第17回ブリッジマネジメントフォーラム講演資料,
2018.11.16(Fri), 15:00-16:20

ヨーロッパにおける構造物維持管理見聞録

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

今回滞在した2つの国の特徴など

将来展開　**2拠点を軸とした長期交流・プロジェクト化を探る**

スイス, スイス連邦工科大学ローザンヌ校(EPFL)
(2016.4.1～2016.9.29の6か月間)

特徴

IABSEリーダー(コンクリート構造物維持管理の専門家)のProf. Eugen Brühwilerがホスト教官

- 国土総面積が日本の九州と同じで総人口が８０８万人の国
周りに海がない国
- 国民の多く(特に知識人)は3か国語以上を自由に話す
- 永世中立の立場を堅持する世界唯一の国
日本との友好関係が150年以上
- 大学を含めた教育費は低く抑えられているが、医療費・物価が非常に高い

フィンランド, Aalto大学(旧ヘルシンキ工科大学)
(2015.8.29～2016.3.31の7か月間)

特徴

Finland土木学会若手リーダー(構造モニタリングの専門家)のProf. Risto Kiviluomaがホスト教官

- 国土総面積が日本と同じで総人口が５５０万人の国
無数の湖がある国
独立後100年で親日家が多い
- 子供の学力が世界一位
- 大学を含めた教育費および医療費が全て無料
ただし、税金・物価は高い
- 国民の幸福度・満足感が高い
住みたい国の上位

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

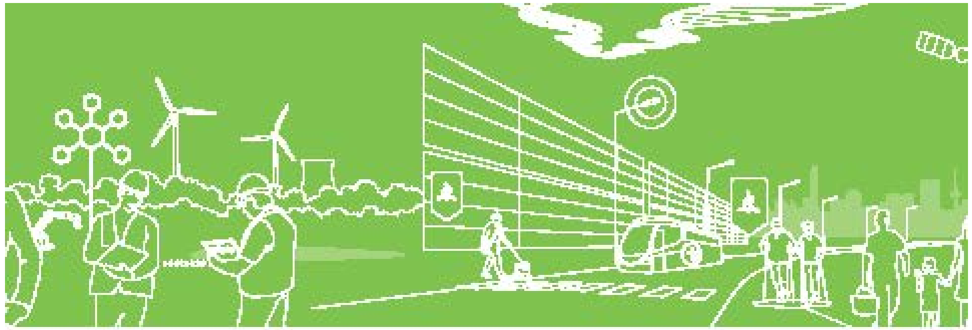
Aalto大学を象徴するビル（Mr. Aaltoの設計）


11
102 501 V
103
194
195
506
552

Past

Present

Prof. Risto Kiviluoma



RESEARCH HIGHLIGHTS • VISIONS • SCIENCE • TECHNOLOGY

12

Smart city

VTT

Future of Smart Transport


Vihantasalmi Bridge, Finland
1999年完成
全長168 m(21+42+42+42+21)

2015.12撮影

2015.12撮影

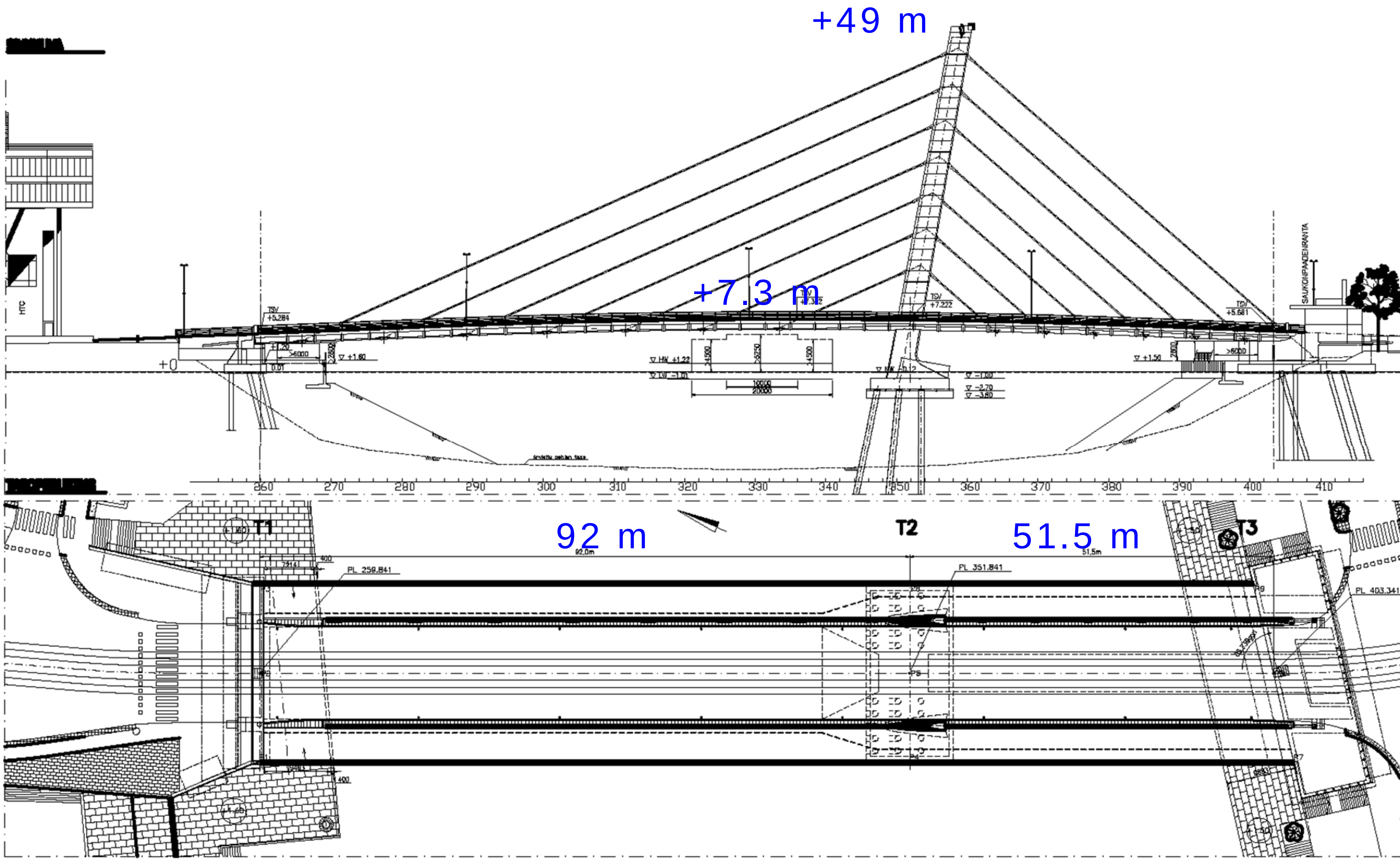

9v Battery
Use 6F22 or equivalent
PROTIMETER plc Meter House
Marlow, Bucks SL7 1LX Telex 849305
PROTIMETER is a Registered Trade Mark
SERIAL NO
MA
LO BAT
14.2
A % H2O
B % H2O
C % H2O
°C
PROTIMETER

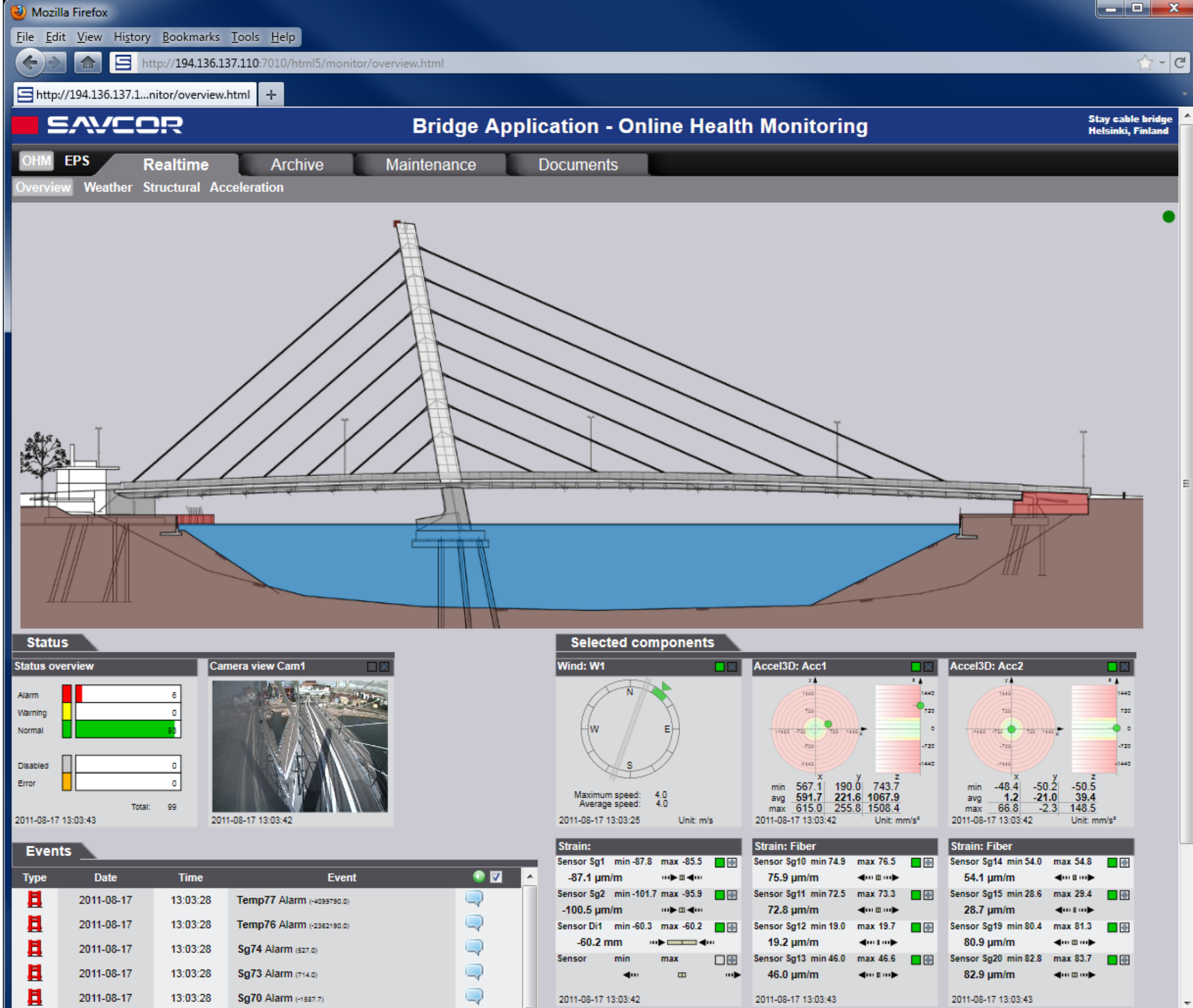
CRUSELLIN Bridge (2011年完成)

