



東北発 フライアッシュの有効利用による コンクリート構造物の高耐久化を 目指して

2018年10月4日

日本大学工学部
岩城一郎



東北地方の現状

- 豊かな自然，急峻な地形，積雪寒冷地，太平洋 & 日本海
- 日本海沿岸の塩害
- 凍害によるスケーリング
- 凍結防止剤の作用による劣化



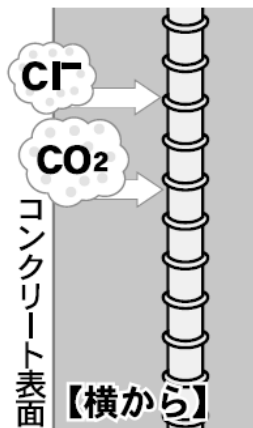
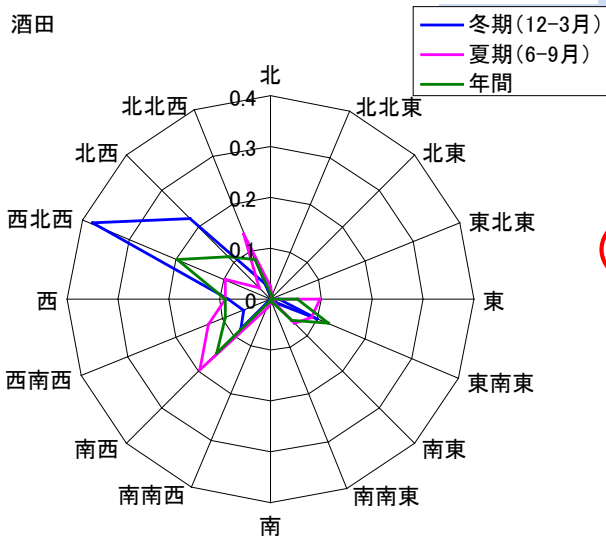
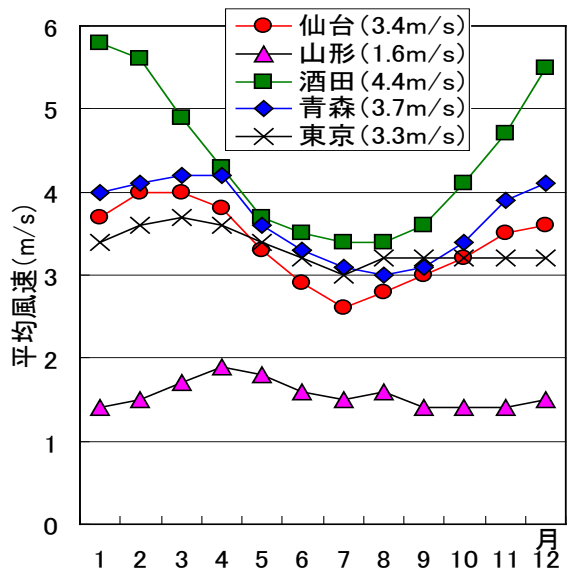
- 東北地方におけるコンクリート構造物の耐久性向上検討委員会（委員長：三浦尚東北大学名誉教授）→東北地方におけるコンクリート構造物設計・施工ガイドライン(案)の策定（2009）

http://www.thr.mlit.go.jp/tougi/choshi/con_guide.html

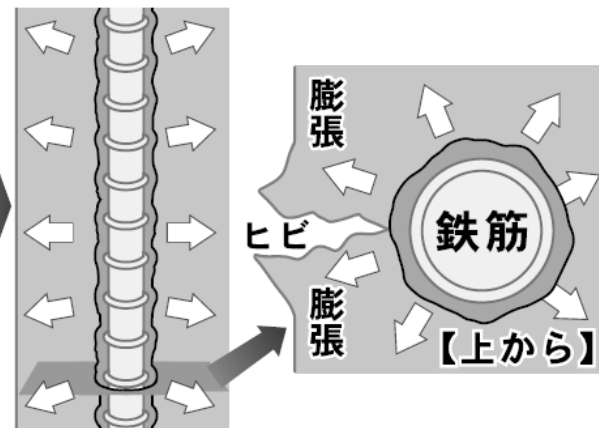




日本海沿岸の塩害橋



二酸化炭素や塩素イオンが侵入



中性化や塩害により腐食した鉄筋が膨張



凍害

1. ○内の数値は凍害危険度.

凍害危険度	凍害の予想程度
5	極めて大きい
4	大きい
3	やや大きい
2	軽微
1	ごく軽微

2. 凍害重み係数 $t_{(A)}$ 一良質骨材, または AE 剤を使用したコンクリートの場合.
 3. コンクリートの品質が良くない場合には, ----- 内の地域でも凍害が発生する.



写真-1 Dひび割れ²⁾



写真-2 パターンひび割れ²⁾



写真-3 長手方向ひび割れ²⁾



写真-4 スケールン²⁾

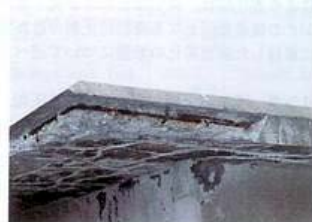


写真-5 剥落・崩壊²⁾



写真-6 ポップアウト²⁾

長谷川・藤原著:コンクリート構造物の耐久性シリーズ
凍害 より抜粋



凍結防止剤散布による劣化

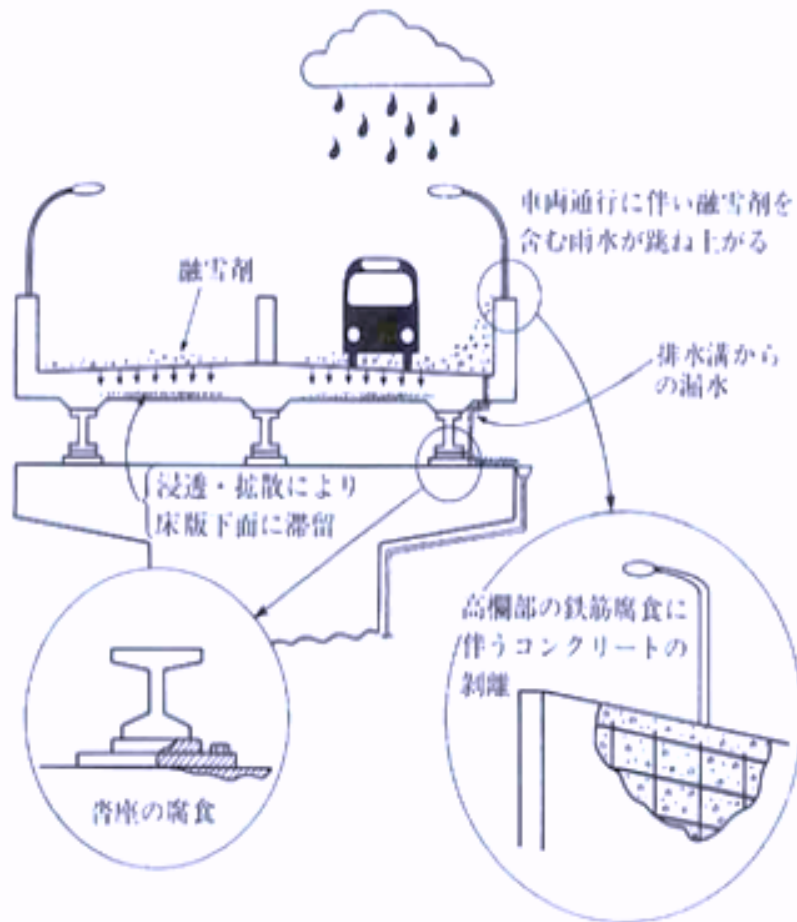


図-1 融雪剤による劣化事例²⁾

- 1991年スパイクタイヤの規制：
凍結防止剤(主にNaCl)の散布量急増(規制前の約10倍)
- JCI「融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会(1999年)」
(三浦尚委員長)
- 劣化の特徴
 - コンクリート表面の激しいスケーリングとして現れる**凍害**
 - **アルカリシリカ反応**の促進
 - コンクリート中の鋼材の急速な腐食(**塩害**)
 - **交通荷重による疲労**



**本格散布から20年しか経って
おらず多くが潜伏期にある！！**

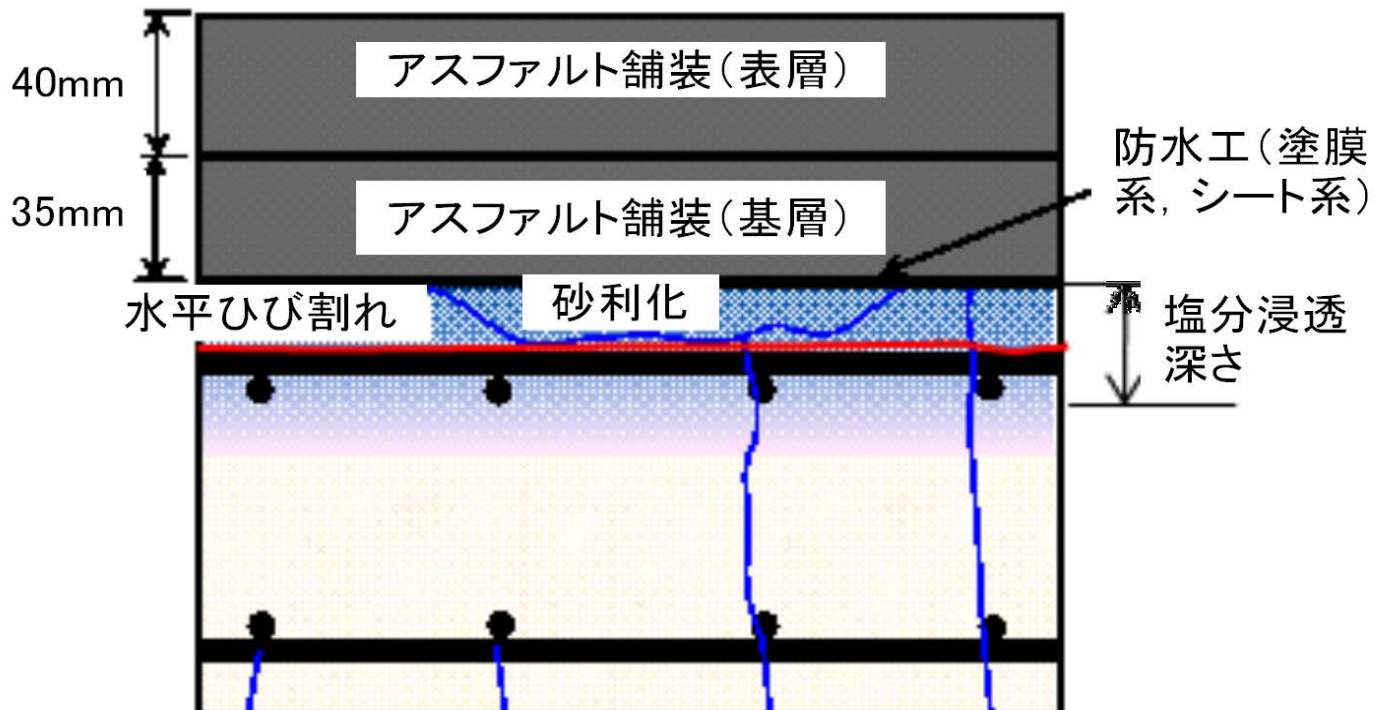


凍結防止剤による劣化事例



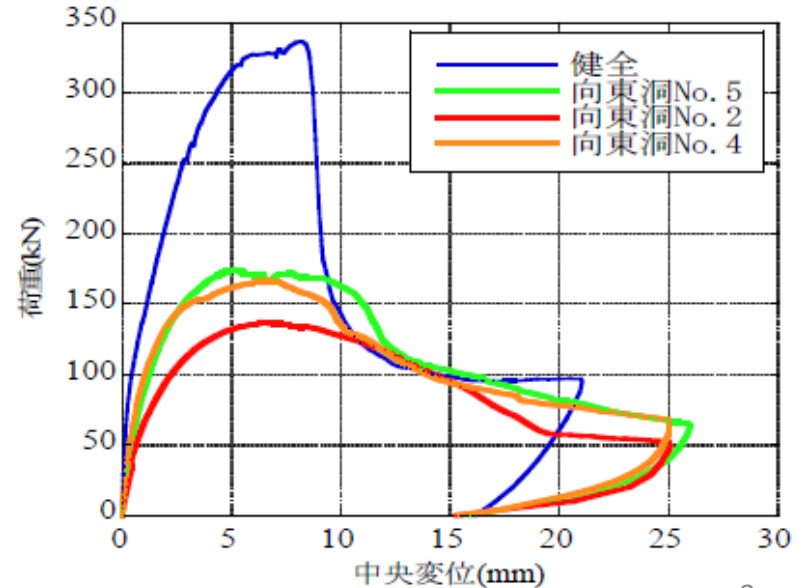
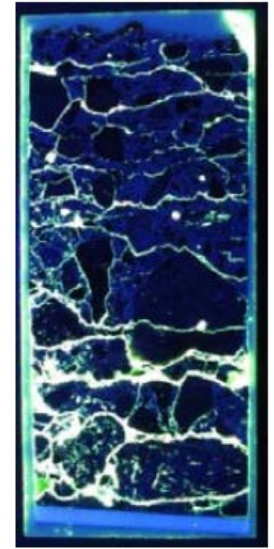
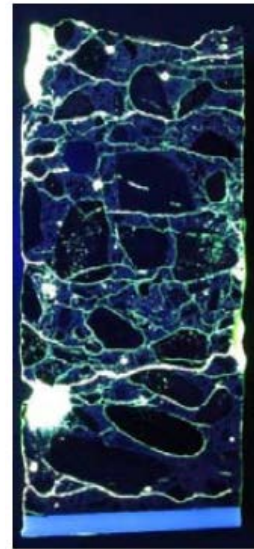


凍結防止剤によるRC床版の劣化機構





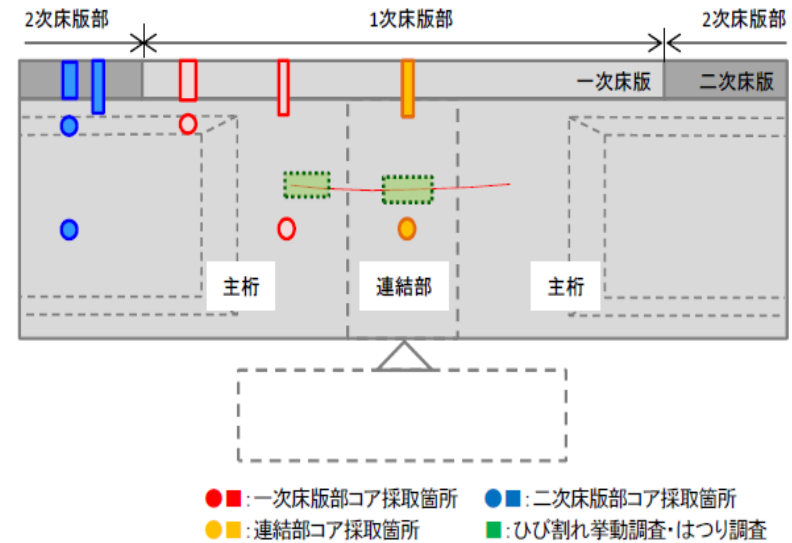
福井県におけるASR床版の劣化事例



アルカリシリカ反応で損傷した鋼道路橋RC床版の調査（北陸保全会議資料⁸より）



檜山橋におけるASR床版の劣化事例



- 八戸自動車道檜山橋（PC 3径間連続合成桁，1986年11月供用開始）
- 一次床版に著しい劣化⇔二次床版は変状なし
- 2002年・2003年度の調査より，ASR劣化であることが判明→一次床版は取り替え



