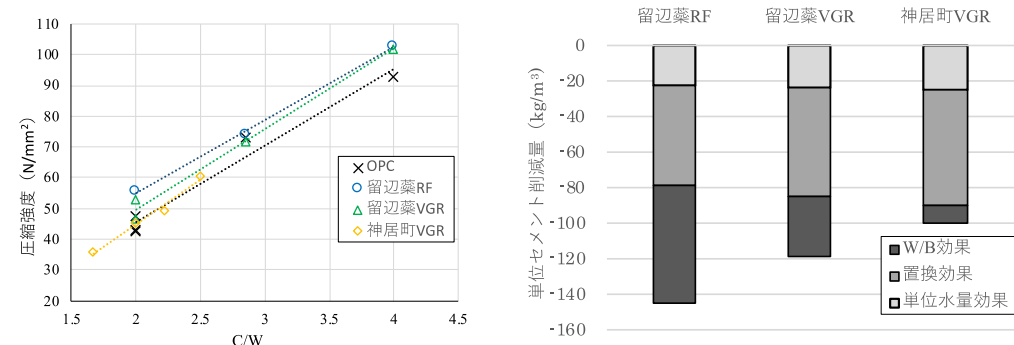
- JISの物性を満たさなくとも活性度指数を満たす（加久藤、留辺薬、神居町）
- 風化の傾向を示した粉塵は比表面積ほどには強度発現性を示さない

©BME Lab @ The Univ. of Tokyo
本資料の再配布はご遠慮ください。

実験結果（コンクリート試験）

留辺薬RF、VGR、神居町VGRをセメントに15%置換したコンクリート試験

→置換してもOPCより強度発現性がよい→低炭素化



VGPを用いたコンクリートのC/WとFの関係

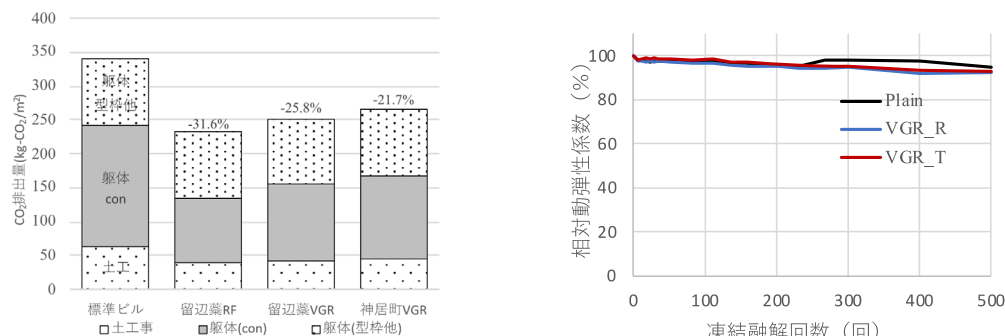
60N/mm²の調査におけるセメント削減量

©BME Lab @ The Univ. of Tokyo
本資料の再配布はご遠慮ください。

実験結果（コンクリート試験）

標準ビルの躯体工事ににおけるCO₂排出量を最大30%程度削減¹⁾

OPC単味と同程度の凍結融解抵抗性、中性化抵抗性は既報と同程度、流動性良好



60N/mm²を用いた新築工事の排出量比較

凍結融解試験の結果

1) 友寄篤ほか：火山ガラス微粉末利用による環境負荷低減効果に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.42、2020

©BME Lab @ The Univ. of Tokyo
本資料の再配布はご遠慮ください。

まとめ

- これまで検証されてきた入戸火砕堆積物以外の6種類の火山性堆積物を原料とした場合にも、JIS A 6209に適合するコンクリート用火山ガラス微粉末を製造することができた。
- ただし、SiO₂および強熱減量がJISの規定を満たさなくても、活性度指数を満たすケースがあり、今後のJIS改定に対し、重要な知見が得られた。
- 比表面積が200000cm²/g程度までは比表面積が大きくなるほど活性度指数も大きくなる。400000cm²/g程度になると活性度指数は大きくなり、風化の影響が考えられる。
- 北海道の火山灰を原料とした火山ガラス微粉末を用いたコンクリートにも良好な流動性、強度発現性、耐久性を示し、標準的な事務所ビルにおける躯体工事に伴うCO₂排出量を最大30%ほど削減できる結果が示された。

©BME Lab @ The Univ. of Tokyo
本資料の再配布はご遠慮ください。

まとめ

- 「セメントニ適質の火山灰ヲ混スルトキハ舊ニ其耐久ノ性ヲ附興スルニ有効ナルノミナラス費用ヲ省減スルノ利アルコト」,小樽築港工事報文（前編）、1905
- 「本工場内ニ於テ採集セシ火山灰ヲ以テ」1908年
- 「採掘後先ツ之ヲ乾燥シ粉末機ヲ以テ「セメント」ト同一程度ノ細末ヲ為ス」
→辰野金吾は日銀小樽支店の基礎・目地に余市産火山灰を採用（1912年竣工）



廣井勇



辰野金吾

北防波堤の工事（小樽市総合博物館所蔵）

©BME Lab @ The Univ. of Tokyo
本資料の再配布はご遠慮ください。

測光色画像処理に基づく VRシステムを利用した業務継続計画に 資する視環境評価法の開発

東京工業大学 環境・社会理工学院 研究員

大成学術財団 研究成果発表会 2022年10月14日(金) 新宿センタービル

研究の背景

業務継続性を考慮した視環境評価の必要性



- 人口の半数被災、M8クラスの余震、確率 70%“南海トラフ地震”¹⁾
- 中長期的な(計画)停電、限られた非常用発電量(業務継続計画では照明を $1/3^{2)}$ ~ $1/4^{3)}$, 72時間分²⁾³⁾、非常時必須業務(応急、避難所、運営)
- 省エネルギーが不可欠だが、照明を間引く、暗くすると、視界悪くなり作業効率の低下、疲労する
- 加えて、オフィスワーカーの49.5 %は女性⁴⁾、うち約20 %が月経中日常生活に支障⁵⁾

