コンクリート構造物の補修・補強フォーラム2017講演資料,
2017.5.18(Thu), 10:05-11:05

ヨーロッパにおける鉄およびコンクリートに代わる次世代材料開発

スイス連邦工科大学ローザンヌ校（EPFL）
（山口大学名誉教授）
客員教授　宮本　文穂

アイスランド
レイキャヴィーク
北極海
フェロー諸島(丁)
シェトランド諸島(英)
北大西洋
ヘブリディーズ諸島
北海
スコットランド
北アイルランド
エディンバラ
グラスゴー
連合王国
(イギリス)
ベルファスト
アイルランド
ダブリン
マン島
マンチェスター
アイリッシュ海
ウェールズ
カーディフ
バーミンガム
ノリッチ
ロンドン
プリマス
ポーツマス
イギリス海峡
ブレスト
情報地図
Johomaps 2010
トロンハイム
ノルウェー
リレハンメル
オスロ
クリスチャンサン
スウェーデン
ウプサラ
ストックホルム
ヨーテボリ
ヘルシンボリ
マルメ
ゴットランド
バルト海
デンマーク
エスビャウ
コペンハーゲン
ボスニア湾
フィンランド
ヘルシンキ
コルカ
タリン
エストニア
サンクトペテルブルク
ルイビンスク
ロシア連邦
モスクワ
ラトビア
リガ
リトアニア
ヴィリニュス
カリーニングラード
ミンスク
ベラルーシ
オランダ
アムステルダム
デン・ハーグ
ロッテルダム
ブリュッセル
ベルギー
ルクセンブルク
ハンブルク
ブレーメン
ロストック
シュチェチン
グダニスク
ドイツ
ベルリン
ライプツィヒ
ドレスデン
フランクフルト
シュトゥットガルト
ミュンヘン
ポーランド
ワルシャワ
ヴロツワフ
クラクフ
チェコ
プラハ
ブルノ
スロバキア
ブラチスラバ
ウィーン
ザルツブルク
オーストリア
ハンガリー
ブダペスト
セゲド
パリ
ナント
オルレアン
ストラスブール
フランス
ラ・ロシェル
リモージュ
ボルドー
ビスケー湾
ビルバオ
リヨン
ジュネーヴ
スイス
トゥールーズ
モンペリエ
マルセイユ
モナコ
ニース
アンドラ・ラ・ヴェリャ
アンドラ
ミラノ
ヴェネツィア
フィレンツェ
サンマリノ
アンコーナ
イタリア
ローマ
バチカン
ナポリ
ベネヴェント
コルシカ島
サルデーニャ島
カリャリ
パレルモ
カタンザーロ
シチリア島
マルタ
バレッタ
チュニス
チュニジア
アルジェ
アルジェリア
モロッコ
地中海
ポルトガル
リスボン
ポルト
スペイン
サラマンカ
マドリード
トレド
バレンシア
バルセロナ
コルドバ
セビーリャ
マラガ
ファロ
アリカンテ
バレアレス諸島
マヨルカ
メノルカ
スロベニア
リュブリャナ
クロアチア
ザグレブ
ボスニア・ヘルツェゴビナ
サラエヴォ
セルビア
ベオグラード
ノヴィ・サド
モンテネグロ
ポドゴリツァ
アドリア海
コソボ
マケドニア
スコピエ
アルバニア
ティラナ
イオニア海
ギリシャ
アテネ
クレタ島
エーゲ海
ブルガリア
ソフィア
ヴァルナ
ルーマニア
ブカレスト
ブラショフ
ガラティ
モルドバ
キシニョフ
ウクライナ
キエフ
リヴィウ
チェルニウツィー
オデッサ
ヘルソン
チェルニーヒウ
ハルキウ
ドニプロペトロウシク
ベルゴロド
ドヌ川
ヴォルゴグラード
ロストフ・ナ・ドヌ
アゾフ海
ノヴォロシースク
セヴァストポリ
黒海
ソチ
グロズヌイ
グルジア
トビリシ
アルメニア
エレバン
カザフスタン
ヴォルガ川
カスピ海
イスタンブル
マルマラ海
サムスン
アンカラ
トルコ
イズミル
コンヤ
アンタルヤ
メルシン
ヴァン
キプロス
ニコシア
シリア
ダマスカス
レバノン
ベイルート
ヨルダン
イラク

話題の内容

鉄、コンクリートに代わる次世代材料：**UHPFRC** (**U**ltra-**H**igh **P**erformance **F**iber **R**einforced cement-based **C**omposites)開発と普及戦略

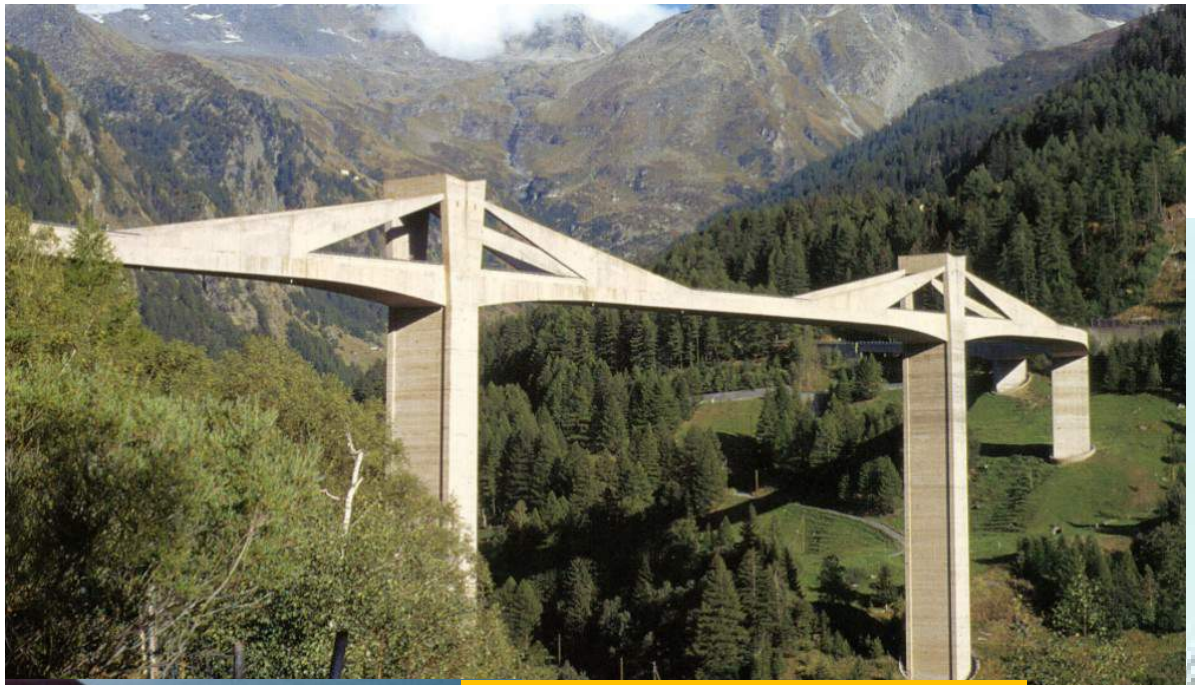
① EPFL, Prof. *Eugen Brühwiler*のコンクリート構造物維持管理の体系化の考え方

② 維持管理概念の提案とそれを実現可能な次世代材料開発および検証実験、適用の継続

③ 開発した新材料のユニークな売り込み方として、特許化せず誰にでもネタ晴らしすることによってUHPFRCの利用をブームにしようとする戦略


Prof. Eugen
Brühwiler

Innovative bridges designed by Mr. Christian Menn



Ganter bridge, 1980

Sunniberg bridge, 1998


Past
2003 10 18

Present

Prof. Eugen Brühwiler

Present

Eugenが提唱する維持管理の考え方

How to deal with existing structures?
(既存構造物をどう維持管理するのか？)

1. **Examination engineering *("Examineering")***

   "In the design of new structures, structural safety can be ensured simply by following codes. In contrast, difficulties in disclosing the real condition of an existing structure make evaluation of its structural safety an extremely demanding task. Structural examination requires comprehensive knowledge of structural engineering beyond the scope of codes !"

2. ***Interventions*** **to improve existing structures to extend their service life(健康寿命を延ばす総合治療)**

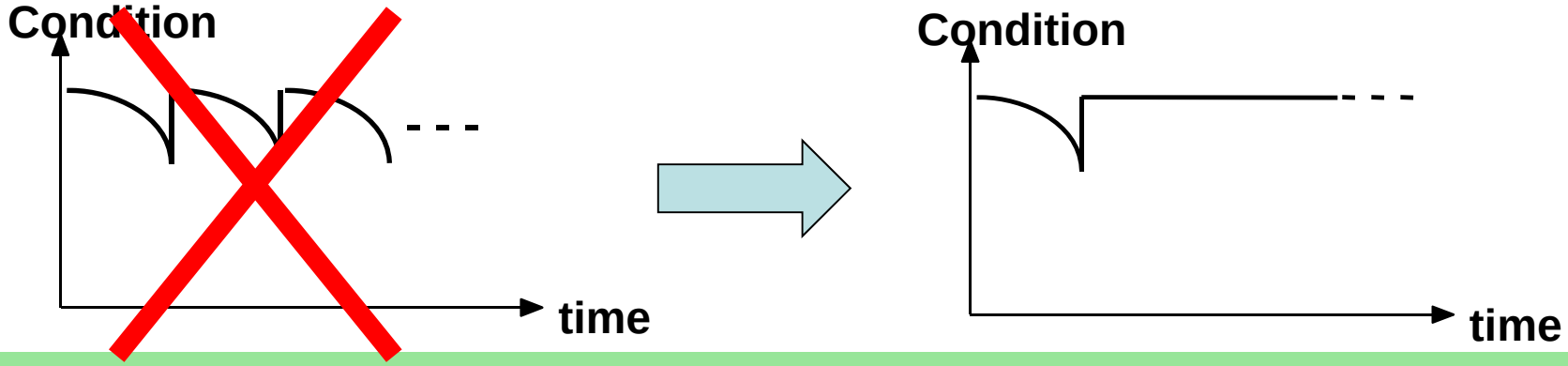
➡ ***we need creative engineers to serve the society !*** **(創造力を発揮できる技術者の育成が必要)**

Present

Eugenが提唱する維持管理の考え方

Durable existing reinforced concrete elements

***The conceptual idea* (理想的な劣化曲線)**



Objective of maintenance interventions :

- **interventions to improve the structure … *not just repair it !* (単なる補修・補強ではない！)**
- **limit the intervention**

"Zero maintenance" structures !!