橋梁点検結果によるASRの発生状況と反応性岩石の分布

凡例
凍結抑制剤散布量の平均散布量
(データ: H18~H20)

- : $0t/km \leq W < 10t/km$
- : $10t/km \leq W < 20t/km$
- : $20t/km \leq W < 30t/km$
- : $30t/km < W$

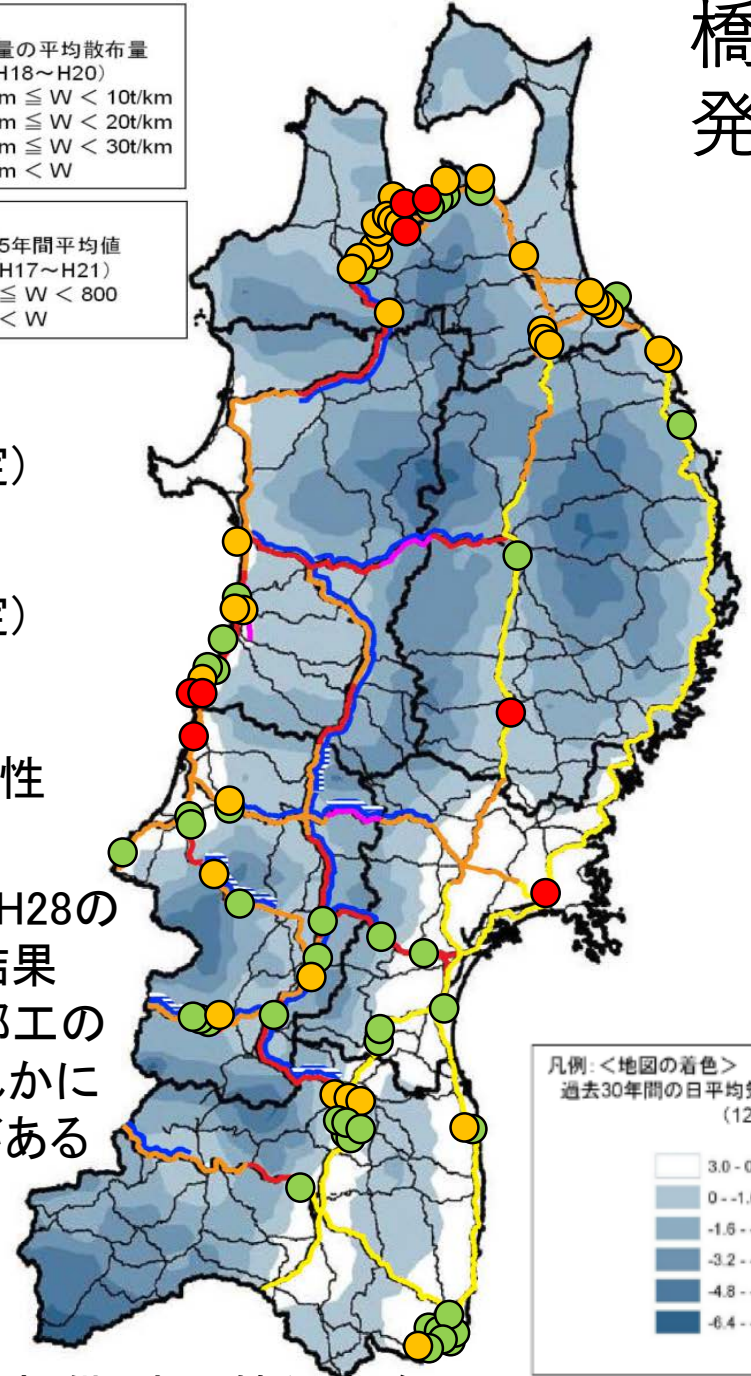
凡例
累加降雪量過去5年間平均値
(データ: H17~H21)

- : $400 \leq W < 800$
- : $800 < W$

- ASR (確定)
- ASR (推定)
- ASR 可能性

* H24~H28の点検結果
* 上下部工のいずれかにASRがある橋梁

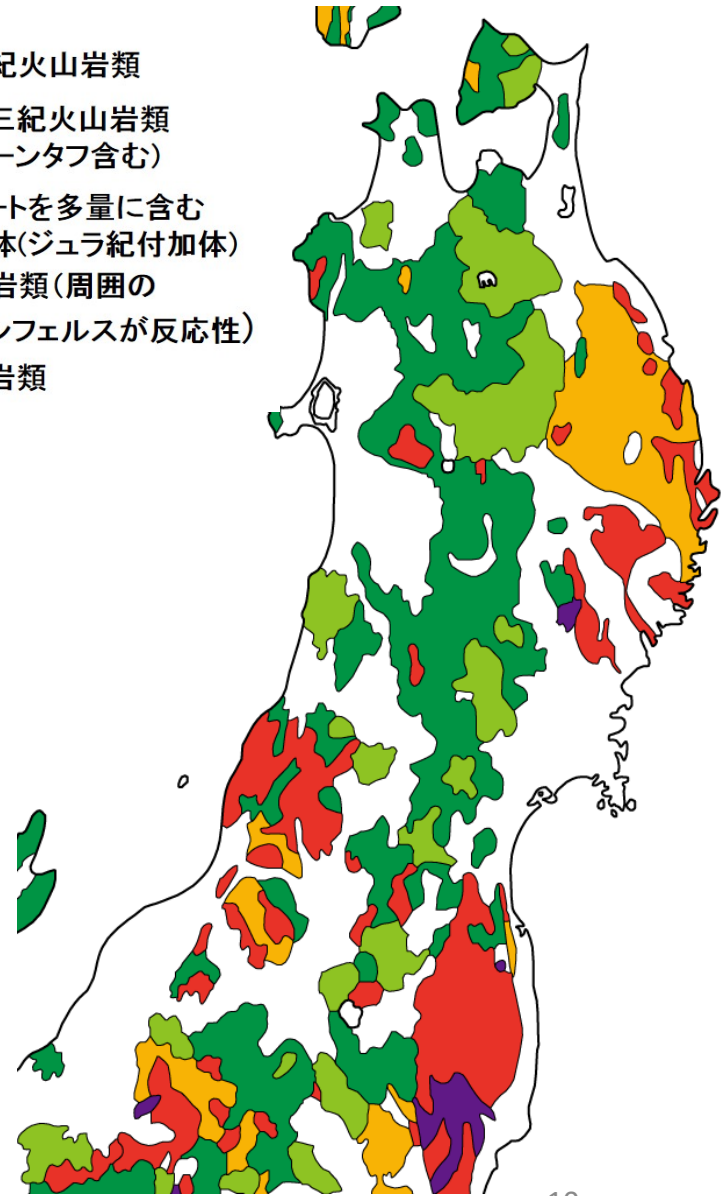
(データ提供: 東北技術事務所)



凡例: <地図の着色>
過去30年間の日平均気温
(12,1,2月の3ヶ月)

- 3.0-0
- 0--1.6
- -1.6--3.2
- -3.2--4.8
- -4.8--6.4
- -6.4--8

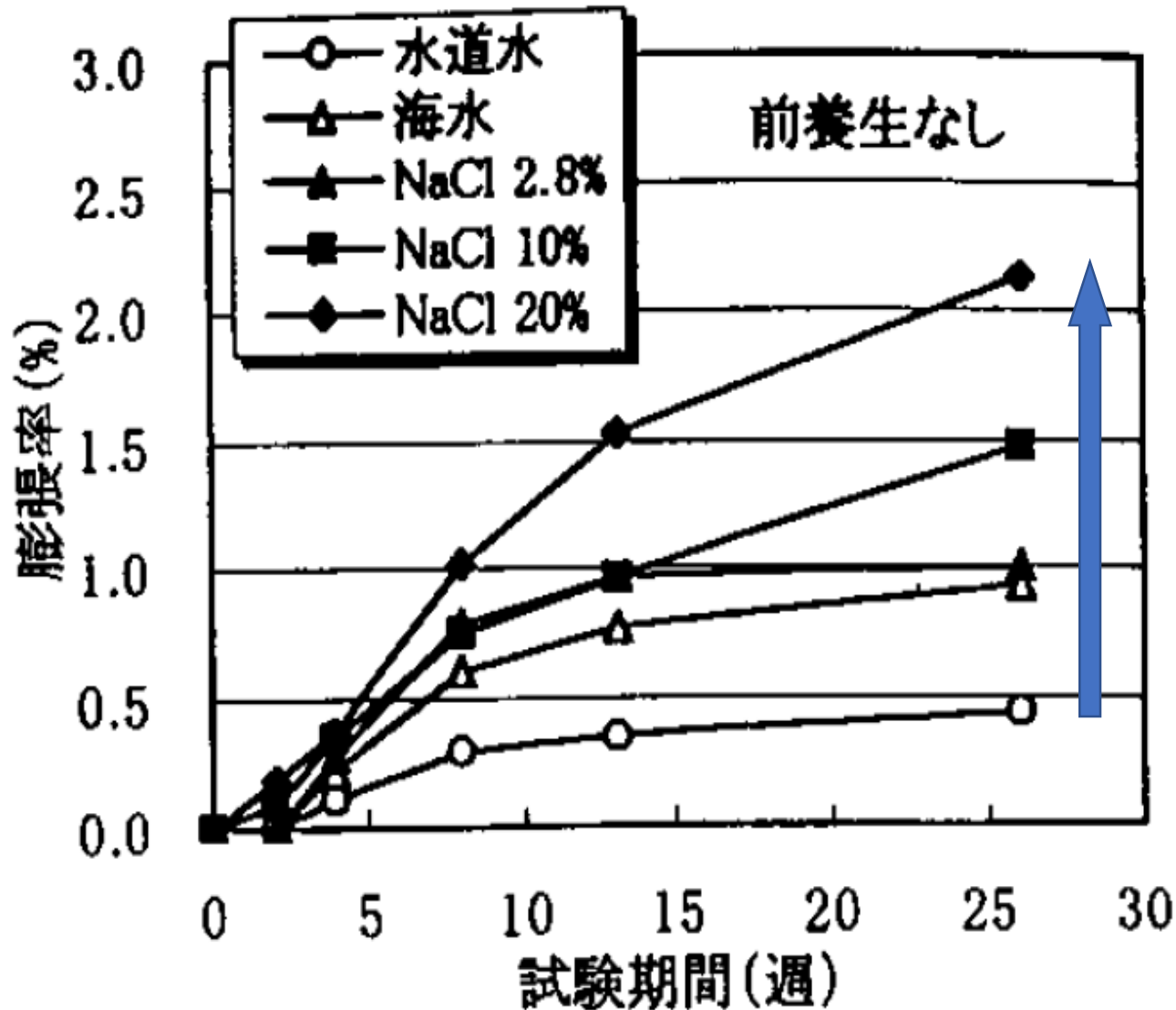
- 第四紀火山岩類
- 新第三紀火山岩類 (グリーンタフ含む)
- チャートを多量に含む付加体(ジュラ紀付加体)
- 花崗岩類(周囲のホルンフェルスが反応性)
- 変成岩類



(データ提供: 金沢大学 鳥居教授)



塩分環境下におけるASR膨張



従来の試験法で無害と判定されても、外部からNaClが供給されると有害なASR膨張を引き起こす恐れがある。



凍結防止剤(NaCl)散布を想定したASR試験方法(SSW)の提案



SSW試験方法

反応性判定試験方法である「コンクリートのアルカリシリカ反応性判定試験方法(JCI-AAR-3)」において、供試体を包む吸取り紙に含まれる真水を20%NaCl水溶液に変える点のみが異なる。

現場配合のコンクリートに対し、 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱、もしくは $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ 角柱供試体を用い、セメントの全アルカリが $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ で1.2% になるようNaOHで調整。材齢1日で脱型後、 40°C で26週間、20%NaCl溶液で濡らした吸取り紙で包み、密閉されたビニール袋の中で保管。

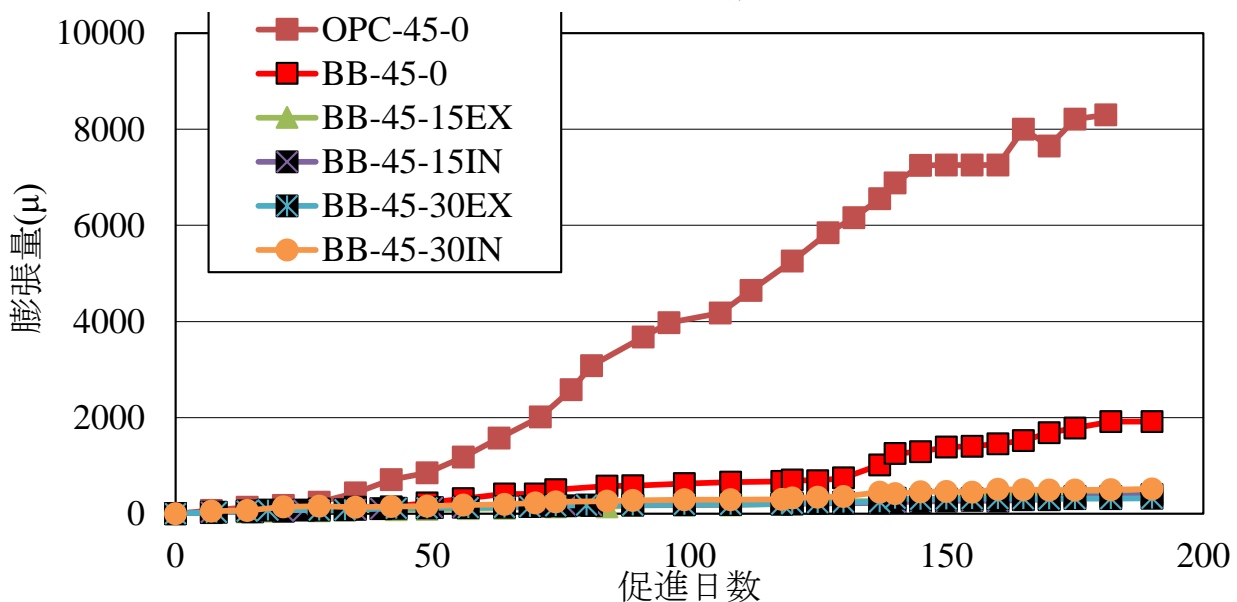
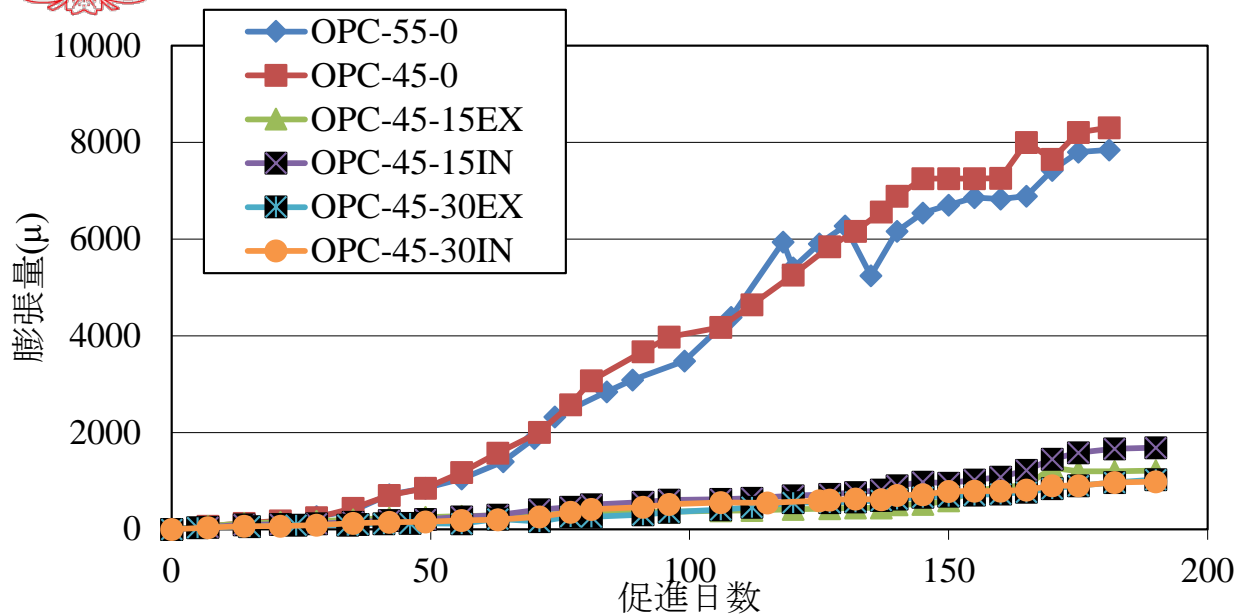


