

UFC道路橋床版研究会

技術セミナー2023

2023/1/26

UFC/UHPCの活用海外事情

技術委員会 委員

三木 朋広（神戸大学）

本日の発表

1. UHPCの定義
2. 米国における研究開発，橋梁適用の事例
3. スイスにおける研究開発，橋梁適用の事例
4. 接合部に関する実験研究
5. まとめ

UHPCの定義

厳密な定義はないが、例えば文献1)によると、

- 圧縮強度120MPa以上
- ひび割れ発生強度5MPa以上、繊維補強による引張軟化特性を示す
- マトリクスはセメント系材料であり、混和剤を利用する
- 透水係数を低減し耐久性を向上させる細孔構造
- 蒸気養生、常温養生(プロジェクトの要件に応じて選定される)
- 一般に体積比で2%以上の高強度鋼繊維を含む
- 世界の一部地域ではUHPFRCと呼ばれる

UHPFRC: Ultra High Performance Fiber Reinforced cement-based Composites

1) Benjamin A. Graybeal, Eugen Brühwiler, Byung-Suk Kim, François Toutlemonde, Yen Lei Voo, Arash Zaghi, **International Perspective on UHPC in Bridge Engineering**, ASCE Journal of Bridge Engineering, **25** (11) (2020).

異なる繊維種類のUHPCの一軸引張応力

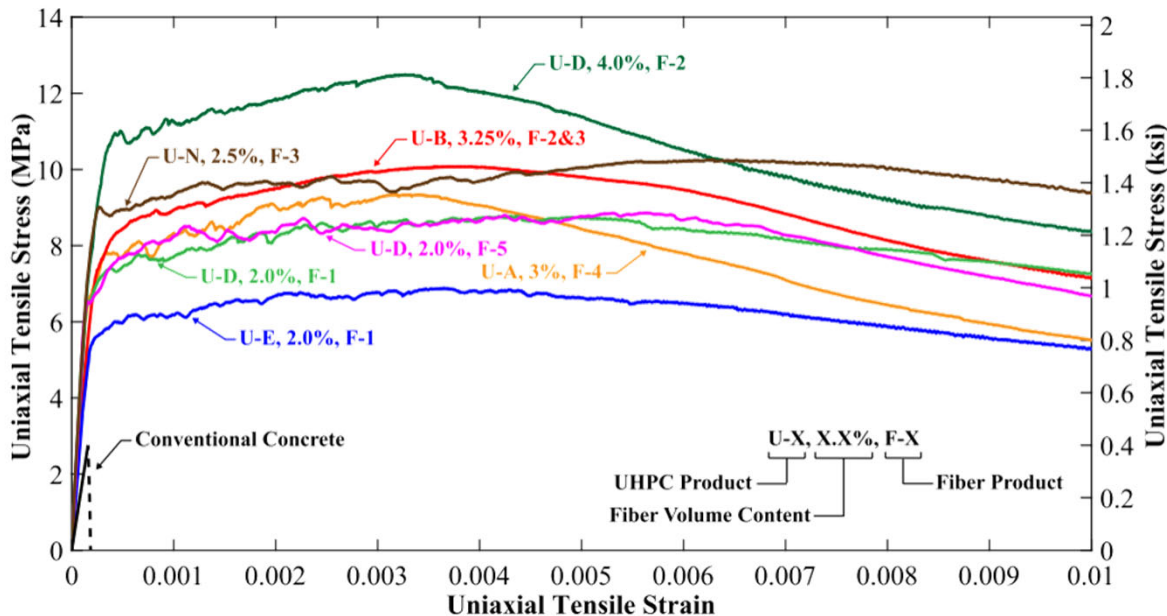
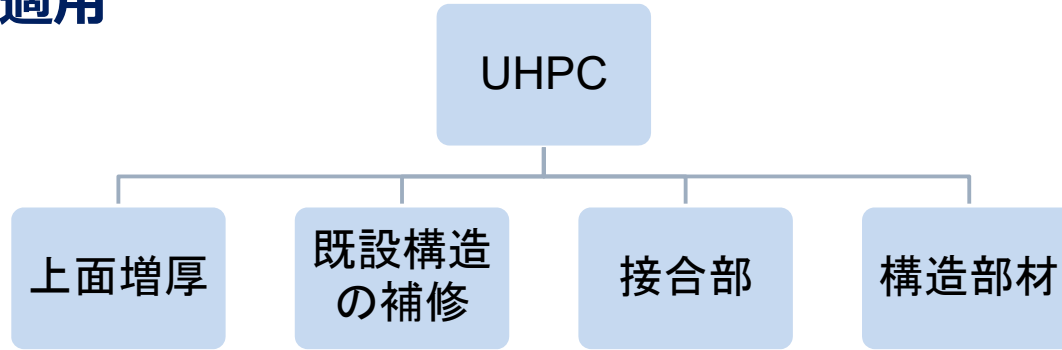