C R U S E L L I N   S I L T A

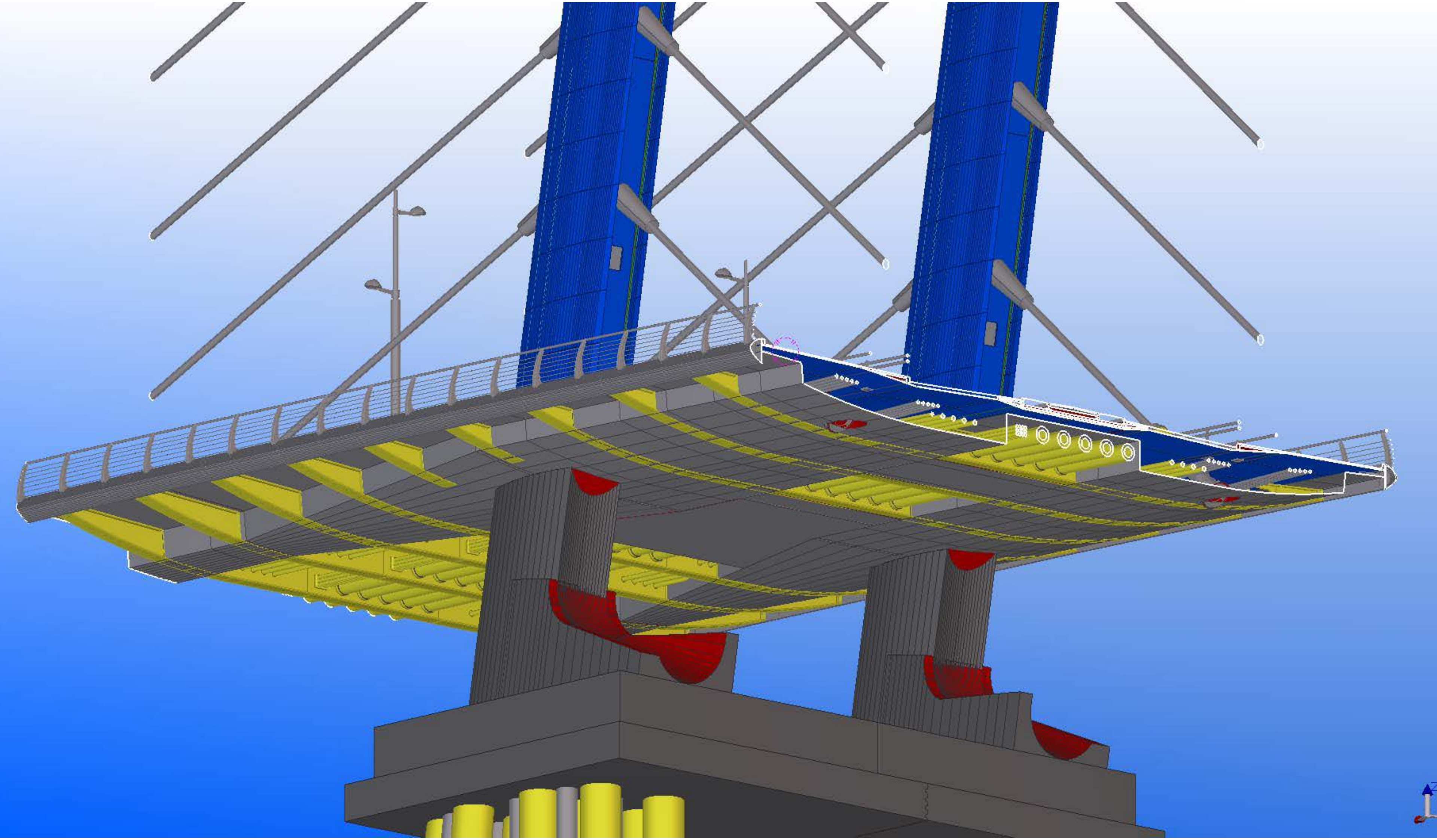
ARKKITEHTITOIMISTO JUSSI TERVAOJA OY   VALAISTUSSUUNNITTELMA: JULLE OKSANEN LIGHTING DESIGN   VISUALISAATIO: STUDIO RENDO, OLIVER WALTER

suunnittelu KORTES

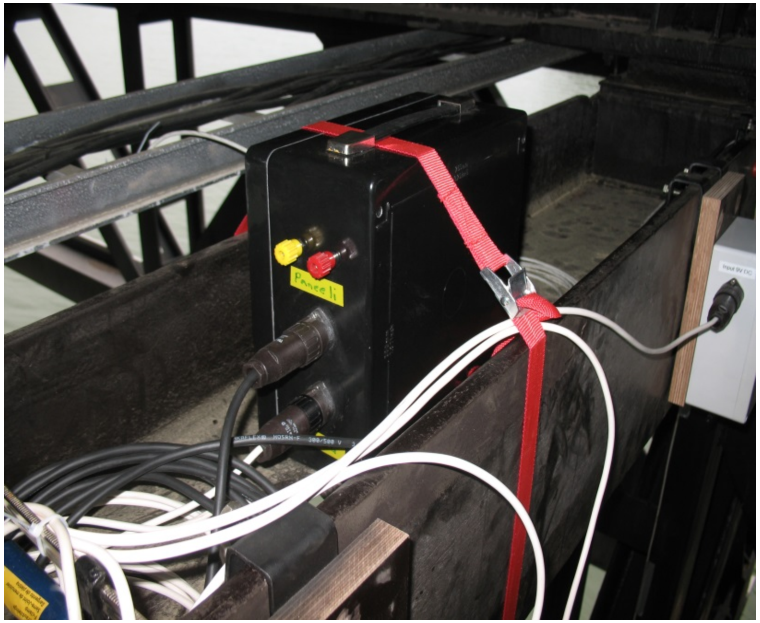

+49 m
+7.3 m
92 m
51.5 m
T1
T2
T3
260
270
280
290
300
310
320
330
340
350
360
370
380
390
400
410

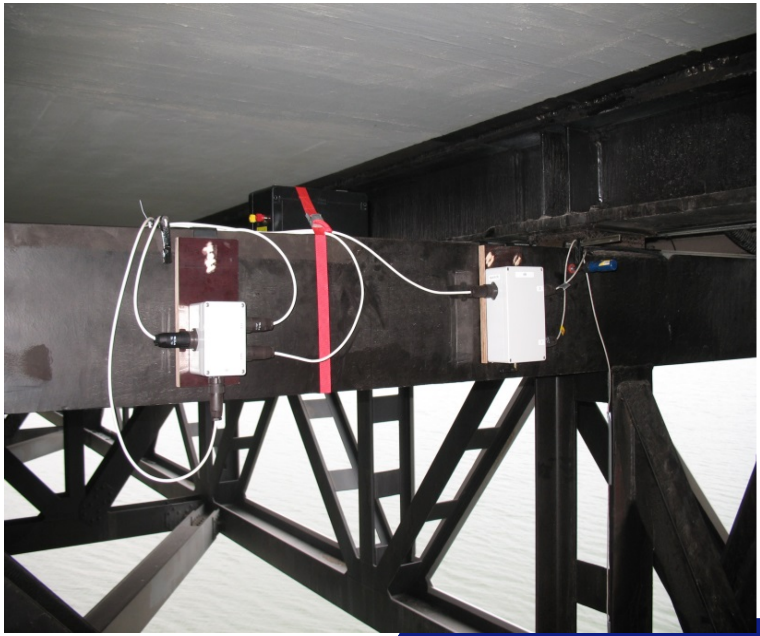

Mozilla Firefox
File Edit View History Bookmarks Tools Help
http://194.136.137.110:7010/html5/monitor/overview.html
http://194.136.137.1...nitor/overview.html
SAVCOR
Bridge Application - Online Health Monitoring
Stay cable bridge
Helsinki, Finland
OHM EPS
Realtime
Archive
Maintenance
Documents
Overview Weather Structural Acceleration
Status
Status overview
Alarm 6
Warning 0
Normal 93
Disabled 0
Error 0
Total: 99
2011-08-17 13:03:43
Camera view Cam1
2011-08-17 13:03:42
Selected components
Wind: W1
N
W
E
S
Maximum speed: 4.0
Average speed: 4.0
2011-08-17 13:03:25
Unit: m/s
Accel3D: Acc1
min 567.1 190.0 743.7
avg 591.7 221.6 1067.9
max 615.0 255.8 1508.4
2011-08-17 13:03:42
Unit: mm/s²
Accel3D: Acc2
min -48.4 -50.2 -50.5
avg 1.2 -21.0 39.4
max 66.8 -2.3 148.5
2011-08-17 13:03:42
Unit: mm/s²
Strain:
Sensor Sg1 min -87.8 max -85.5
-87.1 µm/m
Sensor Sg2 min -101.7 max -95.9
-100.5 µm/m
Sensor Di1 min -60.3 max -60.2
-60.2 mm
Sensor min max
2011-08-17 13:03:42
Strain: Fiber
Sensor Sg10 min 74.9 max 76.5
75.9 µm/m
Sensor Sg11 min 72.5 max 73.3
72.8 µm/m
Sensor Sg12 min 19.0 max 19.7
19.2 µm/m
Sensor Sg13 min 46.0 max 46.6
46.0 µm/m
2011-08-17 13:03:43
Strain: Fiber
Sensor Sg14 min 54.0 max 54.8
54.1 µm/m
Sensor Sg15 min 28.6 max 29.4
28.7 µm/m
Sensor Sg19 min 80.4 max 81.3
80.9 µm/m
Sensor Sg20 min 82.8 max 83.7
82.9 µm/m
2011-08-17 13:03:43
Events
Type Date Time Event
2011-08-17 13:03:28 Temp77 Alarm
2011-08-17 13:03:28 Temp76 Alarm
2011-08-17 13:03:28 Sg74 Alarm
2011-08-17 13:03:28 Sg73 Alarm
2011-08-17 13:03:28 Sg70 Alarm