混和材によるASR抑制効果確認試験

ID	セメント	水セメント比	FA置換率	内割/外割
OPC-55-0	普通	55%	0%	-
OPC-45-0	普通	45%	0%	-
OPC-45-15EX	普通	45%	15%	外割
OPC-45-30EX	普通	45%	30%	外割
OPC-45-15IN	普通	45%	15%	内割
OPC-45-30IN	普通	45%	30%	内割
BB-45-0	高炉	45%	0%	-
BB-45-15EX	高炉	45%	15%	外割
BB-45-30EX	高炉	45%	30%	外割
BB-45-15IN	高炉	45%	15%	内割
BB-45-30IN	高炉	45%	30%	内割



FA and/or BBのASR抑制効果

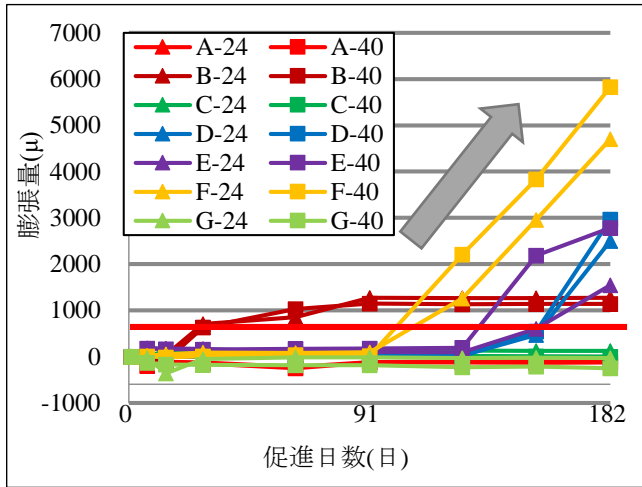


ID	182日目
	最終膨張量(μ)
OPC-55-0	7840
OPC-45-0	8305
OPC-45-15EX	1195
OPC-45-15IN	1667
OPC-45-30EX	971
OPC-45-30IN	967
BB-45-0	1916
BB-45-15EX	419
BB-45-15IN	356
BB-45-30EX	312
BB-45-30IN	487

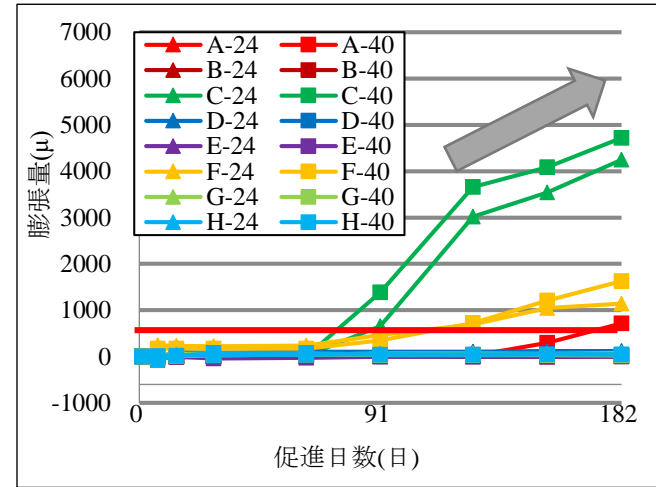
OPCに対し，BBをベースにFAを内割or外割置換することにより優れたASR抑制効果を発揮



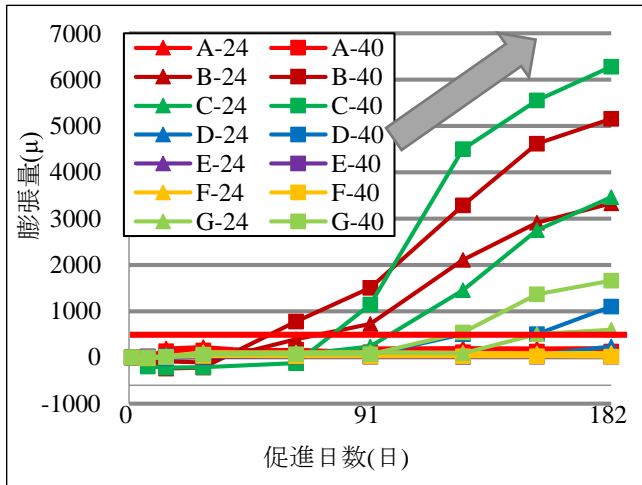
北東北3県におけるSSW試験結果



シリーズⅠ（青森県）



シリーズⅡ（秋田県）



シリーズⅢ（岩手県）

膨張供試体

- シリーズⅠ：7工場中 **4工場**
- シリーズⅡ：8工場中 **3工場**
- シリーズⅢ：7工場中 **4工場**



ロハスの橋プロジェクト

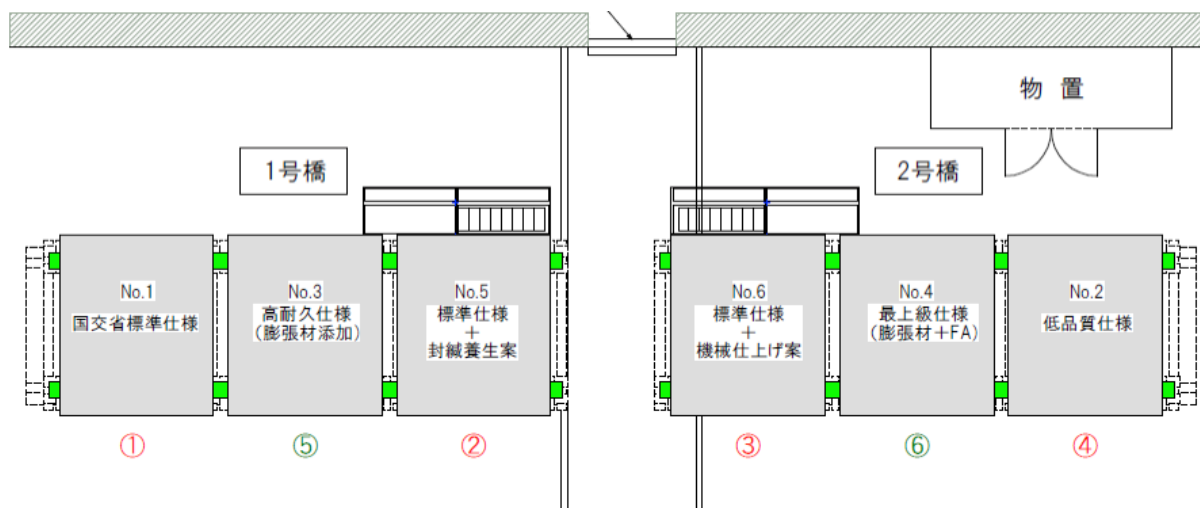


実物大モデルにより，ロハスの橋（丈夫で長持ちする橋）を実現するプロジェクト：タイプの異なる6種類のRC床版を作製
→ 1年間にわたる実測データを収集→各種耐久性試験を実施
→ マルチスケール解析により100年先の耐久性を予測



プロジェクトの概要

床版ID	コンクリートの品質	水セメント比	空気量	使用技術
No.1標準	標準	55%	4.5%	
No.2低品質	低品質	65%	3.0%	
No.3高耐久	高耐久	45%	6.0%	膨張材使用
No.4最上級	最上級	45%	6.0%	膨張材使用+FA20%外割置換+長期養生
No.5養生対策	標準	55%	4.5%	長期養生
No.6機械仕上げ	標準	55%	4.5%	機械仕上げ

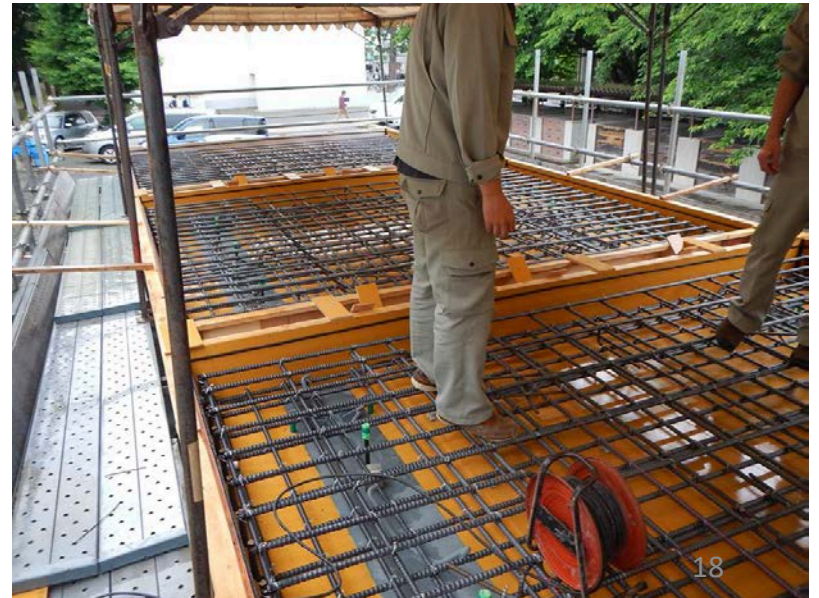


橋梁形式：
鋼非剛性鉄桁 2連

図 床版の配置とその仕様

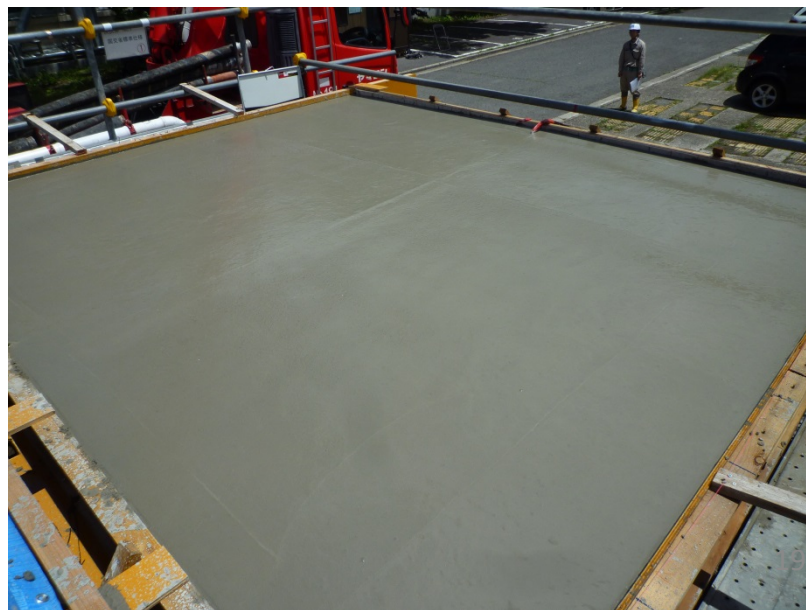
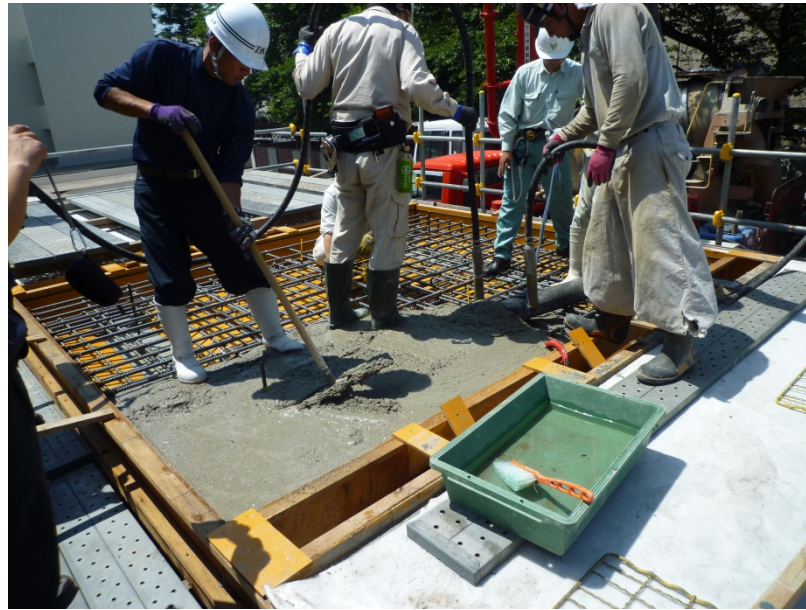