Fig. 1. Uniaxial tensile response of a variety of UHPC formulations with different fiber reinforcements¹⁾

1) Benjamin A. Graybeal, Eugen Brühwiler, Byung-Suk Kim, François Toutlemonde, Yen Lei Voo, Arash Zaghi, **International Perspective on UHPC in Bridge Engineering**, ASCE Journal of Bridge Engineering, **25** (11) (2020).

UHPCの適用



Source: FHWA

Figure 1. UHPC overlay construction in Buchanan County, Iowa.

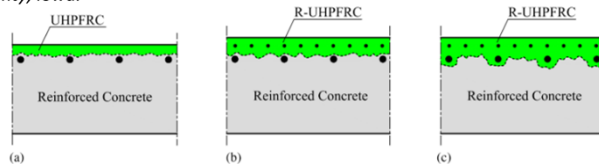


Fig. 2. Basic configurations of enhancement of RC bridge decks: (a) UHPC layer with protective function only; (b) R-UHPC layer with structural and protective functions; and (c) R-UHPC layer is also used to rehabilitate corrosion-damaged existing rebar.



Fig. 16. Use of UHPC for the repair of deteriorated bridge girder ends in Connecticut in 2019: (a) girder end preparation; (b) formwork; and (c) completed repair. (Images by Arash Zaghi.)



Precast deck panel placement prior to UHPC connection casting, Franklin Avenue Bridge, MN (photo courtesy of Ben Graybeal)



Fig. 8. La République Bridge in Montpellier, France, with (a) overall structure (Image courtesy of Agence Rudy Ricciotti); and (b) slant columns and ITE® beams from below. (Image courtesy of François Toutlemonde.)



Post-tensioned UHPC channel girder in the MuCEM pedestrian bridge, Marseille, France (photo courtesy of Ben Graybeal)

米国におけるUHPCの開発・適用の経緯

- 2000年代初頭から研究、開発に着手。先行する欧州での事例を参考にした
- 他国で開発されたUHPCクラスを材料を輸入することで、米国における適用に向けて、**基本的な構造性能の評価**と、**管理者の協力**によるUHPCがどのようにしてニーズに対応できるかの検討に重点が置かれた。
- 2008年までに、橋梁分野においてUHPCに大きな可能性があることは明らかになったが、その可能性を実現するには、幅広い層が、**UHPCの材料、構造設計、施工、性能評価**に関する技術を習得しなければならないと考えていていた。
- ただし、多くの管理者は、**重要道路(Primary road)**にUHPCを使用することに**リスク**を感じていた。実際の試行は、2次道路(Secondary road)で施工を実施。

米国におけるUHPCの開発・適用の経緯（つづき）

- これに対し、米国連邦道路局（FHWA）は、研究に基づくソリューションを通じ、**プレキャスト部材同士の接合部の場所打ち充填材**として、UHPCの使用促進をすすめてきた。
- 接合部は、接続される部材よりも施工が難しく弱点にもなりやすいため、**UHPC接合部が長期的な弱点にならないよう、シンプルな接合部**とすることとした。
- **FHWA**は、ニューヨーク州交通局をはじめとする管理者と連携し、**オンタリオ州交通省**との協力を得て、2014年には接合部の設計・施工指針を策定。**2019年に指針を更新**。
- このような取り組みの結果、米国内の材料の専門家、設計者、コンサルタント、建設業者、管理者などがUHPCを使いこなすようになった。これは、より高度な用途でのUHPCの普及に向けて必要な一歩となった。

北米の橋梁におけるUHPCを適用した橋梁データベース



Deployments of UHPC in Highway Bridge Construction

<https://highways.dot.gov/research/structures/ultra-high-performance-concrete/deployments>