研究目的

非常時のバックオフィス業務の
作業しやすさ、体調の評価への影響を把握、
省エネを実現、継続期間を長期化する
多様性を考慮した社会に対応
(新業務継続計画)

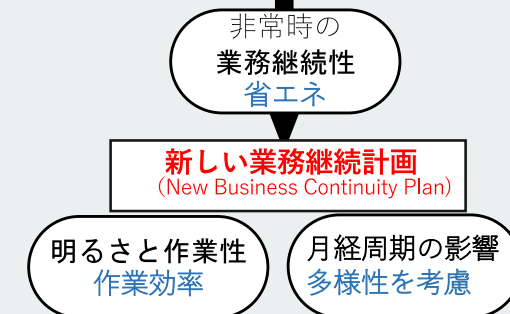
研究の構成

目的と実験の構成の関係

1. 非常時の業務継続性
(Business Continuity)
2. セミ・フォーカルの明るさ分布と作業性の向上
(視線の先の周辺領域)
3. 非常時に働く人のコンディションの評価への影響

現状の業務継続計画

非常時のバックオフィス業務の作業しやすさ・体調の評価への影響を把握、省エネを実現、継続期間を長期化する多様性を考慮した社会に対応



実験手法

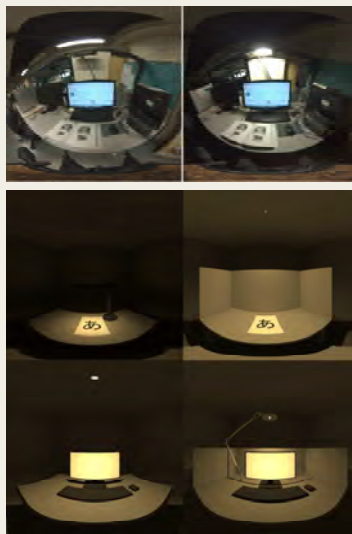
非常時の視環境の研究手法

1. 仮想現実システム(Virtual Reality System, VRS)の開発
業務継続性評価
2. セミ・フォーカル視環境と
作業性向上
3. 月経周期に合わせて3回評価
(月経前、月経中、月経後)

1. 業務
継続性評価

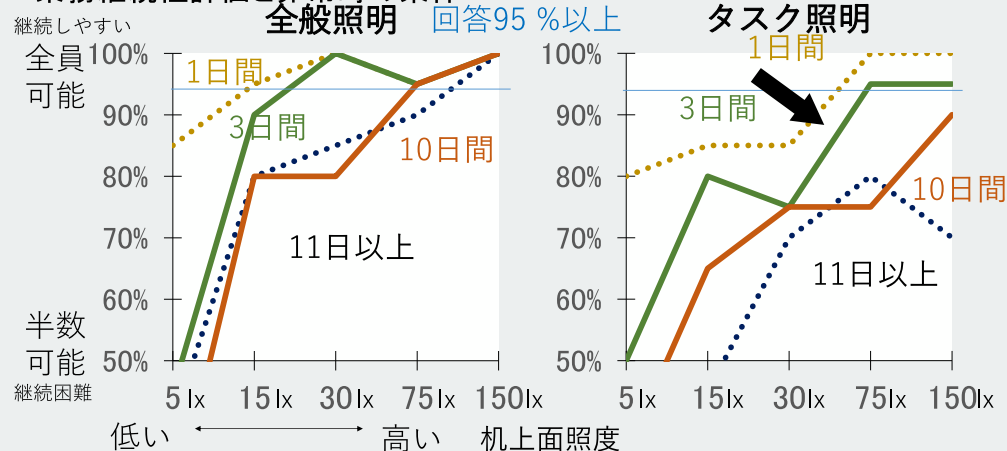
2. 作業性
評価

3. 月経周期中
3回評価



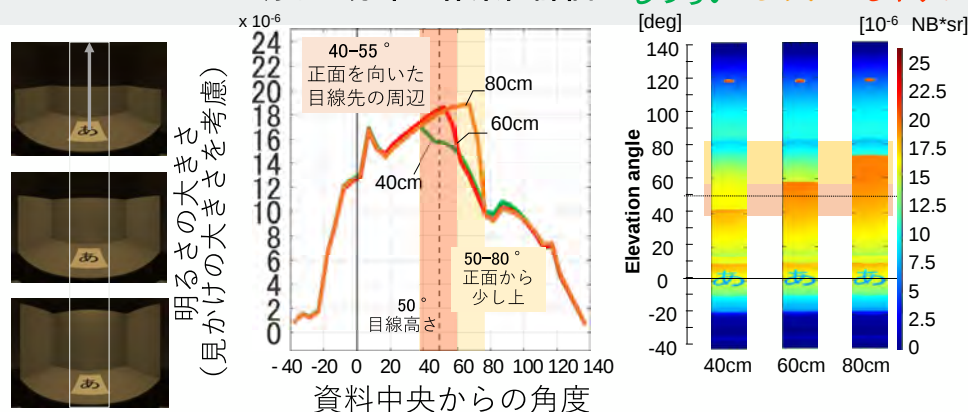
第一実験結果

業務継続性評価と非常時の条件 業務継続性可能



第二実験結果

セミ・フォーカルの明るさ分布と作業性評価



まとめ

72時間の2倍、4倍の期間
(余った電力は他で使用)

- 非常時の省エネ、電力は大幅に下げることが可能、継続期間の長期化
- 作業のしやすさ、見ている先の周辺の明るさ、特に上側が重要
- 女性の月経による、体調不良、作業効率の低下を感じる人が一定数いることを踏まえつつ、省エネの照明が可能