主桁架設→床版型枠工



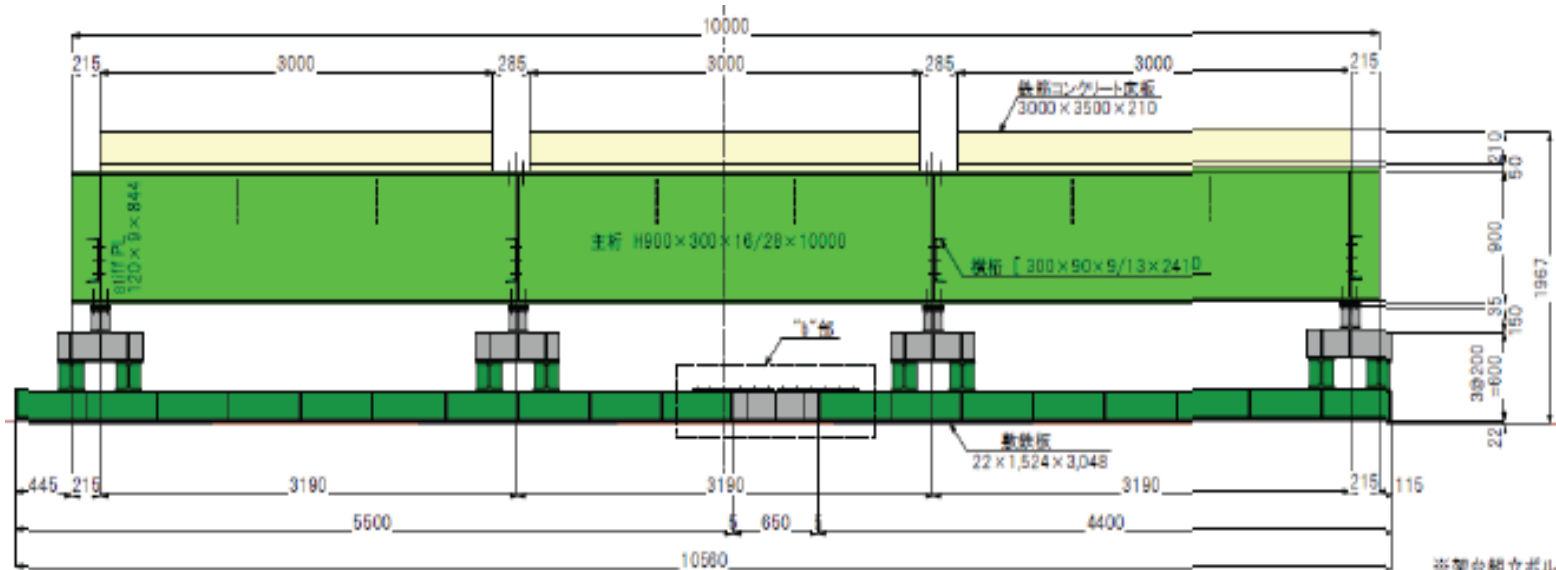


コンクリートの打込み

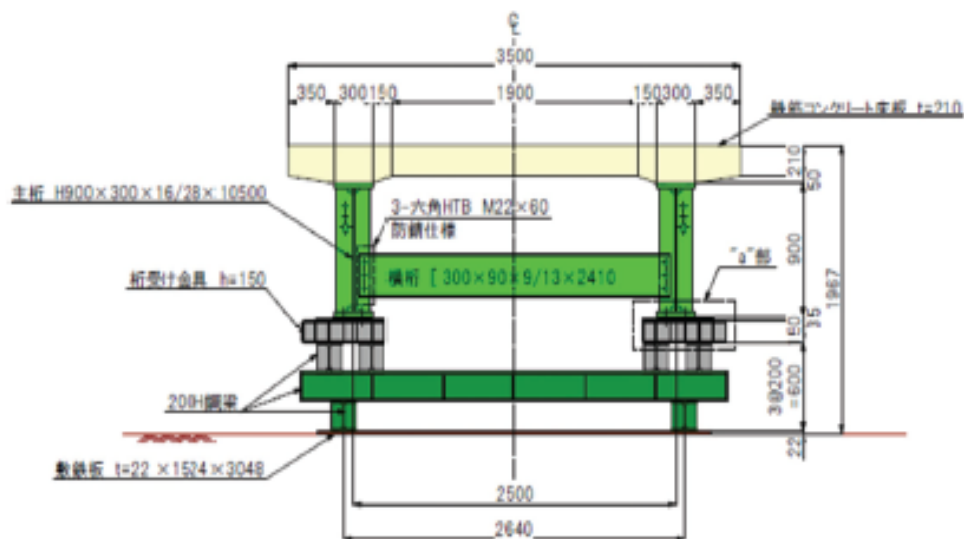




一般図

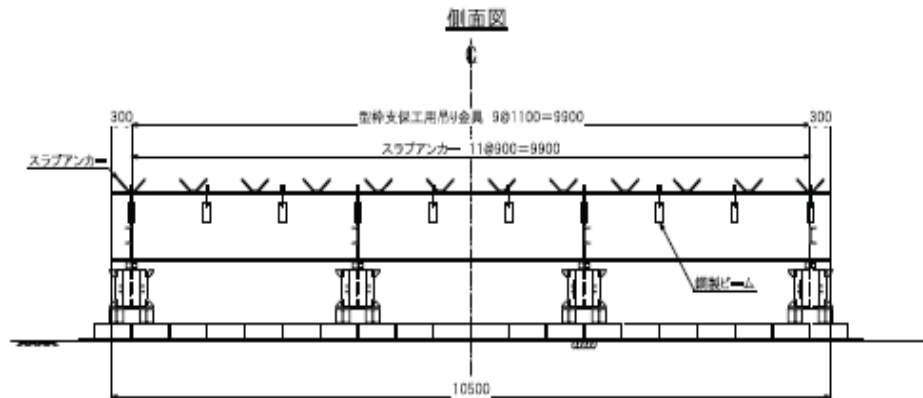


断面図

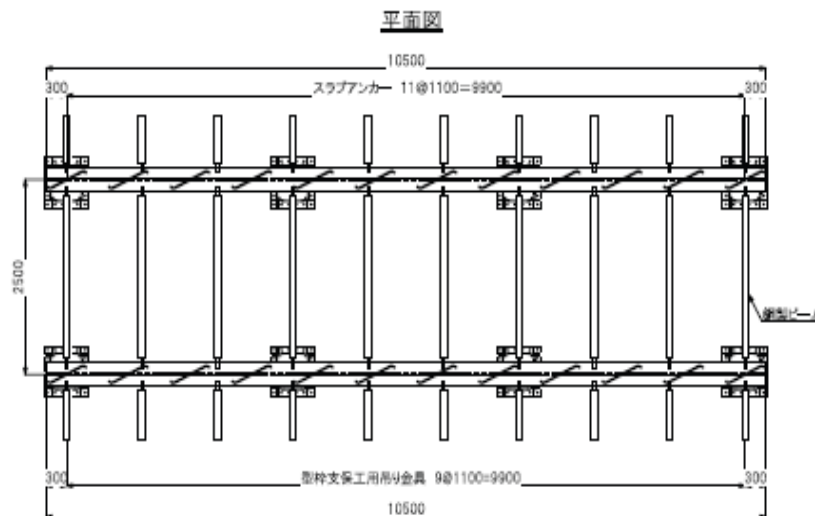
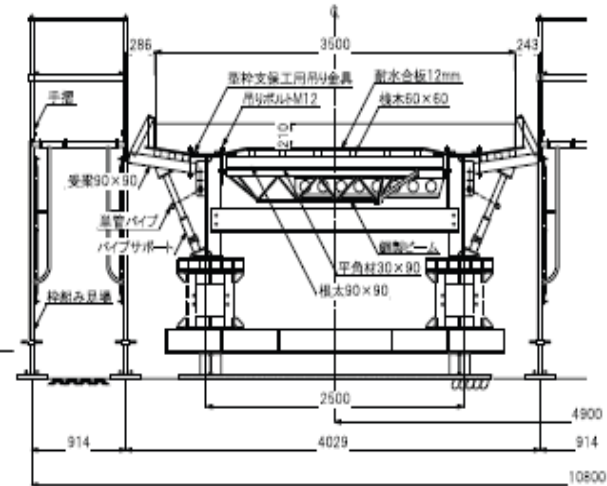




スラブアンカーの概要

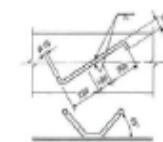


断面図 S=1/40

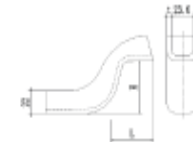


スラブアンカー

型枠支保工用吊り金具①



φ16×600(SR235)



曲径4.5×h50×R40(SAPH400)

H=50mm
L=60mm
t=4.5mm

型枠支保工用吊り金具②

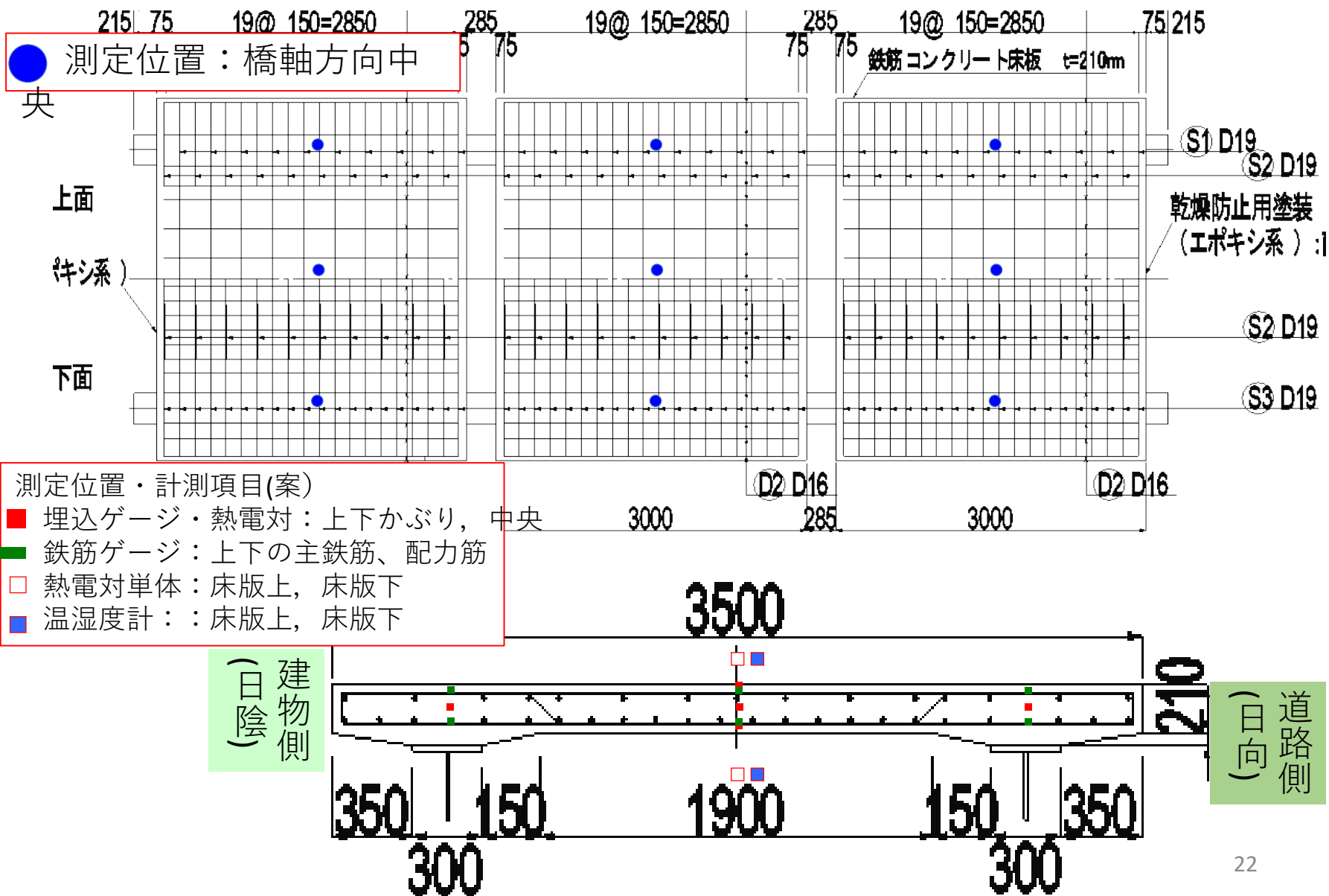
(チェーン吊り元)



PL90×9×300(S5400)

