

日中大学フェア&フォーラム in Japan 2016

無筋建築に利用可能な超高延性セメント系複合材料



同济大学土木工程学院

构造工程·防災研究所

余江滔 俞可权

蘇州に出現した「盈創」の3D印刷建築 別荘の印刷を1日で完了

<http://www.yhbm.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=38&id=110>

高さ6.6m・幅10m・長さ150m の3D プリンターを使い、
10棟・200㎡ のセメント平屋を24時間で印刷。



建築印刷のための「インク」となるのは主に建築ゴミ・工業ゴミ・鉍滓など。
さらに主要材料としてセメントや鉄筋、特殊補助剤がある。

3D印刷された世界初の商業ホテル、フィリピンに登場

<http://mt.sohu.com/20150920/n421629395.shtml>



建設に使用された3Dプリンターは、移動式の中世の城を米国で3D印刷したAndrey Rudenko氏が中心となって設計した。このプロジェクトの仕掛け人も同氏である。

プリントに要した時間は総計100時間だが、水道管や電線、鉄筋などの設置のため、100時間連続で行われたわけではない。また最初の3Dプリンターの設置には2カ月を要した。



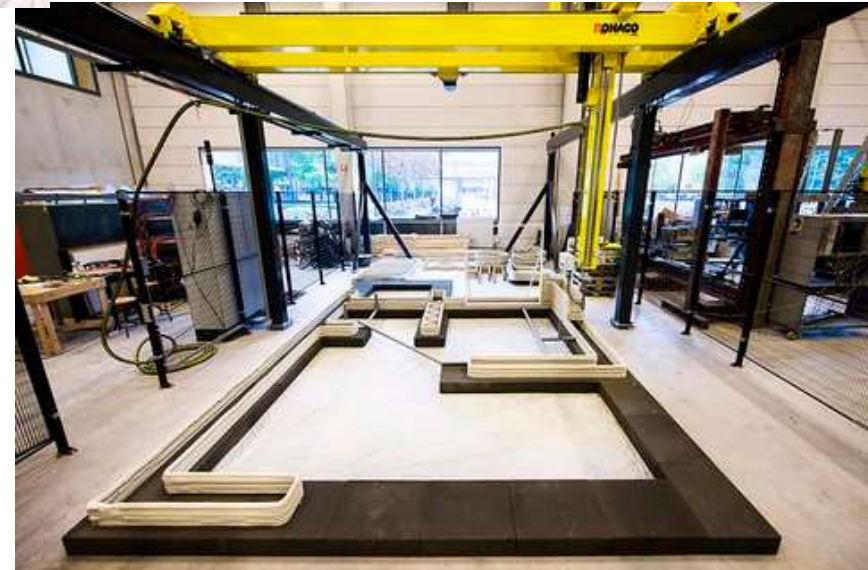
TU Eindhoven starts using king-size 3D concrete printer

<https://www.tue.nl/en/university/news-and-press/news/22-10-2015-tu-eindhoven-starts-using-kingsize-3d-concrete-printer/>



オランダのアイントホーフェン工科大学(TU/e)では現在、コンクリートを利用した3D印刷のテストが行われている。
中国と米国の研究所に続く世界第3の3Dセメント印刷実験となる。

3Dセメント印刷は、コンピューターによって制御される。オランダの会社がすでに、セメント3Dプリンターの生産に乗り出している。価格は約10万ユーロ。3D印刷に使うコンクリートは、材料の増強を経て初めて使用できる。セメント材料の増強は、スチールや合成繊維、生物化学材料の添加などを通じて行われる。



アラブ首長国連邦、建築3D印刷技術を国家戦略として確立



ドバイの副大統領で首相のムハンマド・ビン・ラシド・マクトム氏は、アラブ首長国連邦による3D印刷技術の開発利用に向けた壮大な計画を発表した。3D印刷技術は今後10年で、世界経済に対して5500億ドルの影響を与えるとされる。



「3D印刷技術を利用した機能建築として、2000平方フィート（約185㎡）のオフィスを建築する」

ドバイ、世界初の3D印刷全機能オフィス建設へ



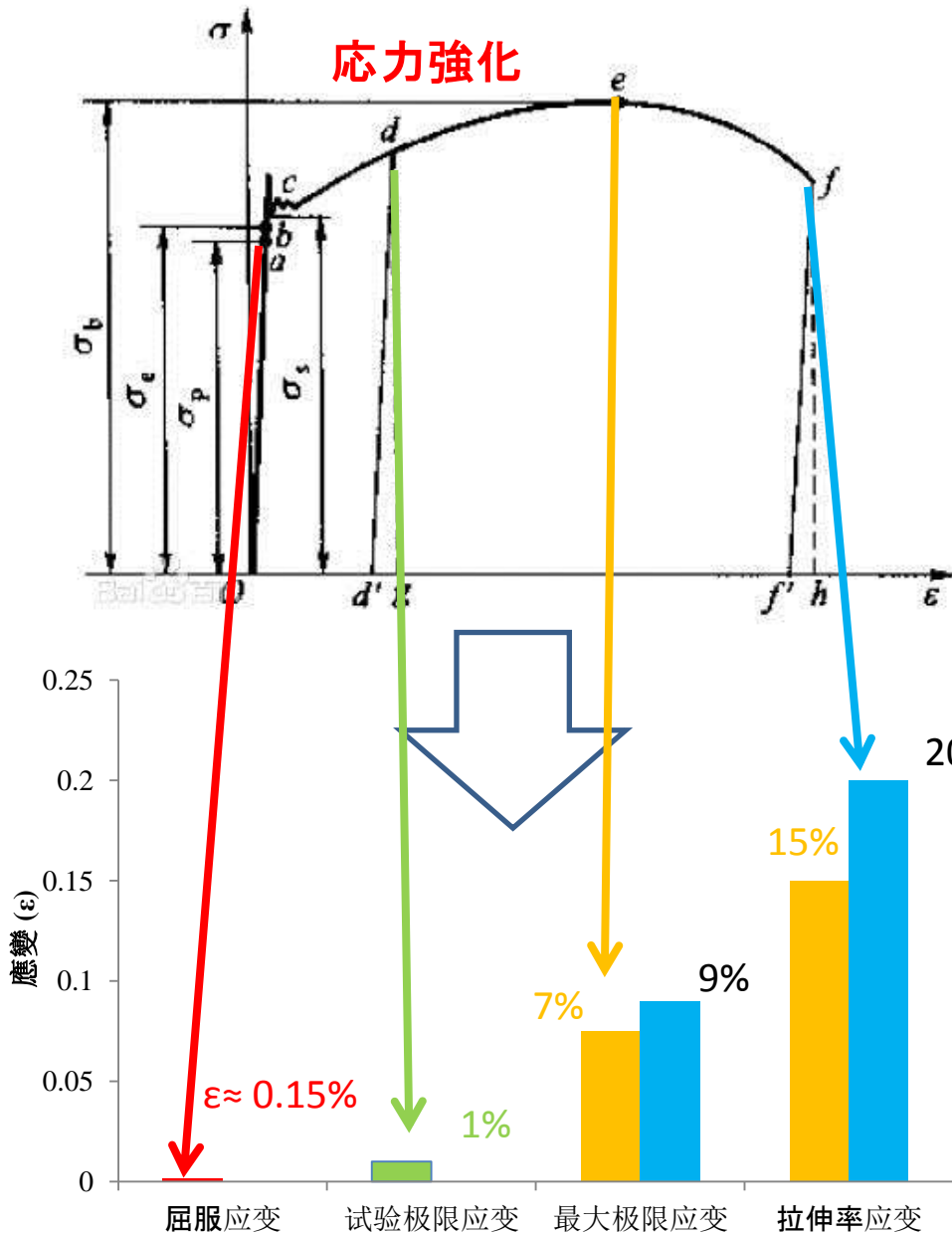
ドバイに建設が計画されている世界初の3D印刷オフィスは、「盈創建築科技(上海)有限公司」(Winsun)が3D印刷を請け負い、設計は「Gensler」「Thornton&Thomasetti」「Syska Hennessy」が共同して行う。部品やインテリアなどディテールに至るまで、大型の3Dプリンターによって作られる成部分は、にぎやかなドバイの繁華街で組み立てられ、完成まで僅か数週間である。