Building Information Modeling (BIM)の適用

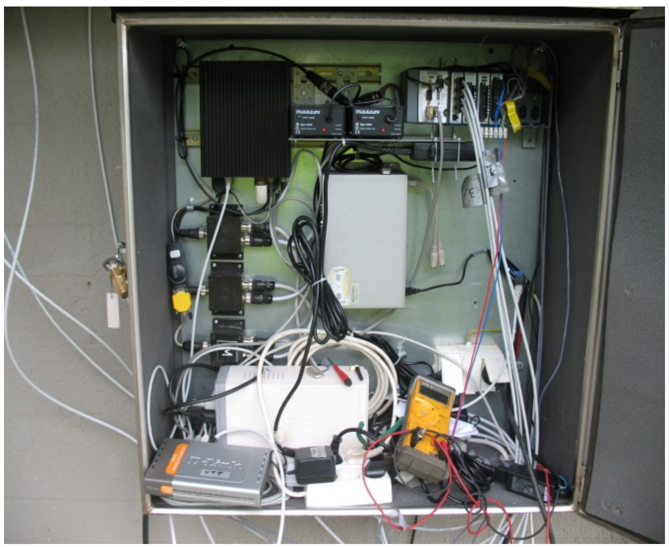


現場での測定装置

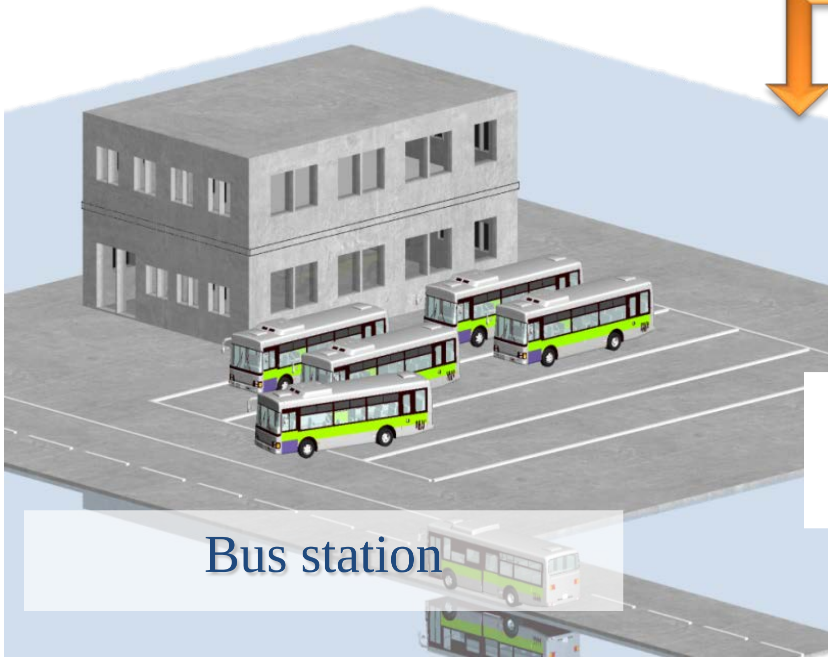


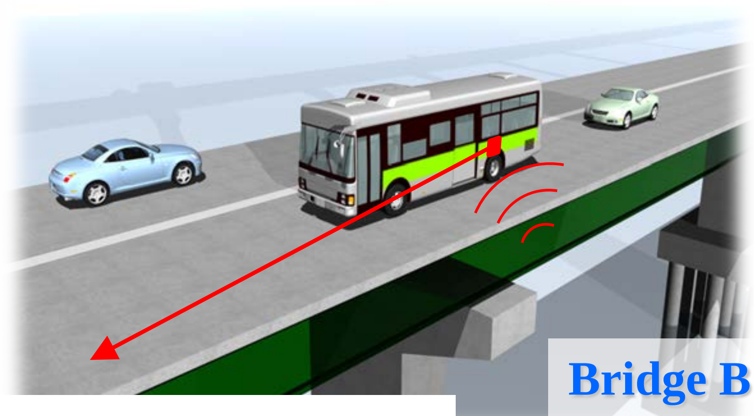


現場での通信装置

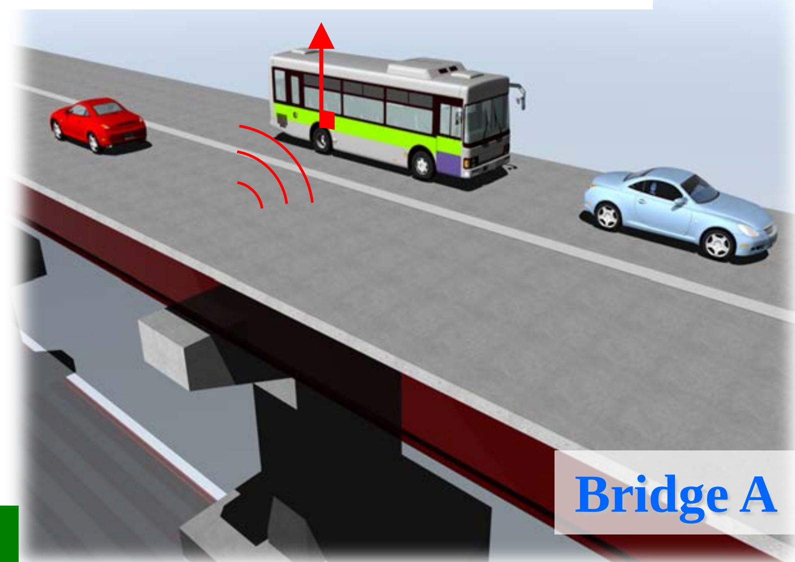


路線バスを利用した中小橋梁の長期モニタリングのイメージ





Monitoring bridge vibration with acceleration sensor

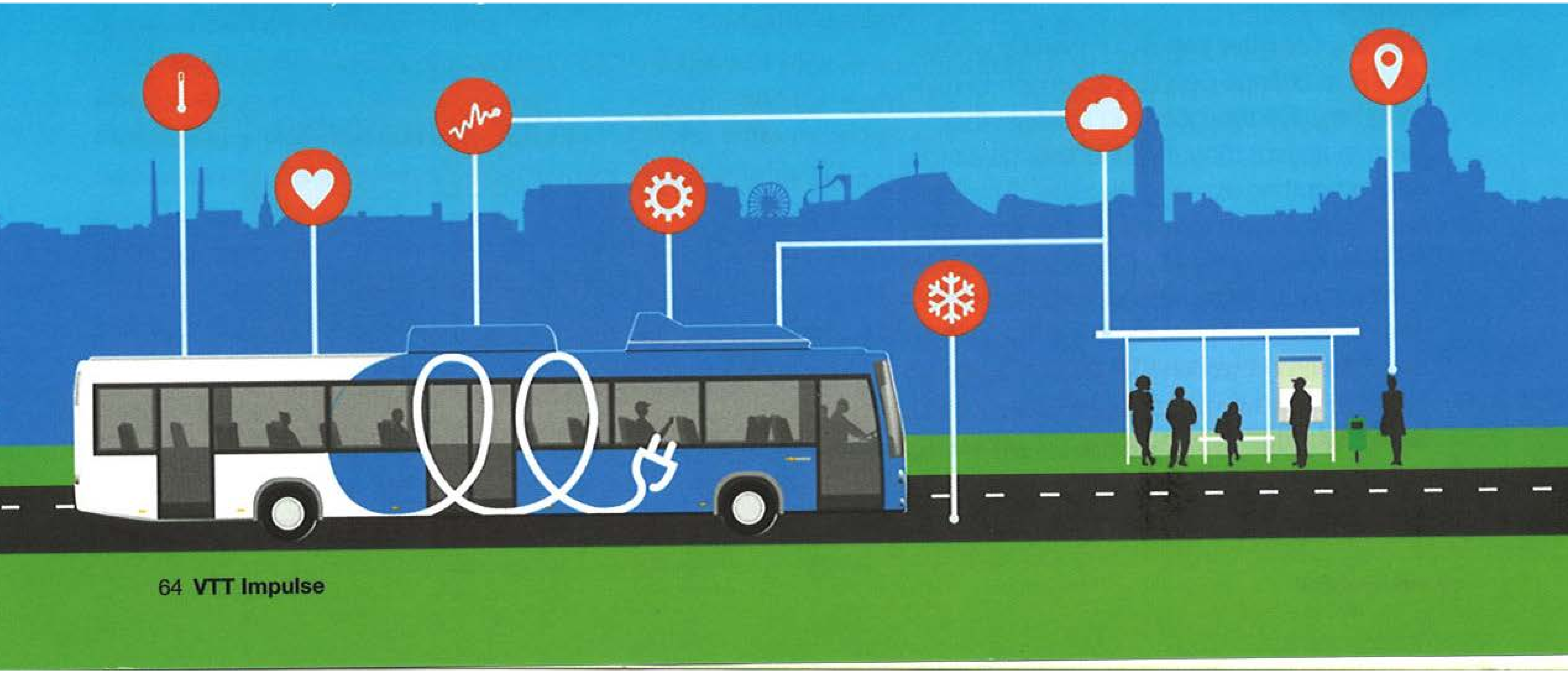


Calculating "characteristic deflection" as a bridge condition indicator

For shorter than 30m span length

VTTでのバスモニタリング導入打合せmeeting

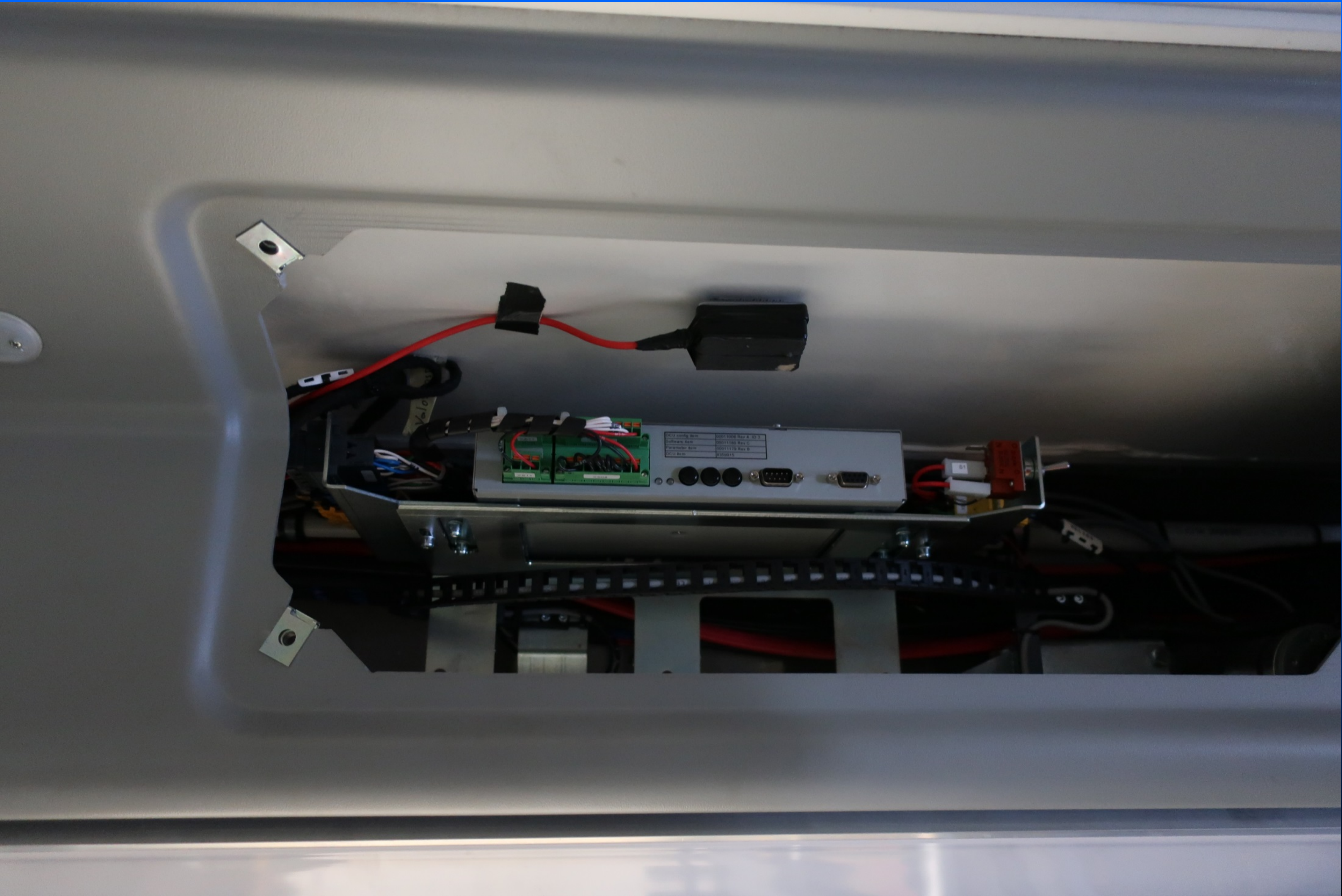
e-Bus Project in VTT



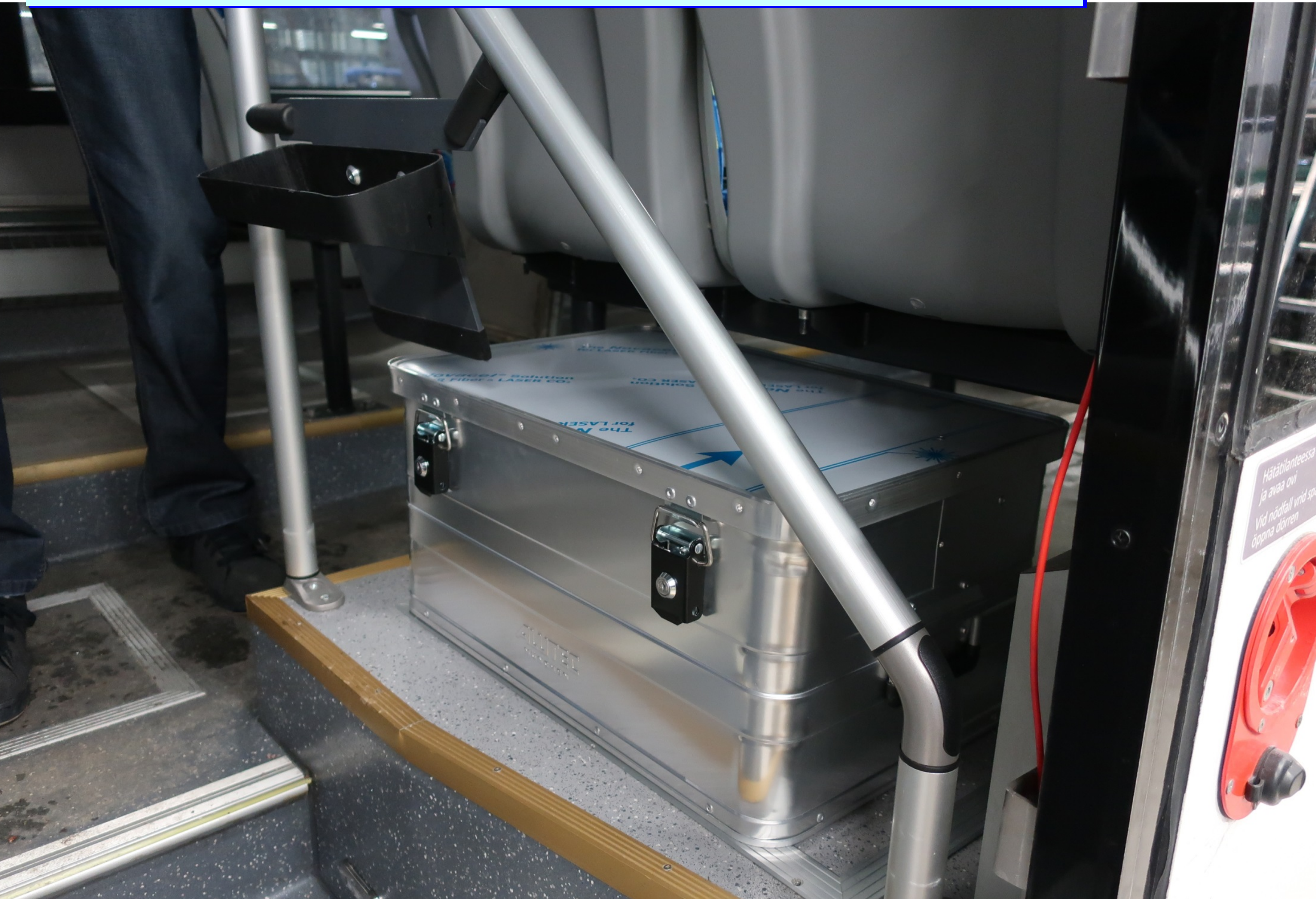
e-Busの外観

e-Bus後輪への加速センサの設置状況

GPSセンサの設置状況

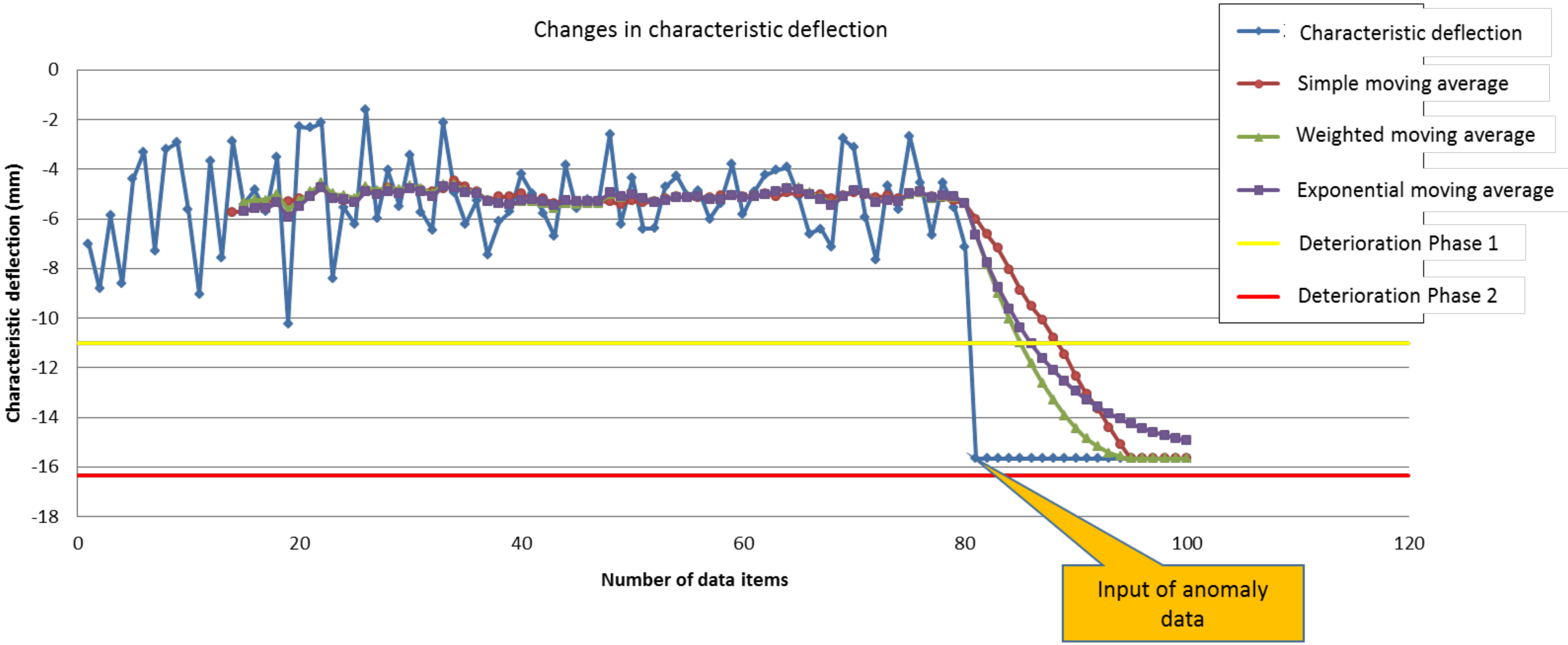


バス内での自動計測装置用ボックス



プロジェクトを支援するVTTの技術者

バスモニタリングによる既存橋の損傷検出例



スイスでの次世代材料開発

鉄、コンクリートに代わる次世代材料：UHPFRC
(Ultra-High Performance Fiber Reinforced cement-based Composites)**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

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**)