米国におけるUHPCの材料特性

- 水とセメント系材料の比率が0.25以下
- 圧縮強度 150MPa以上
- ひび割れ発生強度 5MPa以上
- 定義の一例として,「粉体粒径を最適調整された(optimized gradation of granular constituents)不連続細孔構造(discontinuous pore structure)のマトリックスを短繊維補強したセメント系材料」
- 強度特性とともに, 不連続細孔構造による透水性を低減し, 劣化の抵抗性, 耐久性を大幅に向上させる



Wapello County, Iowa

米国における新たなソリューション（床版上面補修）

- 老朽化した橋梁の補修
 - 米国の橋梁分野で最も重要なニーズの一つ
 - 構造物全体の寿命を延ばすことを目的とした
迅速な補修に対応
 - スイスで進められる橋梁床版のオーバーレイの概念を採用した修繕が主流となっている。
 - 最初の適用はアイオワ州。実橋でいくつか実績がある。



Fig. 14. One of the early implementations of UHPC overlay repair in 2016 in Iowa. (Image by Benjamin Graybeal.)

米国における新たなソリューション（ジョイント部の接合）

- もう一つの有望なソリューションは、既存の伸縮装置をUHPCリンクスラブに置換
- ニューヨーク州道路交通局では、これまでに十数件のリンクスラブを施工している

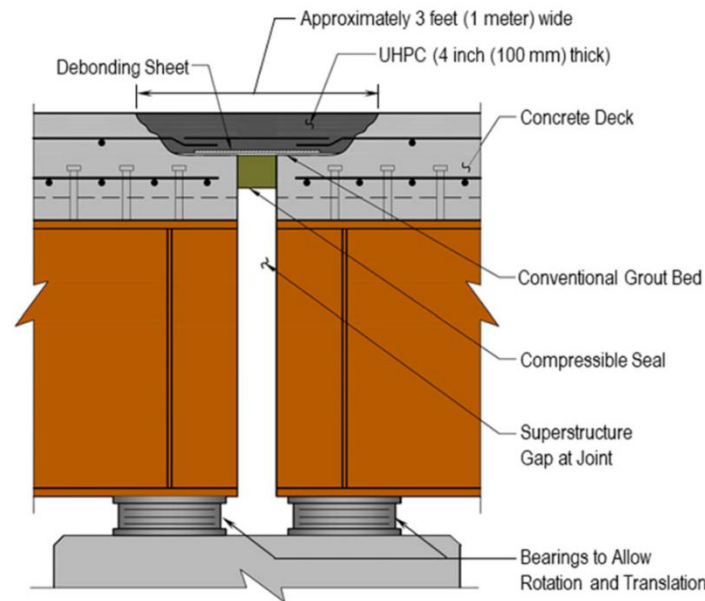


Fig. 15. Detail of UHPC link-slab developed by the New York Department of Transportation.