UHPFRC: Ultra-High Performance Fiber Reinforced cement-based Composites (超高性能セメント系繊維補強材)

ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

"Structural UHPFRC" :

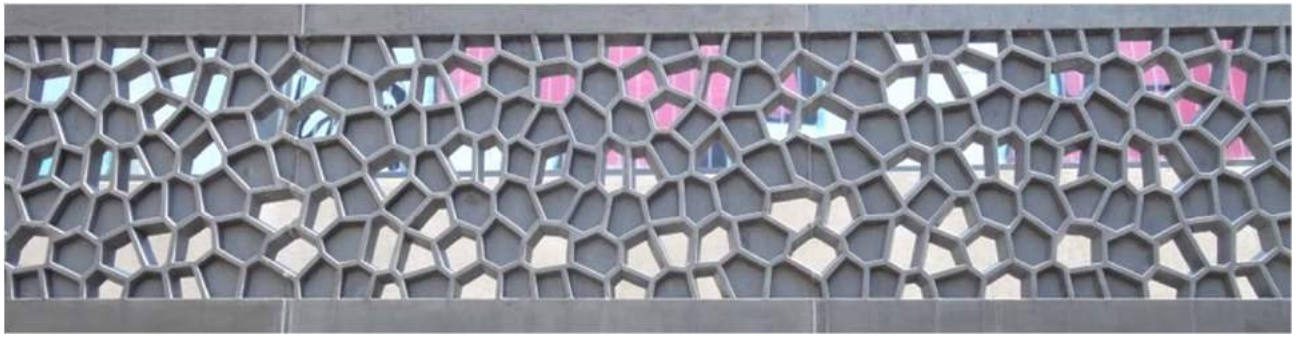
Welcome to the post-concrete era !

(ようこそ次世代材料時代へ！)

Eugen Brühwiler

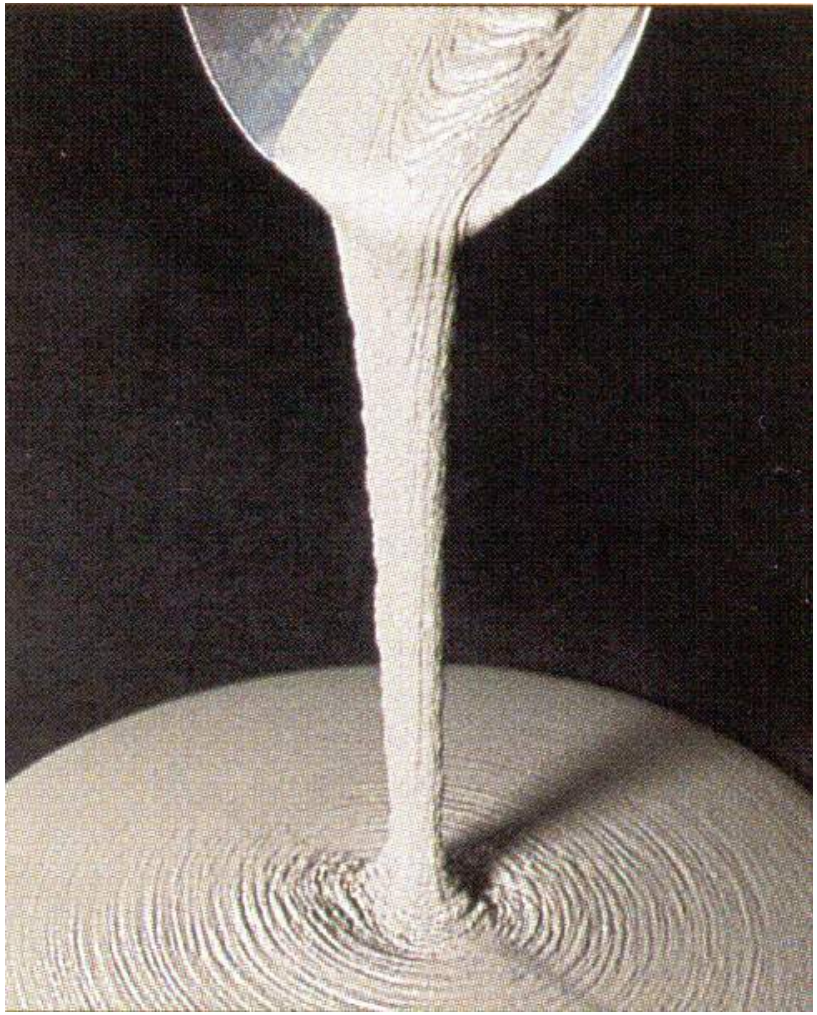
Professor and Consulting Engineer

EPFL – *Swiss Federal Institute of Technology*
Lausanne, Switzerland



Mix & fresh properties of UHPFRC(1)
(配合およびフレッシュ状態での特性(1))

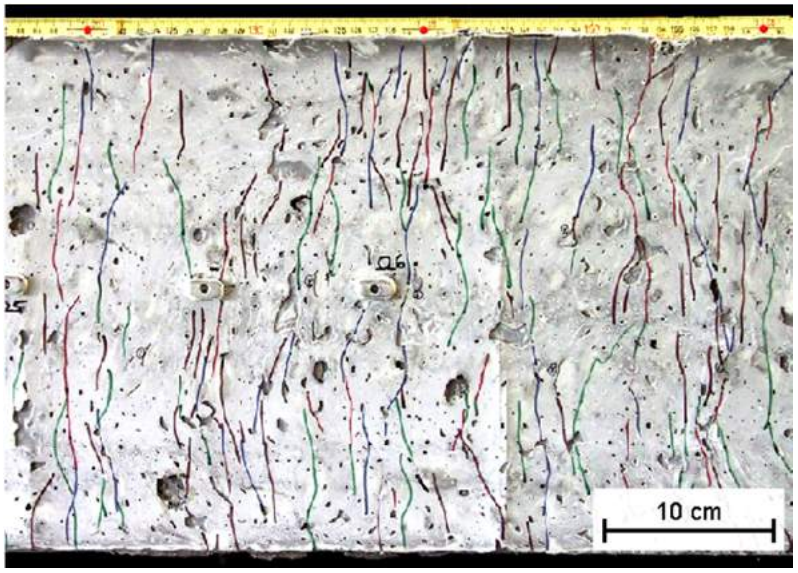
- 650-900 kg/m^3 binders(結合材) (cement, *limestone filler*, micro-silica and fine-particles(quartz, basalt, etc) with a grain size less than 1.0 mm and *superplasticizer*)
- Water/Binder ratio: 0.13-0.17 (水・結合材比)
- Aggregates ≤ 1.0 mm(骨材)
- Straight steel fiber: 13-15 mm length(Aspect ratio: more than 65)(直線状鋼繊維)



MCS-EPFL

Mix & fresh properties of UHPFRC(2)
(配合およびフレッシュ状態での特性(2))

- Fiber volume: at least 3% or 240kg/m^3 (繊維混入量)
- Rheological property(流動性) : good self-compacting on construction site
- Thixotropic behavior(揺変性) : casting up to 12 % slope
- Tensile property: high tensile strength and significant tensile strain hardening behavior(高引張強度+ひずみ硬化特性)



MCS-EPFL

Terminology of UHPFRC(UHPFRC とは?)

UHPFRC = Ultra-High Performance Fiber Reinforced cement-based Composites

コンクリートとは違う！

UHPFRC is not a concrete !

➔ use UHPFRC to improve R-concrete

Reinforced Concrete

***Shortcomings*:(RCの短所)**

- limited durability under severe exposure: rebar corrosion, AAR, frost(厳しい環境での耐久性に限界)
- high maintenance cost(高維持管理費)
- heavy weight, material consuming (高重量，高材料消費)
- slow construction(施工期間が長い)

Performance of UHPFRC(Ultra-High Performance Fiber Reinforced Cement-based Composites) (主な性能)

Hardening (in tension) (引張ひずみ硬化)

Impermeable (compact matrix: powders and particles)(不透水・気性)

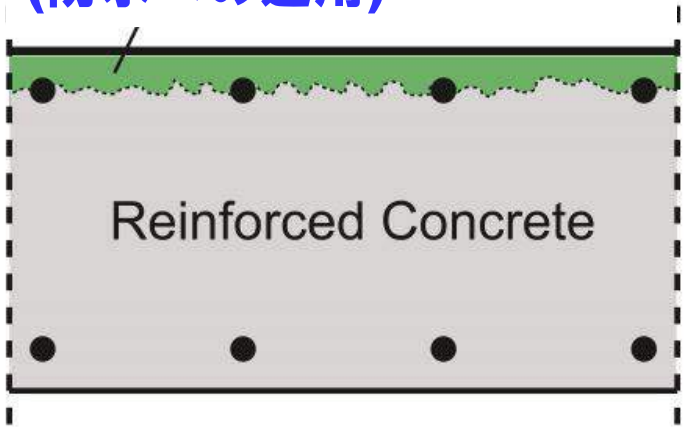
Fiber reinforced (steel fibers *l*=15mm, *l*/*d*>65; > 3 vol.%)(繊維で補強)

COMposite(複合)

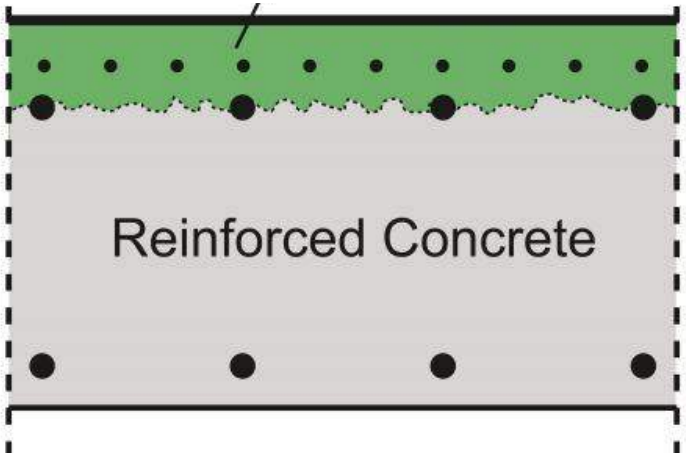
➔ ***HIFCOM***

Basic concept of the UHPFRC strengthening technology (基本的な概念)

UHPFRC for waterproofing
t_u= 20 to 30 mm (1 inch)
(防水への適用)



R-UHPFRC for strengthening
(t_u= 40 to 70 mm) + rebars
(補強への適用)