Appendix. 1 論文と参考文献

提出した論文

- 宮田 智美, 中村 芳樹, 青木 万理, 千歳 優希：非常時の業務継続性を確保するオフィス視環境（その1）：ヘッドマウントディスプレイ型ヴァーチャルリアリティシステムを用いた検討, 日本建築学会環境系論文集, 第86巻,第784号, pp.590-599, 2021.6 [第一実験に対応]
- 宮田 智美, 中村 芳樹, 青木 万理, 石井 里佳：オフィスにおける視作業に必要な作業対象周辺のセミ・フォーカル視環境に関するヘッドマウントディスプレイ型ヴァーチャルリアリティシステムを用いた検討, 日本建築学会環境系論文集, 第87巻, 第797号, 2022.7 [第二実験に対応]
- 宮田 智美, 中村 芳樹：体調変動を考慮したオフィスにおける作業性と業務継続性に必要な視環境 [第三実験に対応] 投稿準備中

参考文献のリスト

- 鎌田浩毅：地震・噴火・温暖化今後どうなるか？,OpenCourseWareKYOTO UNIVERSITY, 2021.03.10. (https://ocw.kyoto-u.ac.jp/course/971/?video_id=10639) (参照2022-03-22)
- 東京都：東京都業務継続計画（都政のBCP）, 東京都, 2017. 12
- 内閣官房: 内閣官房業務継続計画平成20年7月(平成27年3月改訂) , 内閣官房, 2015.
- 厚生労働省雇用均等・児童家庭：働く女性の実情,厚生労働省雇用均等・児童家庭、2014.
- 秋元世志枝, 宮岡佳子, 加茂登志子：月経前症候群、月経前不快気分障害の女性の臨床的特徴とストレス・コーピングについて, 跡見学園女子大学文学部紀要, 第43号, 2009.09
- 中村芳樹: 視環境設計入門: 見え方から設計する光と色, 数理工学社, 2020. 7

Appendix. 2 VRSの詳細とメリット

VRSを実験で用いた理由

- 実際の視環境に近い環境提示が可能
立体視、見かけのサイズが保存⁶⁾
- 同じ環境の提示が可能
実空間は自然光が変化する、一つの実験で複数条件の空間を被験者に提示
- どんな時・どこでも可能
(体のコンディションを考慮するために必須)



Appendix. 3 業務継続可能性と机上面照度（1）

作業のしやすさ、空間の印象の不快感、業務継続性、タスク照明

画面輝度 50cd/m ²	業務継続 可能性	机上面照度 [lx]			
		1日間	3日間	10日間	不明, 11日以上
全般照明	55%	5 以下	5 以下	5 以下	5 -15
	75%	5 -15	5 -15	5 -15	5 -15
	85%	5 -15	5 -15	5 -15	15
	95%	5 -15'	15	15	30
	100%	15, 75以上	30以上	150	75以上
タスク照明	55%	5 以下	5 以下	5	15
	75%	5 以下	5 -15	5 -15	30 -75
	85%	5 -15	5 -15	5 -15	75-150
	95%	15	75 -150	該当なし	該当なし
	100%	75以上	150	該当なし	該当なし

画面輝度 50cd/m ²	業務継続 可能性 [%]	空間全体の不快感			
		1日間	3日間	10日間	期間不明, 11日以上
全般照明	55%	不快, 以上	不快, 以上	不快, 以上	不快 - 少し不快
	75%	不快 - 少し不快	不快 - 少し不快	不快 - 少し不快	不快 - 少し不快
	85%	不快 - 少し不快	不快 - 少し不快	不快 - 少し不快	少し不快
	95%	不快 - 少し不快	少し不快	少し不快	少し不快
	100%	少し不快, 不快 感はない	不快感はない	不快感はない	不快感はない
タスク照明	55%	不快, 以上	不快, 以上	かなり不快 - 不快	不快
	75%	不快 - 少し不快	不快 - 少し不快	かなり不快 - 少し不快	不快 - 少し不快
	85%	不快 - 少し不快	不快 - 少し不快	不快 - 少し不快	不快 - 少し不快
	95%	少し不快	少し不快 - 不快 感はない	不快 - 少し不快	不快 - 少し不快
	100%	少し不快	不快感はない	該当なし	該当なし

Appendix. 4 業務継続可能性と机上面照度（2）

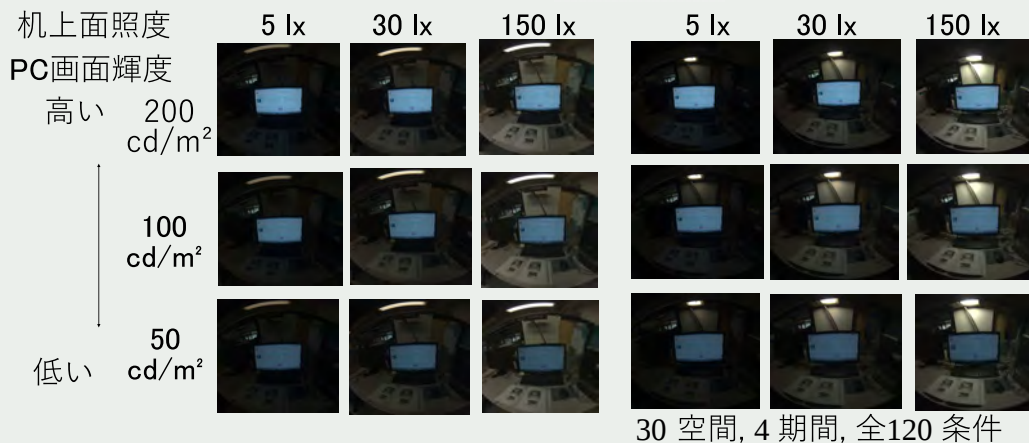
作業のしやすさ、空間の印象の不快感、業務継続性、タスク照明

画面輝度 50cd/m ²	業務継続 可能性	パソコン作業の負荷			
		1日間	3日間	10日間	不明, 11日以上
全般照明	55%	少し負荷がある - より負荷が大きい	少し負荷がある - より負荷が大きい	やっどできる	やっどできる - 少し負荷がある
	75%	少し負荷がある	少し負荷がある	やっどできる - 少し負荷がある	やっどできる - 少し負荷がある
	85%	少し負荷がある	少し負荷がある	やっどできる - 少し負荷がある	やっどできる - 少し負荷がある
	95%	少し負荷がある	少し負荷がある	やっどできる - 少し負荷がある	やっどできる - 少し負荷がある
	100%	少し負荷がある	少し負荷がある	やっどできる - 少し負荷がある	やっどできる - 少し負荷がある
タスク照明	55%	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい
	75%	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい
	85%	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい
	95%	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい
	100%	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい

画面輝度 50cd/m ²	業務継続 可能性	読み書き作業の負荷			
		1日間	3日間	10日間	不明, 11日以上
全般照明	55%	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい
	75%	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい
	85%	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい
	95%	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい
	100%	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい
タスク照明	55%	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい
	75%	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい
	85%	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい
	95%	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい
	100%	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい	やっどできる - より負荷が大きい

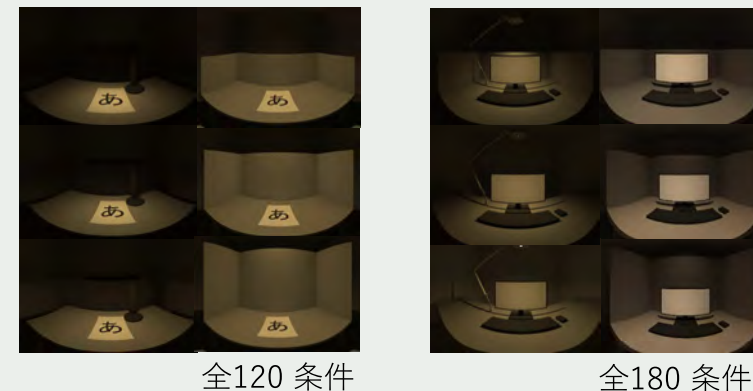
Appendix. 5 提示空間の例 (1)

タスク照明、全般照明、パソコン画面輝度、机上面照度



Appendix. 6 提示空間の例 (2)

タスク照明、全般照明、パソコン画面輝度、セミ・フォーカルの明るさ分布



Appendix. 7 実験の詳細

非常時の想定、質問項目

<被験者に関する情報>

- ・ 10日後の締め切りの資料作成
- ・ 地方自治体で勤務する職員

<勤務先からの情報>

- ・ 近域で地震が発生し電力事業所からの供給が不足
- ・ 非常用発電機を運用中、業務継続が可能な範囲での節電協力要請あり

<電力事業所からの連絡>

- ・ 供給電力は「**X期間**」後に通常供給に戻る、(あるいは期間が不明)

例) 3日間の場合

<本日>

3日間

通常の照明環境

10日後

<業務の締め切り>

非常電源で運用

提示された空間で業務を行う

Appendix. 8 実験の詳細

非常時の想定、質問項目

業務継続性評価 Business Continuity Assessment

期間中継続して業務を行うことは可能ですか。 はい・いいえ
Is it possible to continue working for X days? yes・no

フォーカル評価 Focal Assessment

各作業(パソコン, 紙面)をするうえで作業の
負荷の程度を評価してください。
Assess how difficult it is to perform task
(PC/Paper) for X days continuously.

0 特に負荷はない Not difficult
1 やややりづらい Slightly difficult
2 やりづらい Difficult
3 やっとできる Very difficult
4 できない Impossible

アンビエント評価 Ambient Assessment

部屋全体を見渡し、部屋全体に対する
不快感の程度を評価してください。
Assess the room impression when
working continuously for X days.

0 特に不快感はない Comfortable
1 やや不快 Slightly uncomfortable
2 不快 Uncomfortable
3 かなり不快 Very Uncomfortable

Assessing the Reliability of Reinforced Concrete Structures under Coupled Degradation Effect of Crack Development and Rebar Corrosion



王 眺, 李 春鶴, 欒 堯, 石田 哲也
wangtiao@g.ecc.u-tokyo.ac.jp
東京大学コンクリート研究室

研究の背景

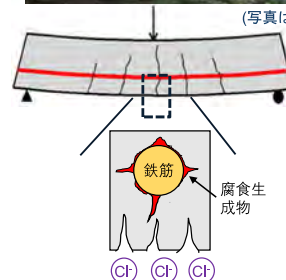


研究背景

海洋環境におけるRC構造物の塩害



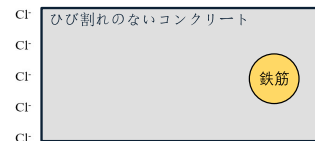
(写真はネットから)



鉄筋の腐食によってひび割れが発生したが、腐食過程はひび割れの進展と密接に関連する。

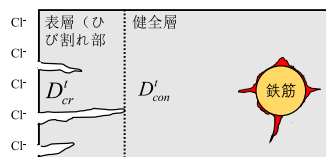
課題

腐食の評価は現在、主にひび割れの無い健全なコンクリートを対象としている。



$$C_d = \gamma_d C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \times c}{2 \sqrt{D_d \times t}} \right) \right\}$$

ひび割れが発生したコンクリート



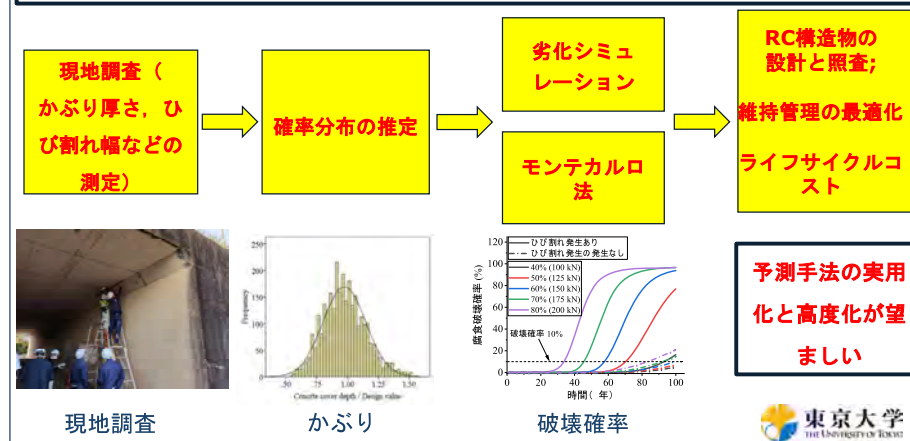
ひび割れの進展と鉄筋の腐食を連成する評価・予測システムの構築が必要。

確率的評価システム

供用期間中のRC 構造物には多くの不確実因子がある:

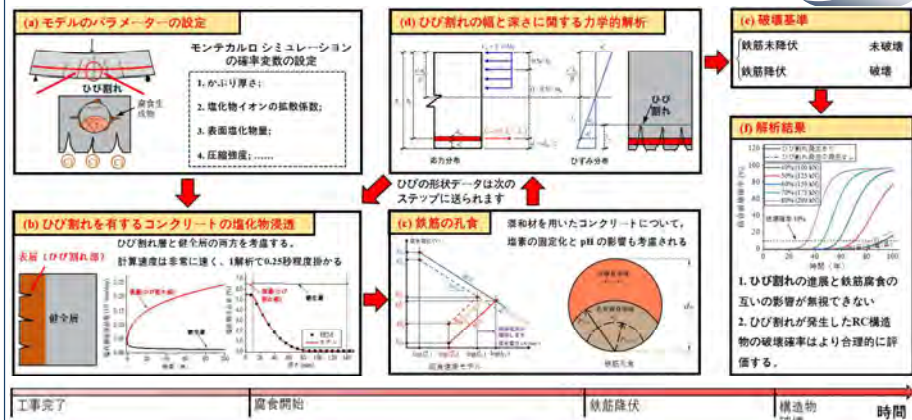
塩化物イオンの拡散係数、コンクリートのかぶり、表面塩化物量、温度など

信頼性解析には数百万回のサンプリング、高効率なアプローチが不可欠



解析システムの構成

解析システムの構成



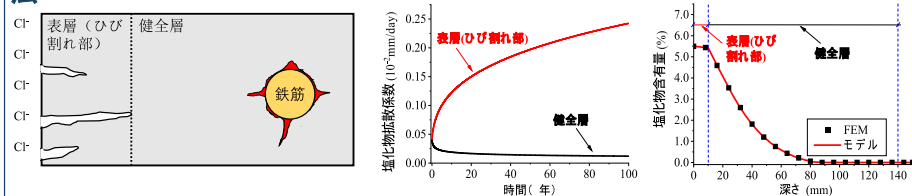
本システムは、従来の経験的な劣化モデルではなく、物理化学モデルと力学モデルに基づいて開発されており、RC構造物の全寿命性能を総合的に評価することができる。

ひび割れが発生したコンクリートの塩化物イオンの拡散特性

迅速な数値アプローチ

ひび割れが発生したコンクリートの塩化物イオン浸透の新たな解析手法

Wang et al., Struct. Infrastruct. E. 2021



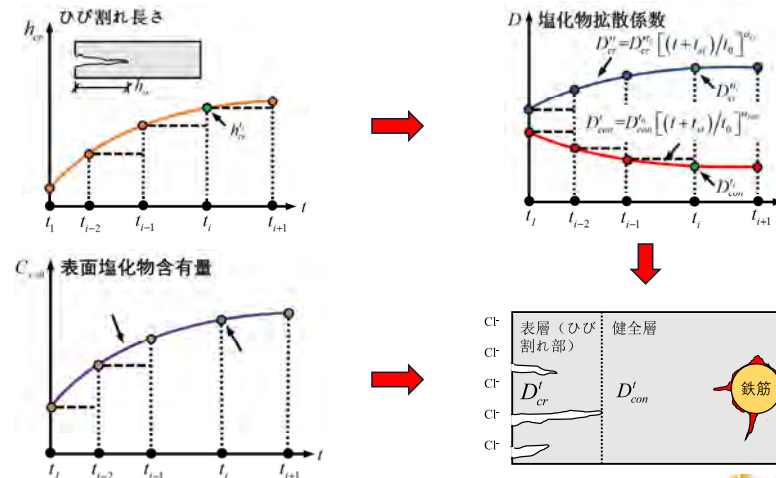
$$C = \begin{cases} C_0 + [A_n \sin(\lambda x / \sqrt{D_1}) + B_n \cos(\lambda x / \sqrt{D_1})] \exp(-\lambda^2 t), & 0 < x < h_1 \\ C_0 + \{A'_n \sin[\lambda(x - h_1) / \sqrt{D_2}] + B'_n \cos[\lambda(x - h_1) / \sqrt{D_2}]\} \exp(-\lambda^2 t), & h_1 < x \end{cases}$$

$$C = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n f_n(x) \exp(-\lambda_n^2 t)$$

$$f_n(x) = \begin{cases} \sin(\lambda_n x / \sqrt{D_1}), & 0 < x < h_1 \\ \frac{\sin(\lambda_n h_1 / \sqrt{D_1})}{\cos(\lambda_n h_2 / \sqrt{D_2})} \cos[\lambda_n(x - h_1 - h_2) / \sqrt{D_2}], & h_1 < x < h_1 + h_2 \end{cases}$$

ひび割れが発生したコンクリートの塩化物の拡散

ひび割れが発生したコンクリートの塩化物拡散の時間依存性について、ステップ関数を用い解析を行う。



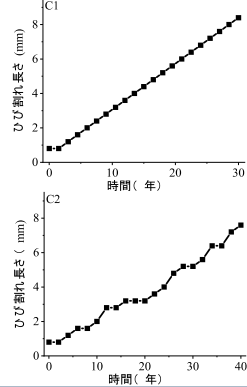
塩化物イオン拡散の検証



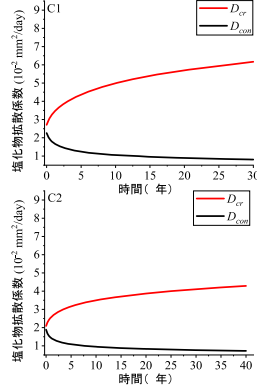
有限要素法 (FEM)を用いたRNAの検証

Case	D_{cr}^0 (mm ² /day)	D_{con}^0 (mm ² /day)	α_{cr}	α_{con}	$C_{s=0}^0$ (wt% binder)	$C_{s=0}^0$ (wt% binder)	t_{cr} (year)	t_{st} (day)	t_0 (day)
C1	2.5×10^{-2}	2.5×10^{-2}	0.20	-0.25	3.0	3.5	30.0	180	120
C2	2.0×10^{-2}	2.0×10^{-2}	0.15	-0.20	3.0	3.5	40.0	120	90