米国における新たなソリューション（鋼桁の端部補強）

- 破損した伸縮継手の下に位置する劣化した鋼桁の端部を補修。腐食損傷を受けた桁端部をUHPCで包むことで、局所的に腐食した部位を補強することができる。

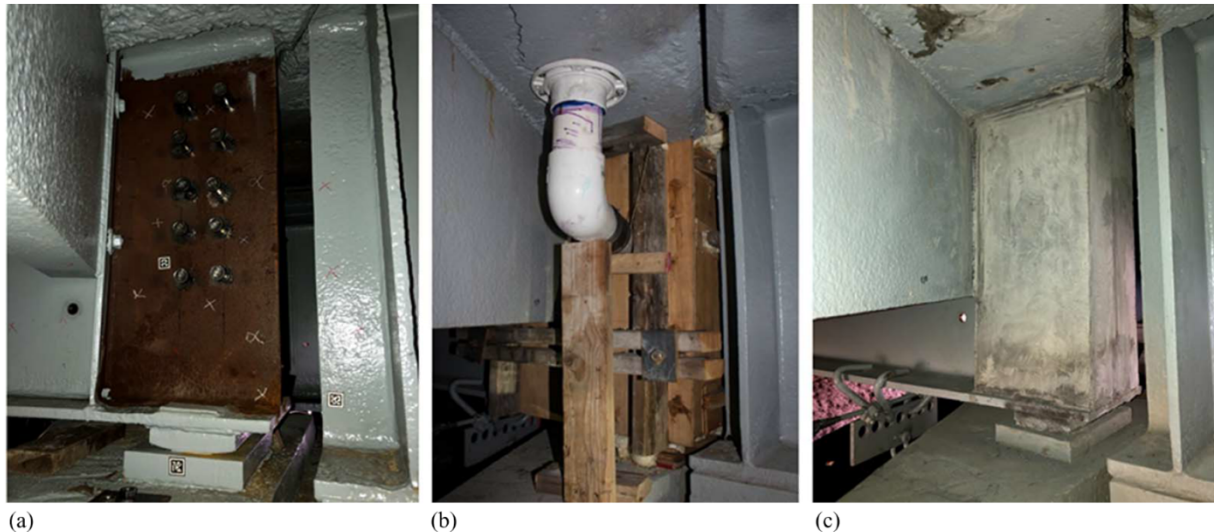


Fig. 16. Use of UHPC for the repair of deteriorated bridge girder ends in Connecticut in 2019: (a) girder end preparation; (b) formwork; and (c) completed repair. (Images by Arash Zaghi.)

米国における構造設計指針の開発

- 新設構造物へのUHPCの適用について、最も重要なハードルは、このクラスの材料のための構造設計ガイダンスの欠如
 - － 高いイニシャルコストを相殺する、算定可能な利点がなければならない
 - － UHPCの特徴である引張強度、圧縮強度と耐久性に関連する**かぶりの低減**など、**構造的に最適化**
 - － 現場への運搬が容易になり、施工が容易になるなどのメリットにより、**効率的な施工を実現できる最適設計**



Source: FHWA



Source: FHWA



Source: FHWA



Source: FHWA

New Construction

Preservation and Repair

米国における構造設計指針の開発（つづき）

- FHWAではUHPC構造部材に関する先行研究を基に、**構造設計指針を開発することを目的とした研究を実施**してきた。
- AASHTOの橋梁・構造委員会と共同で実施、目標は**橋梁の部材にUHPCを使用することを可能にする指針の草案**を作成すること
- FHWAとのその他の機関は、たわみ、せん断、界面せん断、桁端の応力度、製作上の考慮事項などに関連した、構造性能を評価するための**フルスケールの試験を実施**している。



Fig. 17. Shear testing of a pretensioned UHPC bridge girder at the U.S. Federal Highway Administration. (Image by Benjamin Graybeal.)

UHPCの耐久性評価

第十四巻 第三号 昭和3年6月発行 (1927年)
 い報 An Electrical Method for Measuring the **Setting**
Time of Portland Cement, Y. Shimizu, 423-429

(本文は The Science Reports of the Tôhoku Imperial University,
 Series I, Vol. XVII, No. 1. に掲載せられたる清水興三松氏の論文にして
 土木工学に極めて密接なる關係を有する研究報告と認めらるゝに依り、特に著
 者の快諾を得て茲に轉載せるものなり。)

423

要約

要旨

土木學會誌 第十四卷第三號 昭和三年六月

AN ELECTRICAL METHOD FOR MEASURING THE SETTING TIME OF PORTLAND CEMENT⁽¹⁾

By Yosomatsu Shimizu, B. Sc.

Synopsis

The change in electrical resistance which occurs during the setting and hardening of Portland cement, has been measured for the purpose of determining the setting time. The effect of temperature on the rate of setting of Portland cement has also been studied; this method being more accurate than the mechanical and thermal methods commonly used, and more adapted for the purpose.

(1) Introduction

When the setting time of Portland cement is measured by a mechanical method, Vicat's needle is commonly used, but there are some disadvantages owing to the fact that setting and hardening of the cement are chemical processes. Gary, however, observed that at the moment when the final set occurs the temperature reaches a maximum⁽²⁾, and defining this moment as the final set, he tried to measure the setting time thermally⁽³⁾. Professor S. Uchida also determined the moment corresponding to the maximum temperature with a thermo-couple, by the differential method, and measured the setting time⁽⁴⁾; but this thermal method is not regular, that is, the time of setting is greatly affected by the quantity of the material used for the specimen. In an experiment dealing with Portland cement, the writer hit upon the following method to determine the setting time by the change in electrical resistance. It was observed by the writer that when the electrical conductivity was

(1) The 190th report from the Research Institute for Iron, Steel and Other Metals.

(2) W. and D. Asch consider that it is due to the separation and hydration of calcium oxide from the aluminosilicate molecules. W. Asch and D. Asch, The Silicates in Chemistry and Commerce, (1913), 195.