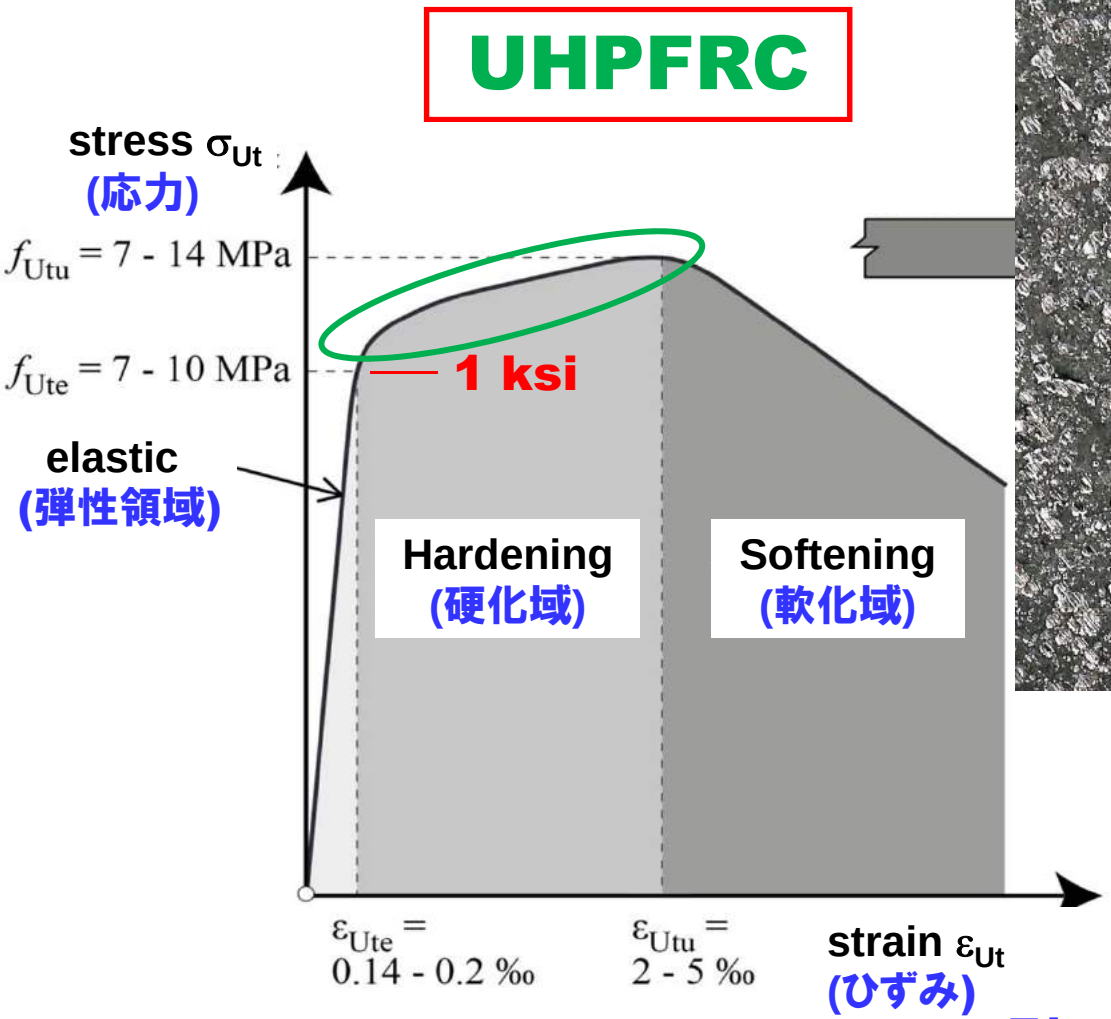
composite behavior of (R-)UHPFRC – RC elements
(RC部材との複合挙動)

Research at EPFL since 1999 **(1999年から研究開始)**

(10 completed doctoral thesis and about 30 peer-reviewed papers) **(10人の学位と30編の査読論文)**

UHPFRC Materials(材料特性)

UHPFRC tensile behaviour(引張り挙動)



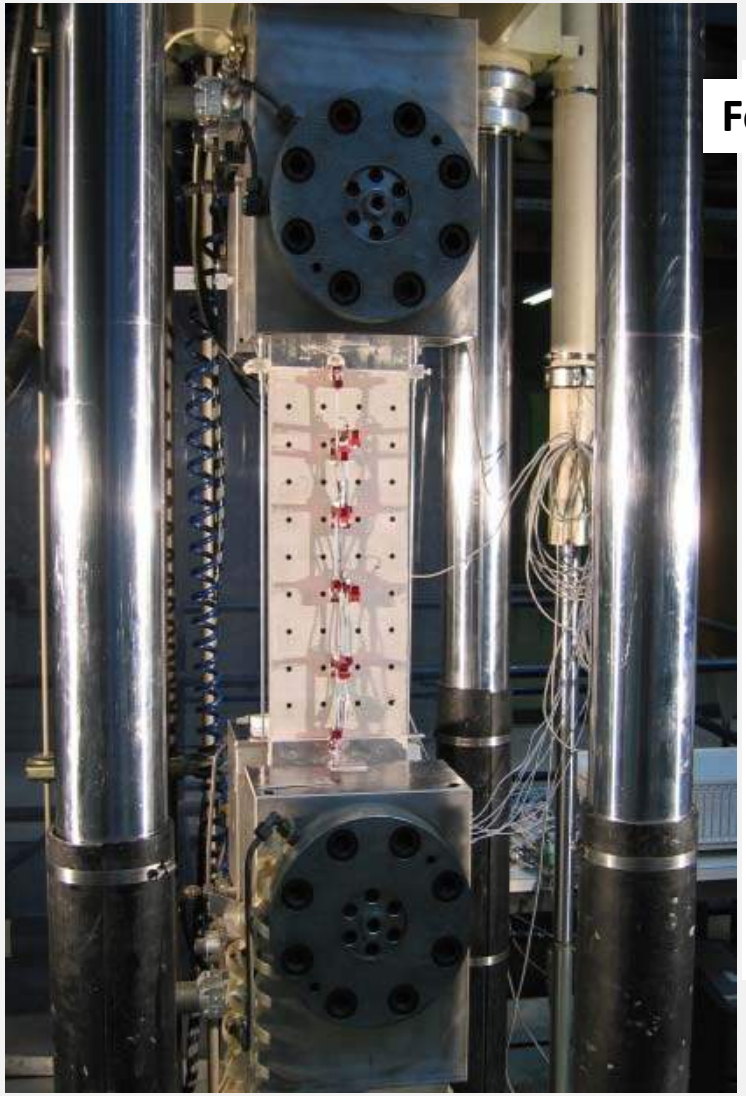
Compressive strength:
130 – 180 MPa(19 – 26 ksi)

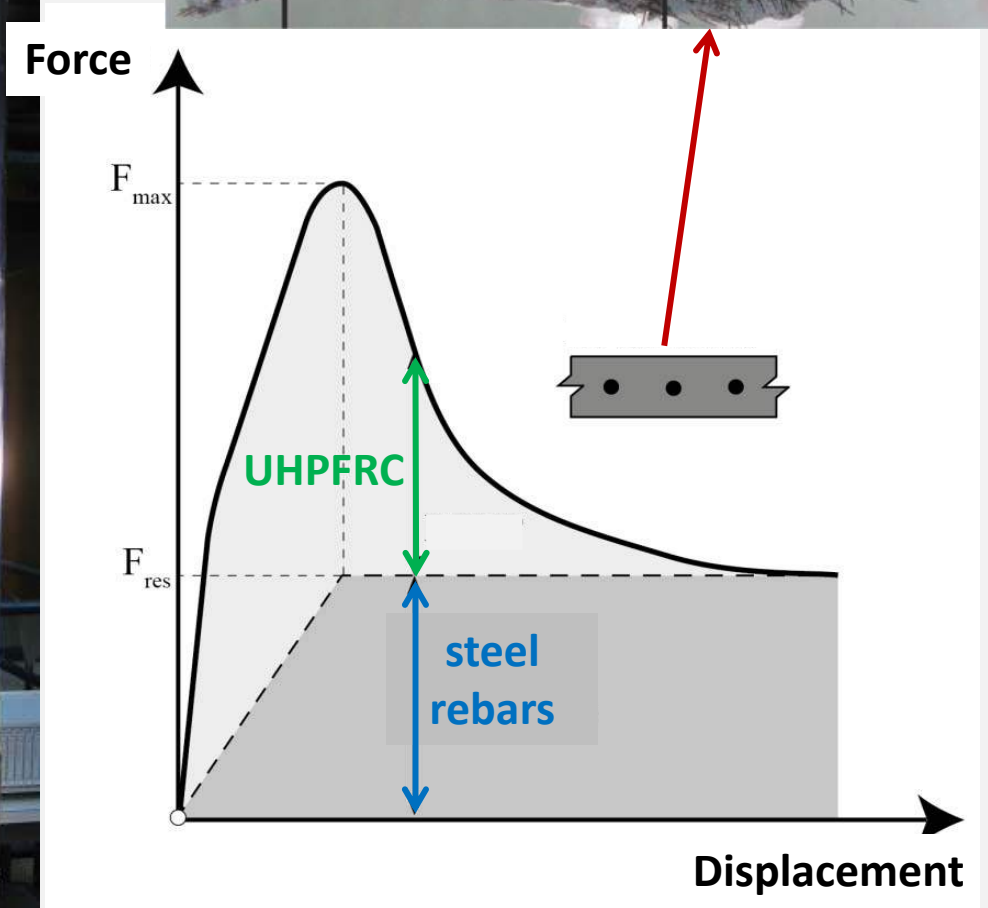
Modulus of elasticity:
45 – 50 Gpa (7'000 ksi)

→ **Strain hardening UHPFRC: (引張りひずみ硬化特性)**
min. 3 Vol.-% steel fibres (*l*/*d*>65)

R-UHPFRC

Tensile behaviour of R-UHPFRC
(R-UHPFRCの引張り挙動)



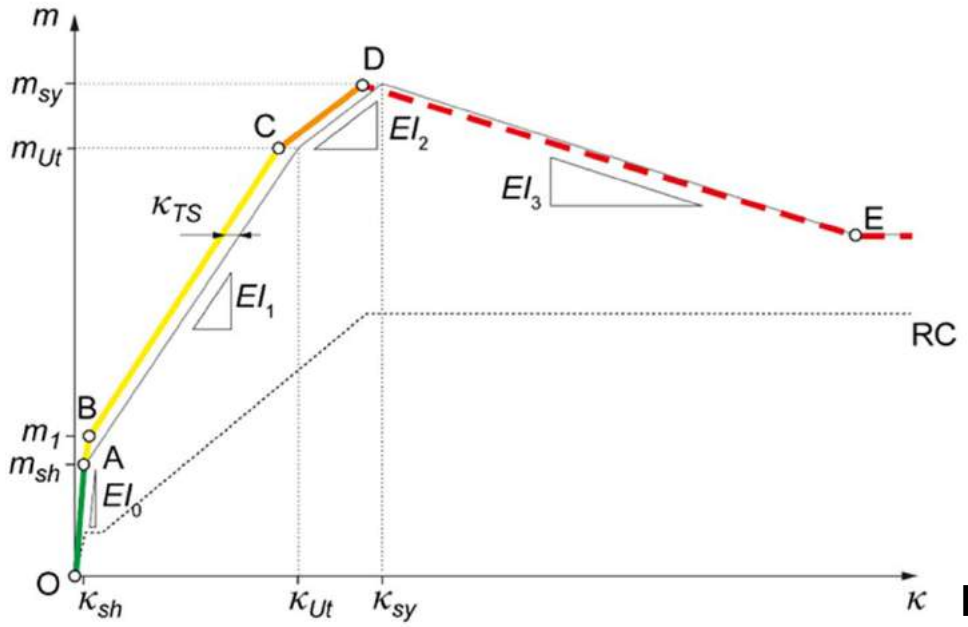


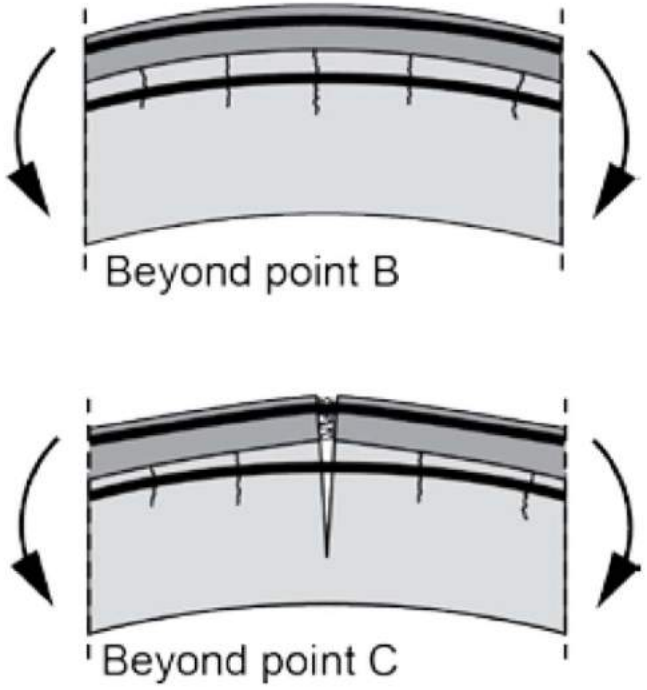
➔ Superposition of UHPFRC and rebar responses (鉄筋との協働)