無筋建築の2つの難点

- ❖ **材料問題:** コンクリートは無筋建築に向いているが、延性や強度に乏しく、単独での利用は難しい。
- ❖ **構造の分層問題**



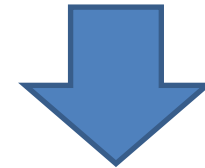
鉄筋コンクリート構造の信頼性はなぜ高いか



「コンクリート構造試験方法標準」
GB50152-92

「鉄筋コンクリート用鋼——異形鉄筋」
GB_1499.2-2007

「コンクリート建築耐震設計規範」
GB5011-2010



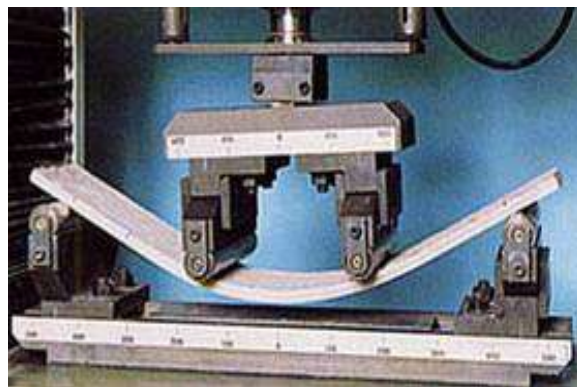
- ❖ 最大引張応力に対する鉄筋の伸長率は実測値で9%を下回ってはならない(コンクリートの数百倍)
- ❖ 鋼材は、明確な降伏ステップを示し、伸長率は20%を下回ってはならない(降伏変形の100倍余り)

無筋3D印刷に利用可能な材料 但し目下性能不足

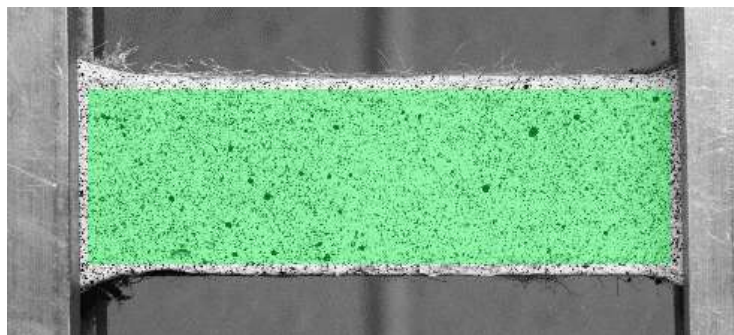
ECC (Engineered Cementitious Composites) は、**変形可能な硬化**セメント系材料である。ミクロ力学の原理に基づいて設計され、低い繊維含量で超高延性を実現することをねらいとする。