(3) Gary and Stradling, Conc. and Const. Eng., 1, (1901-1907), 356, 432.

(4) S. Uchida, Sci. Rep. of the Sendai Higher Technical School, 1, (1923), 17.

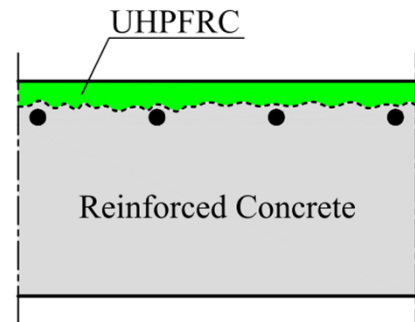
スイスにおける事例

- 2004年に10mスパンの道路橋の床版の補強工事に初めてUHPFRCが採用された.
- その後15年間で, 適用件数は約150件に増加. ほとんどが橋梁.
- UHPFRCの適用は, 従来の方法より建設コストが安いことが主な理由であるが, 技術効率の向上や耐久性の向上などの付加価値もある
- スイスの橋梁現場にUHPFRCが導入された背景
 - 技術者と職人の両方の質の高い教育
 - 標準規格 **SIA2052”UHPFRC”(SIA2016)**は, 発展の余地を残しながら簡潔でわかりやすい要件を設定

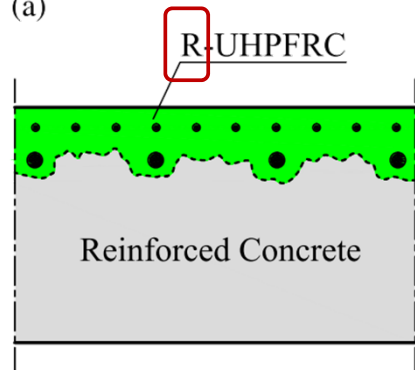
スイスにおけるUHPFRCの材料特性

- 引張ひずみ硬化, 不浸透性を有する繊維補強のセメント系複合材
- 弾性限界応力 7MPa以上
- 引張強度 9MPa以上
- 圧縮強度 120MPa 以上
- スイスの市場では4つのUHPFRC製品がある
- 繊維は長さとの直径の比が65以上(長さが13~15mmの鋼繊維)を3vol.%以上混入
- 鉄筋やPC鋼材と組み合わせて使用

UHPFRC層による既設橋梁の補強（スイス・オーストリアの事例）



(a)



(c)

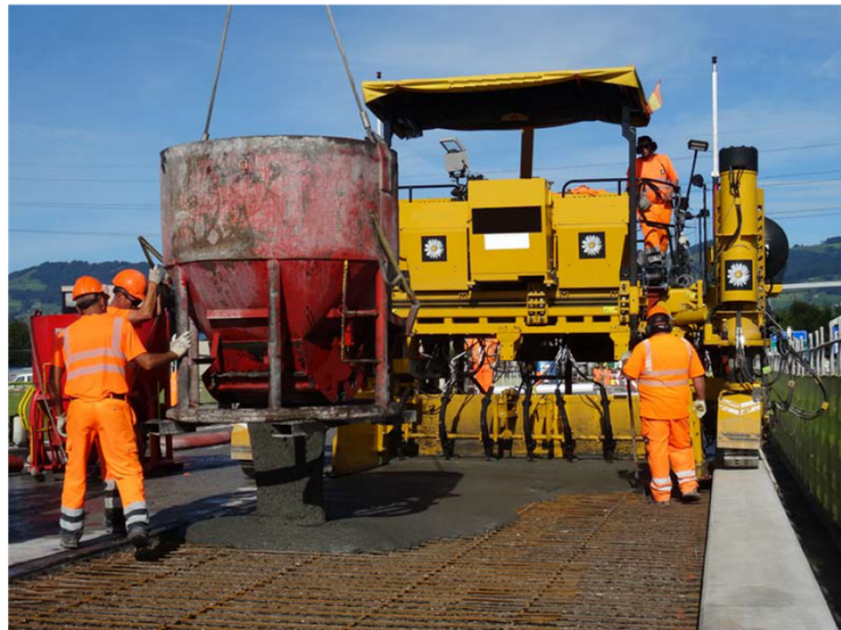


Fig. 3. Enhancement of the 330-m-long post-tensioned concrete road bridge over the Rhine river at Kriessern between Switzerland and Austria. UHPFRC casting using a finisher. (Image by Eugen Brühwiler.)