Structural response of R-UHPFRC – RC composite members(1) (複合部材としての挙動(1))

Ultimate resistance under pure bending
(純曲げ下での終局耐力)

曲げモーメント

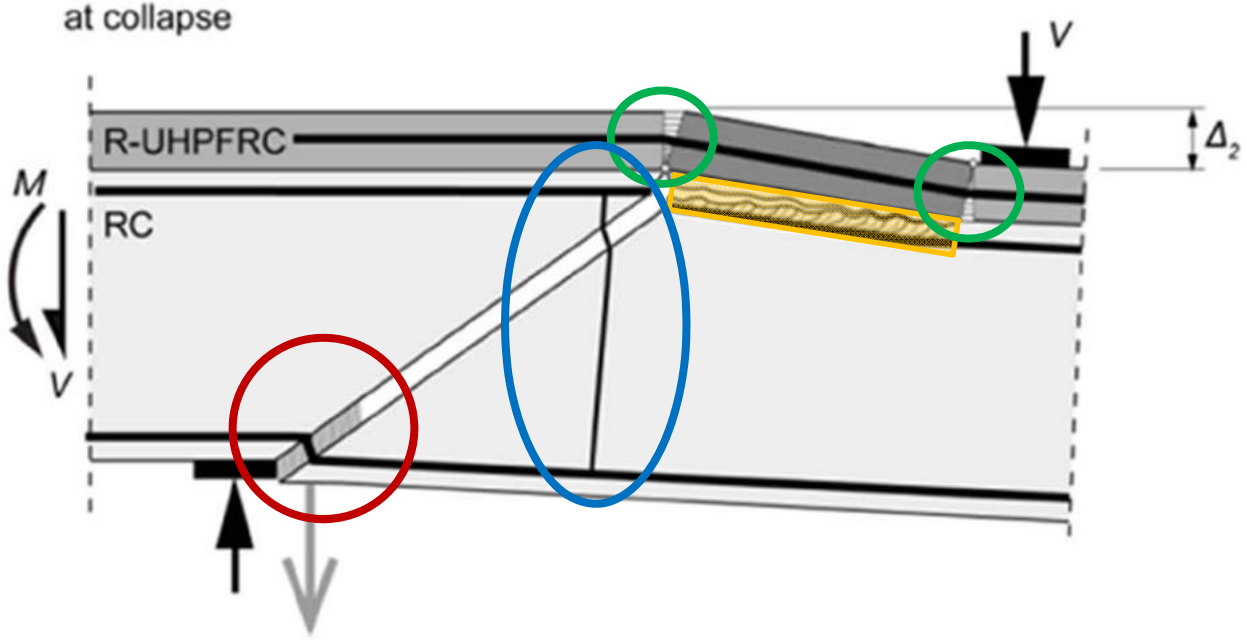




➔ Multilinear relation predicts the bending behaviour of any type of composite element (beams or slabs) with sufficient precision.
(曲げ荷重下において梁および床板部材に対して多直線関係を仮定)

Structural response of R-UHPFRC – RC composite members(2) (複合部材としての挙動(2))

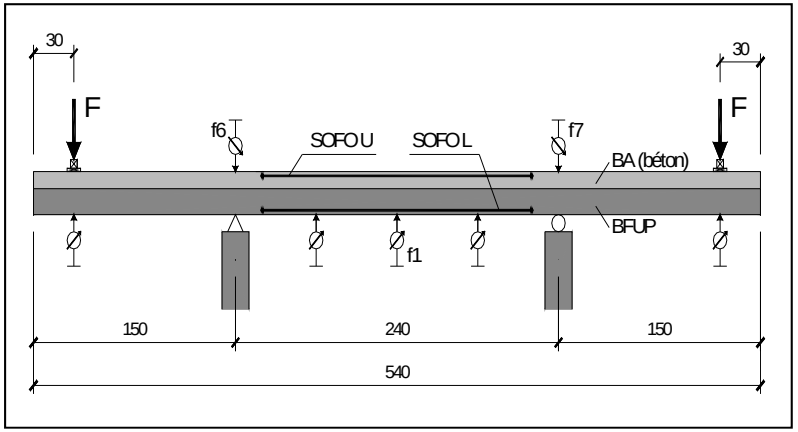
Ultimate resistance under combined shear and bending
(せん断と曲げの組み合わせ下での終局耐力)

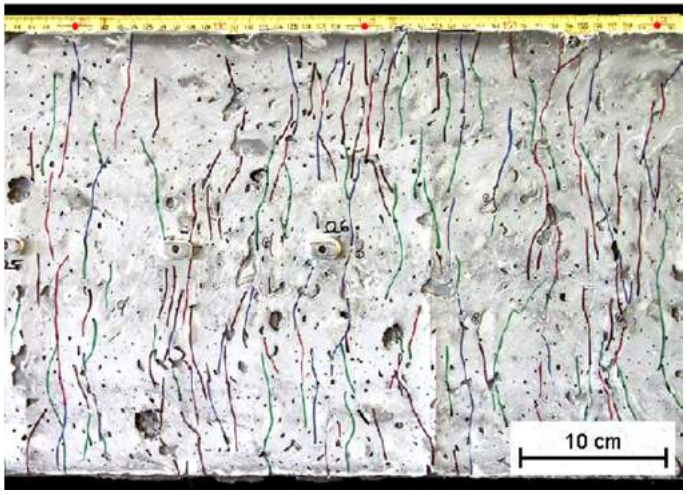


Ultimate shear resistance : $V_R = V_{Rc} + V_{Rs} + V_{RU}$
(終局せん断耐力算定式)

Research at EPFL – Composite elements
(複合部材でのEPFLにおける研究)

- **Fracture tests :(破壊試験)**
- **monolithic behaviour(単調載荷)**
- **many fine and densely distributed cracks**
  (微細で密なひび割れ)

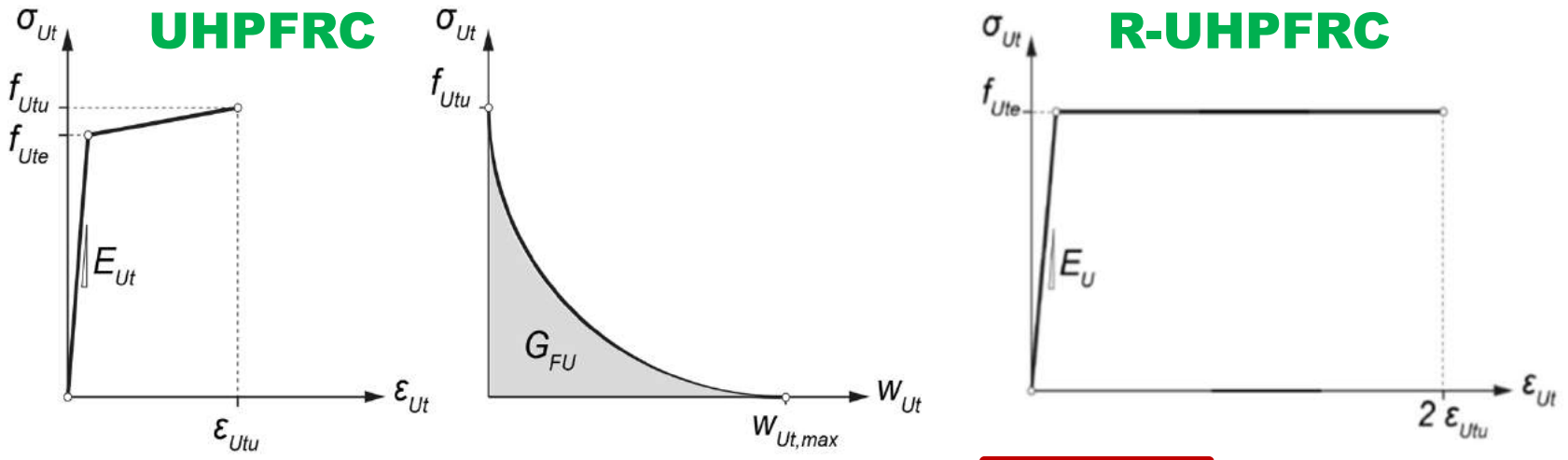




Crack pattern at ultimate load
(終局荷重時のひび割れ状況)

MCS-EPFL : thesis K. Habel, 2004

UHPFRC Properties & Types (特性とグレード)



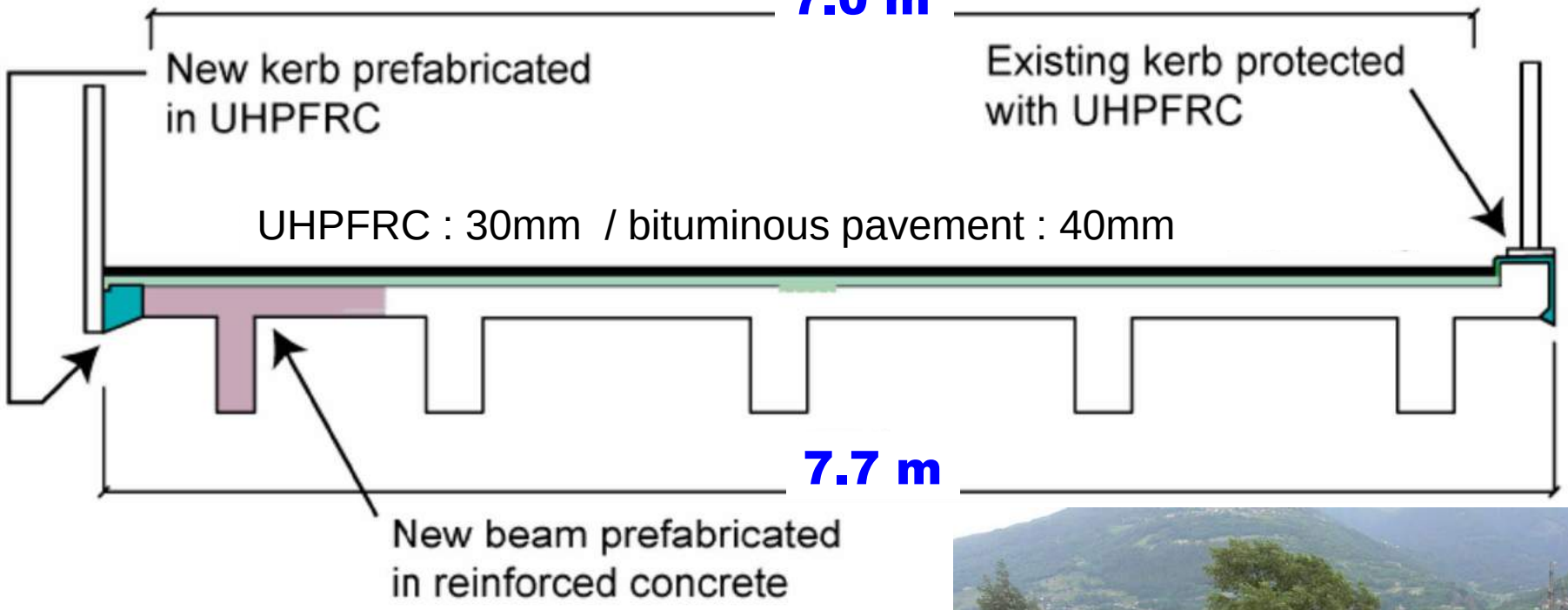
UHPFRC Type (グレード)	U0	UA	UB
Elastic tensile strength, f_{Utek} Mpa (弾性引張強度)	≥ 7,0	≥ 7,0	≥ 10,0
Ratio : f_{Utuk} / f_{Utek} (比率)	> 0,7	> 1,1	> 1,2
Hardening, ε_{Utu} ‰ (ひずみ硬化)	-	> 1,5 strain hardening	> 2,0
Compressive strength, f_{Uck} Mpa (圧縮強度)	≥ 120	≥ 120	≥ 120