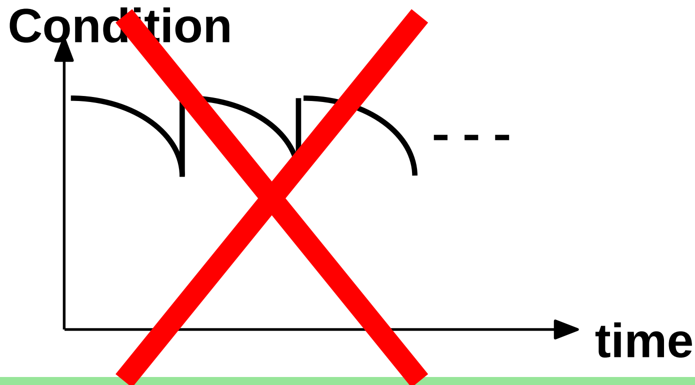
⇨ *we need creative engineers to serve the society !* **(創造力を発揮できる技術者の育成が必要)**

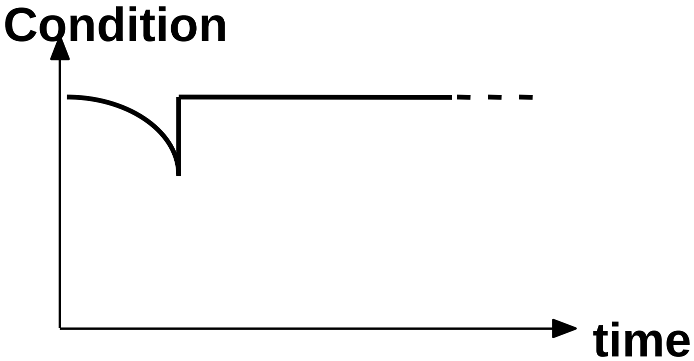
Present

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)

"Structural UHPFRC" :

Welcome to the post-concrete era !

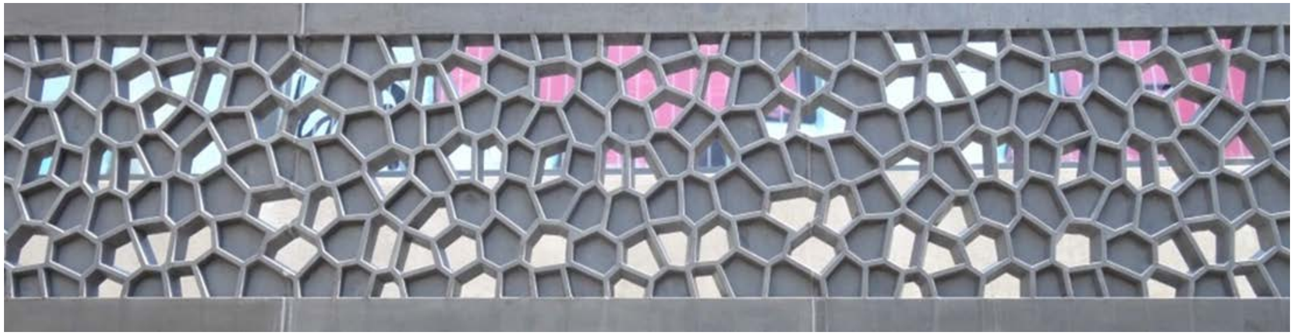
(*ようこそ次世代材料時代へ！*)

Eugen Brühwiler

Professor and Consulting Engineer

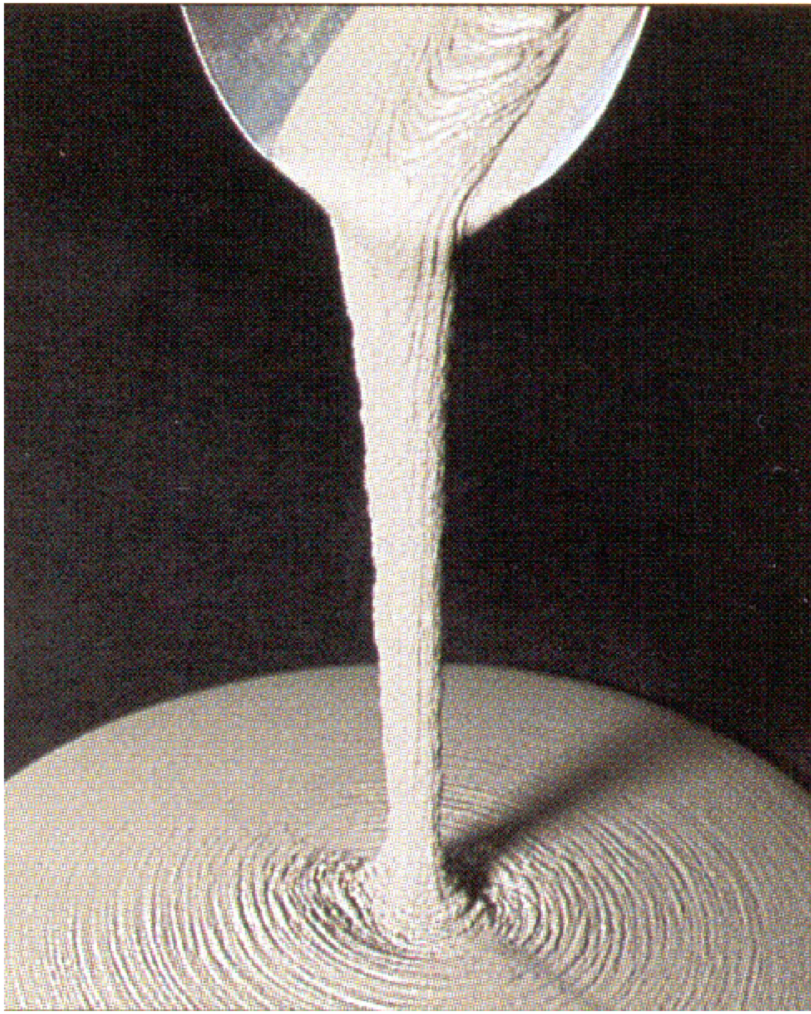
EPFL – *Swiss Federal Institute of Technology*

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))

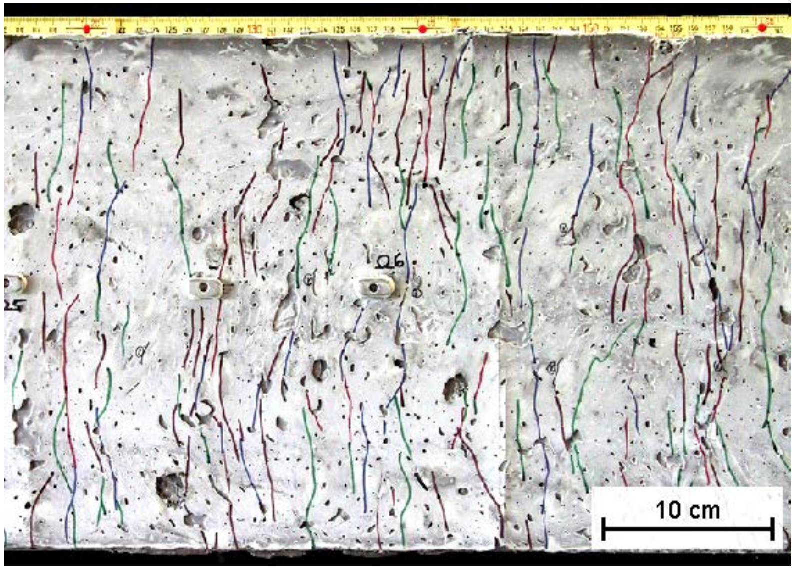
- 650-900 kg/m³ binders(結合材) (cement, *limestone filler*, micro-silica and fine-particles(quartz, basalt, etc) with a grain size less than 1.0 mm and *superplasticizer)*
- Water/Binder ratio: 0.13-0.17 (水・結合材比)
- **Aggregates ≤** 1.0 mm(骨材)
- Straight steel fiber: 13-15 mm length(Aspect ratio: more than 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)