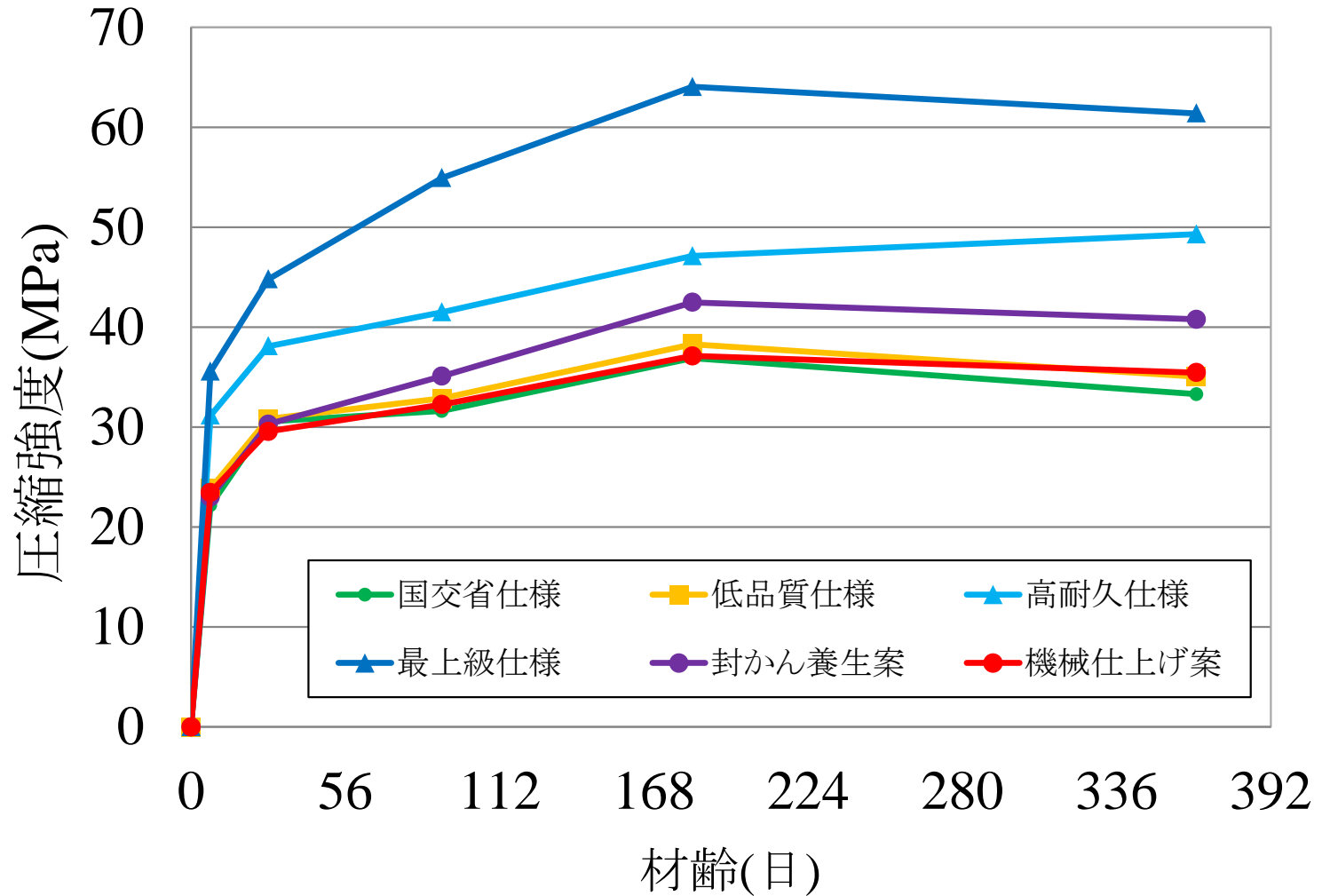


計測計画





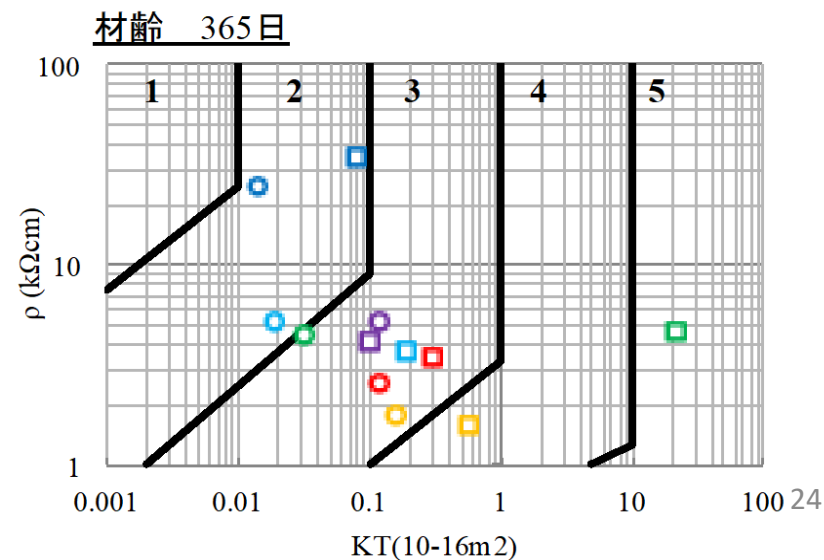
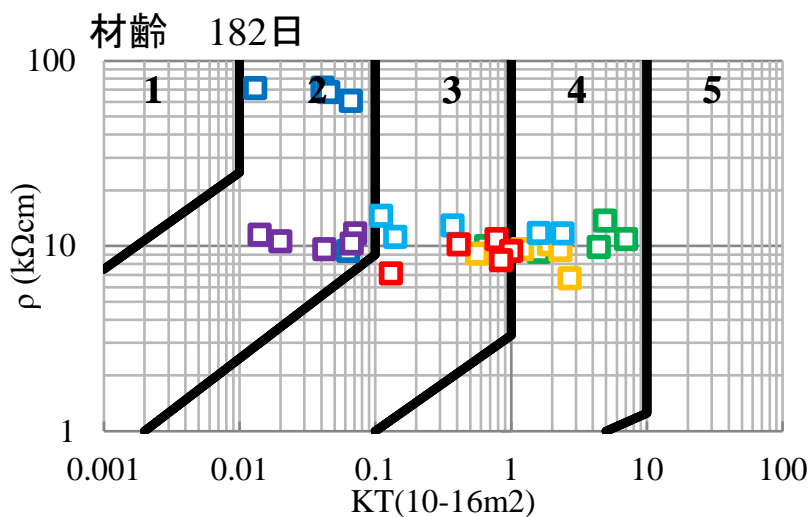
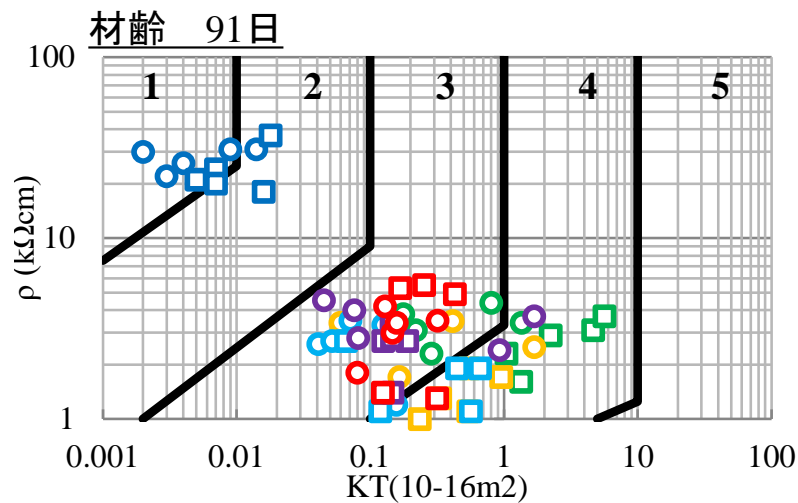
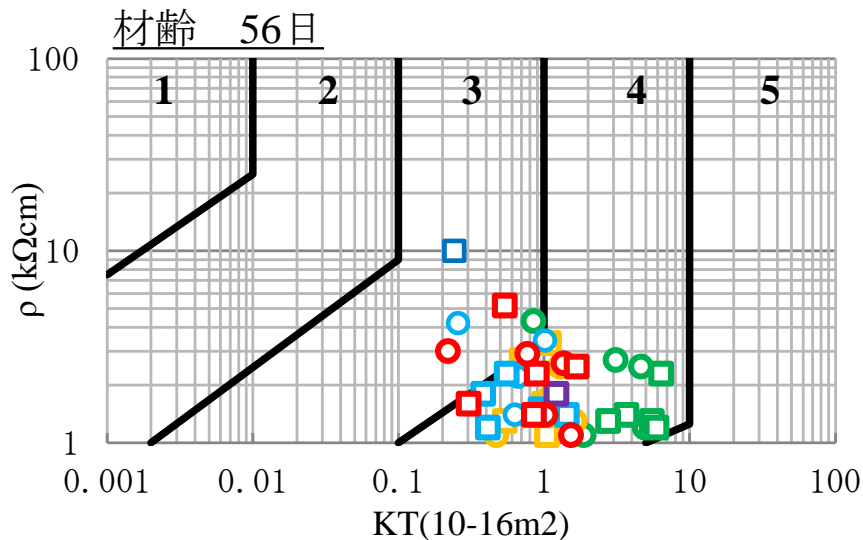
コンクリートの強度発現性





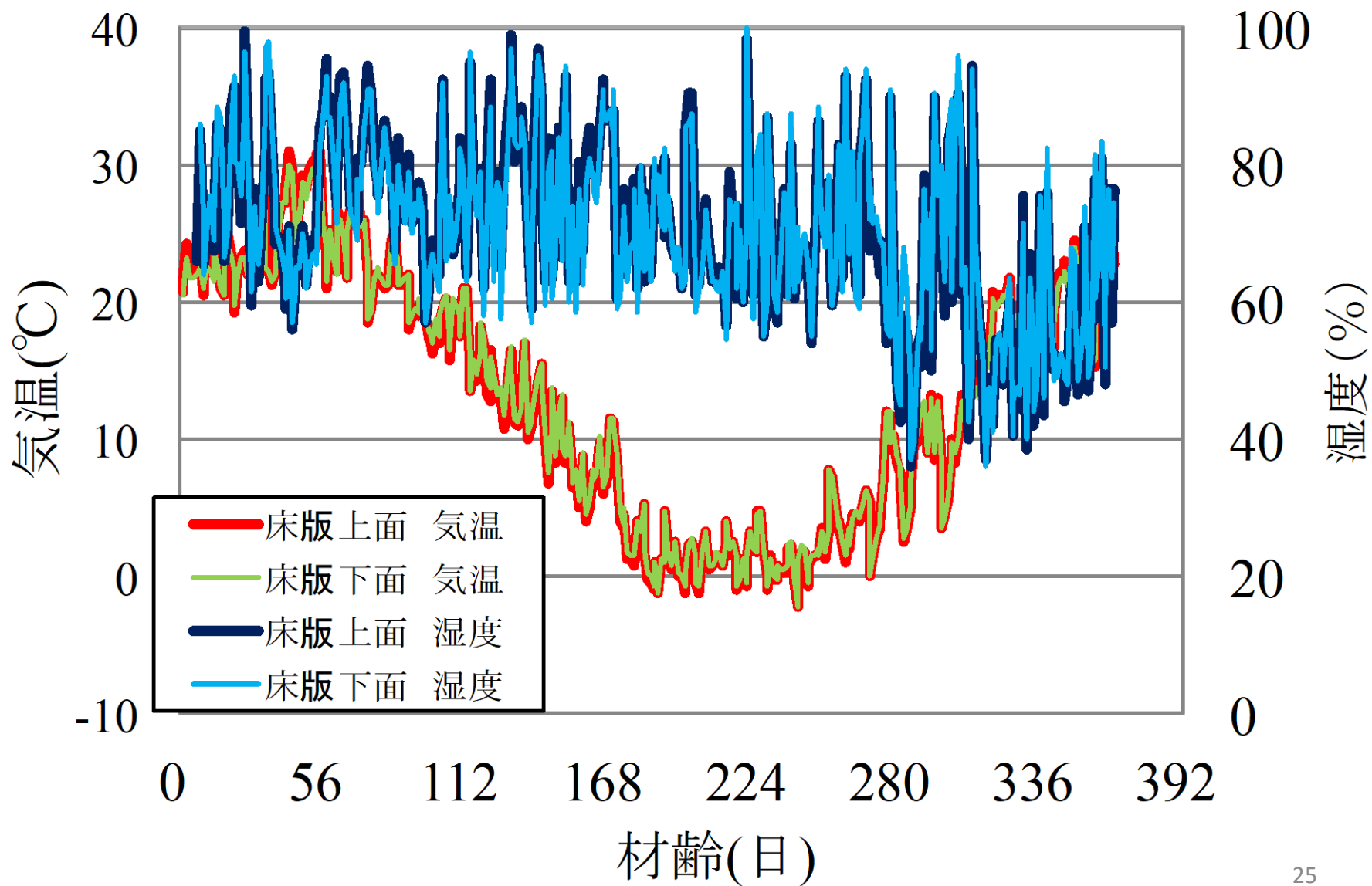
トレント法による透気試験測定結果

○:上面	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
□:下面	標準	低品質	高耐久	最高級	標準封緘	標準機械



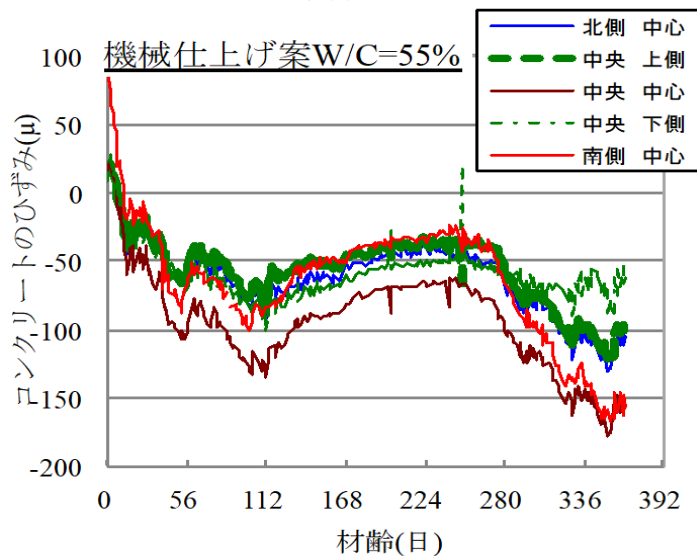
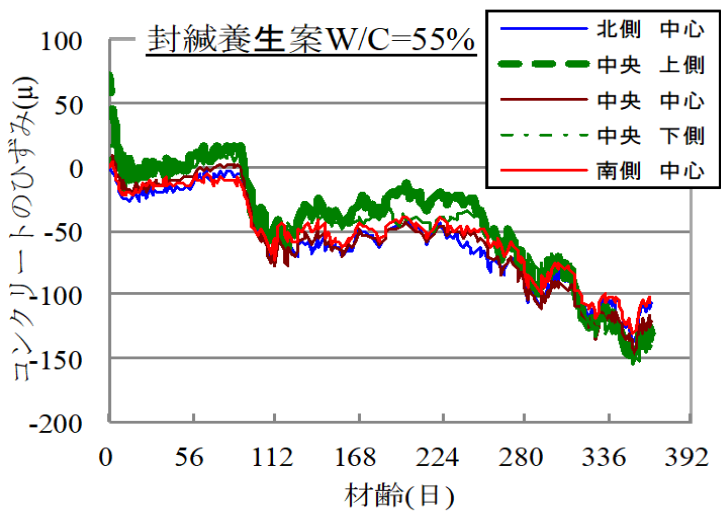
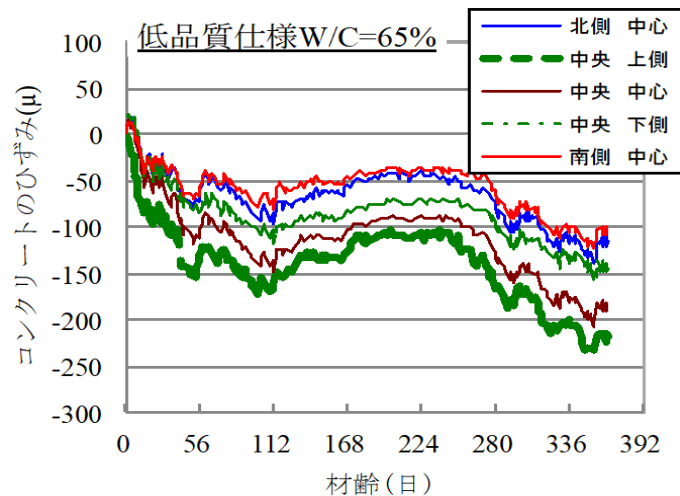
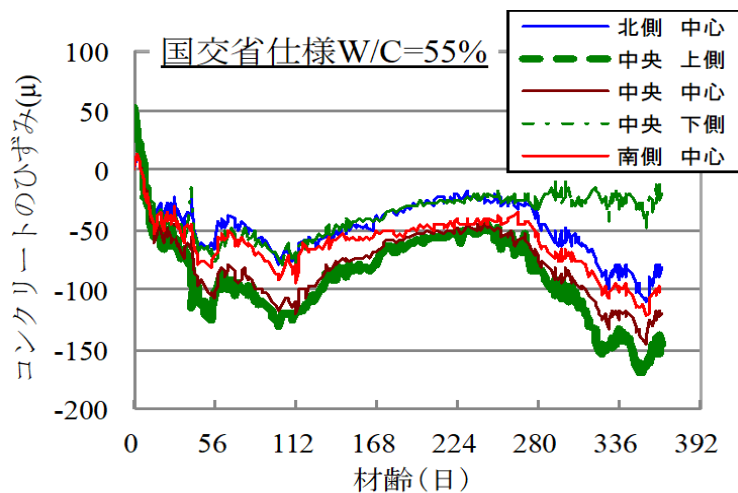