→ mechanical properties, creep and shrinkage, fatigue, fire resistance
(力学特性，クリープおよび乾燥収縮，疲労特性，耐火性能)

適用例1 Waterproofing of bridge deck slabs (床版防水)

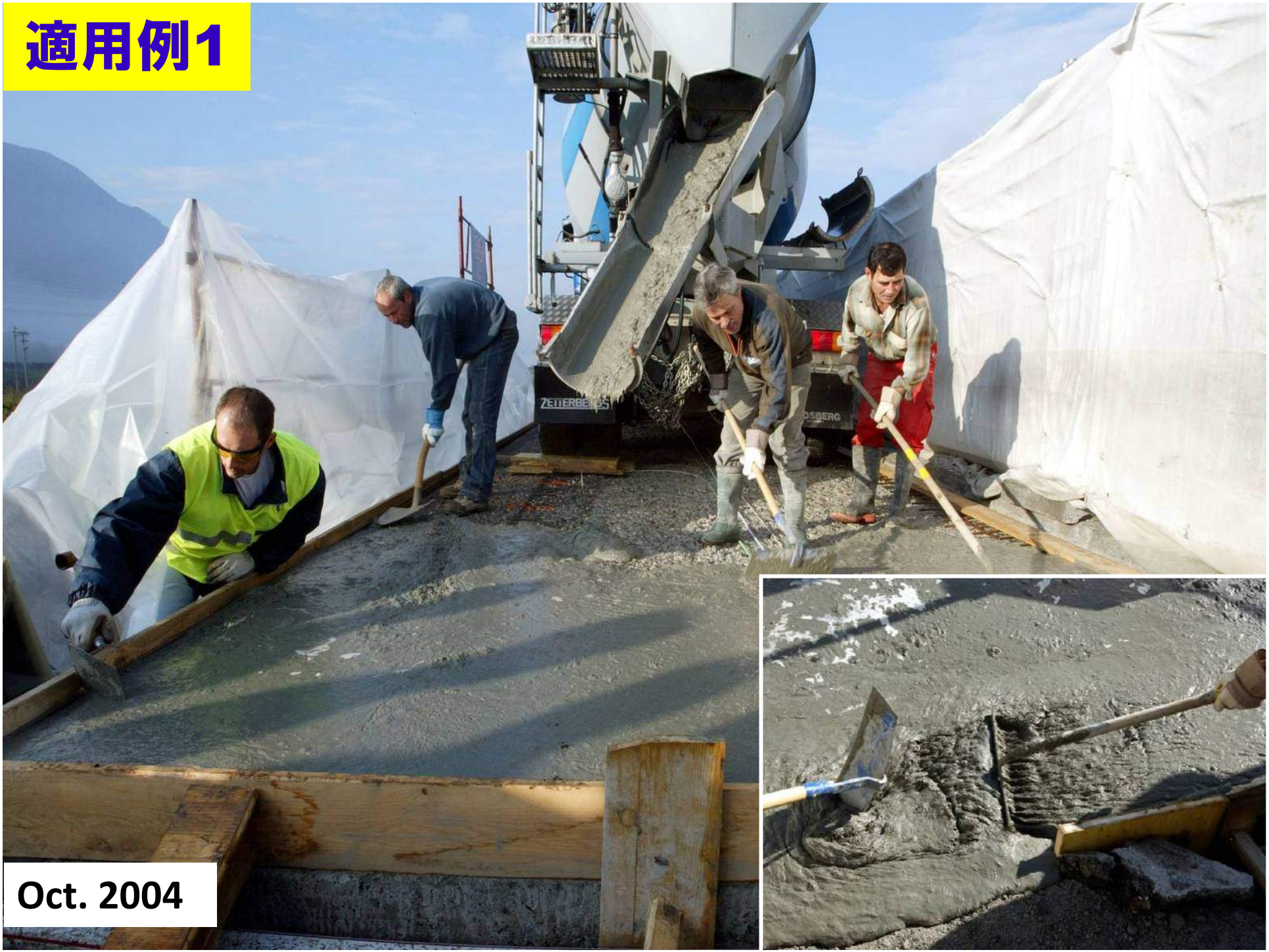
First application !
(最初の適用例)

UHPFRC casting: Oct. 2004



Rehabilitation and widening of a 10m span short road bridge deck slab(スパン10mの橋の拡幅と性能回復)

適用例1



Oct. 2004

適用例1

Monitoring：

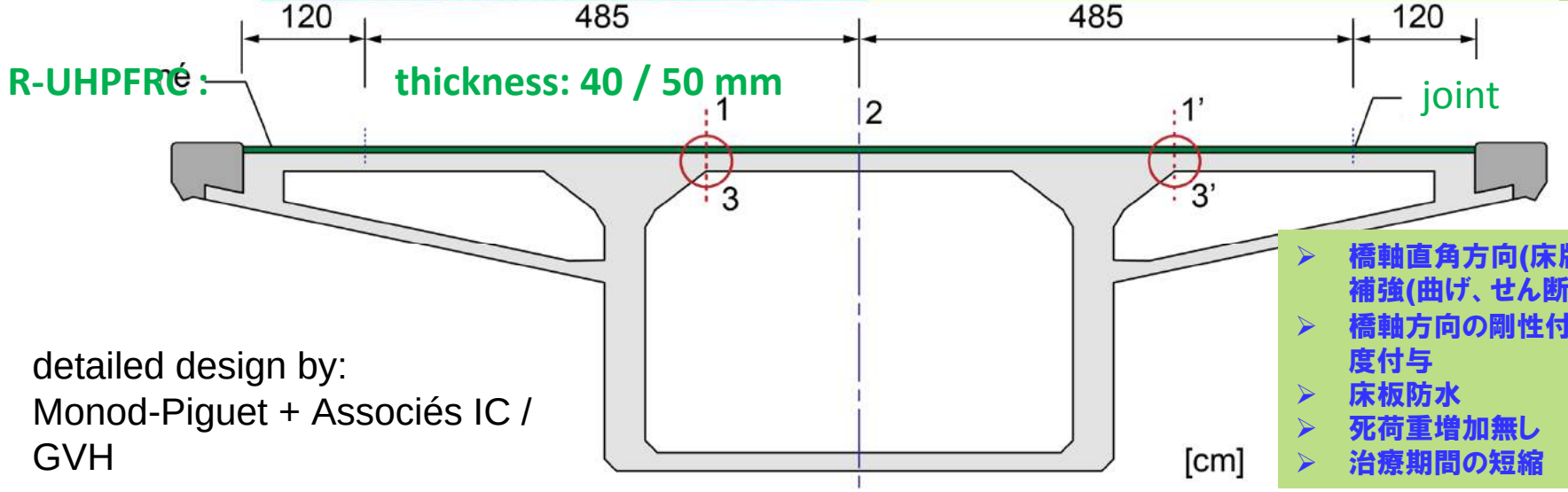
- visual inspection
  (目視点検)
- sampling tests
  (サンプル試験)

適用例2

Strengthening of the Chillon Viaducts (2014 & 2015) (シヨン高架橋の補強)

Functions of R-UHPFRC:

- Strengthening of deck slab in the transverse direction: bending, shear and fatigue resistance
- Increase in stiffness and strength in the longitudinal direction
- Waterproofing of slab
- No increase in dead load
- Short duration of intervention



detailed design by:
Monod-Piguet + Associés IC / GVH

- 橋軸直角方向(床版部)の補強(曲げ、せん断、疲労)
- 橋軸方向の剛性付加と強度付与
- 床板防水
- 死荷重増加無し
- 治療期間の短縮

適用例2

Strengthening of the Chillon Viaducts (2014 & 2015) (シヨン高架橋の補強)

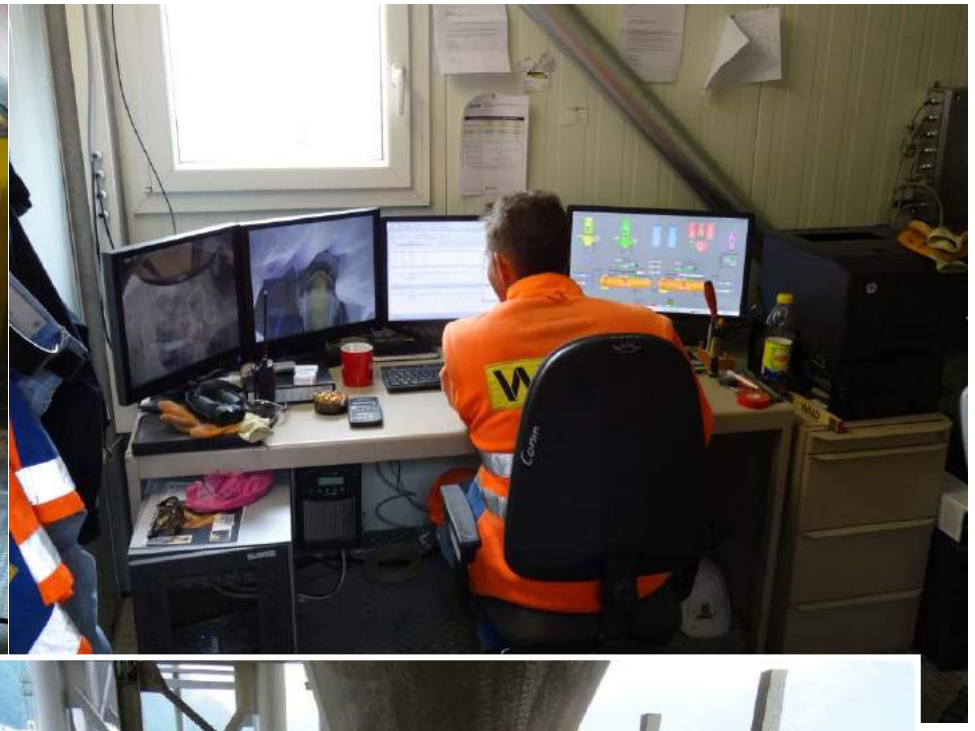
July/Aug. 2014 & June 2015:
Casting of 1'200m³ UHPFRC on each 2.1km long viaduct.
(施工面積:1200m³, 延長:2.1km)
Intervention cost:
200 Euro / m² deck surface.
(コスト:200ユーロ／m²)
Contractor:
Walo Bertschinger SA