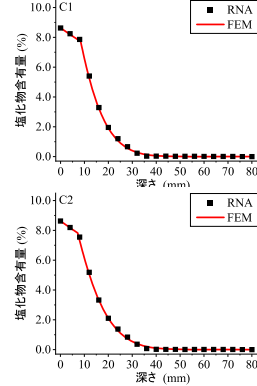
ひび割れ長さ



塩化物拡散係数



塩化物プロファイル

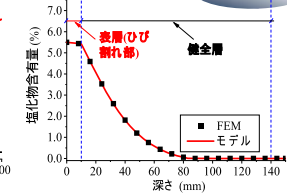
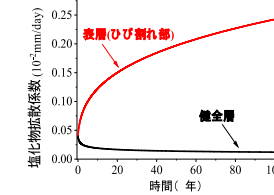
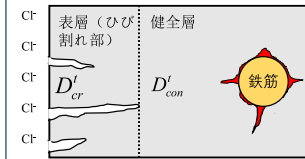


学

計算時間



ひび割れが発生したコンクリートの塩化物イオンの拡散過程



計算時間 (モンテカルロ、100 万回のサンプリング、100 年、ラップトップ)

	C1	C2	C3	C4	Average
FEM (s)	5,332	6,589	7,680	7,577	
RNA (s)	0.2048	0.2301	0.3008	0.2642	
FEM/RNA	26,035	28,635	25,532	28,679	27,220

FEM: 475.65 年

RNA: 69.44 時

計算可能!!!



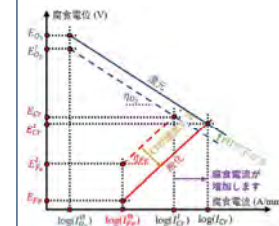
腐食モデル



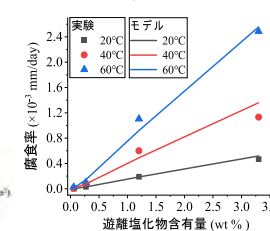
腐食モデル



腐食速度モデル

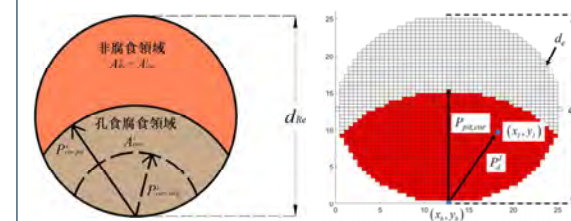


Hussain et al., 2011



腐食速度モデルは、pH、塩化物含有量、温度などの因子を取り入れるため、混和材の使用が腐食過程に及ぼす影響が再現できる。

鉄筋腐食モデル



鉄筋腐食は孔食であり、本モデルに取り入れる。

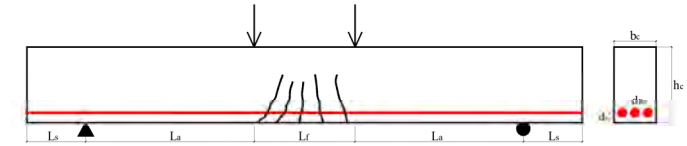
力学的解析



力学的解析

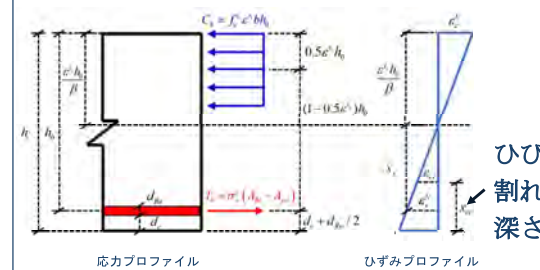


曲げ作用を受けるRC構造物



平面保持の仮定

ひび割れが発生したコンクリートの塩化物拡散係数



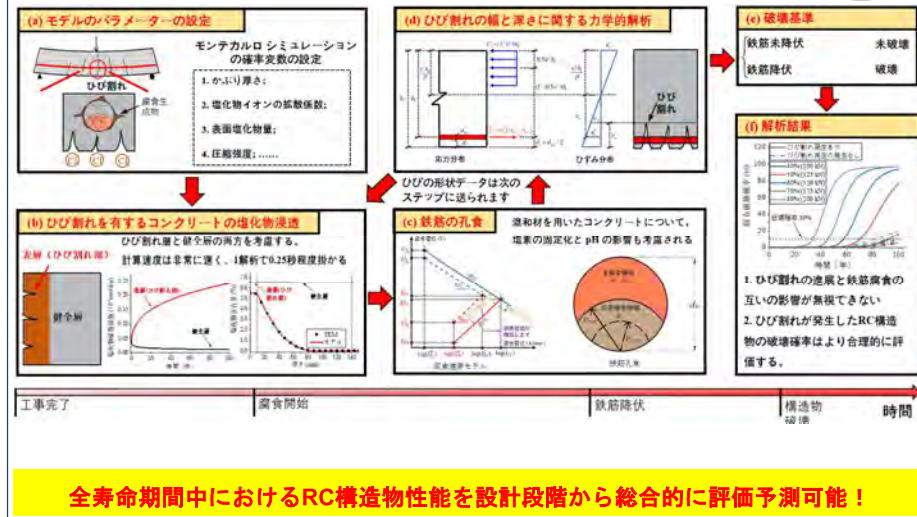
$$D_{cr}^t = \left[D_{con}^{t_0} + 3 \left(\frac{\sigma_s}{E_s} + \epsilon_{sh}^t \right) D_{cr,k} \right] m_{t_0}^{T_0}$$