温湿度計測結果



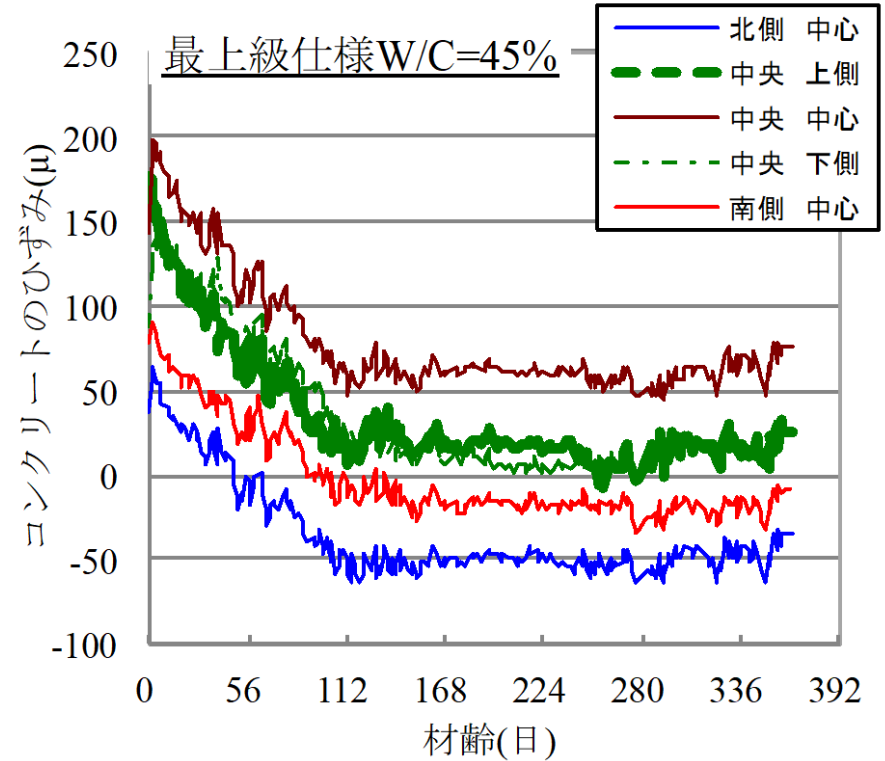
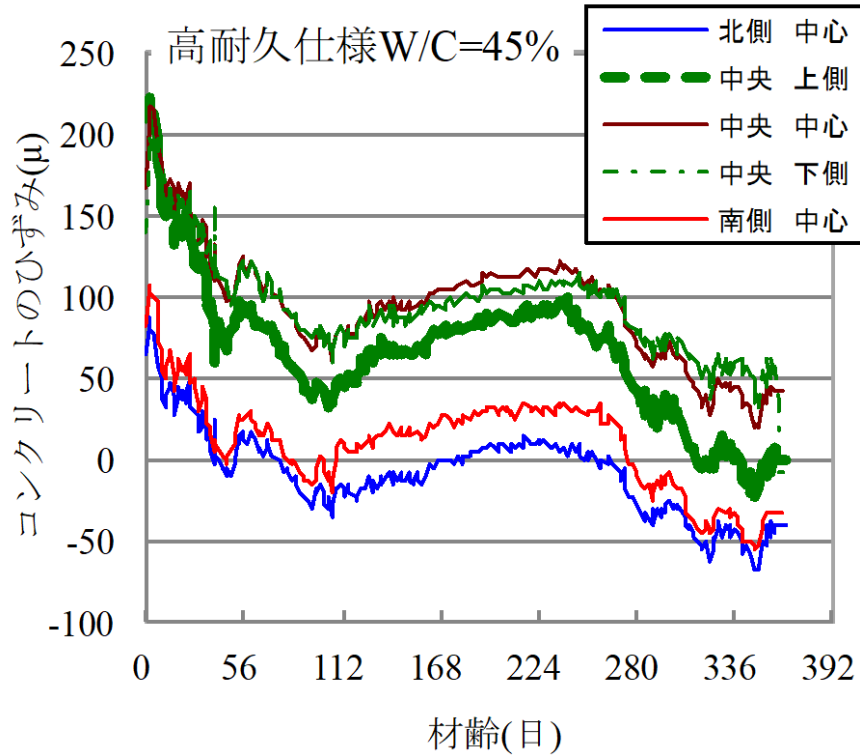


ひずみ挙動測定結果-1





ひずみ挙動測定結果-2





実験と解析の連成

実物モデルを用いた計測・実験



耐疲労性
評価

実物大鋼主桁上
コンクリート床版

耐久性
評価

非破壊試験による
表層品質・
構造性能評価

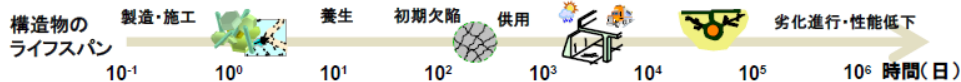
耐久性&耐疲労性
複合評価

大型環境
試験装置

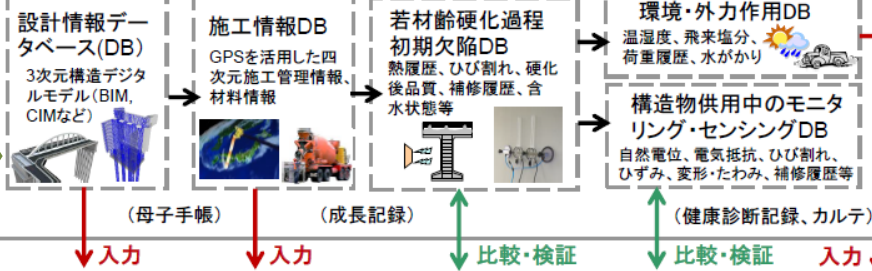
輪荷重走行試験装置



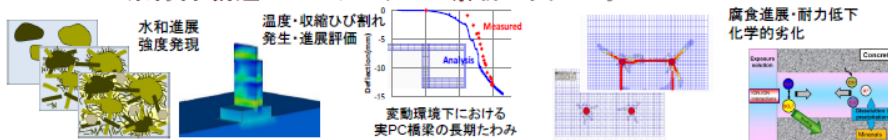
マルチスケール解析



コンクリート構造物の統合型情報プラットフォーム: 各段階をシームレスに結合



セメント系材料・構造のマルチスケール解析プラットフォーム DuCOM-COM3



現場の実構造物

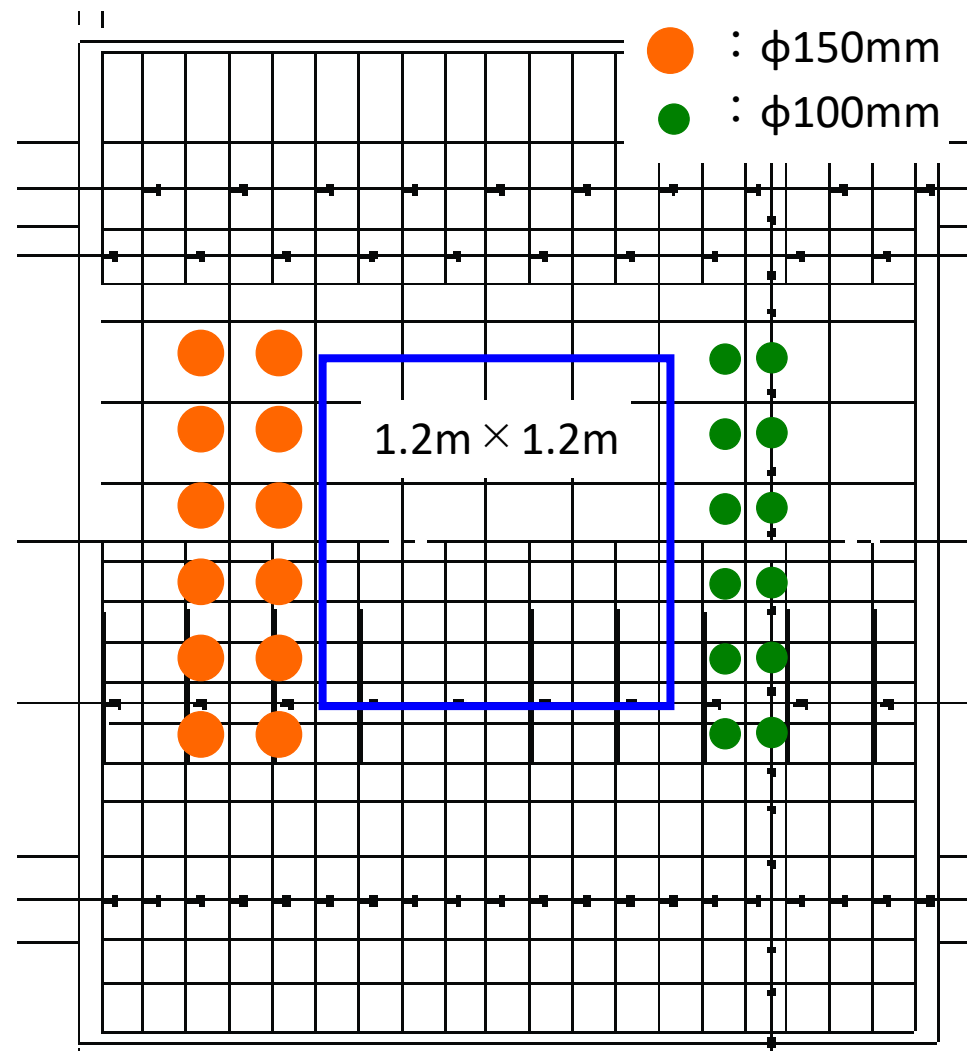


高耐久コンクリート床版の開発と実装

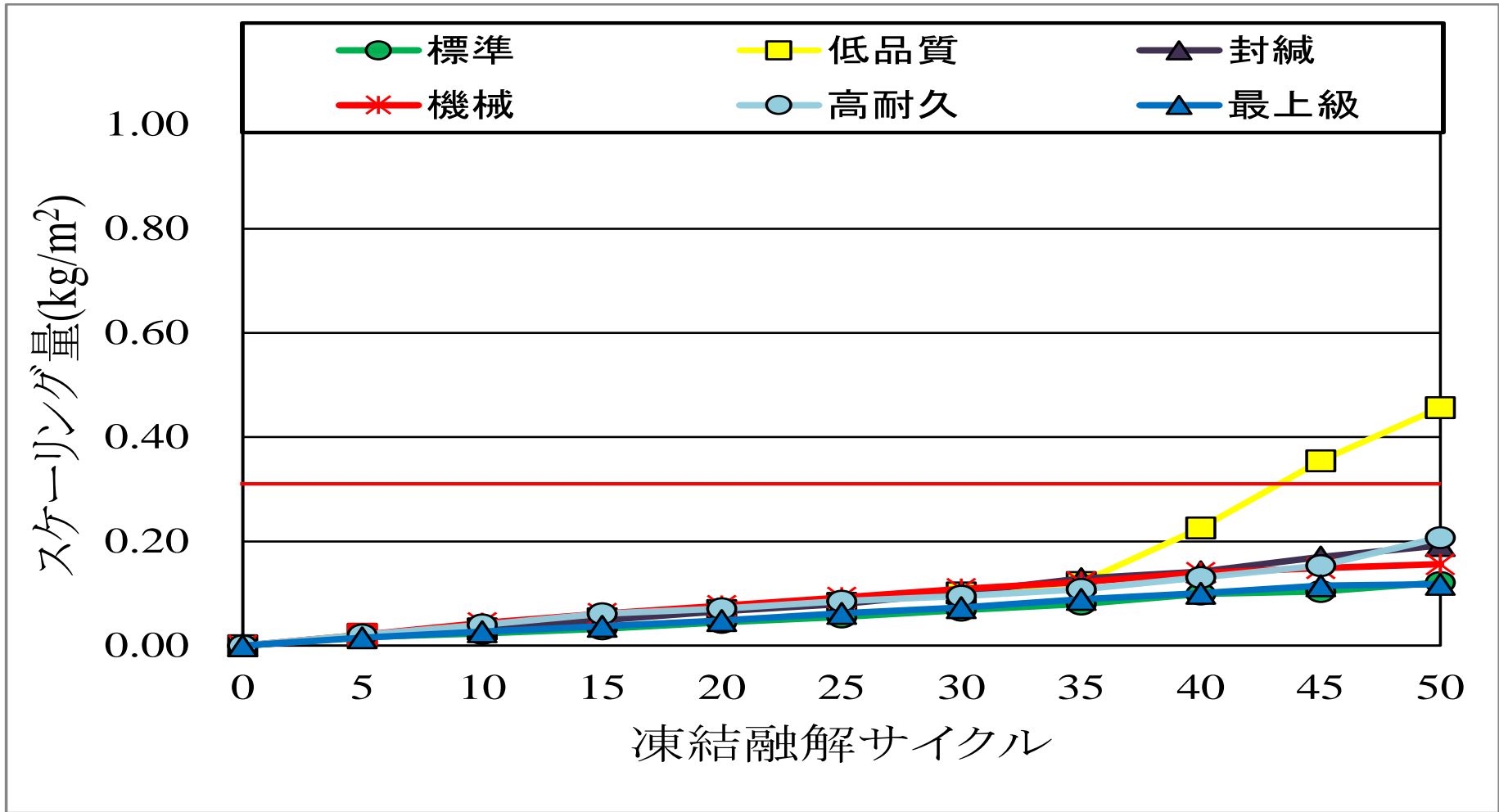


耐久性試験計画

- 塩分浸透性試験：
φ 150mm, 3%NaCl
- 凍結融解試験：スケーリング,
φ 150mm, 3%NaCl
- 気泡間隔係数試験：
φ 100mm, 上下面と中央
- 圧縮強度試験及び静弾性係
数試験：φ 100mm