適用例2

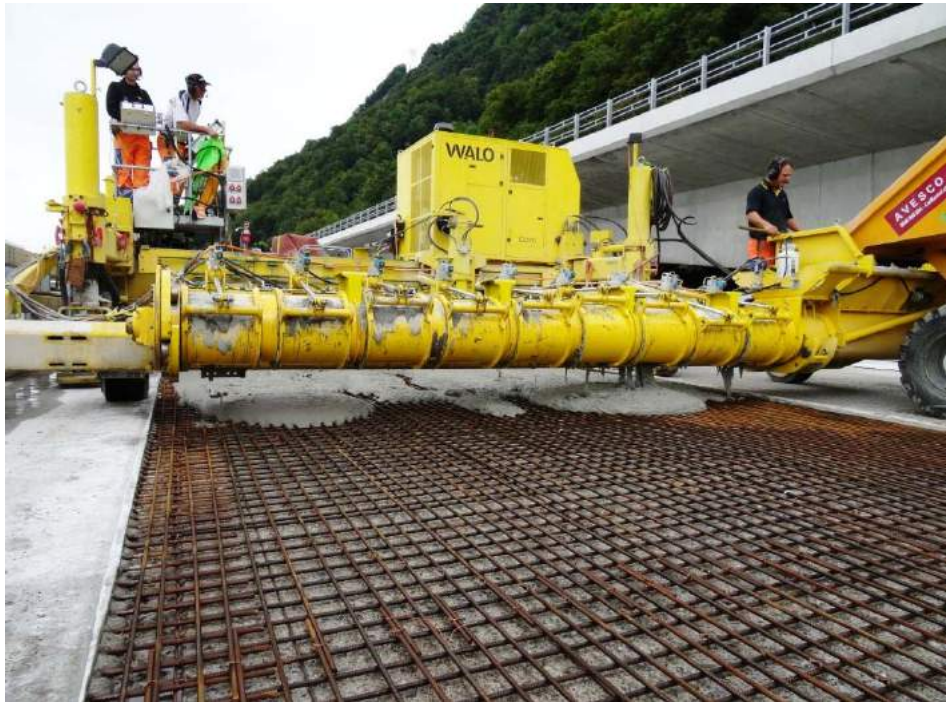
UHPFRC ready-mix plant on site

現場生コン
プラント

適用例2



適用例2

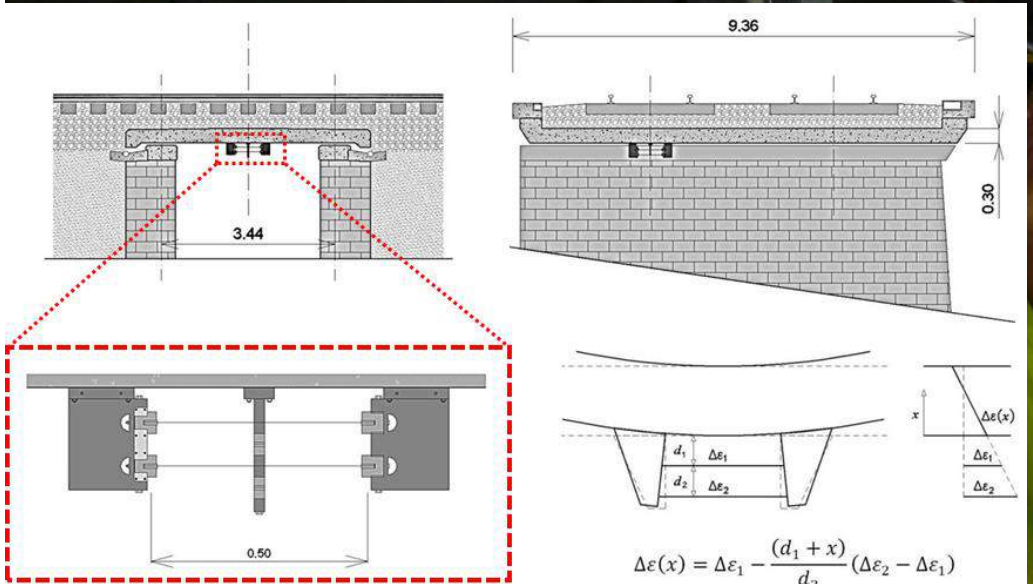


適用例2

maximum slope: 7%

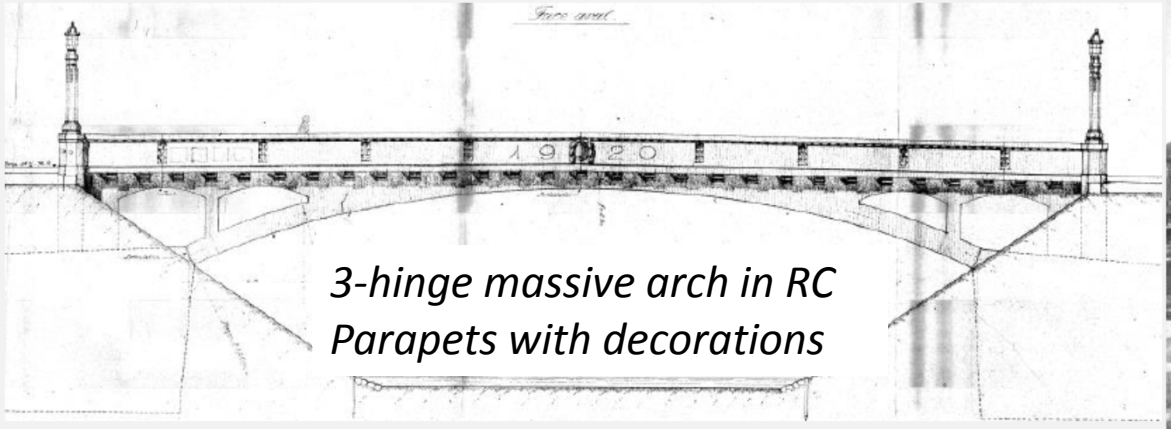
curing

適用例2　施工後の長期モニタリングシステム



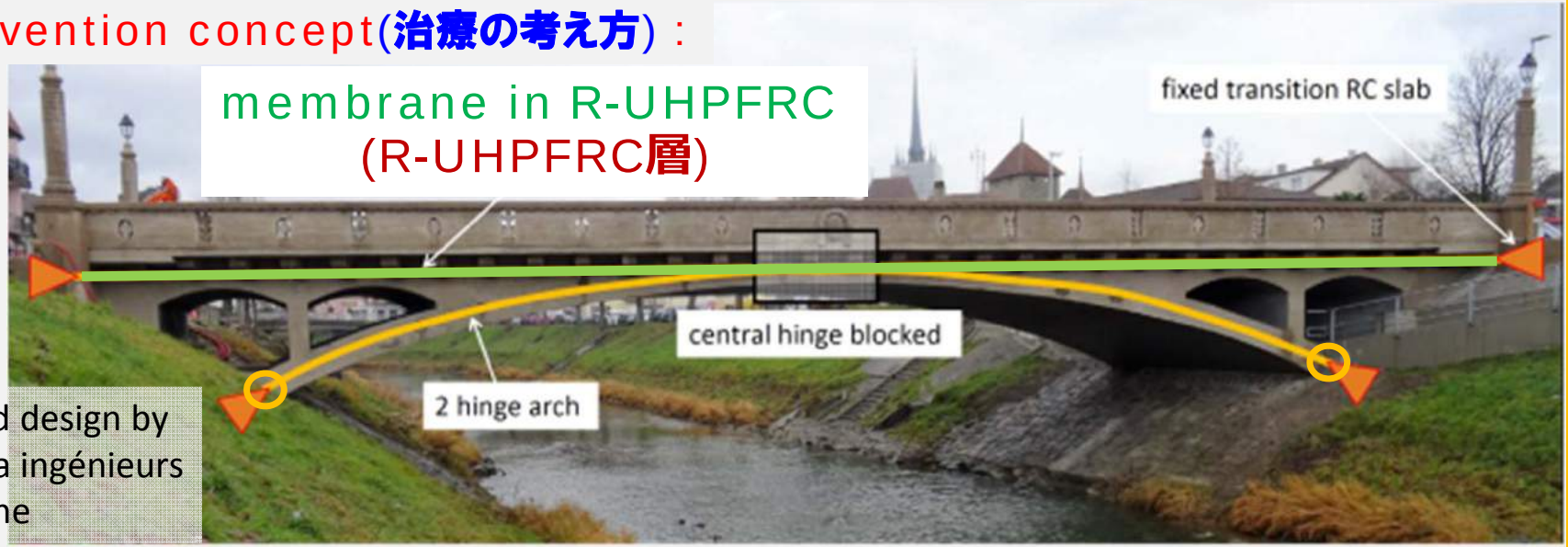
適用例3

Guillermaux Road Bridge (1920), Payerne, Switzerland
(1920年架設の3ヒンジアーチ道路橋の改良→2ヒンジ構造へ)



3-hinge massive arch in RC
Parapets with decorations

Intervention concept(**治療の考え方**) :



detailed design by
Sollertia ingénieurs
Lausanne

Objectives (**目的**):

- increase load bearing capacity(**耐力増加**)
- improve durability(**耐久性向上**)
- restore aesthetics(**装飾復帰**)

適用例3

Guillermaux Road Bridge (1920), Payerne, Switzerland
(1920年架設の3ヒンジアーチ道路橋の改良→2ヒンジ構造へ)

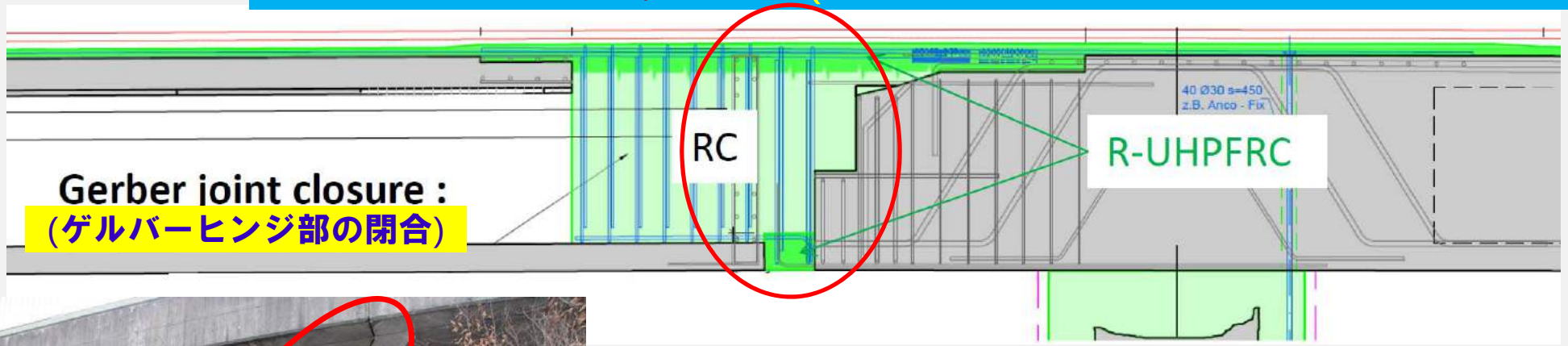
UHPFRC casting

Restoration of the decorative elements of parapets
(装飾部材の復帰)