飽和状態における微細亀裂



曲げ可能なセメント系材料



超高延性のセメント系材料



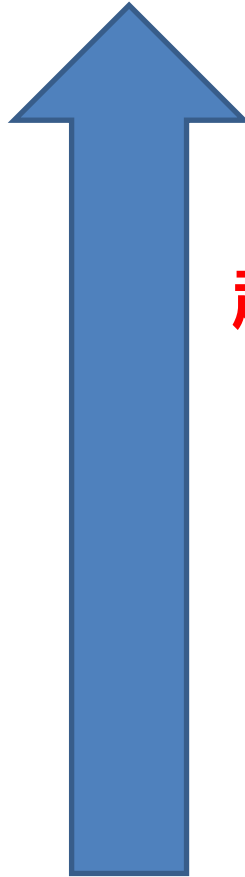
高性能繊維

超級 ECC 材料

鉄筋並みの延性

超高度の引張強さ

普通ECC材料



超級 ECC

コンクリートを**独立で圧力を受けられる**
材料に変身

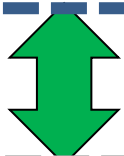
8%を下回らない
超高度の延性

15MPaを下回らない
超高度の抗張強度、
曲げ抗張強度は**30MPa**

100Pmaに達する
確かな抗压強度



2倍以上に向上



2倍以上に向上



2倍以上に向上

引張延性約3%

抗張強度3MPa-
6MPa

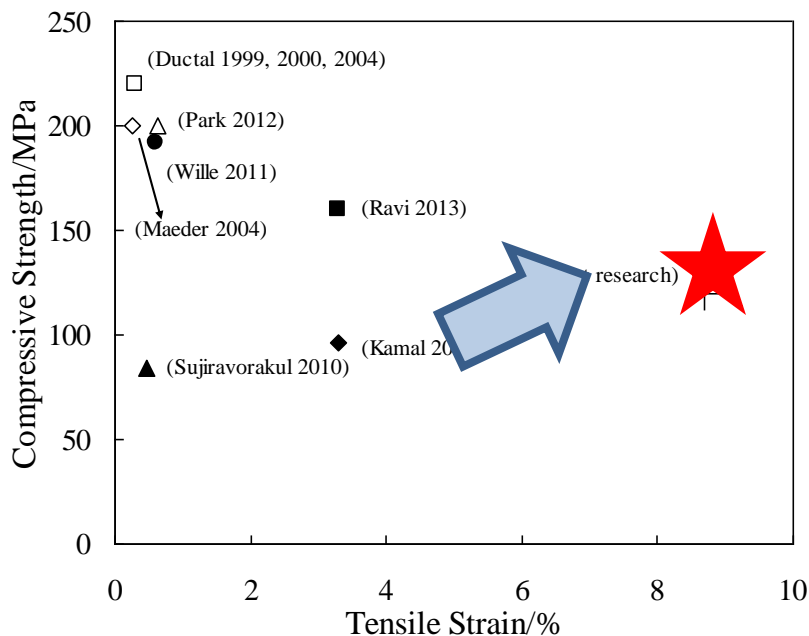
抗压強度は普通
50MPa以下

普通ECC

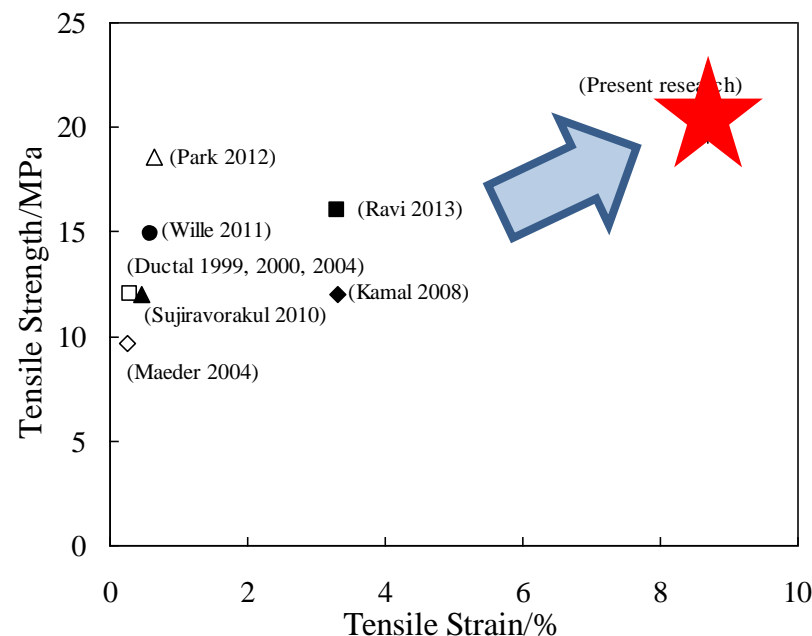
研究目標:これまでにないセメント系材料

超高延性/超高強度の高性能複合セメント系材料

(UHDC, Ultra-high ductile cementitious composites)は、これまでになかった変形強化性能を持ち、その極限抗張強度は**20MPa**に達し、同時に**8%から10%**の引張延性を持つ。軸方向抗压強度は**120MPa**に達する。



(a) 抗压強度と引張延性の比較

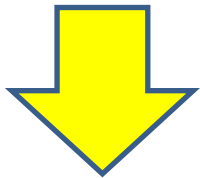


(b) 抗拉強度与延性比较

材料性能の比較(同類研究)

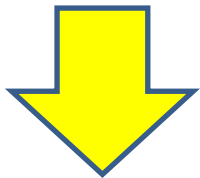
ミクロからマクロの過程

Fiber, Matrix, Interface
 繊維、マトリックス、界面



Micromechanics
 微視力学

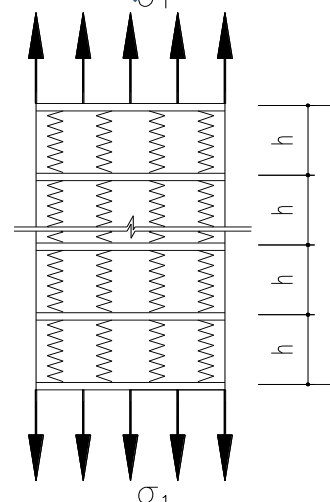
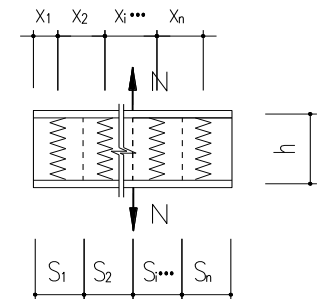
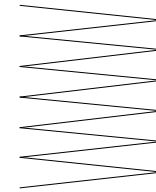
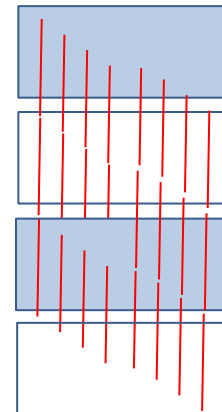
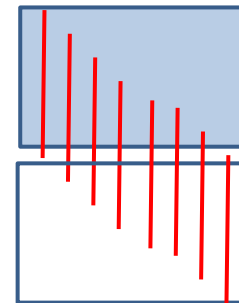
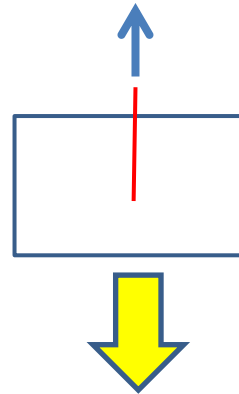
Fiber Bridging Properties
 Across a single cracks
 単一亀裂を複数の繊維がブリッジング



Steady-State Crack Analyses
 Spring Capacity Analyses
 安定亀裂分析 弾性能力分析

Composite Tensile Strain-Hardening
 複合引張りひずみ硬化

並列から直列のランダム体系



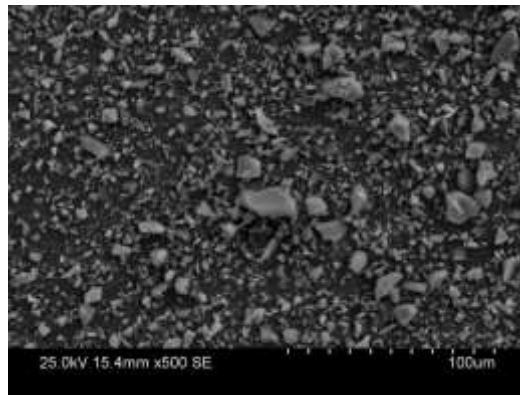
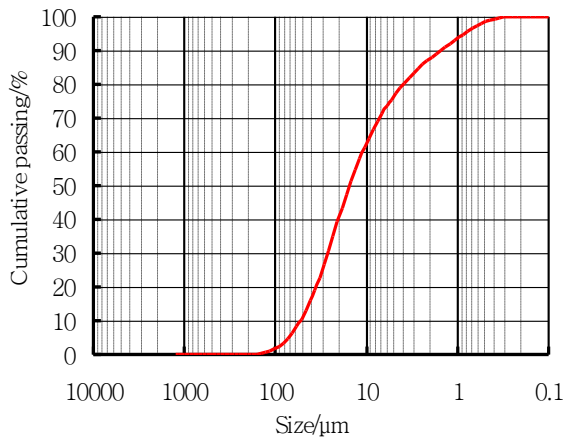
調合材料

Mixture properties of UHDC

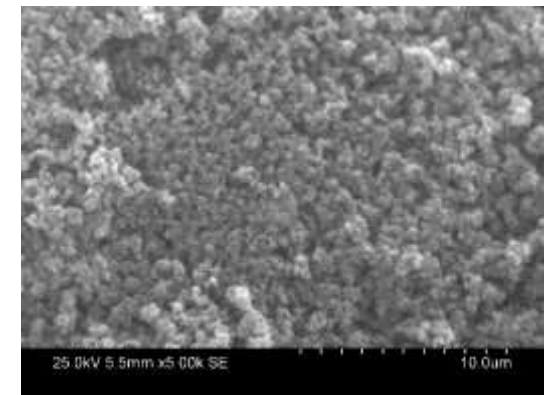
Cement (C) (kg/m ³)	700
Silica fume (SF) (kg/m ³)	250
Ground granulated blast furnace slag (GGBFS) (kg/m ³)	650
Silica sand (kg/m ³)	800
Water(W)(kg/m ³)	230
Fiber (kg/m ³)	20
HRWR (kg/m ³)	25
W/(C+SF+GGBFS)	0.135
W*/(C+SF+GGBFS)	0.14

Fiber properties for UHDC

Fiber	Polyethylene
Den	4600
Length L _f , mm	12
Volume fraction V _f , %	2
Nominal strength, MPa	3000
Nominal Young's modulus, GPa	100
Elongation at break, %	2~3
Specific gravity, g/cm ³	0.97
Melting temperature, °C	150