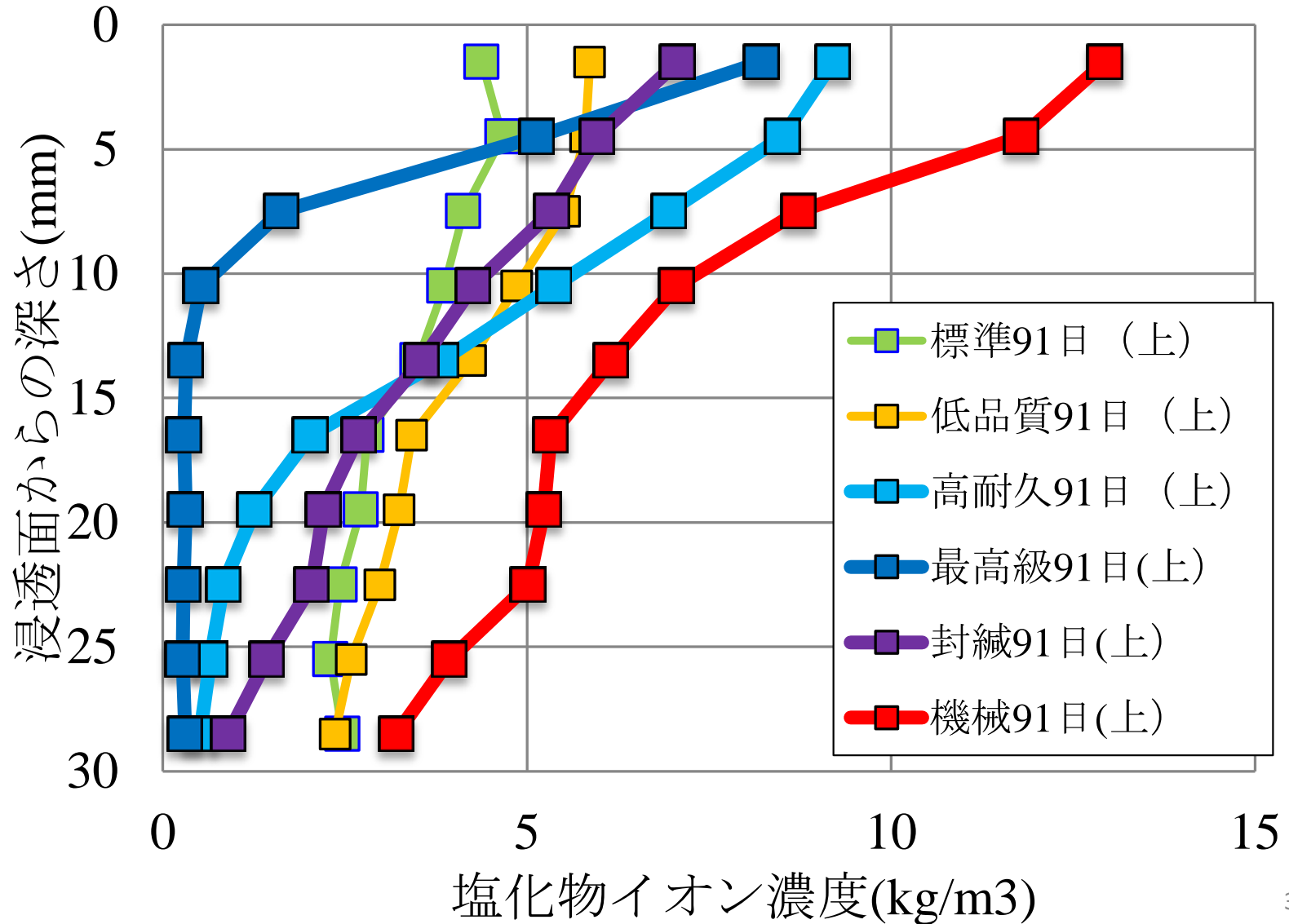


スケーリング抵抗性試験結果



- 低品質のもののみスケーリング抵抗性が著しく低下
- FAを入れても十分な空気量が確保されていればスケーリング抵抗性に問題なし

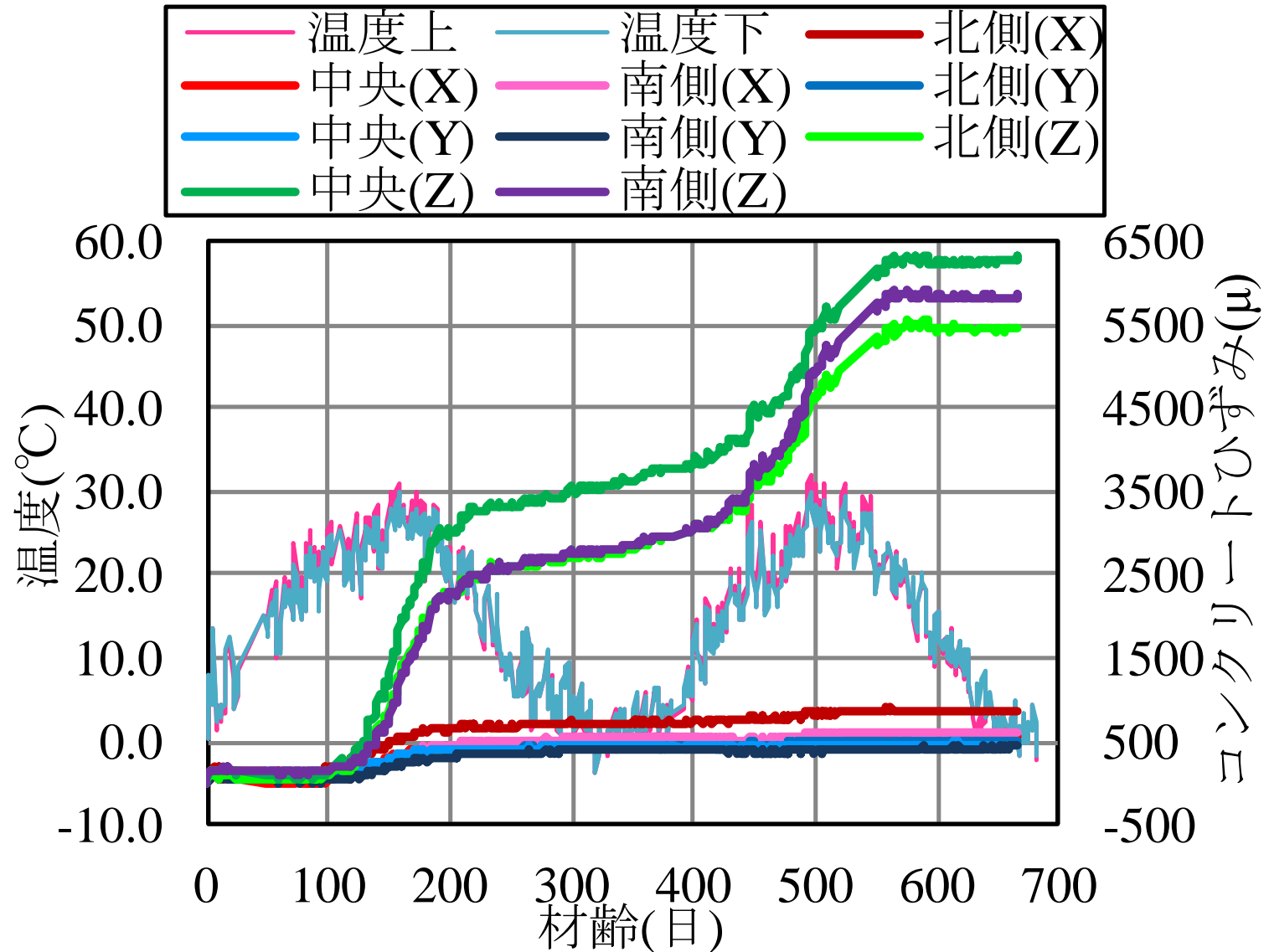
塩分浸透試験結果



ロハスの橋第2期プロジェクト

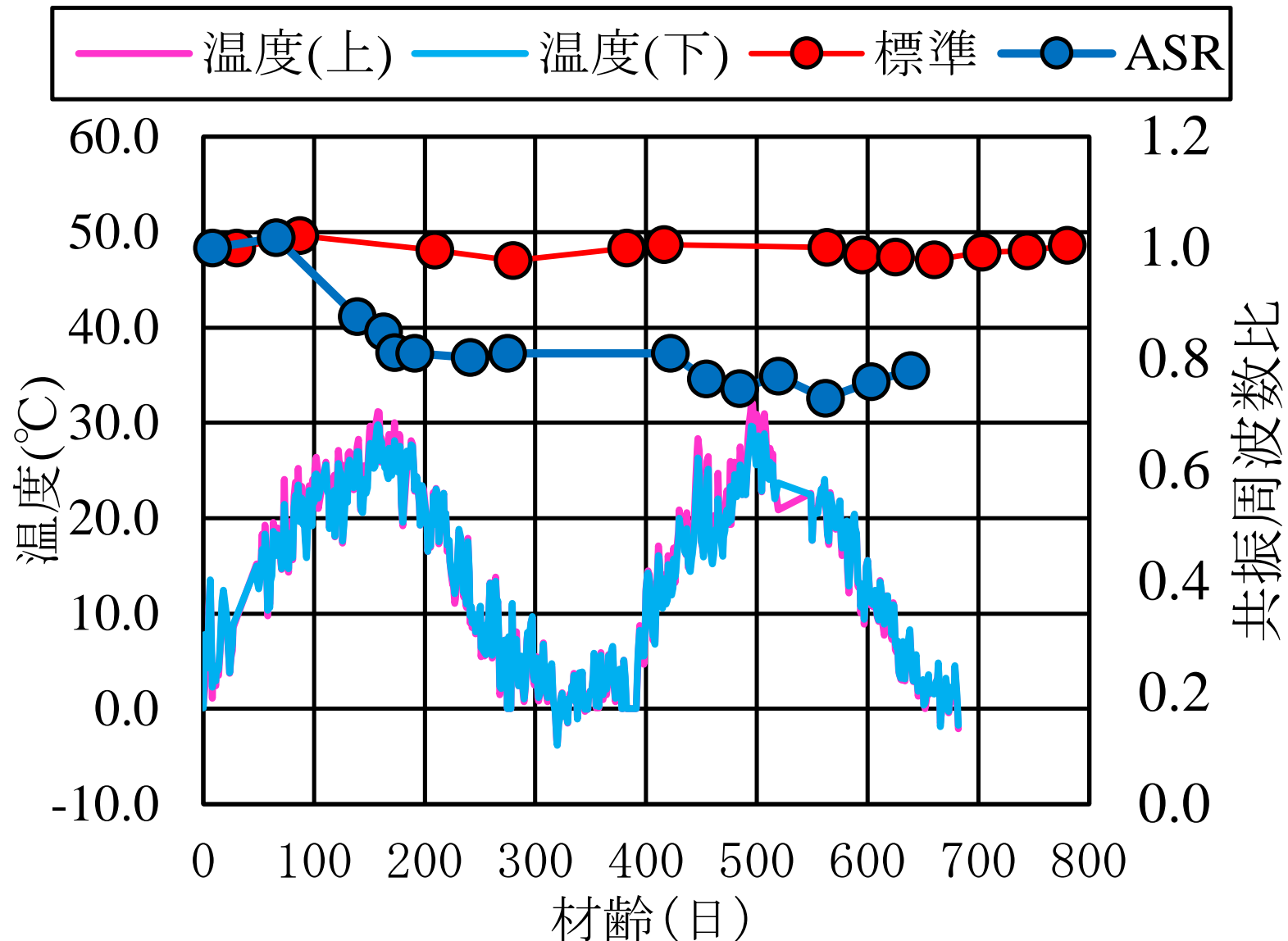
1. 国交省標準（共通：秋冬春夏バージョン）
2. BBコンクリート：膨張材 & 封かん養生1ヶ月（橋建協）
3. FA & 中空微小球（デンカ）
4. ASRコンクリート→補修／補強（NIPPO & 首都高）
5. ASRコンクリート→補修／補強（太平洋C）
6. 2層打ちコンクリート床版（NIPPO & 東大 & 日大 & 太平洋C）

床版コンクリート内部のひずみ変化(中央)



暴露環境下による長期モニタリングによりASRの温度依存性が明確になった。

共振周波数比



ひずみは膨張期間に入っているが、共振周波数比は急激に低下しなかった。
⇒これはASRによって生じたゲルがひび割れに充填した可能性が考えられる

ひび割れ発生状況（上面）

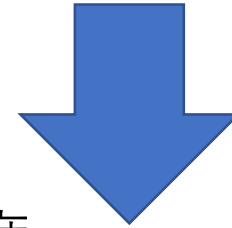
W

M

E

2016年度

- 配筋量に差があるため拘束度の異なる床版端部に0.1mm以上のひび割れが発生



2017年度

- 中央部の膨張が大きいため床版中央部にも0.1mm以上のひび割れが発生
- 新規で出来たひび割れは少ないため、床版上面のひび割れのパターンが固定されつつある

赤：0.1mm以上

N

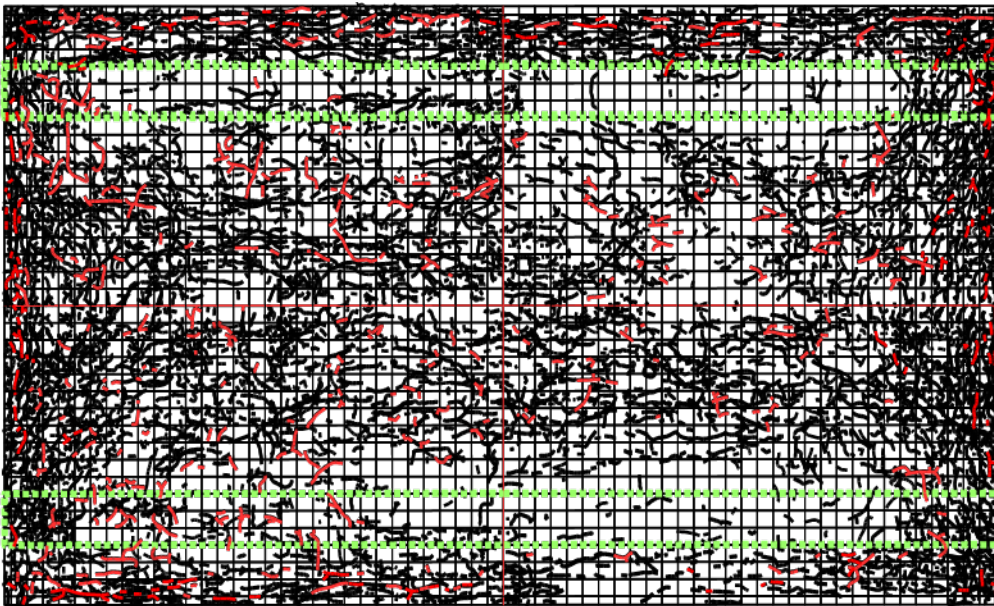
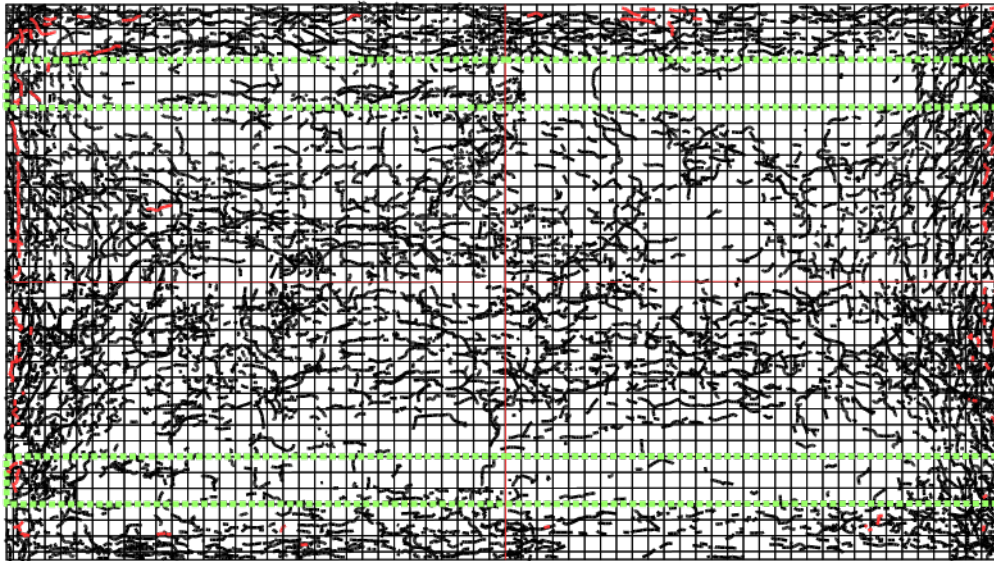
C