<u>H</u>ardening (in tension) (引張ひずみ硬化)

<u>I</u>mpermeable (compact matrix: powders and particles)(不透水・気性)

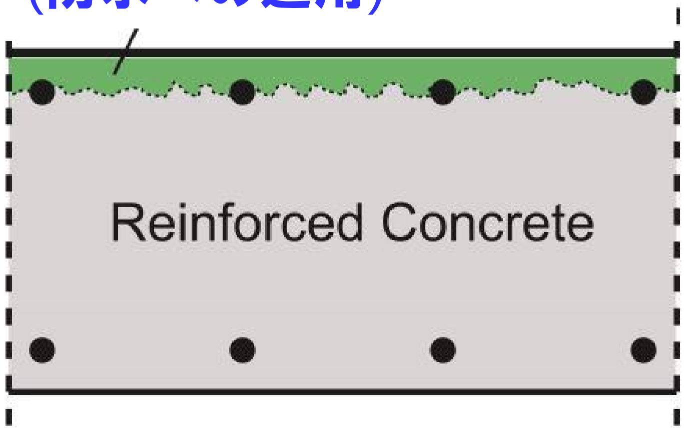
<u>F</u>iber reinforced (steel fibers *l*=15mm, *l/d*>65; > 3 vol.%)(繊維で補強)

<u>COM</u>posite(複合)

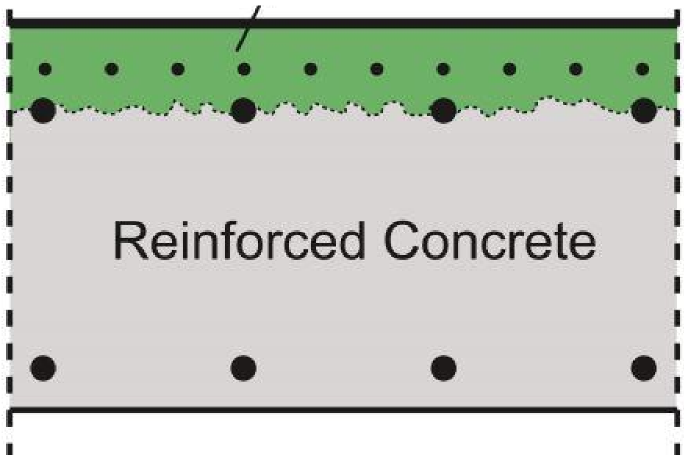
➔ <u>*HIFCOM*</u>

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)

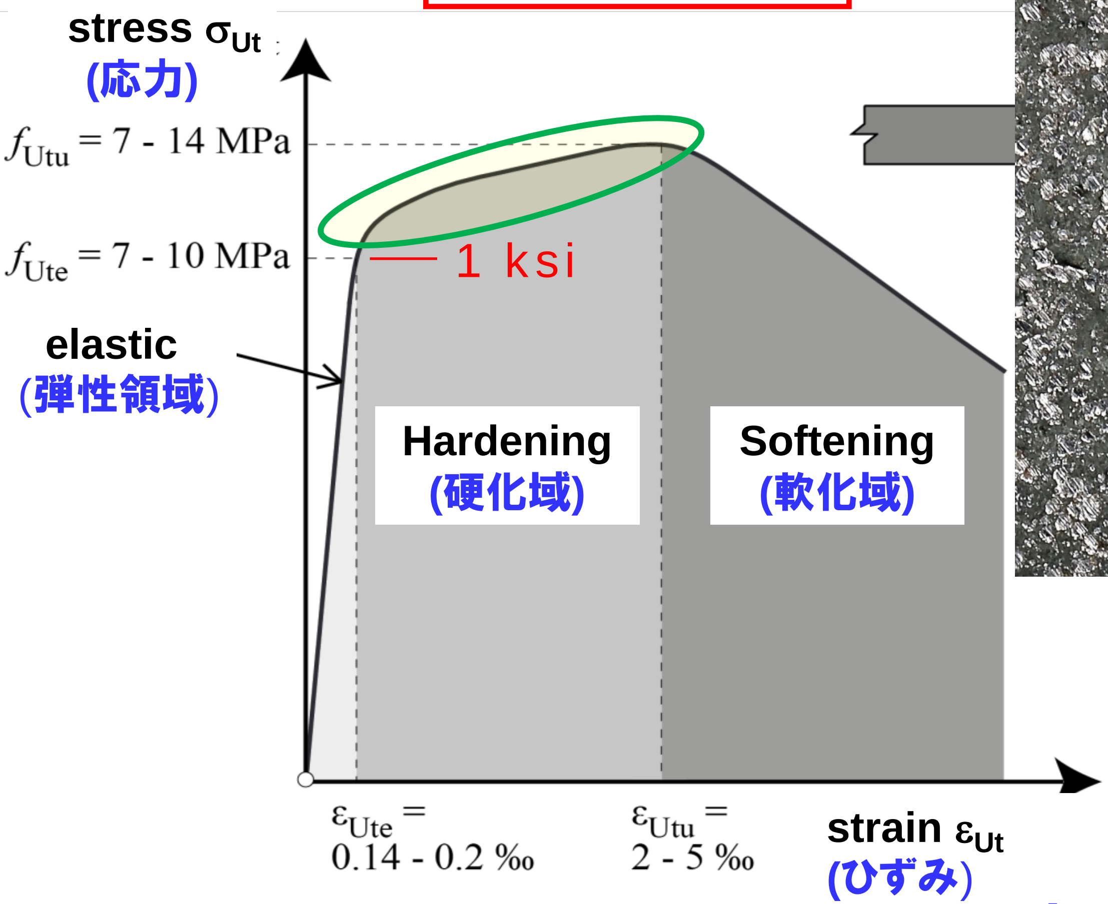


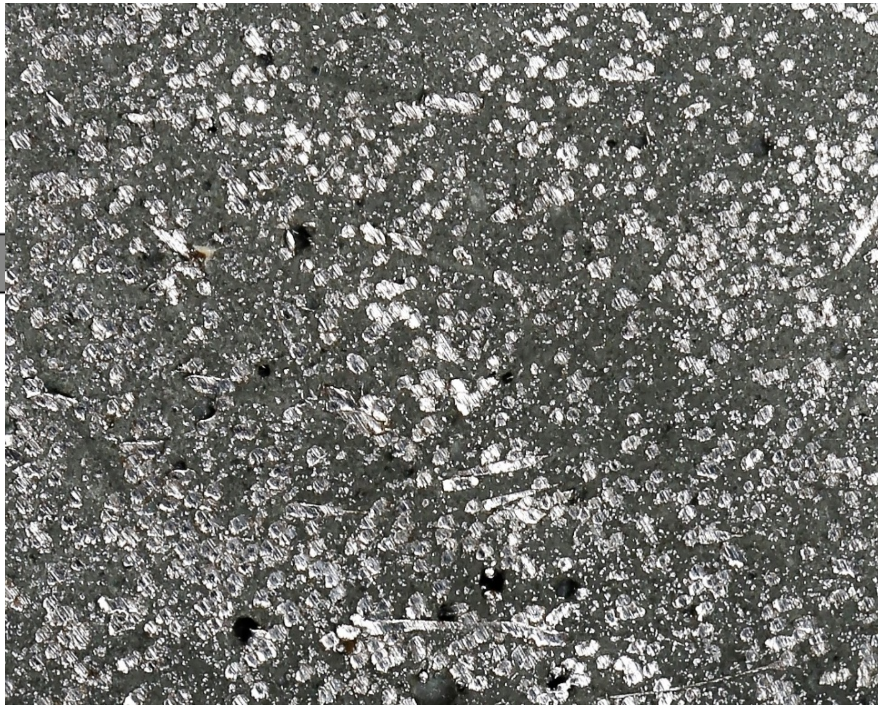
- ***composite behavior of (R-)UHPFRC – RC elements*** (RC部材との複合挙動)
- ***Research at EPFL since 1999*** (1999年から研究開始)
  (10 completed doctoral thesis and about 30 peer-reviewed papers)(10人の学位と30編の査読論文)

UHPFRC Materials(材料特性)

UHPFRC tensile behaviour(引張り挙動)

UHPFRC





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

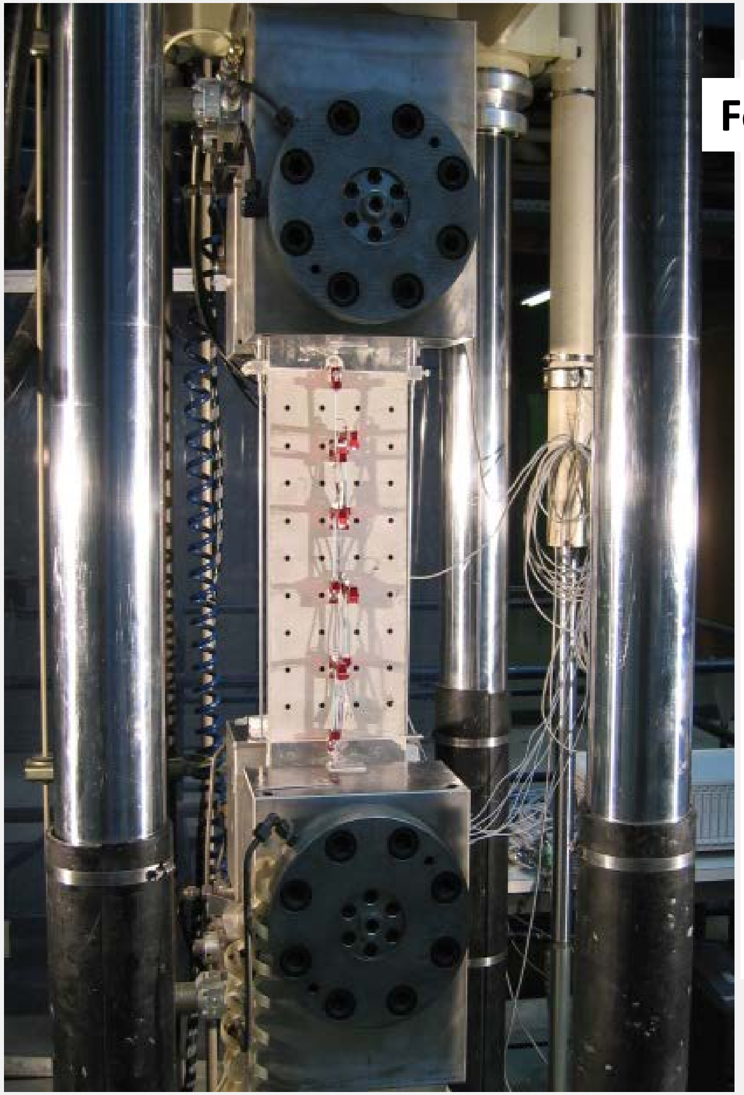
Modulus of elasticity:
45 – 50 Gpa (7’000 ksi)

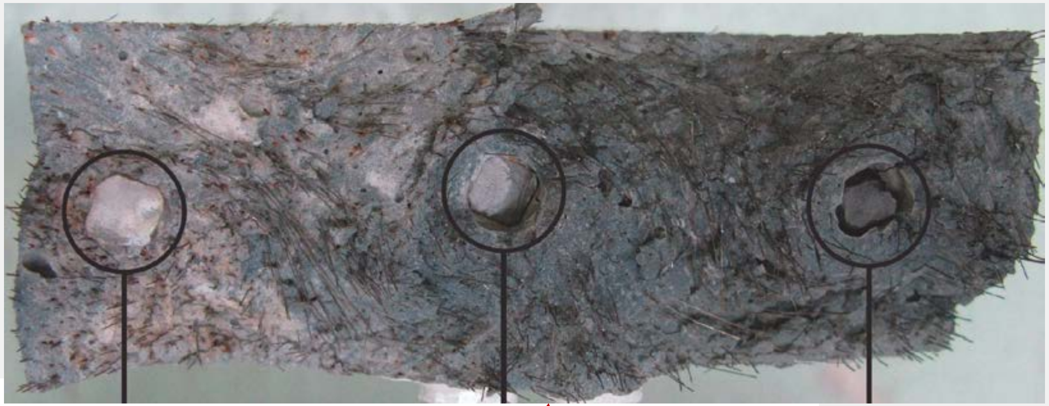
➔ Strain hardening UHPFRC: (引張りひずみ硬化特性)