(a) Morphology of GGBFS

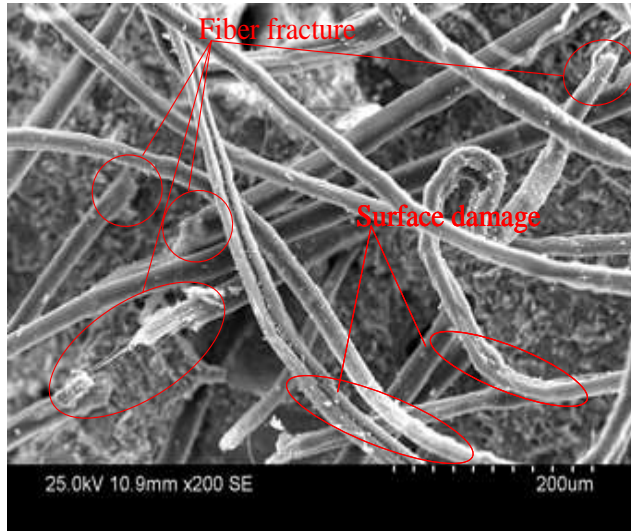


(b) Morphology of silica fume

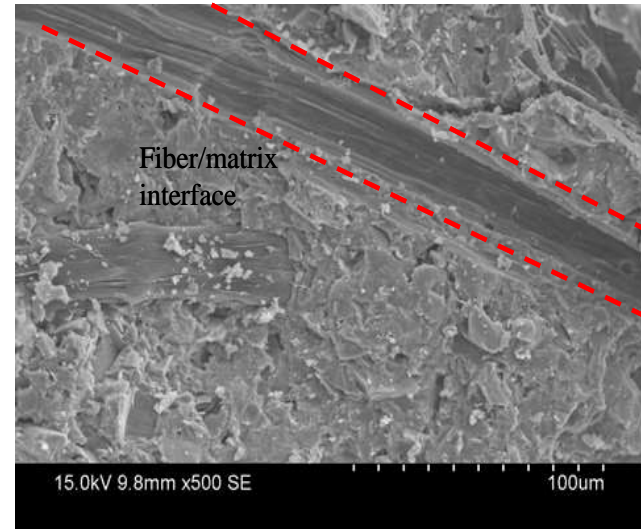
Particle size distributions of GGBFS

Morphology of GGBFS and silica fume

材料性能

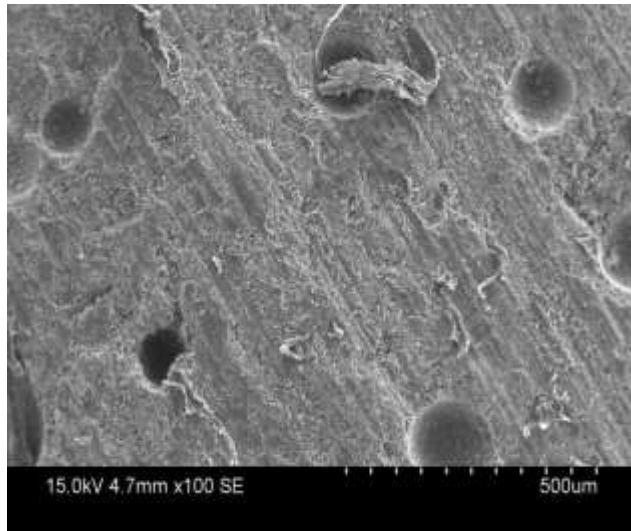


(a) Fiber fracture and surface damage



(b) Fiber/matrix interface

SEM images of PE fiber and fiber/matrix interface



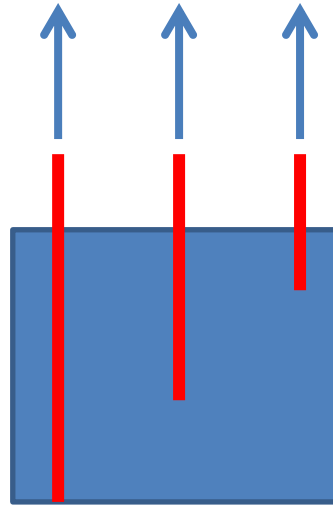
(a) Specimen cross section



(b) Tobermorite in one pore

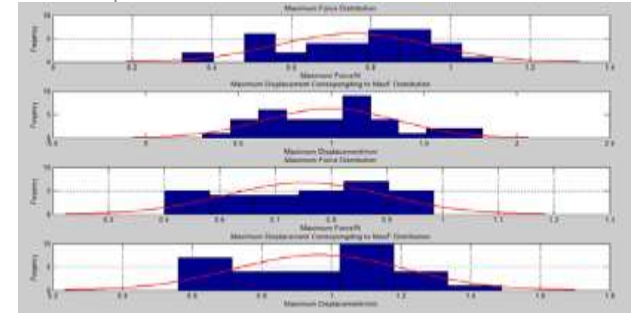
SEM images of specimen matrix

ミクロ試験

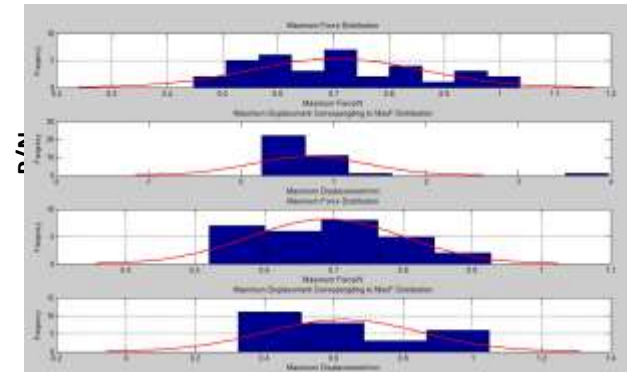


異なる深さの単繊維
抜き出し実験

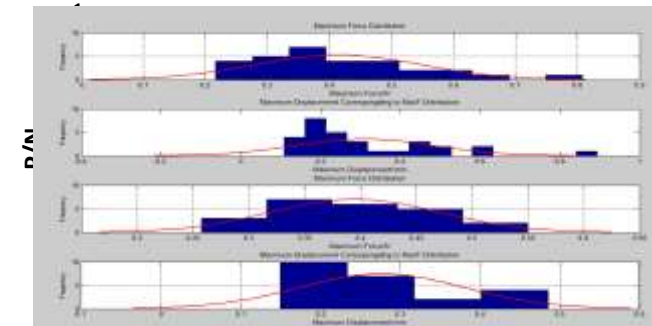
1



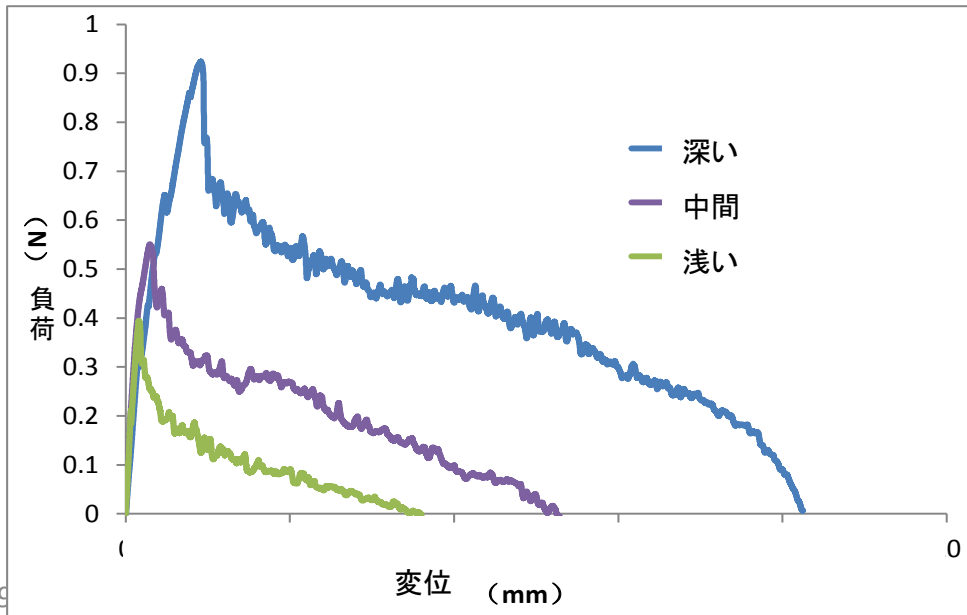
UHDC-1単繊維引き抜き試験結果統計



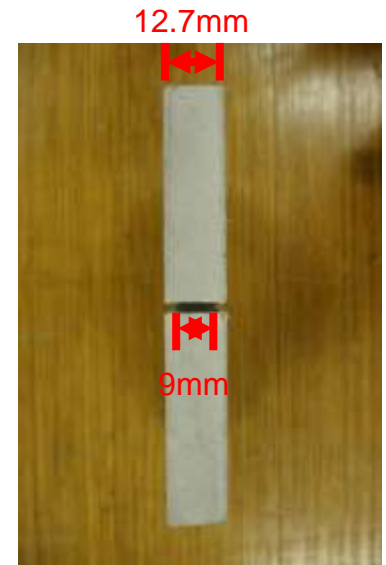
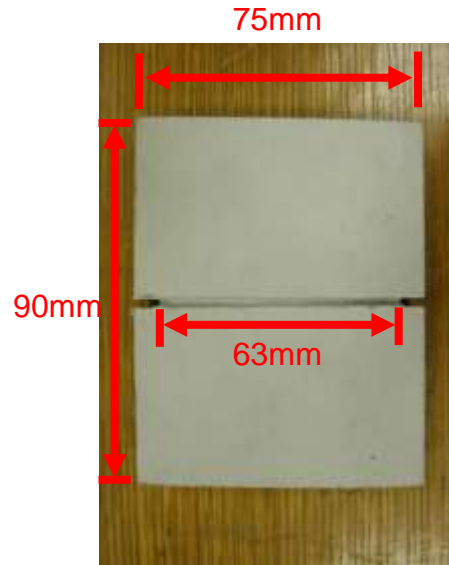
UHDC-2単繊維引き抜き試験結果統計