本システムでは、ひび割れの進展と鉄筋の腐食過程の解析を連成する。

解析システムの構成



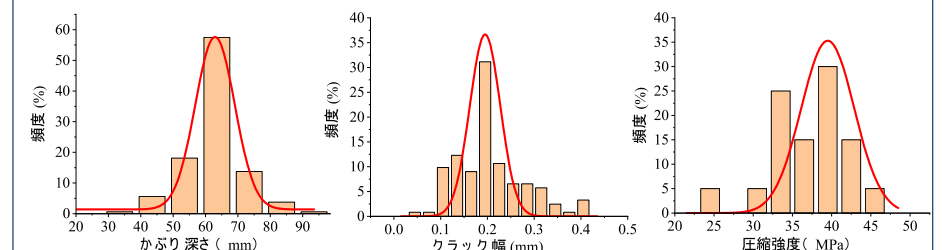
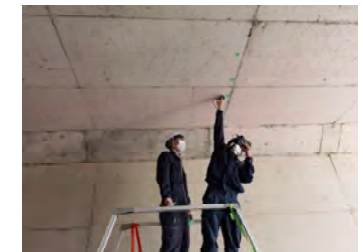
解析システムの構成



宮崎での現地調査



国道220号線（宮崎市区間）の現地調査





解析結果



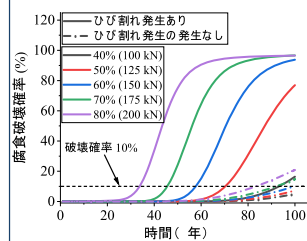
荷重レベルの影響

荷重レベル

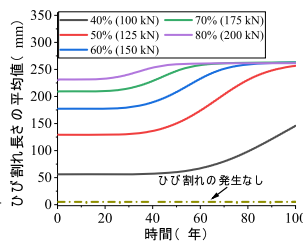


荷重レベルの影響（ひび割れ進展なし：ひび割れ深さ5mm）

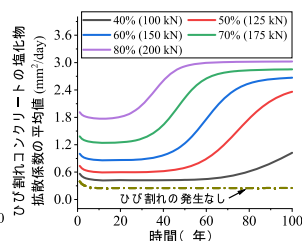
腐食による破壊確率



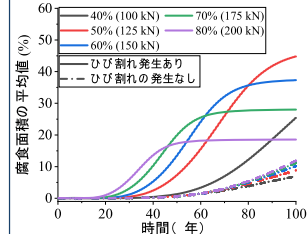
ひび割れ長さ



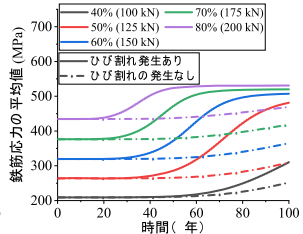
塩化物拡散係数



腐食領域



鉄筋応力



ひび割れの進展と鉄筋
腐食の連成を考慮しな
い場合、腐食破壊確率
を大幅に過小評価！

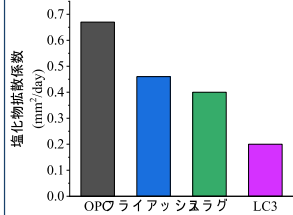
異なる混和材（SCMs）に よる影響

異なる混和材の使用による影響

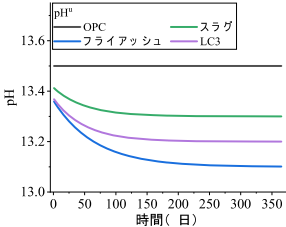


SCM は、塩害環境におけるRC構造物の耐久性を大幅に向上させる。

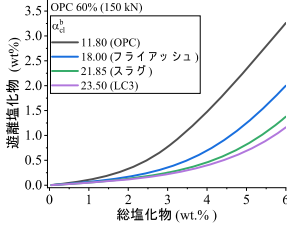
低い塩化物拡散



ポゾン反応による低pH

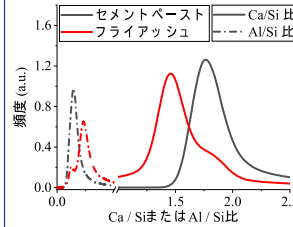


塩化物の異なる固定化能力

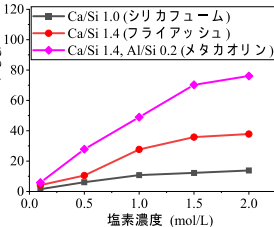


本研究の最新の実験結果は、SCMの塩化物固定化に対する影響が複雑であることが確認された。

SEM-EDS マッピング (Wang et al., 2019)



C-(A)-S-Hゲルの塩化物結合試験

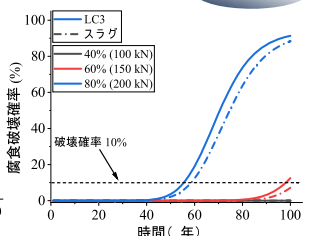
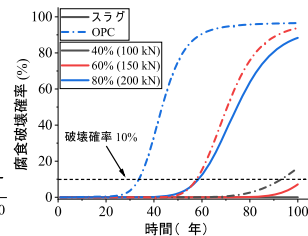
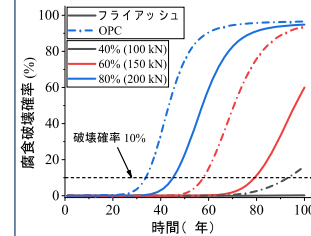


C-(A)-S-H ゲルの塩化物イオンの固定化能力！

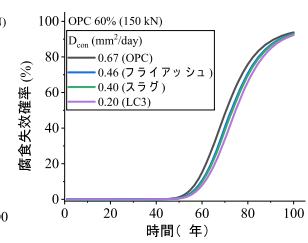
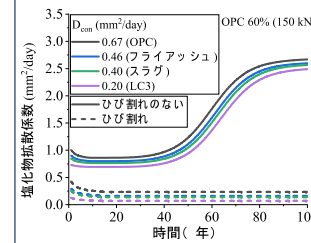
異なる混和材の使用による影響



