

# コンクリート構造の設計・施工と管理に向けた知識の構造化



On- and Underground spaces Service life of RC bridge (cyclic loads and chloride attack)

- ・情報化時代の知識/経験の整理/保管法
- 問題解決に活用できるように(設計管理)
- 気づきへの導き→境界・領域の拡大へ
- ・情報化時代の技術者ミッションと倫理



前川 宏一  
土木学会理事



<http://utf.u-tokyo.ac.jp/project/pjt07.html>



Prof. Aoyagi,  
文化庁長官

# R & Dに関する自己紹介 (本日の講演に関連して)

1970 1980 1990 2000 2010 2015 2018 任期満了まで土被り1.8年の落盤寸前

構成則研究 動的応答解析

自己充填(SCC) コンクリート(岡村・小沢・前川)

材料-構造の統合研究

西宮生まれ 北大阪(吹田茨木)育ち

アジア工科大学院派遣

耐久性、疲労、複合劣化、床版、橋梁

地盤と構造の常時相互作用と耐久性

AIT

1988 open demonstration: SCC

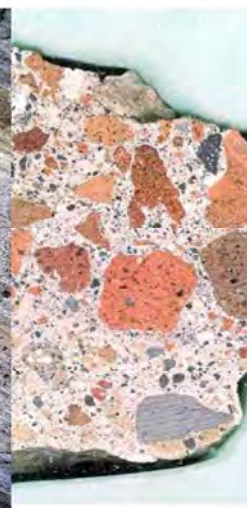
1995.1.17

2011.3.11

Dec. 2, 2012



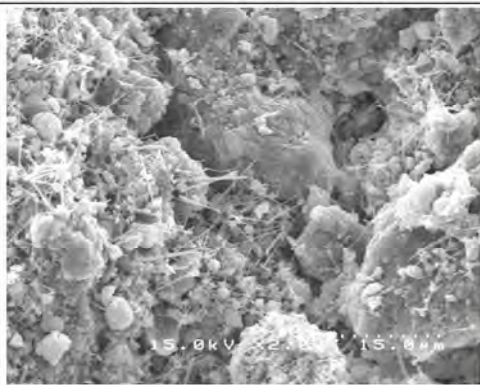
# ソンマ Vesuviana 遺跡, ナポリ 古代ローマConcrete Imperator Caesar Divi Filius Augustus



<http://utf.u-tokyo.ac.jp/project/pjt07.html>



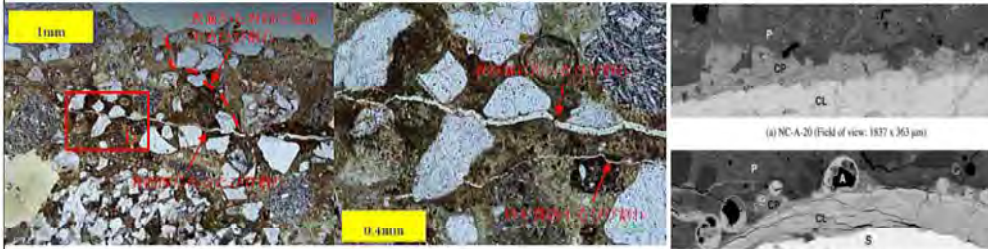
JSCE committee on Roman Concrete from HP-JSCE (坂井悦郎委員長)



ナノスケール, CSH and Etringite (電子の目)



マイクロスケール, 微細気泡と氷の結晶  
Cover-sheet; Journal of Advanced Concrete Tech.