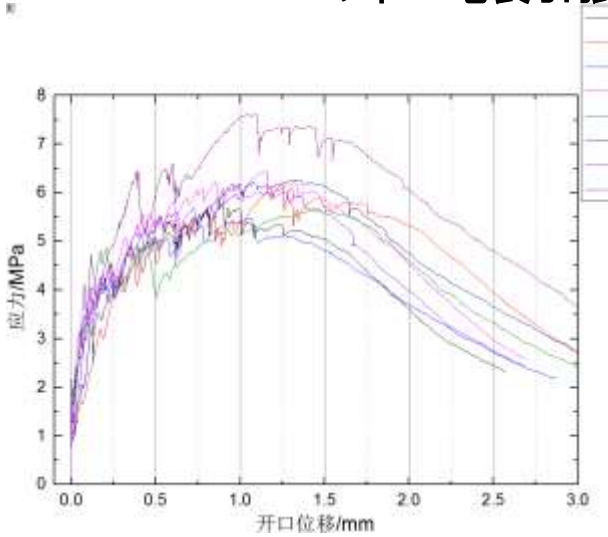
UHDC-3単繊維引き抜き試験結果統計



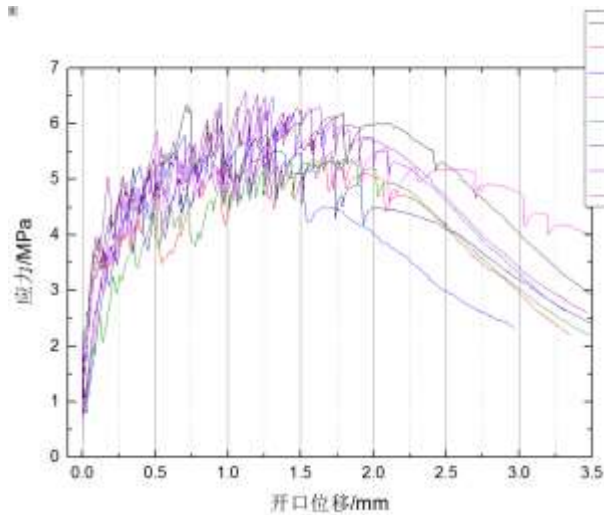
マクロテスト



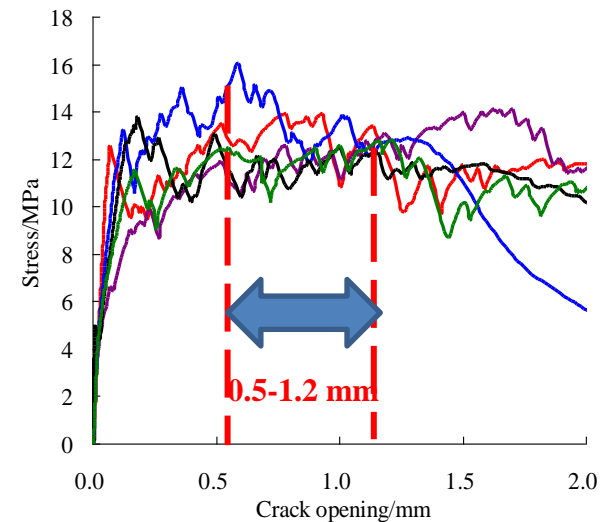
UHDCの単一亀裂引張



UHDC-1 単一亀裂引張試験結果



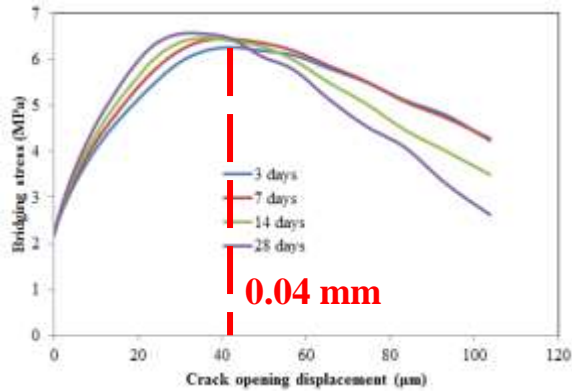
UHDC-2 単一亀裂引張試験結果



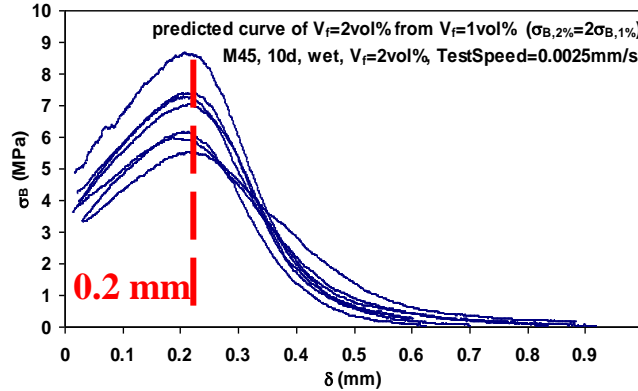
UHDC-3 単一亀裂引張試験結果

同類対比

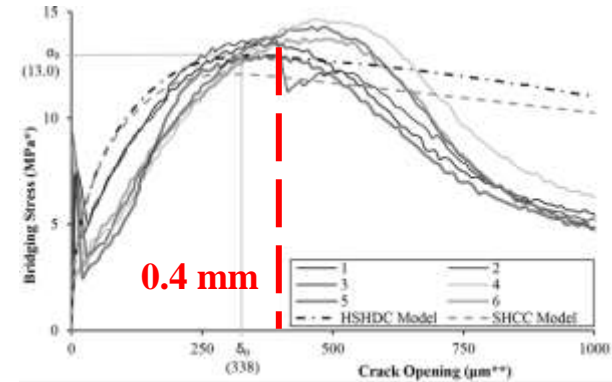
From Zhigang Zhang



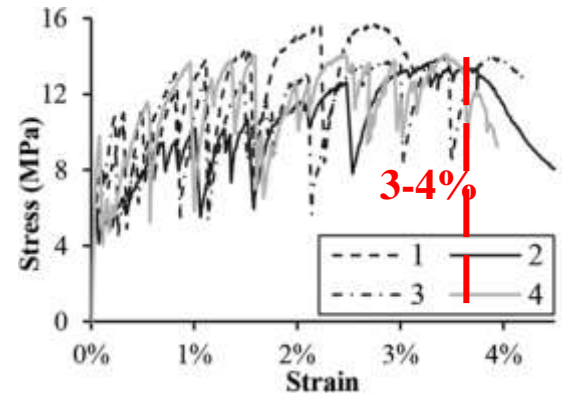
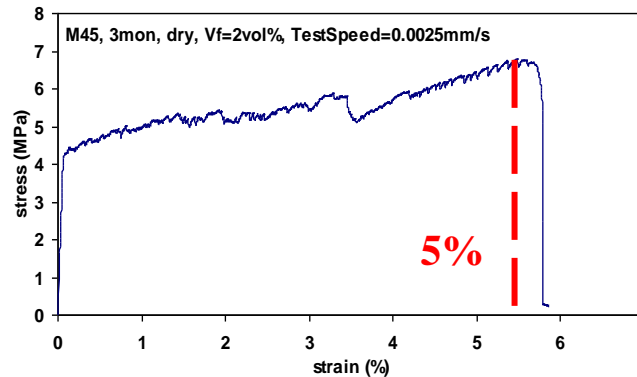
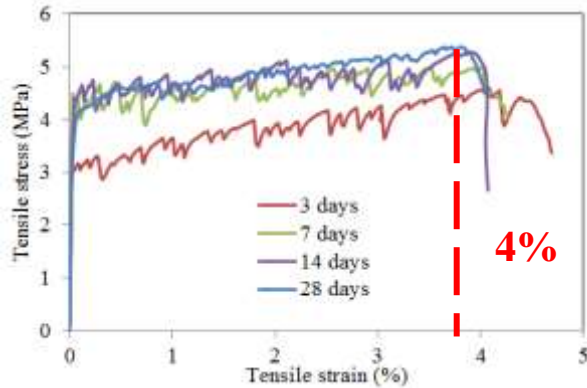
From Enhua Yang