SCM は、塩害環境におけるRC構造物の耐久性を大幅に向上させる。



塩化物イオン拡散係数の影響

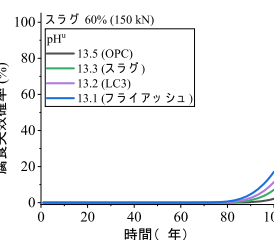
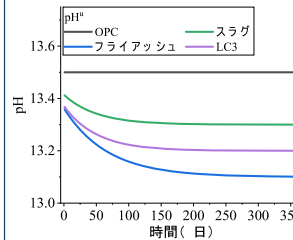


ほとんどの塩化物イオンの浸透はひび割れを介して発生するため、コンクリート自体の塩化物拡散係数の影響が相対的に小さい。

異なる混和材の使用による影響

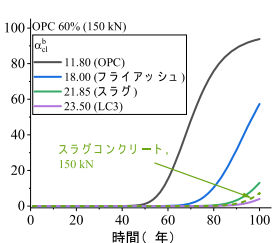
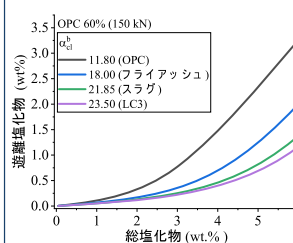


pHの影響



pH は、RC 構造の腐食破壊率に大きな影響を与える。

塩化物イオンの固定化の影響

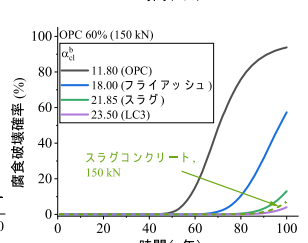
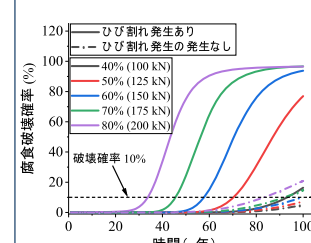
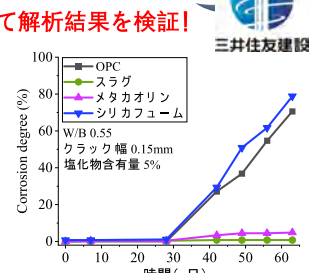
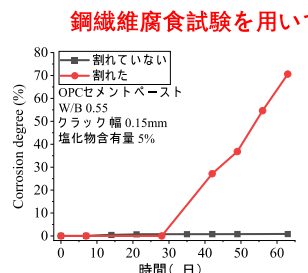
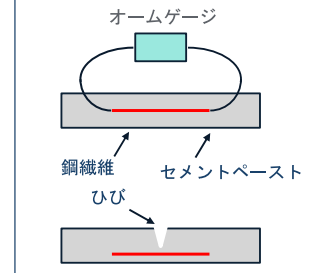


塩化物イオンの固定化は、支配的な影響要因であることを示す。スラグおよびLC3)などのアルミニウムが豊富な SCM は、海洋環境下の RC 構造により適していることを示す。

実験的検証



鋼繊維腐食試験 (三井住友株式会社様のご協力)



ひび割れは鋼繊維の腐食に大きな影響を与えている。塩化物イオンの固定化能力が支配的な要因であることも示す。

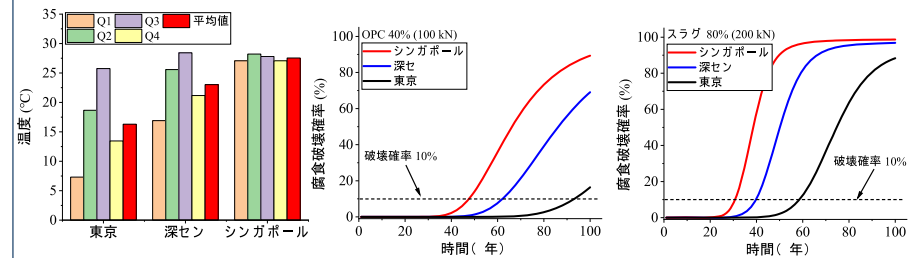


温度の影響

温度の影響



温度の影響



気温の影響を検討するために3つの都市を選択。

気象データは地方の気象局によって (1981-2010 年に) 収集されたデータ。

→ 気温の影響を無視してはならないことを示す。

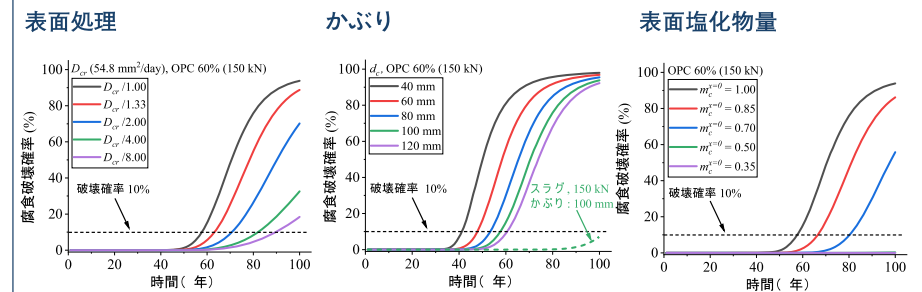


実構造物への展開

実構造物への展開



実構造物への展開



本解析システムは、コンクリートの表面処理、かぶり厚さ、表面塩化物量などの影響を再現でき、設計・維持管理の最適化および照査への適用が可能。

将来の目標と謝辞



将来の目標

1. 水とおよび細孔構造を検討することで、精度向上が可能。
2. 3次元の力学解析モデルを用いることで、縦方向の鉄筋の鋼腐食に関連する空間的変動を考慮することが可能。
3. 腐食進展による、せん断破壊、疲労劣化の検討も可能。

謝辞

一般財団法人 大成学術財団 (2020～2022) 財政的支援に深くお礼申し上げます。

宮崎河川国道事務所の技術支援・協力にお礼申し上げます。