スイスにおける研究開発ニーズ

- 鋼繊維とセメント系マトリクスによる、機械的特性の改善
- セメント系マトリクスの収縮を低減する添加剤の開発による、従来のコンクリートとUHPFRCを用いた複合構造における、UHPFRC層の残留引張応力の低減
- CO2排出量とエネルギー消費量を大幅に削減する次世代UHPFRC
- UHPFRCによる既存橋梁の補強は、コンクリート床版や橋梁全体の更新に比べて経済的で持続可能である

スイスにおける将来展望

- フランスの規格(2016～2018)があることを踏まえると、橋梁へのUHPFRCの適用が制限されているのは、研究や技術規準の欠如が原因ではない
- 管理者や設計者の教育, サプライチェーンの効率化の難しさ(特に少量の場合), 費用対効果の位置づけ, 最適化された構造形状のプロセス管理など
- 材令初期の管理の重要性が, 関係者間で十分に認識されていない
- 過酷な環境における長期耐久性, 実験室で短時間で測定可能な耐久性指標との関係
- 建築物への適用に向けては, 火災に対する応答性に関する科学的知見が必要
- 軽量化は, 架設コストの削減と既存構造物への影響を低減し, 橋梁の補強や拡張などの課題解決に利点となる

Young-Jin Kim, Won-Jong Chin, Se-Jin Jeon, **Interface Shear Strength at Joints of Ultra-High Performance Concrete Structures**, International Journal of Concrete Structures and Materials (2018).

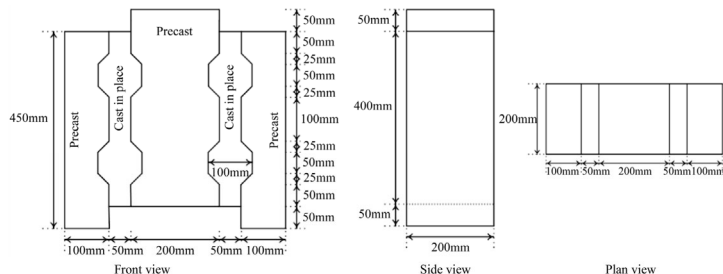


Figure 1. Details of cast *in-situ* joint specimens.

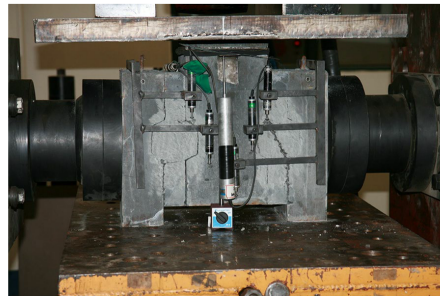
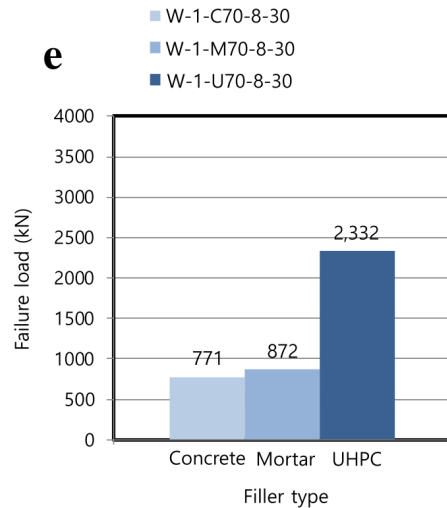
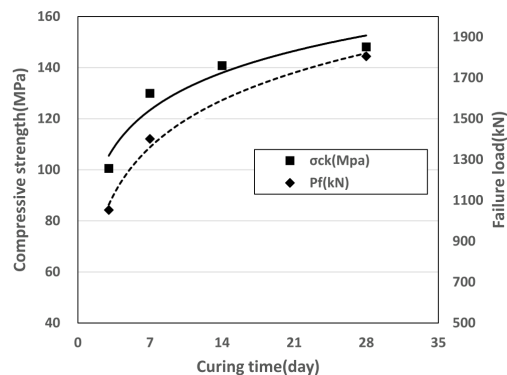


Fig. 3 Set-up of push-off test.