From Ravi Ranade



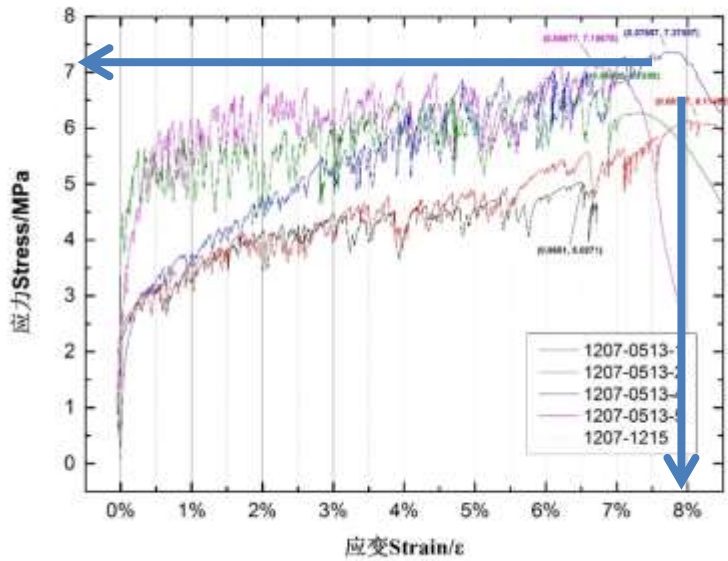
単一亀裂引張



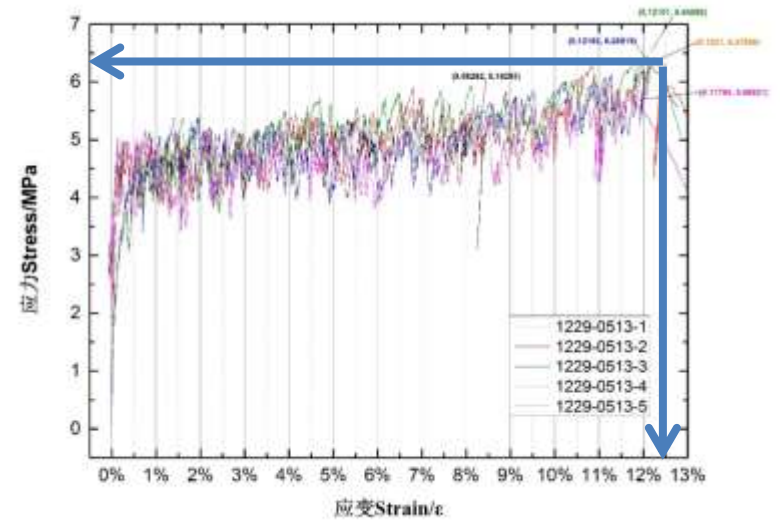
Dogboneの軸引張試験

Micromechanics of High-Strength, High-Ductility Concrete
by Ravi Ranade, Victor C. Li, etc.

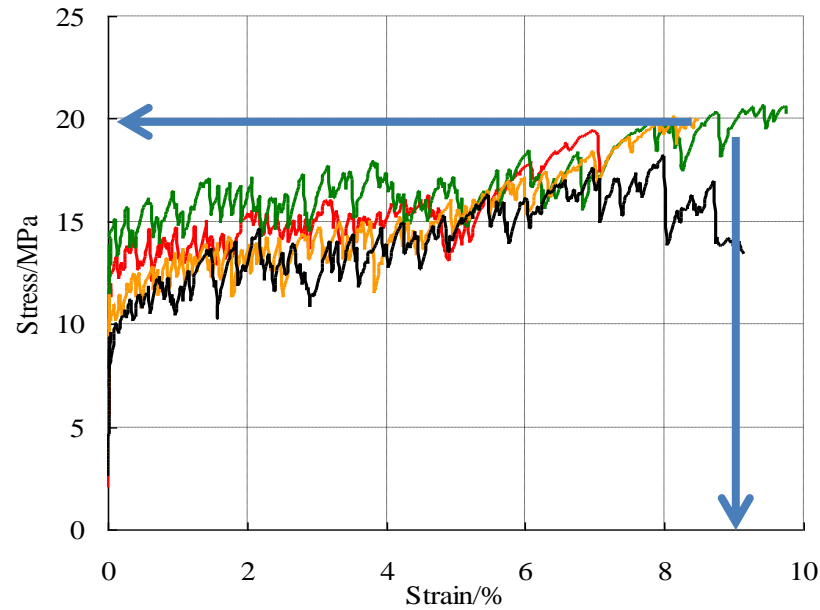
Zhang Zhigang, Zhang Qian, Qian Shunzhi., Victor C. Li., "Low E-Modulus Early Strength Engineered Cementitious Composites Material Development for Ultrathin Whitetopping Overlay", Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (TRR), No. 2481, pp. 41-47, 2015.