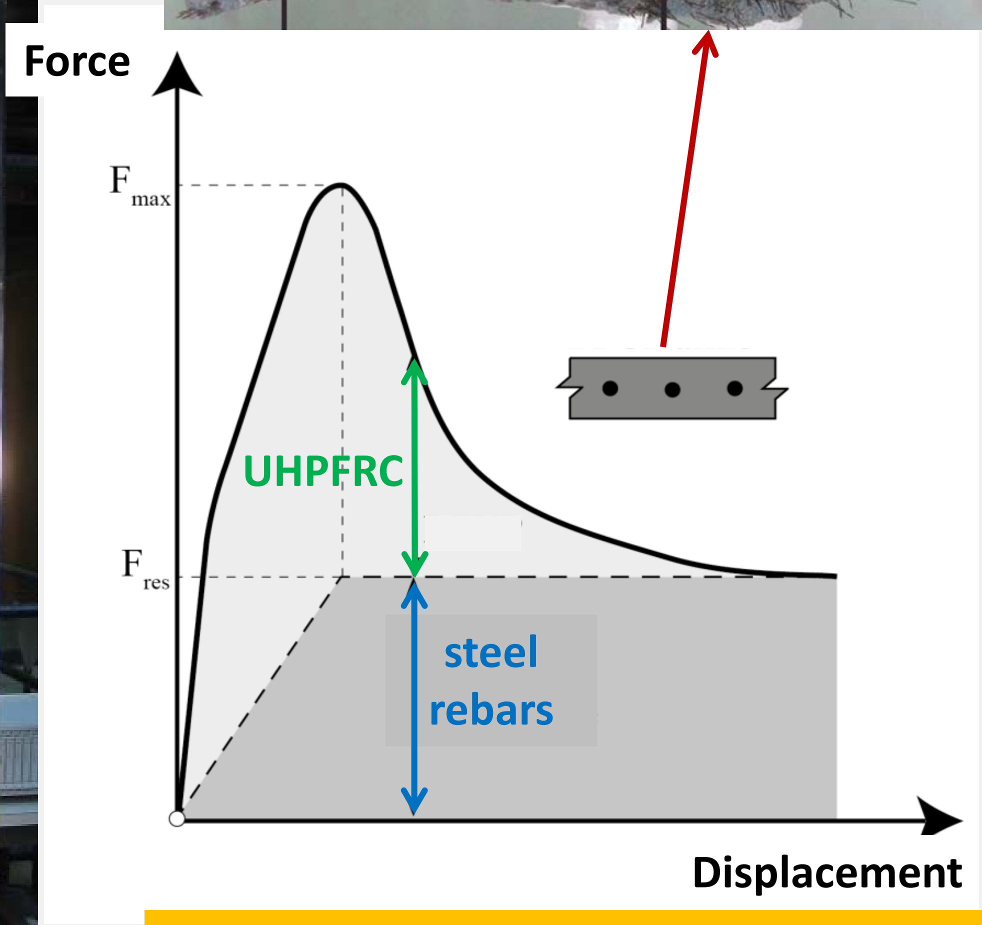
min. 3 Vol.-% steel fibres (*l*/*d*>65)

R-UHPFRC

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



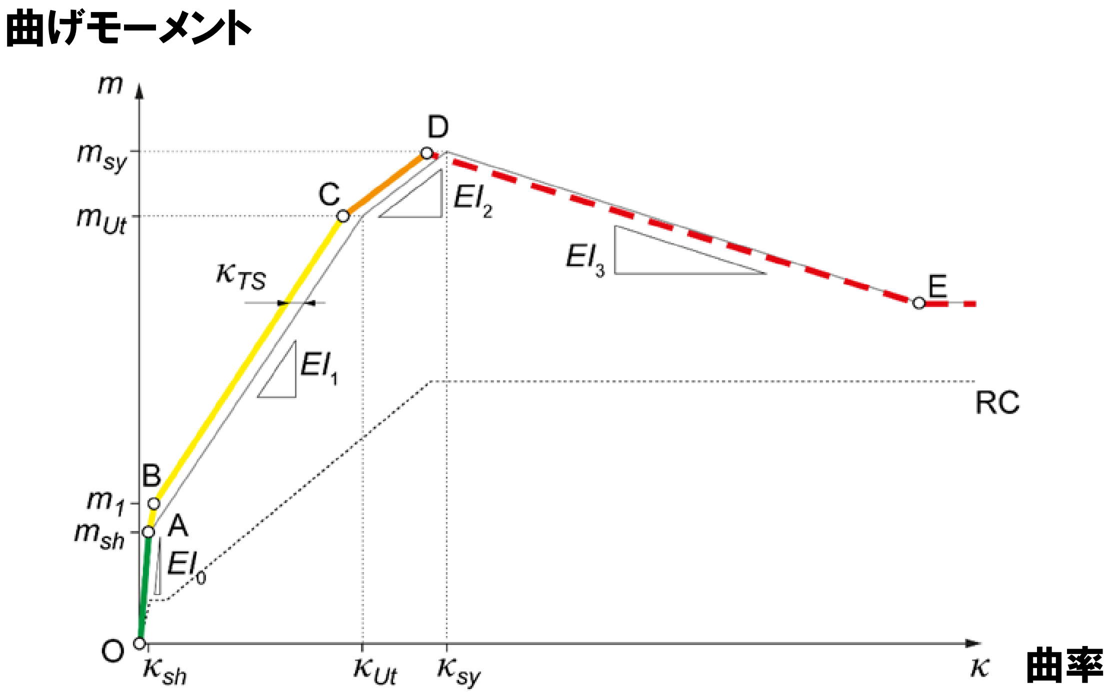


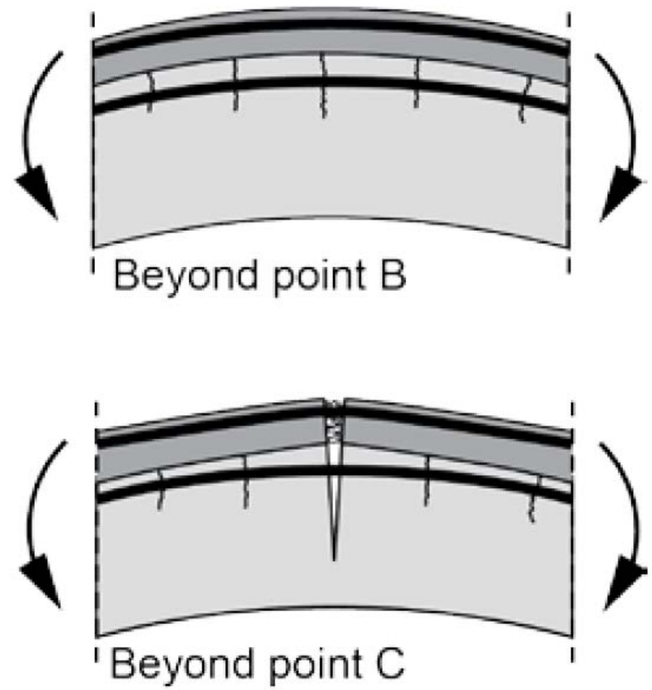


➔ Superposition of UHPFRC and rebar responses (鉄筋との協働)

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)

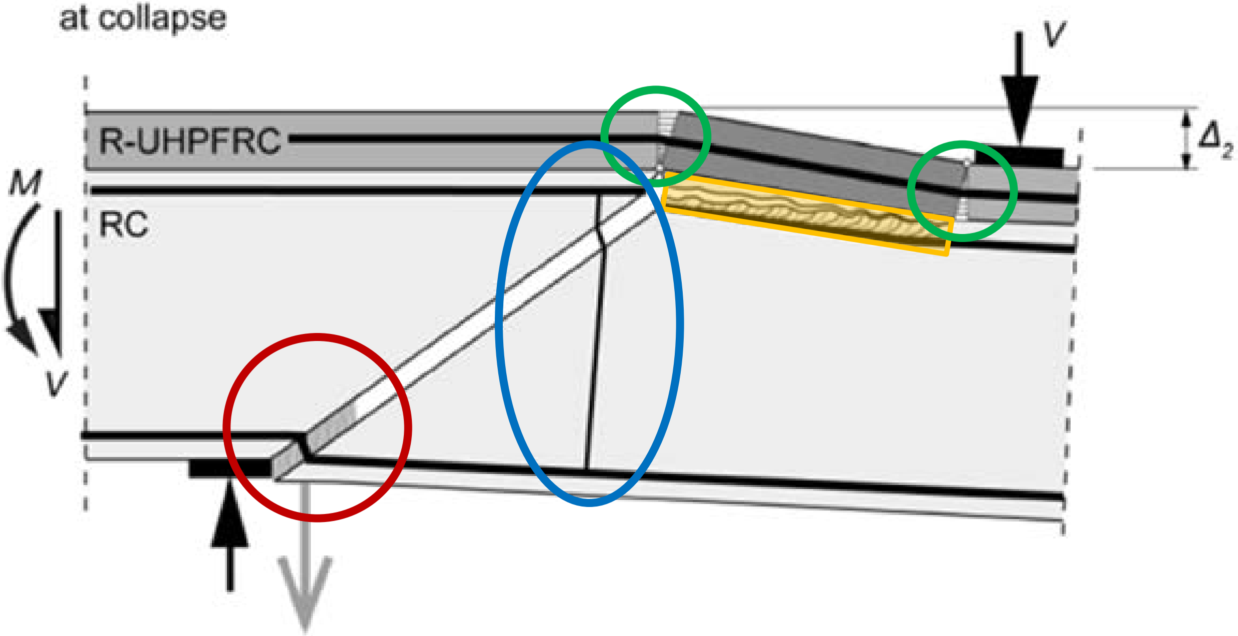




➔ Multilinear relation predicts the bending behaviour of any type of composite element (beams or slabs) with sufficient precision.
(曲げ荷重下において梁および床板部材に対して多直線関係を仮定)

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

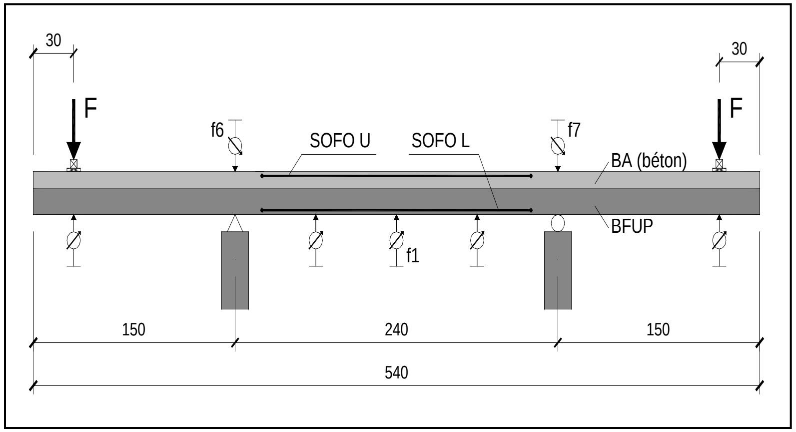
Ultimate resistance under combined shear and bending
(せん断と曲げの組み合わせ下での終局耐力)