Hee Seok Kim, Won Jong Chin, Jeong Rae Cho, Young Jin Kim, Hyejin Yoon, **An Experimental Study on the Behavior of Shear Keys According to the Curing Time of UHPC**, Engineering 212-218. (2015)

接合部（UHPC間のせん断，鉄筋あり）に関する実験研究

Hyun-O Janga, Han-Seung Leea, Keunhee Chob, Jinkyu Kim, **Experimental study on shear performance of plain construction joints integrated with ultra-high performance concrete**, Construction and Building Materials 152 (2017) 16–23.

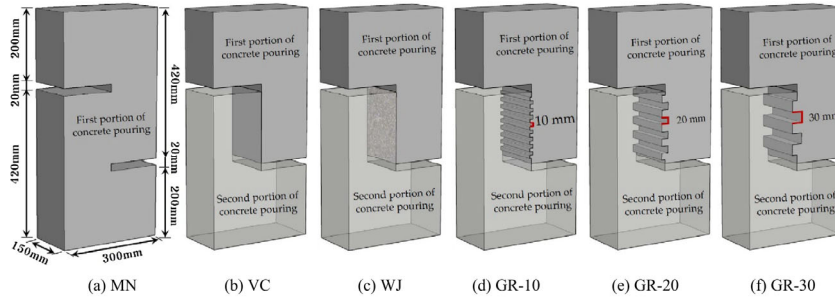
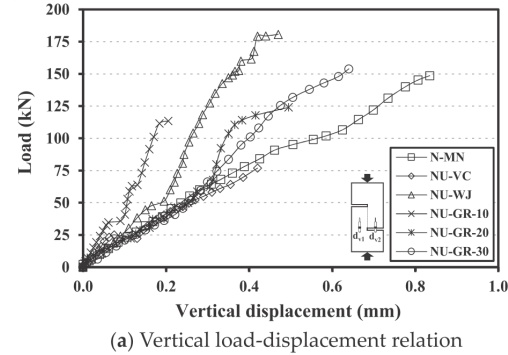


Fig. 1. Configuration of specimens.



(i) NU-WJ

Zachary B. Haber, Benjamin A. Graybeal, **Interface Shear Behavior of UHPC with and without Supplemental Reinforcement**, International Accelerated Bridge Construction Conference (2019).

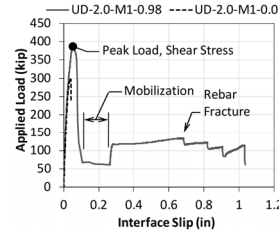
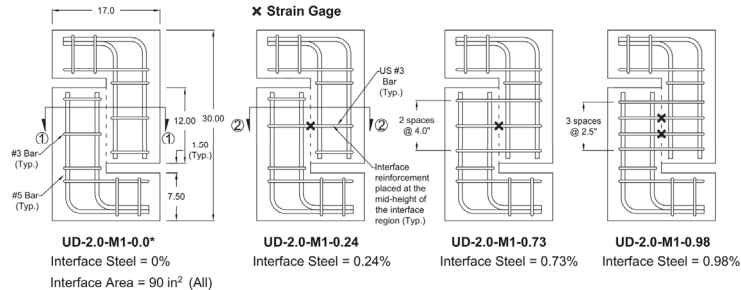


Figure 2. Characteristic Load-Slip Relations. Source: FHWA

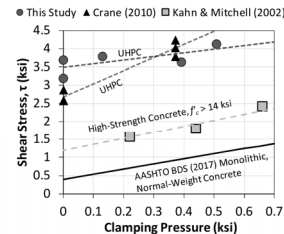


Figure 3. Shear stress vs. clamping pressure. Source: FHWA

まとめ

- 米国では現場接合部の仕様を通じて、管理者間で体系的にUHPCの技術成長を期待。現在、一次部材やリハビリテーションのシナリオにおけるUHPCの適用に向けて始動。
- スイスはリハビリテーションソリューションを重視している。鉄筋と併用した上面増厚事例もあった。

今後の課題として、以下のような点が挙げられる

- 過酷な環境における長期耐久性(暴露試験)と実験室で短時間で測定できる耐久性指標(促進試験と簡易評価法の提案)との関係
- 火災, 耐火性
- UHPCと鉄筋を併用した場合の施工の留意点, ひび割れの影響, 繊維補強効果の長期特性, UHPCにおけるひび割れ補修や断面補修方法