S

N

C

S

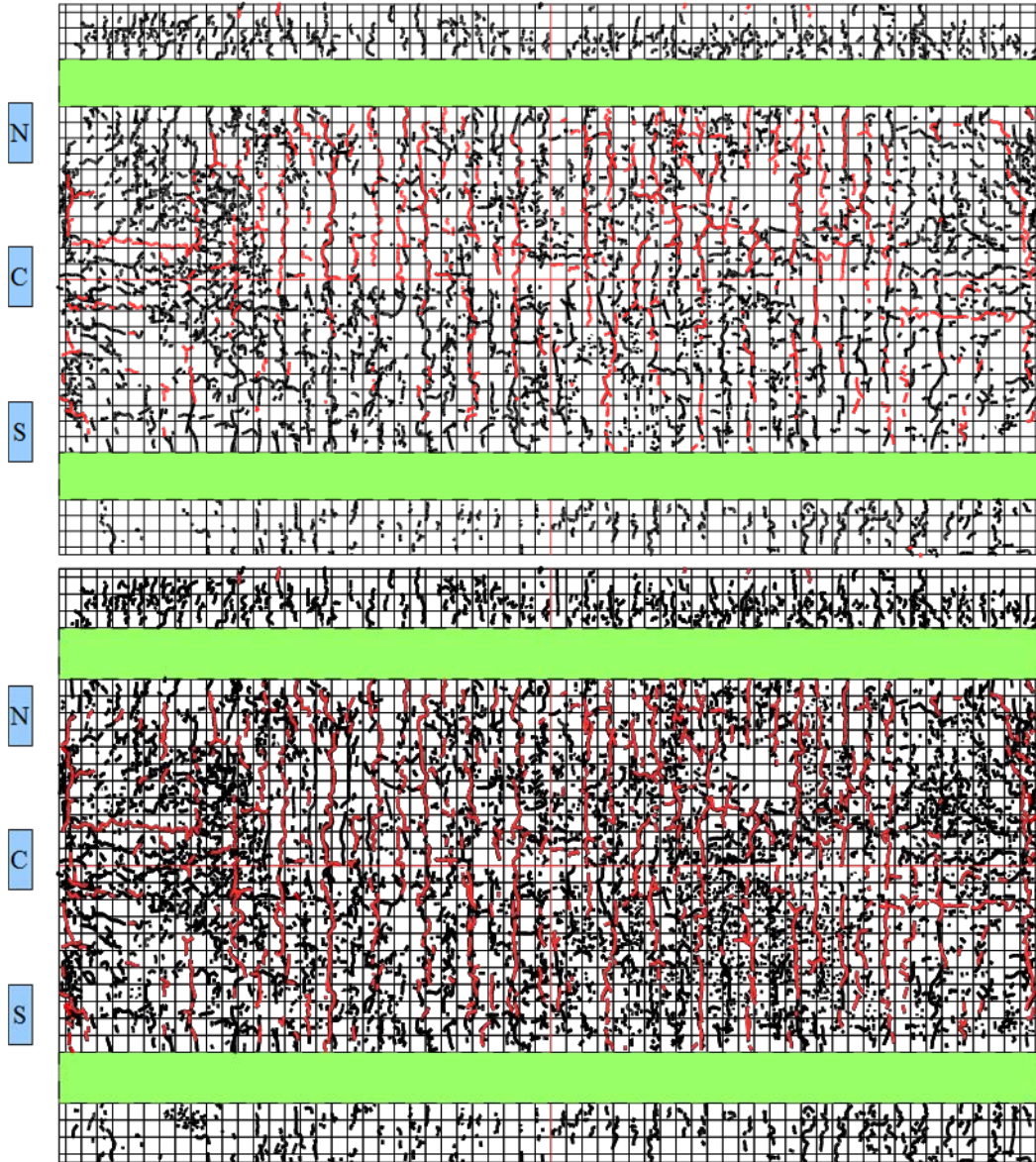


ひび割れ発生状況（下面）

W

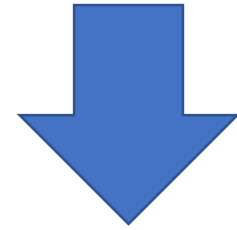
M

E



2016年度

- 主桁による拘束がある為
0.1mm以上のひび割れが
橋軸直角方向に発生



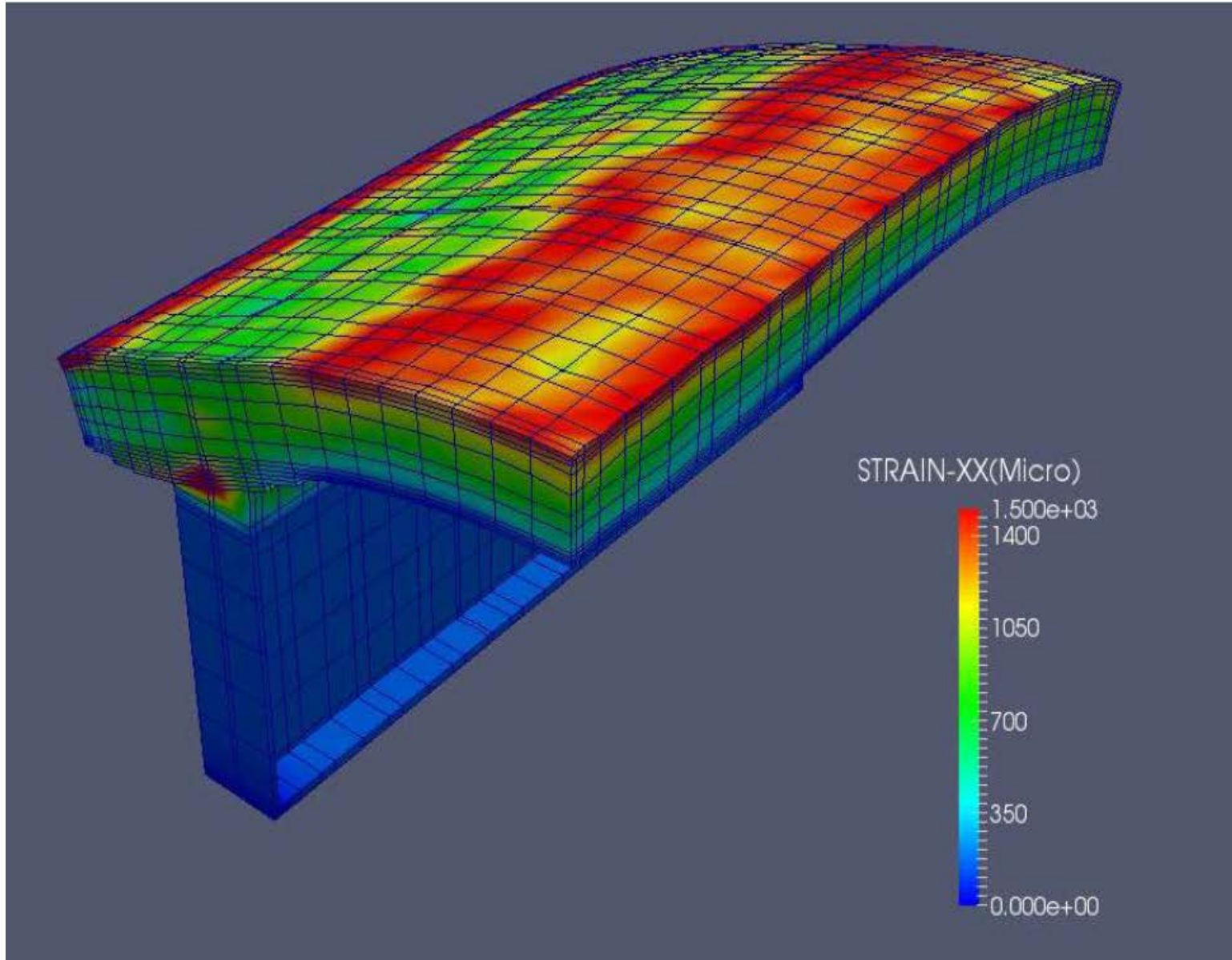
2017年度

- 0.1mm以上のひび割れは観
察されず、床版中央に微細
なひび割れが多数発生

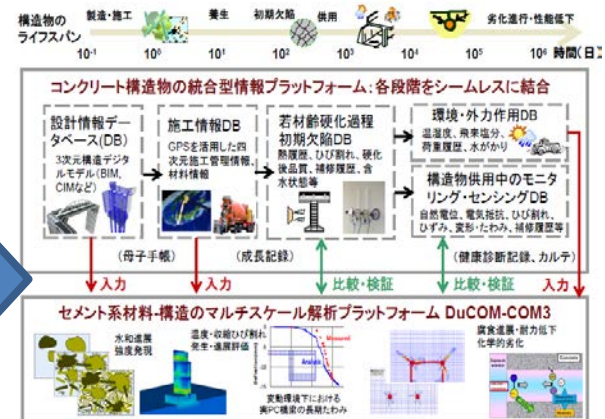
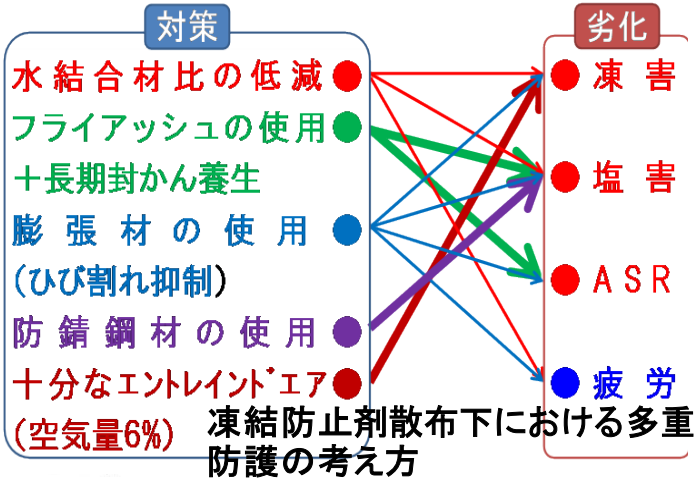
床版上下面の中央部に変化が
見られたため、ひび割れの発
生状況からも床版中央部の膨
張が著しく大きいことが判断
できる

赤：0.1mm以上

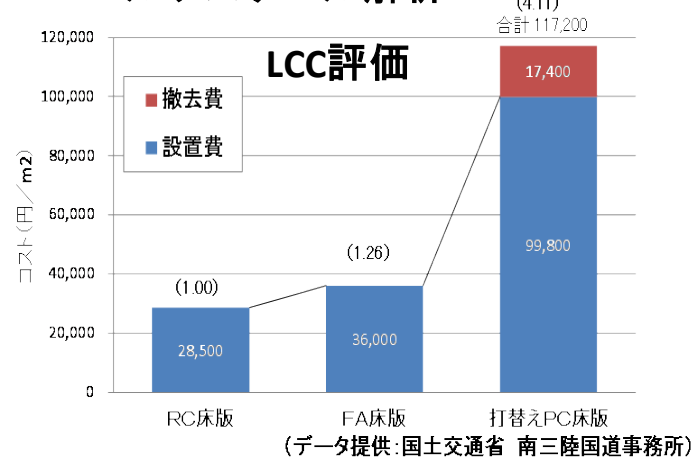
解析による変形図



東北における復興コンクリート構造物の高耐久化



マルチスケール解析



東北における高耐久床版の実装



不動沢橋 L = 19 m
間詰コンへのフライッシュ適用
(2015年8月)



大沢第3橋 L = 71 m
プレキャスト部材との合成場所打ち
フライッシュ床版 (2016年4月)



浪板橋 L = 38 m
フライッシュコン&平坦仕上げ
(2016年4月)

新気仙大橋 L = 438 m
高炉スラグセメント (2016年5月)



向定内橋 L = 45 m
日本初のフライッシュRC床版
(2015年3月)



品質・耐久性確保に関する4提言

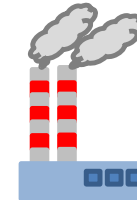
① 復興道路等における構造物の耐久性確保

- ・過酷環境(積雪寒冷地, 凍結抑制剤散布)での早期劣化
- ・全国標準では耐久性が不足
- ・復興道路の耐久性確保が必要
- ・東北地整の試行工事の成果活用
- ・耐久性確保のための手引き

熊本復興への貢献



② 産業廃棄物・副産物の有効利用による耐久性の確保



- ・石炭火力発電の依存増大
- ・石炭灰の処分問題



Ecology & Global



- ・良質なフライアッシュの活用
- ・高炉スラグの活用

③ 地方のニーズにあわせた技術基準の策定

- 全国一律 → 地方ごとの基準
- ・設計, 維持管理の合理化
 - ・国際展開への対応力強化

④ 施工中の不具合抑制, 品質確保

- 東北地整の試行工事の成果活用
- ・品質確保の手引き



熊本地震からの復興

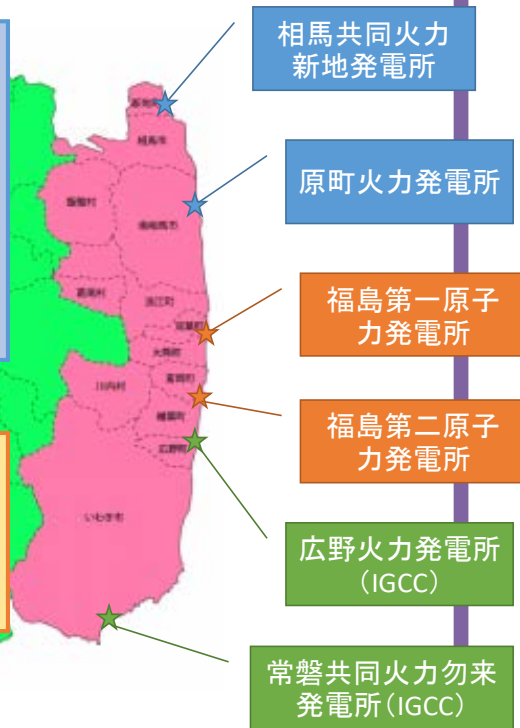
原発事故からの福島県浜通りの復興



- 東日本大震災における福島第一原子力発電所事故
- 脱原発→石炭火力発電への依存→石炭灰の大量発生
- ガス化石炭火力発電所 (IGCC) の新設→ガス化溶融スラグの発生

対策

- 浜通り石炭灰／石炭ガス化溶融スラグ有効利用→産学官の連携による共同研究→浜通りの現場への実装



地域に合った高耐久コンクリートの開発と実装

桑折高架橋BB & 常磐道拡幅FA



書籍「新設コンクリート革命」



- 著：熱血ドボ研2030
 - 編：岩城一郎・石田哲也・細田暁・日経コンストラクション眞鍋政彦
 - 定価：3,400円（税抜き）
 - A5判、296ページ
 - ISBN：978-4-8222-3526-0
 - 発行日：2017年3月20日
 - 著者：岩城一郎，石田哲也，細田暁，田村隆弘，二宮純，佐藤和徳，春日昭夫，土橋浩，須田久美子，田中泰司，後藤千恵，平原由三枝，中田絢子，中野朱美
 - 座談会ゲスト：阪田憲次，青山俊樹
 - CONTENTS
- 第1章 今こそ新設にこだわりを！
- 第2章 東北・山口から始まる革命ののろし
- 第3章 トップエンジニアが語るコンクリートの最先端
- 第4章 2030年に向けて革命の先は？