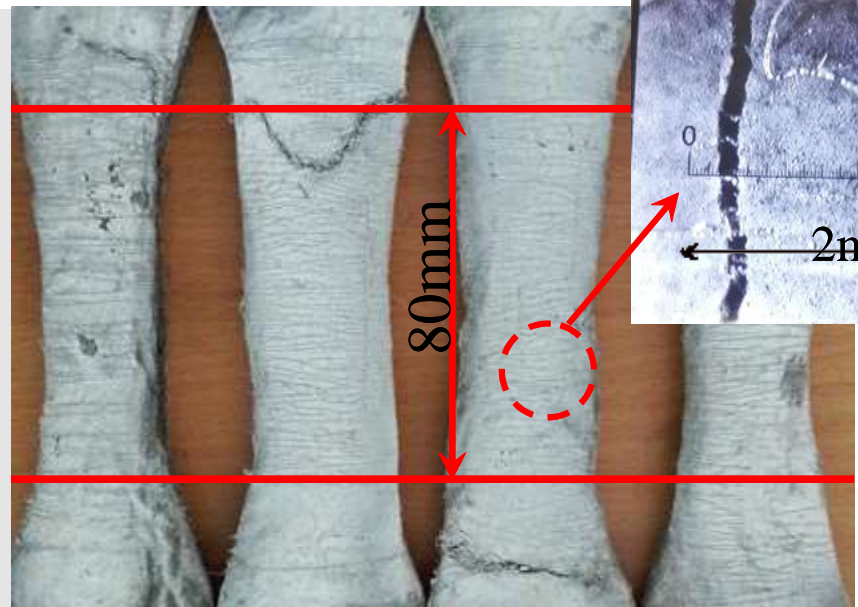
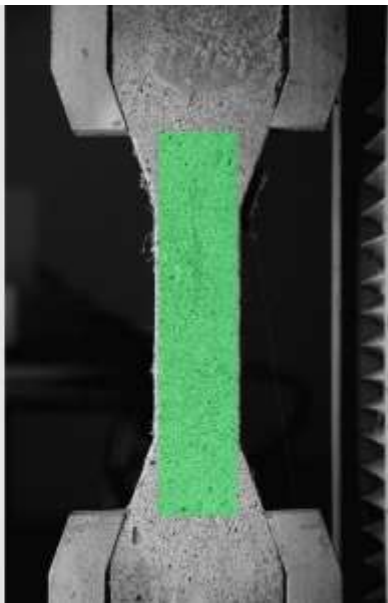
UHDC-1 軸引張応力変形曲線