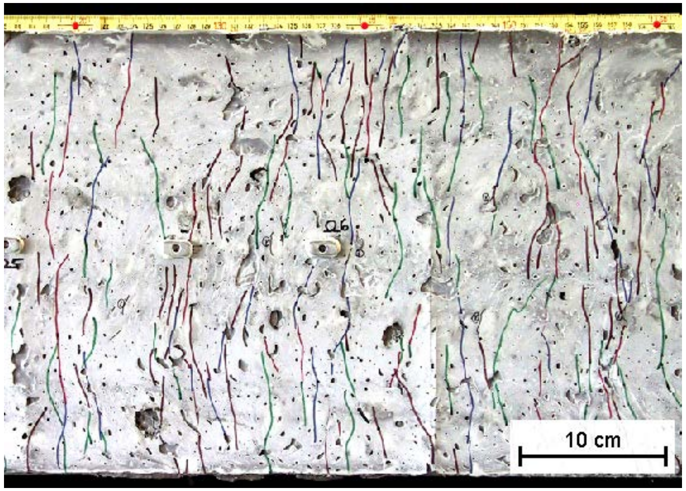


Ultimate shear resistance : $V_R = V_{Rc} + V_{Rs} + V_{RU}$
(終局せん断耐力算定式)

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)

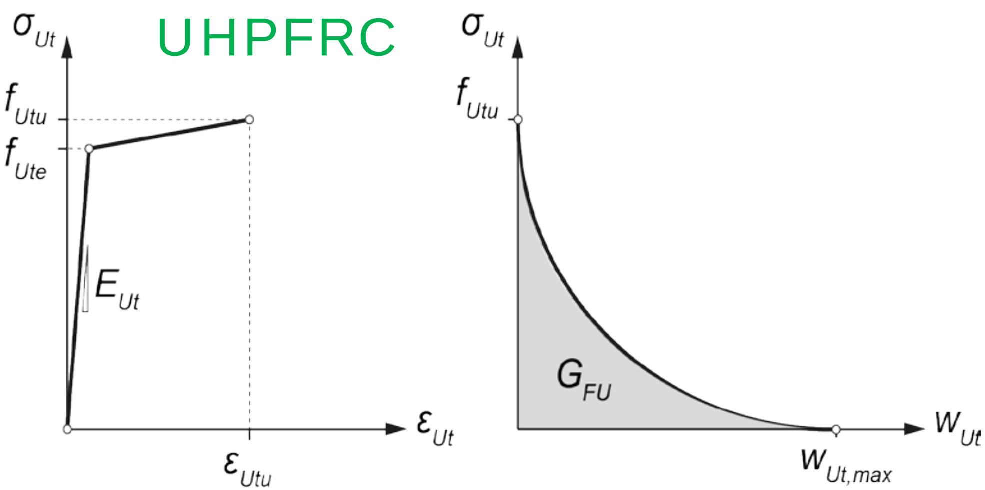


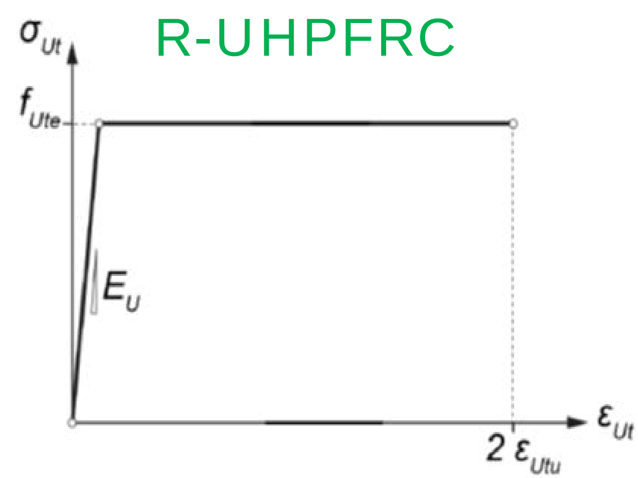


Crack pattern at ultimate load
(終局荷重時のひび割れ状況)

MCS-EPFL : thesis K. Habel, 2004

UHPFRC Properties & Types (特性とグレード)





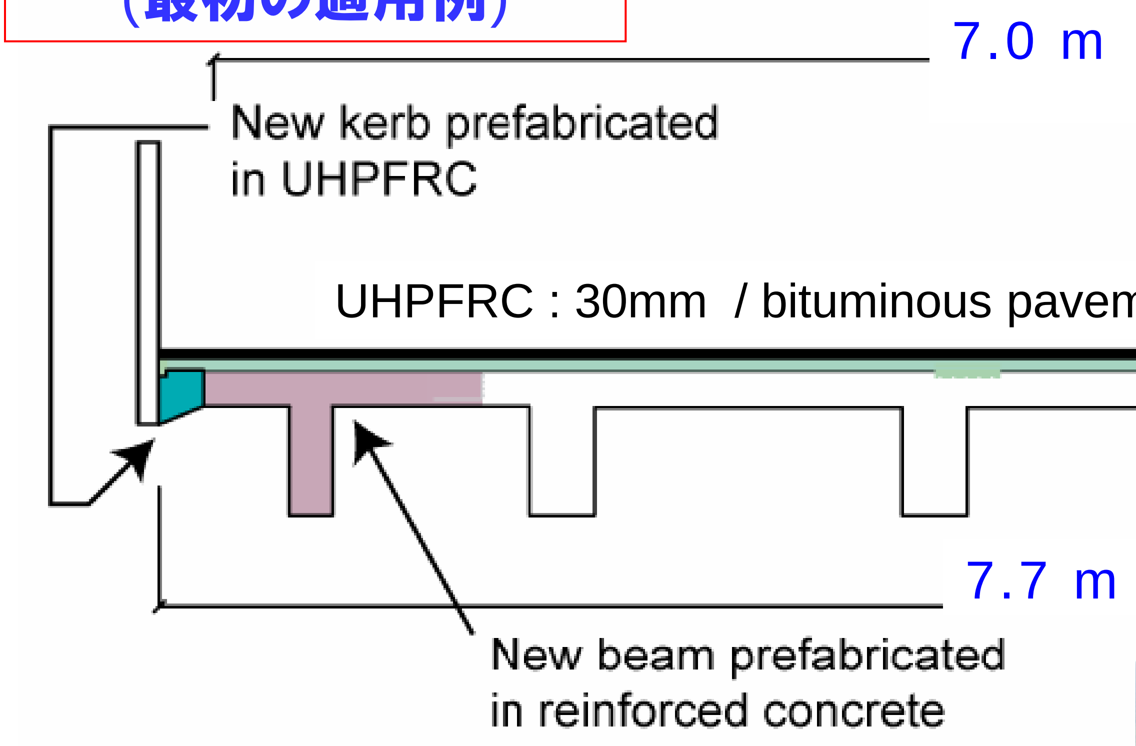
UHPFRC Type (グレード)	U0	UA	UB
Elastic tensile strength, f_{Utek} Mpa (弾性引張強度)	≥ 7,0	≥ 7,0	**≥ 10,0**
Ratio : f_{Utuk} / f_{Utek} (比率)	> 0,7	> 1,1	> 1,2
Hardening, ε_{Utu} ‰ (ひずみ硬化)	-	> 1,5 strain hardening	> 2,0
Compressive strength, f_{Uck} Mpa (圧縮強度)	≥ 120	≥ 120	≥ 120

➔ 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 :

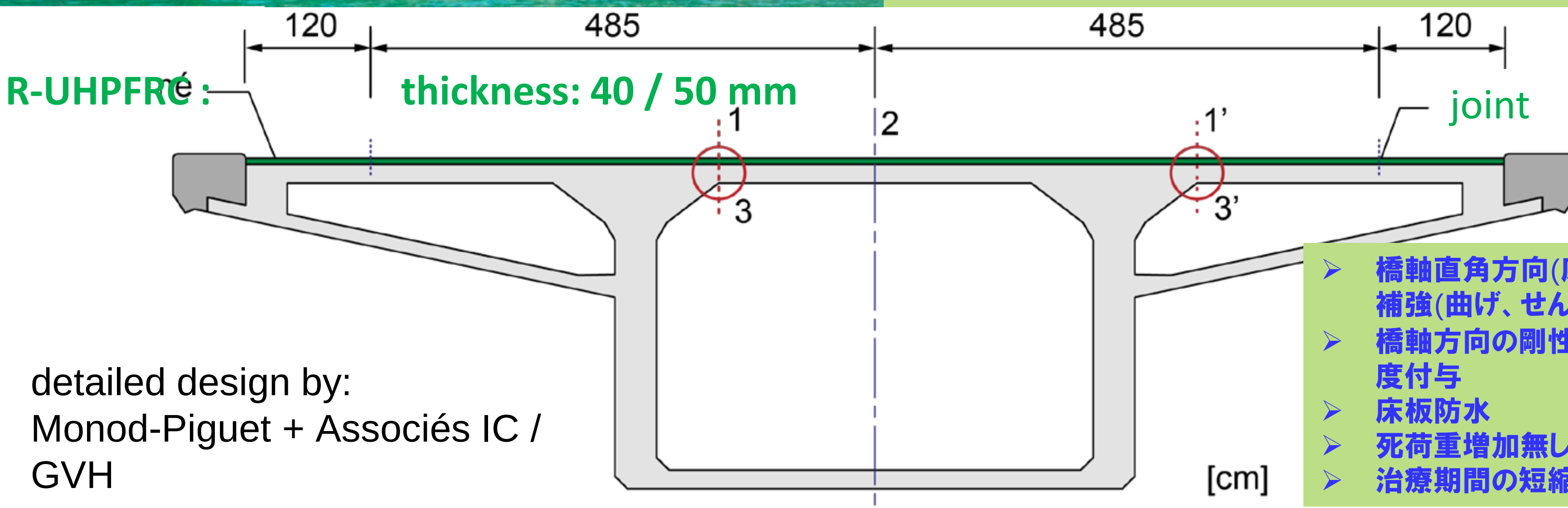
- visual inspection (目視点検)
- sampling tests (サンプル試験)

適用例2

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

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



- 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

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

適用例2

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

Photo: July 4, 2014

July/Aug. 2014 & June 2015:
Casting of 1’200m^3 UHPFRC on each 2.1km long viaduct.
(**施工面積**:1200m^3, **延長**:2.1km)

Intervention cost:
200 Euro / m^2 deck surface.
(**コスト**:200**ユーロ**／m^2)