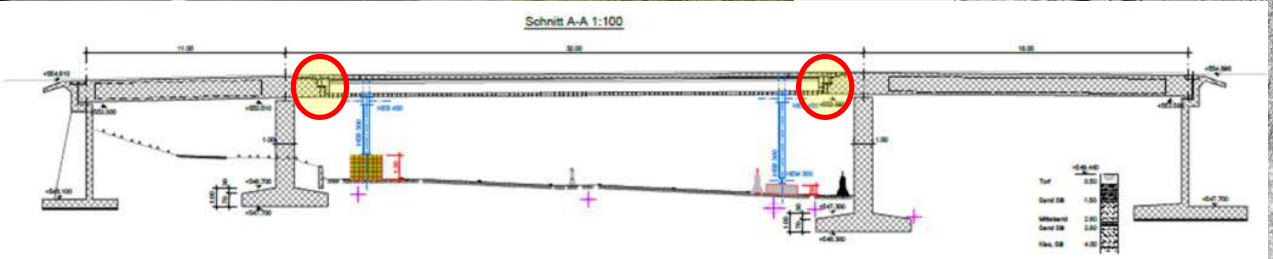
Intervention cost **(治療費)** :
40% lower than replacement cost of the bridge**(架け替え費より40%減)**

Others

Improvement of Jupiter-Street Bridge (1972), Berne, Switzerland, 2014 (1972年架設ゲルバーヒンジ橋の改良)



Gerber joint closure :
(ゲルバーヒンジ部の閉合)

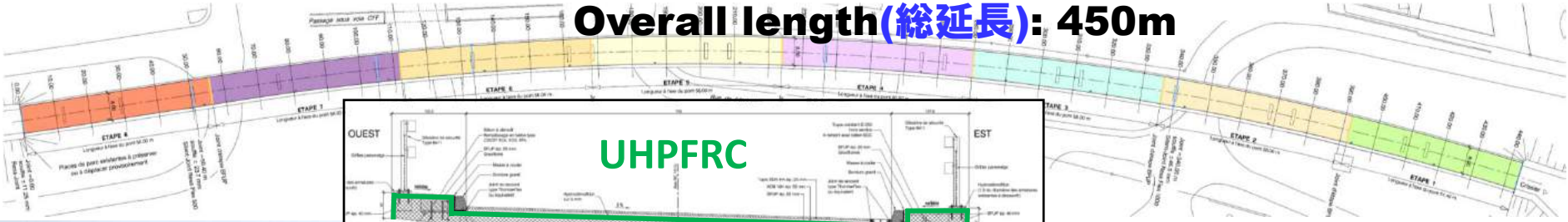


detailed design by:
Hartenbach & Wenger Berne

適用例4

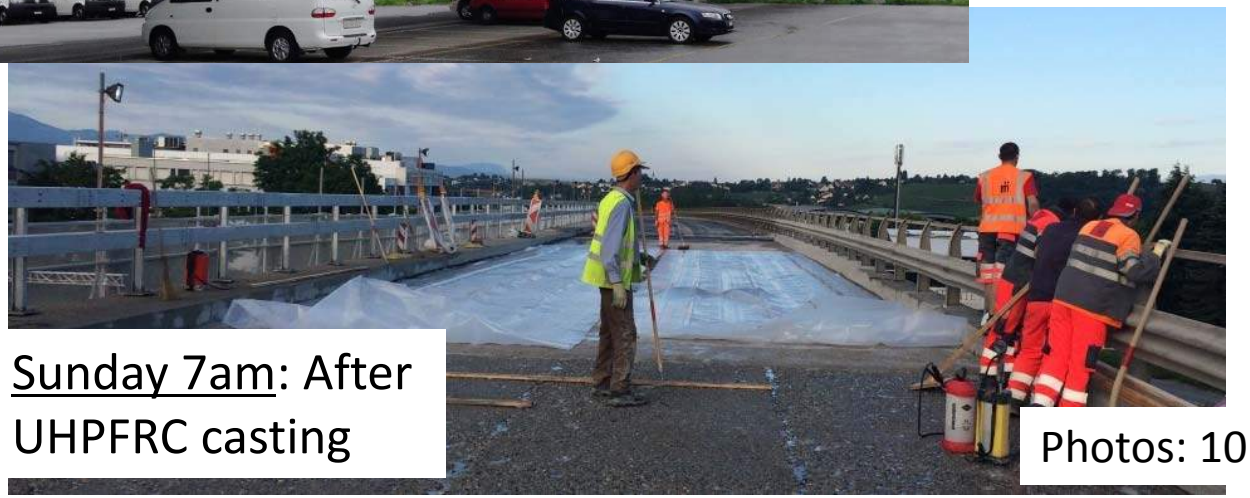
Improvement of the Cudrex Viaduct(高架橋の改修)～Concept: progress in 8 work phases of 36 hours (week-end: 5 pm Sat.-5 am Mon.)(8ブロックに分けて36時間の急速施工を実現;土曜午後5時～月曜午前5時)

Overall length(総延長): 450m



56m per week-end Sa 2am – Mo 5am

Sunday 1am: Prepared surface before casting



Sunday 7am: After UHPFRC casting

Photos: 10 July 2016 by P.Wolf

適用例4

適用例4

UHPFRC casting, 31 July 2016

適用例4

適用例5

Coating of a pedestrian bridge, Neuchâtel, 2015 (歩道のコーティング)

- → 25mm thin UHPFRC layer to obtain a wearing and waterproofing surface with long term durability (耐久性向上:25厚)
- → ramps with a slope of 13 % (勾配)
- → thixotropic properties of the fresh mix (obtained by additives) (揺変性)

適用例5

適用例6

Wearing coating of a weir, Berne, Switzerland, 2015 (せきのコーティング)

→ layer of thixotropic UHPFRC to hold the slope up to 6%
(揺変性を利用した6%勾配施工)

→ low ambient temperature: tent (テントによる低温対策)

Weir in use after UHPFRC strengthening
(施工後のせき)

Damaged basalt plates
(せきの損傷)

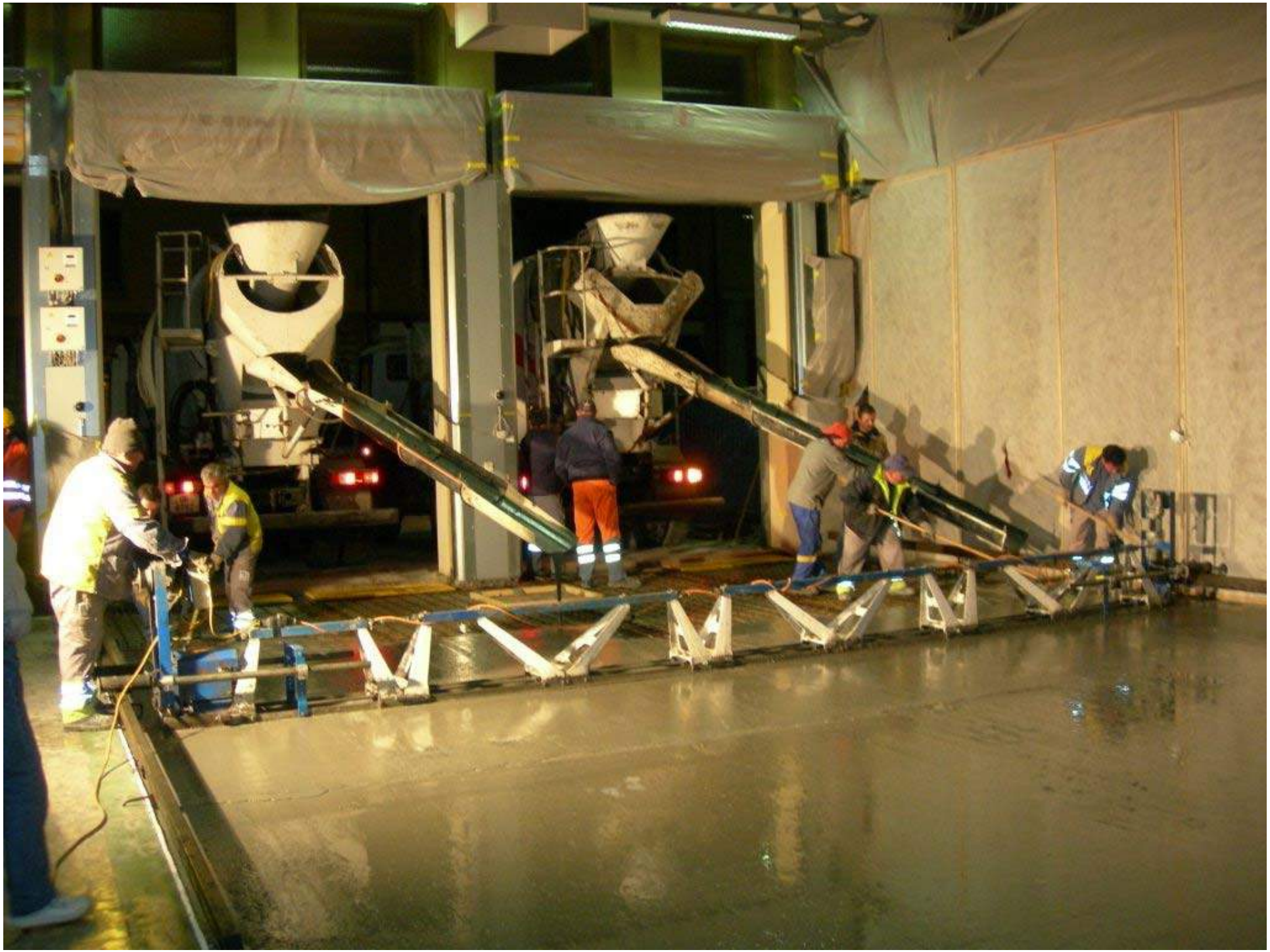
Manual UHPFRC casting in a tent
(テント内での施工)

Others

Protection against chemical attack and aggressive wastewater in two containers, Switzerland, 2015 (化学浸食，劣悪排水保護)

➔ extremely compact material structure of UHPFRC(超高密度) :high resistance against acid attack(高耐化学浸食性能)

➔ relatively thin layer to limit of storage volume reduction (薄層のため元の貯蔵容積の減少を制限可能)