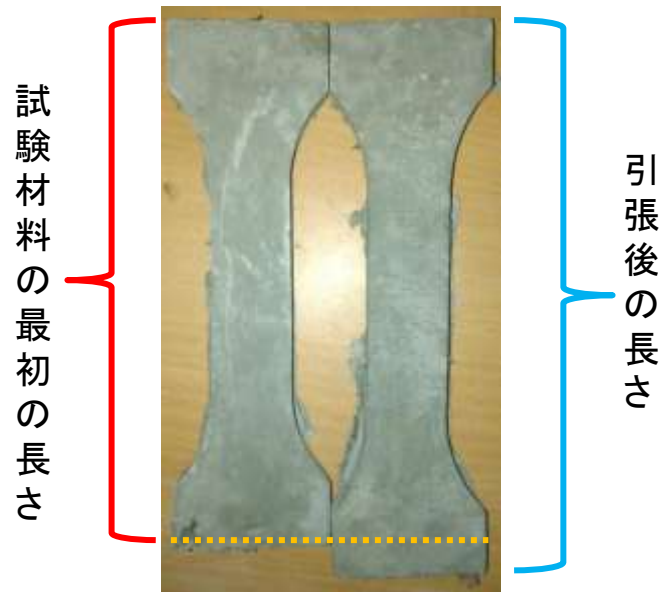
UHDC-2軸引張応力変形曲線



UHDC-3軸引張応力変形曲線



Residual crack width of UHDCC

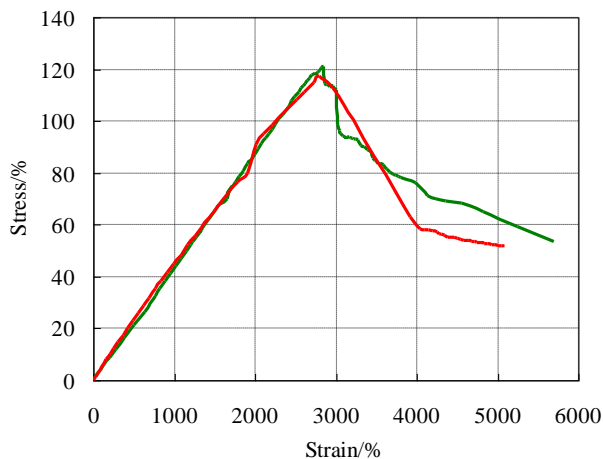


試験材料の最初の長さ

引張後の長さ



UHDCCの抗压強度曲線



Compressive properties of UHDCC

立方体抗压試験

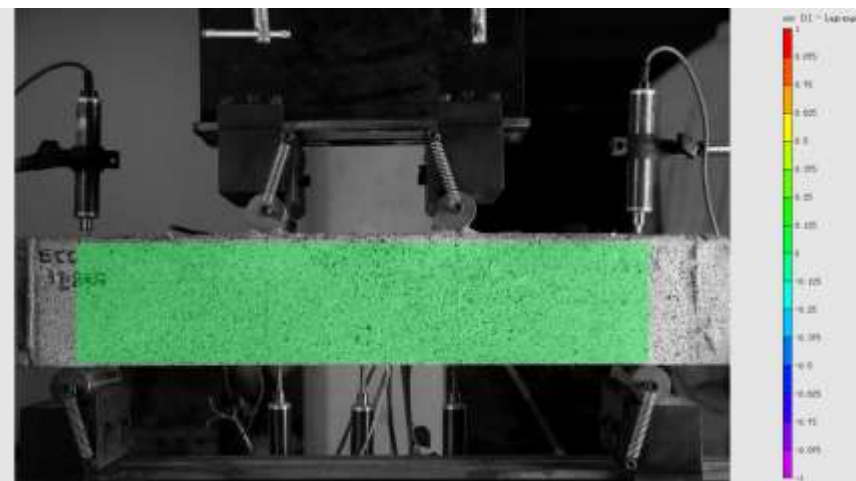
角柱体抗压試験

UHDCCの軸方向抗压性能

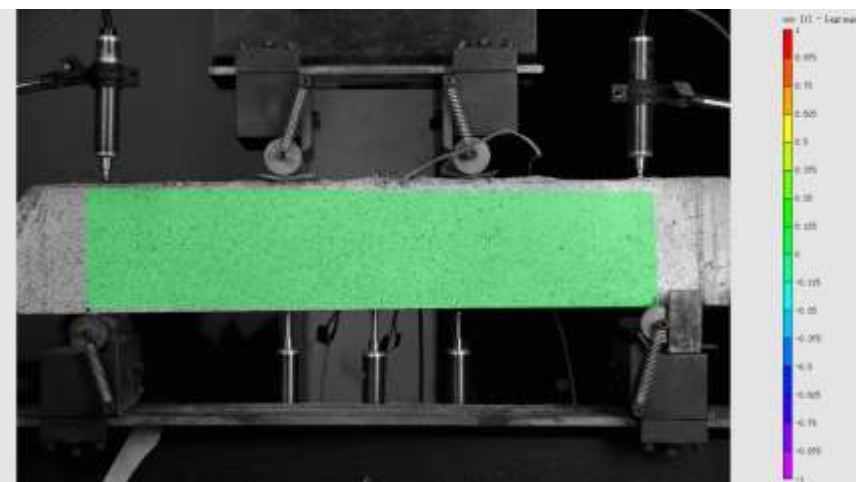
試験材料	70.7mm 立方体 /MPa	100mm 立 方体 /MPa	最高抗压強度 /MPa(角柱)	最高抗压強度に対応する ひずみ/Mε (Prism)	ヤング率 /GPa (Prism)
1	125.00	108.46	123.70	3582.84	38.51
2	110.51	104.77	121.06	2847.74	43.76
3	122.54	113.93	101.94	2789.98	44.61
4	126.36	112.72	119.53	3678.24	36.99
5	125.78	113.63	—	—	—
6	118.84	114.72	—	—	—
平均値	121.50	111.38	116.56	3224.70	40.96
標準偏差	6.05	3.91	9.90	470.83	3.78
COV	0.050	0.035	0.085	0.146	0.092

UHDCCの4点梁弯曲試験

試材番号	試材名称	性質	縦方向鉄筋	配筋率	あばら筋
1	2@6 Concrete	普通コンクリート	2@6	0.57%	有
2	3@8 Concrete		3@8	1.51%	有
3	3@10 Concrete		3@10	2.36%	有
4	2@6 Concrete		2@6	0.57%	無
5	3@8 Concrete		3@8	1.51%	無
6	3@10 Concrete		3@10	2.36%	無
7	Pure ECC-1	UHDCC	無	無	無
8	Pure ECC-2		無	無	無
9	2@6 ECC		2@6	0.57%	有
10	3@8 ECC		3@8	1.51%	有
11	3@10 ECC-S		3@10	2.36%	無
12	3@8 ECC-S		3@8	1.51%	無
13	3@10 ECC-S		3@10	2.36%	無

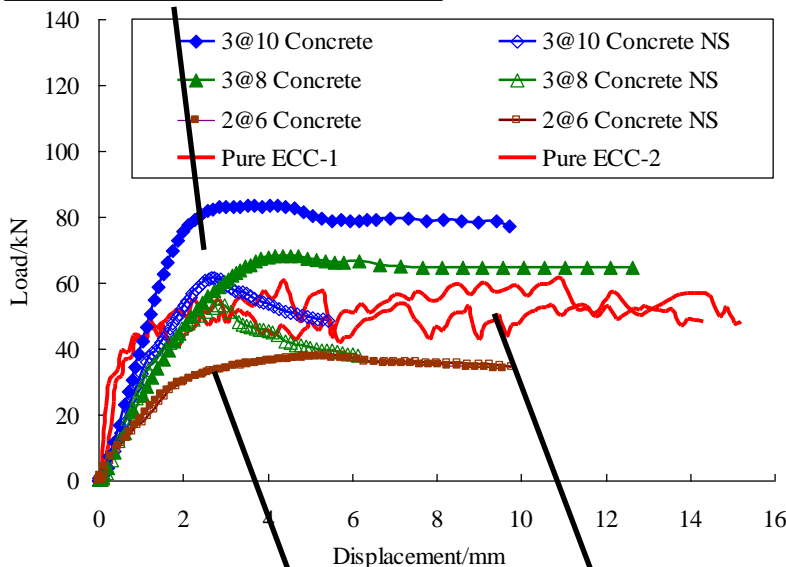


無筋UHDCC梁 (600x100x100mm)



配筋率1.5%の鉄筋コンクリート (600x100x100mm)

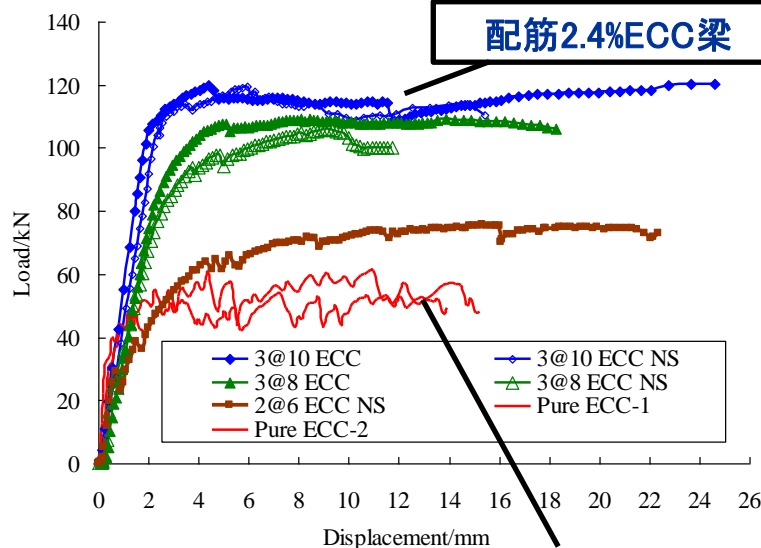
配筋率1.5%のRC梁



配筋率0.6%のRC梁

無筋ECC梁

配筋2.4%ECC梁



無筋ECC梁

1. **純UHDCC梁**の抗弯強度は、配筋率1.5%の普通梁に相当する。延性に優れ、たわみ・支点間距離比はL/30である。

2. **配筋されたUHDCC梁**に曲げ作用をかけると、UHDCC材料と鉄筋が相互に作用し、亀裂がより周密で細かくなり、鉄筋の亀裂による応力波動の程度が減少し、延性が向上し、たわみ・支点間距離比はL/20に達する

3. 純UHDCC梁は**せん断破壊**が比較的起こりやすい。せん断破壊は、純UHDCC梁の延性に影響を与える主要原因である。

結論

1. 普通鉄筋コンクリート家屋の強度と信頼性に到達するためには、「無筋家屋」は、高強度と高延性の材料を採用する必要がある。
2. 現在、Engineered Cementitious Composites (ECC) は、その要求に近い唯一のセメント系材料である。
3. より高い延性を備えたECC材料であるUHDCC的の抗張強度は5MPa～20MPaで、最高引張変形は8%以上に達し、抗压強度は100MPaを超え、無筋建築への応用の潜在力を備えている。
4. UHDCCを採用した無筋梁の抗弯曲性能は、配筋率1.5%の普通鉄筋コンクリート梁に匹敵し、さらに良好な延性を示す。無筋建築の初期の成功事例と言える。

- ありがとうございます
- 専門家の皆様の貴重な
ご意見をお待ちしております