Contractor:
Walo Bertschinger SA

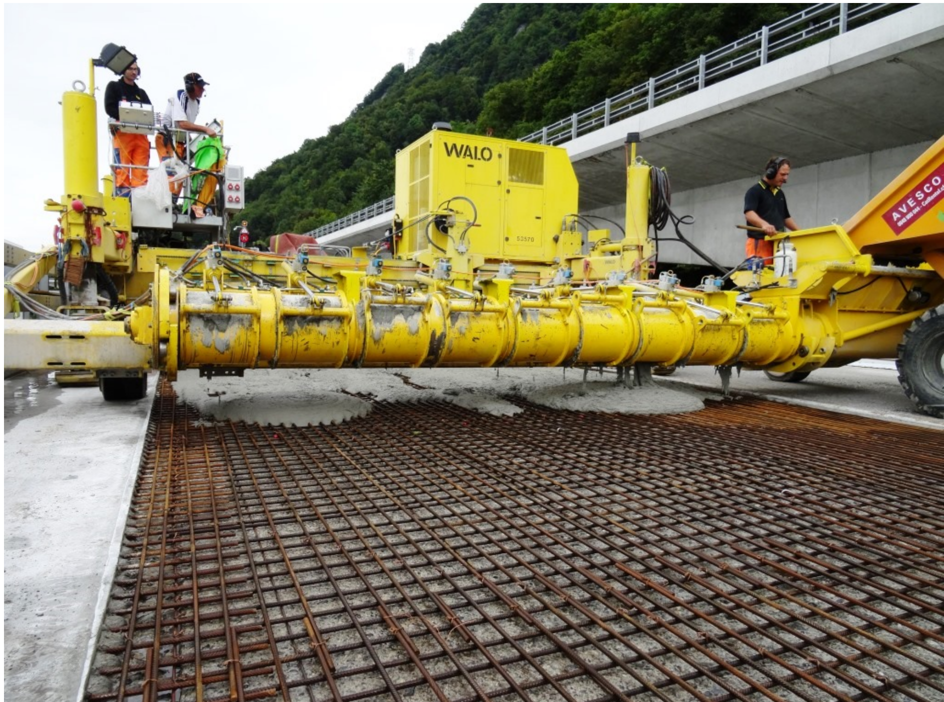
適用例2

UHPFRC ready-mix plant on site

現場生コン
プラント

適用例2

適用例2

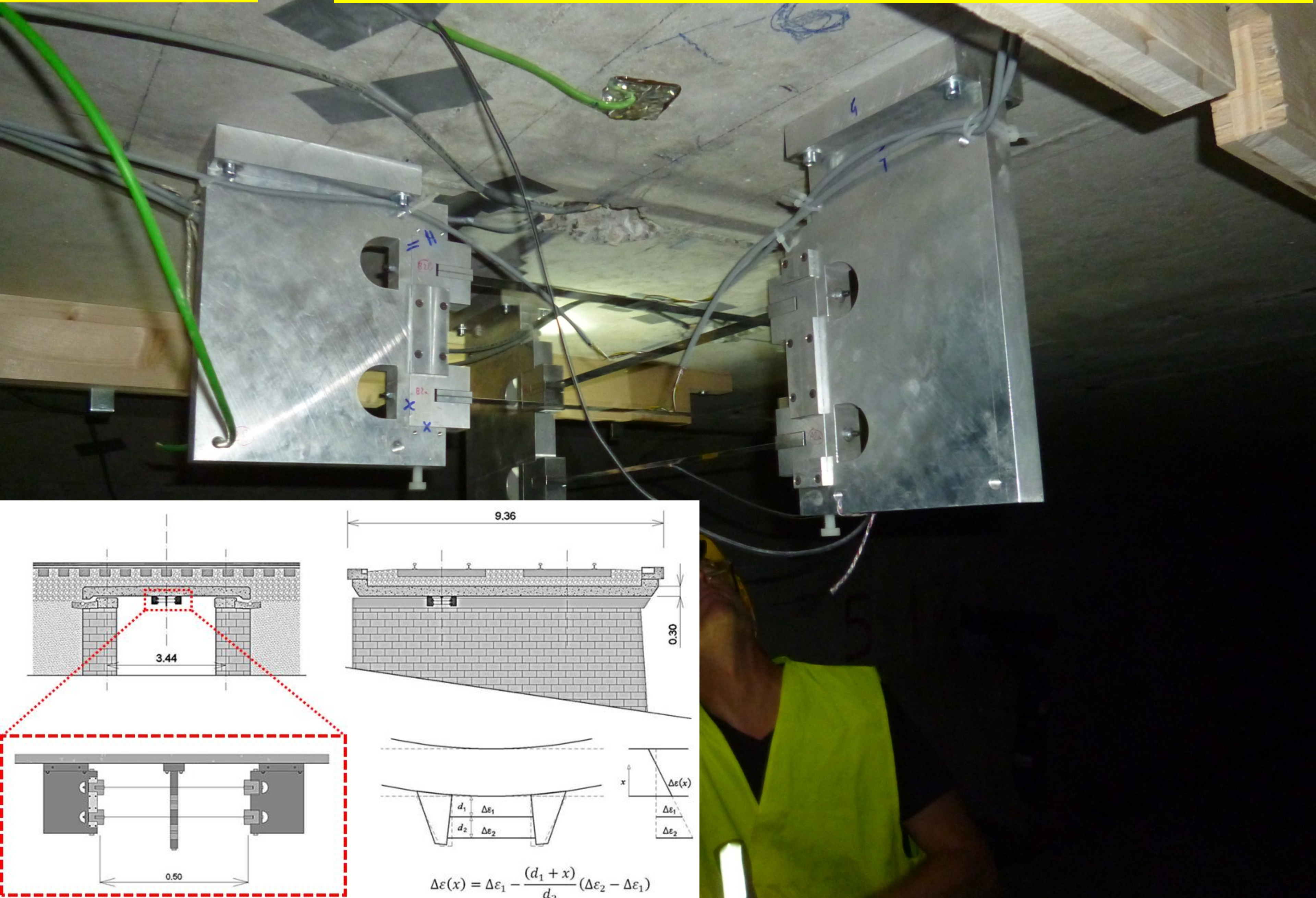


適用例2

maximum slope: 7%

curing

適用例2　施工後の長期モニタリングシステム

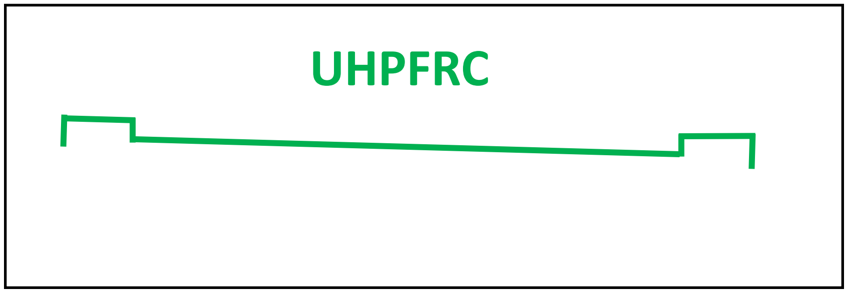


$$\Delta\varepsilon(x) = \Delta\varepsilon_1 - \frac{(d_1 + x)}{d_2}(\Delta\varepsilon_2 - \Delta\varepsilon_1)$$

適用例3

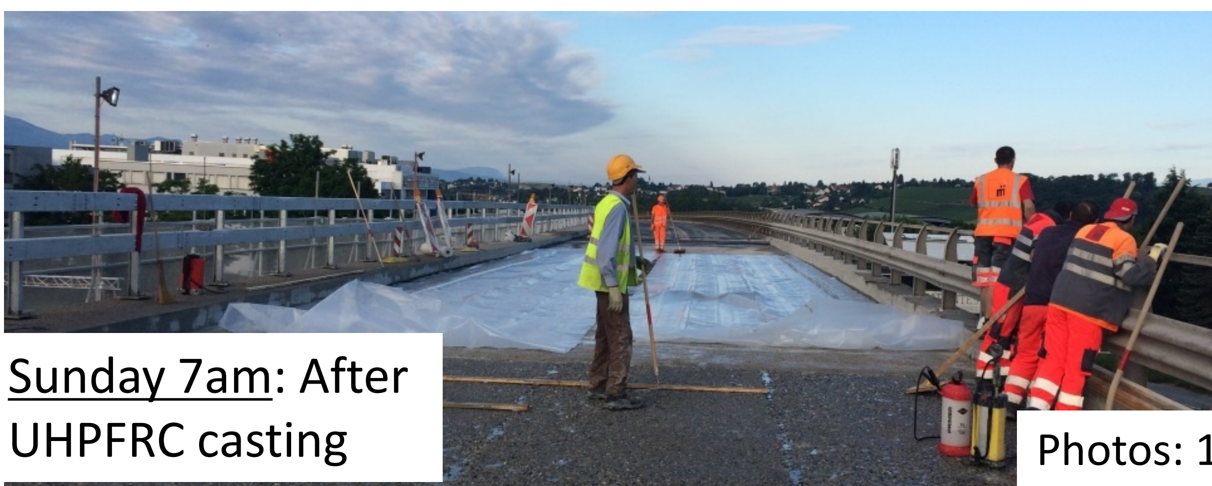
Improvement of the Cudrex Viaduct(高架橋の改修)～Concept: progress in 8 work phases of 36 hours (week-end: 5 pm Sat.-5 am Mon.)(8ブロックに分けて36時間の急速施工を実現;土曜午後5時～月曜午前5時)

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3

適用例3

UHPFRC casting, 31 July 2016

適用例3

適用例4

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4

適用例5 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6

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

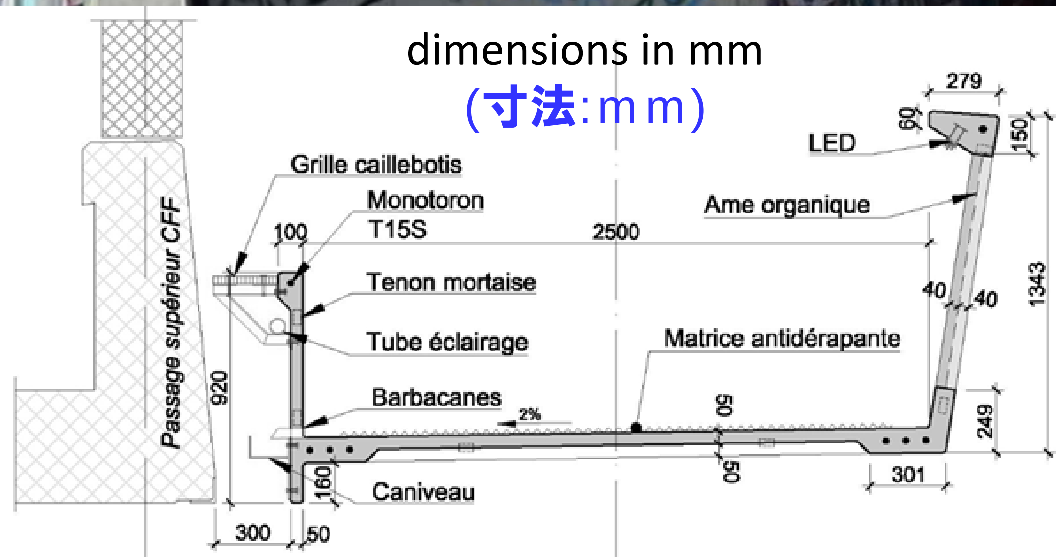
適用例6

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

新設橋への適用例: ローザンヌの歩道橋

Martinet Pedestrian Bridge, Lausanne, Switzerland, 2015

Designed by Rita Galrito, Eugen Brühwiler, Didier Robyr

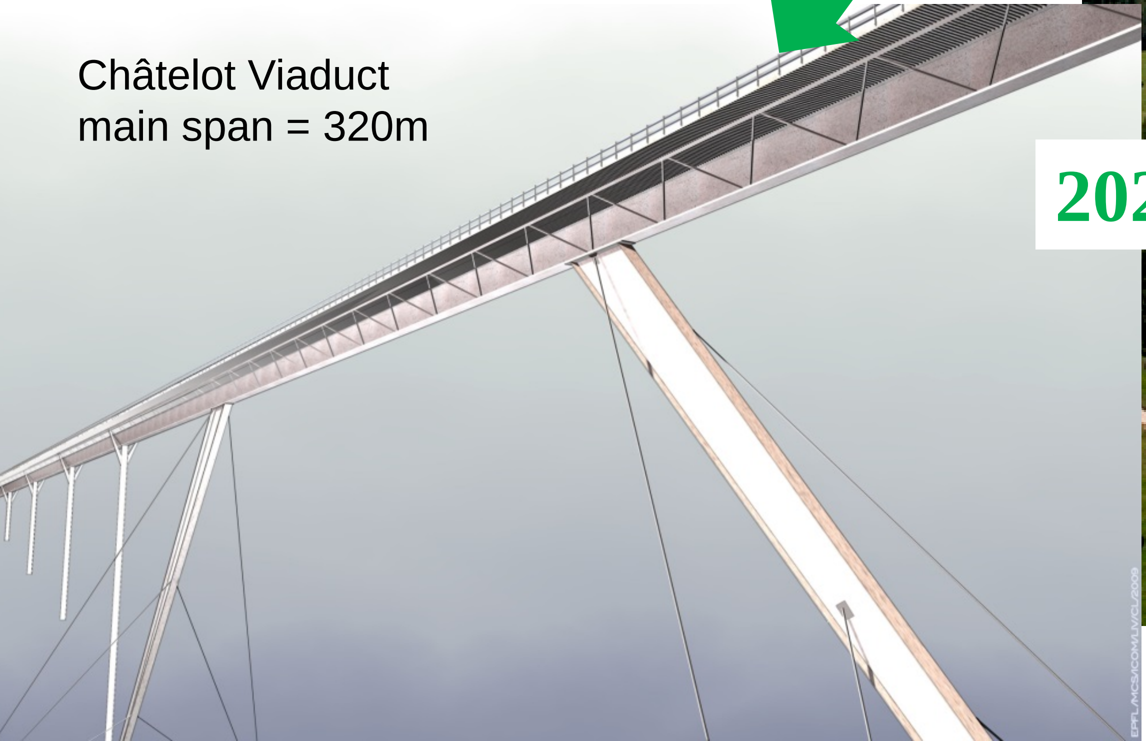


新設橋への適用例

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

OUTLOOK

Martinet Footbridge, 2015



Châtelot Viaduct
main span = 320m

2025

Photomontage: MCS-EPFL
www.sunwindenergy.com