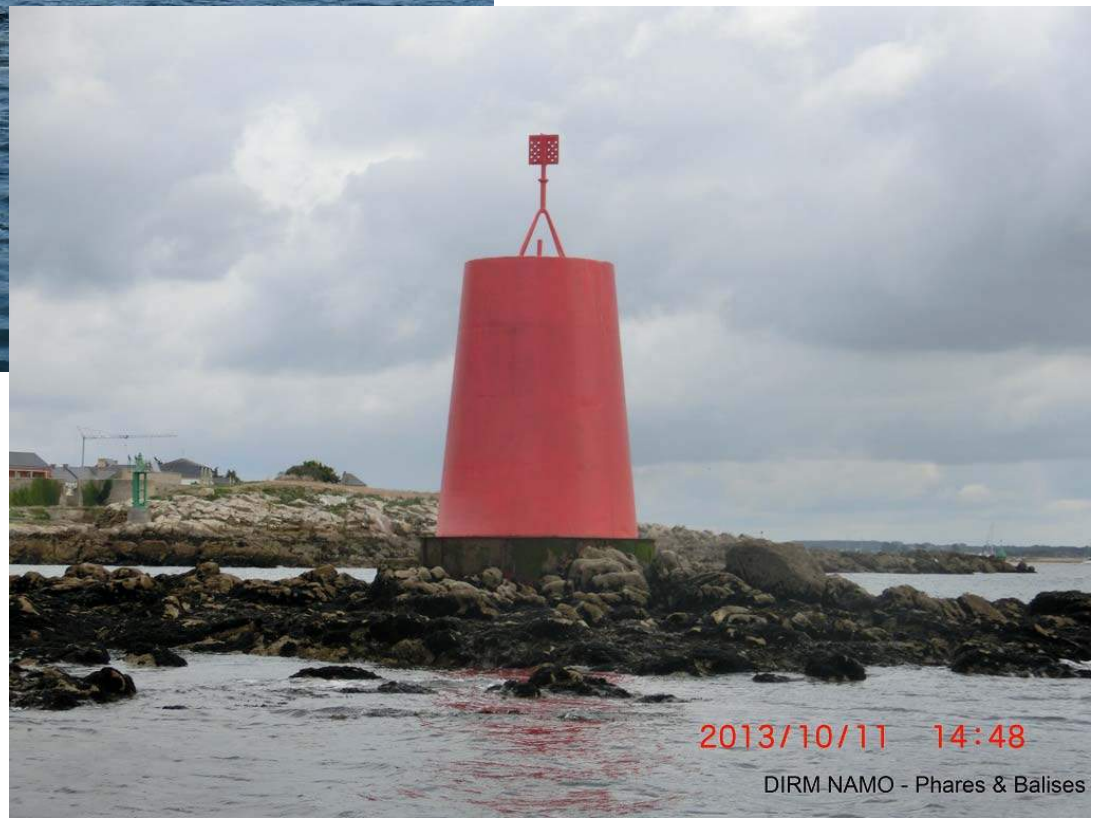


適用例7

UHPFRC surface protection and strengthening of a lighthouse turret – Brittany France: 2013(灯台塔の表面保護と補強)

適用例7

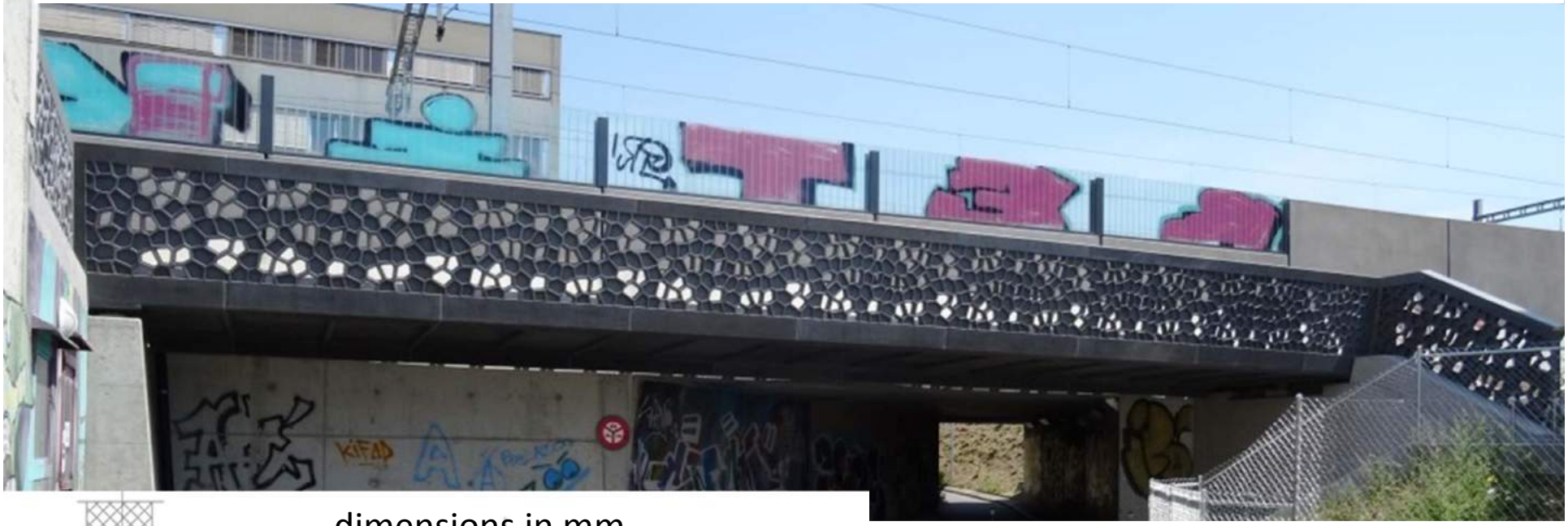
After formwork removal and painting
(型枠除去後塗装)

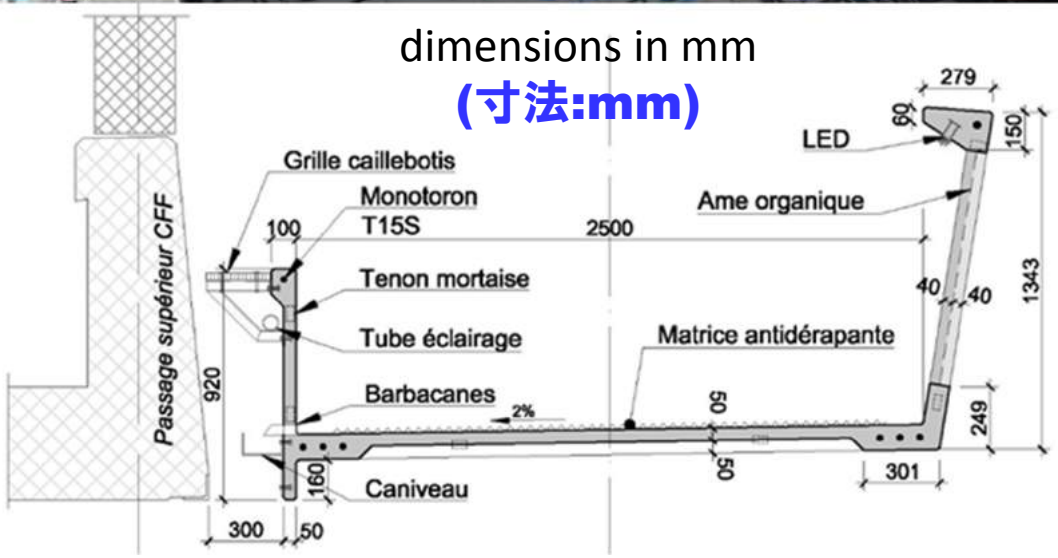


新設橋への適用例-1: ローザンヌの歩道橋

Martinet Pedestrian Bridge, Lausanne, Switzerland, 2015

Designed by Rita Galrito, Eugen Brühwiler, Didier Robyr





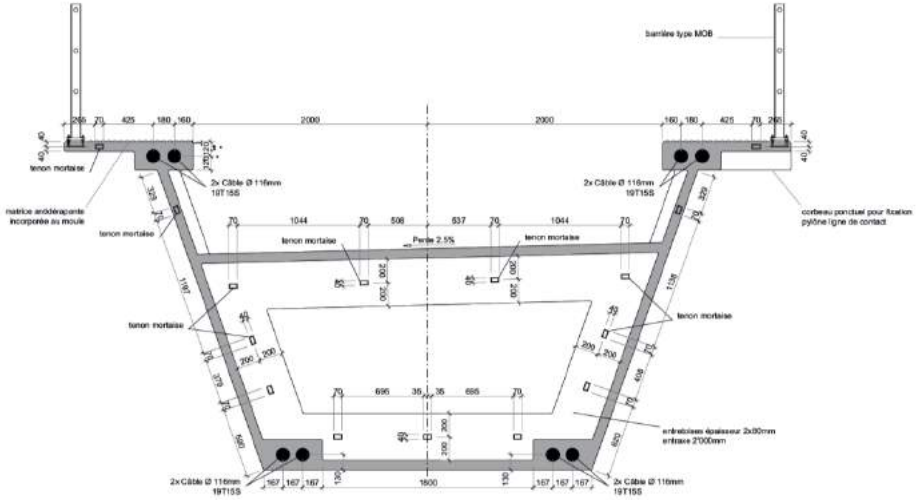
新設橋への適用例-1

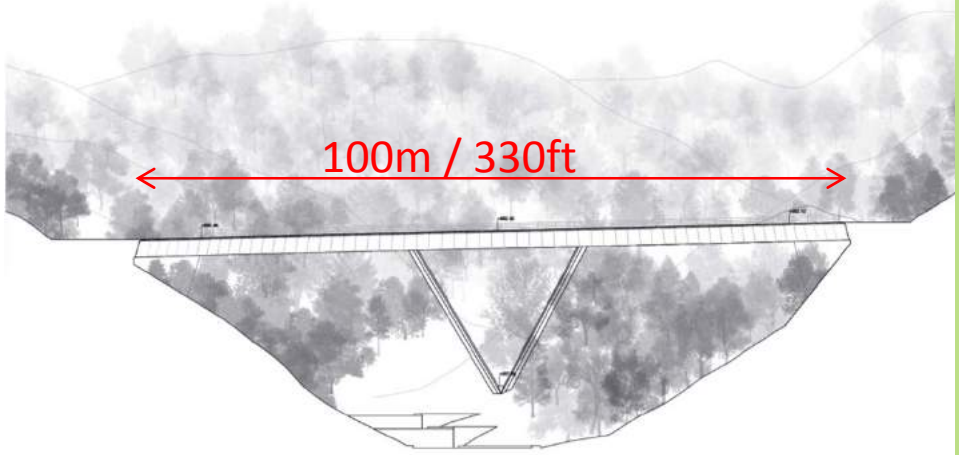
Martinet Pedestrian Bridge, Lausanne, Switzerland, 2015
(マルティネ歩道橋, 2015)

新設橋への適用例-1

新設橋への適用例-2: 単線の曲線鉄道橋

Approach: combine assets of steel construction and reinforced concrete construction to realize lightweight structures of original aesthetic expression(鉄とコンクリートの強みを合わせた軽量化の実現)





Design of a curved single track railway bridge in R-UHPFRC(設計上の特徴) :

- segmental construction (ブロック工法)
- lightweight elements(軽量化)
- post-tensioned(ポステン)

ご清聴ありがとうございました