ミリメートルスケール, water-ASR-corrosion-gelsの流れ (肉眼)

「努力するほどセンスが悪くなり、勘も鈍る勉強法はある」  
「練習をすればするほど、(野球やゴルフの)試合で勝てなくなるような練習が少なくない……」

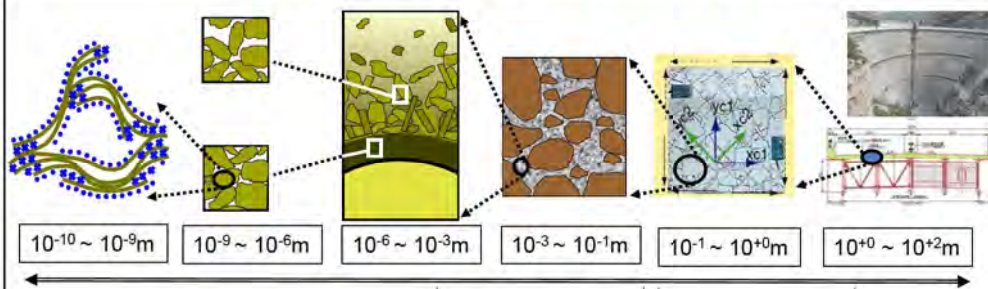


87代土木学会会長

知識や経験の整理整頓の仕方=「知の構造化」  
知識経験を問題解決に使えるように蓄えるには□  
—ガイドライン、指針類、ソフトウェア、、、人工知能—

ここを間違えると、→ Prisoner of the familiar

スケールの異なる領域に対して得られた知識と関係性:  
直列連結 over the multi-scale

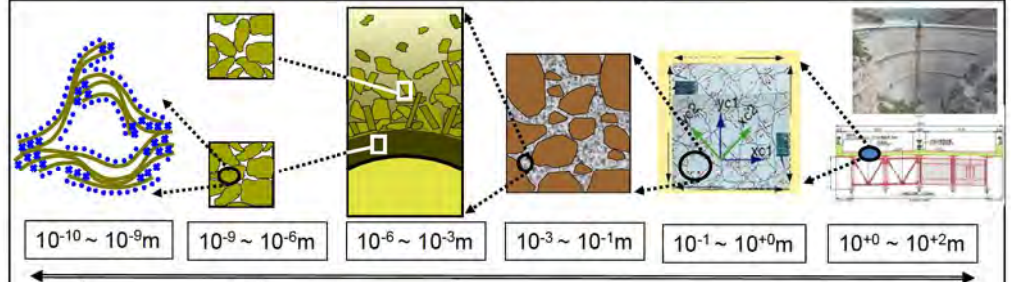


知識(1): 乾燥すると、  
コンクリートは縮む(μm~mm)

知識(2): 乾燥すると、  
鉄筋コンクリートは伸びる (cm - meter)

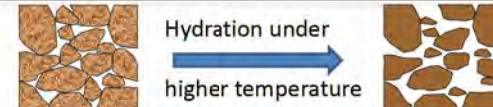
一見して矛盾して聞こえるが、因果関係でつながっている

スケールの異なる領域に対して得られた知識と関係性:  
直列連結 over the multi-scale



Knowledge (2): 高温下で養生されたセメント硬化体(マトリックス)は  
空隙が多くなって強度も幾分低下する。

Knowledge (1): 高温下で養生されたセメント硬化体(ゲル粒子)は緻密化されて密度  
も大きくなる(空隙が少ない)。

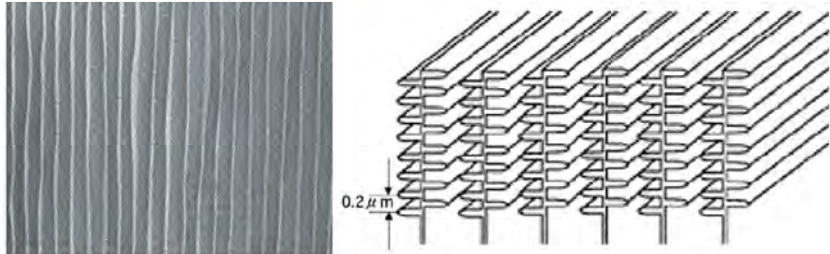


一見して矛盾して聞こえるが、因果関係でつながっている

**モルフォ蝶、ムラサキアゲハが青く見える理由**  
**青色色素ではなく、鱗粉の3次元構造により、青色光が選択的に反射**



自然界で青色色素は稀。西洋絵画では17世紀に漸く青色顔料発見(フェルメール)

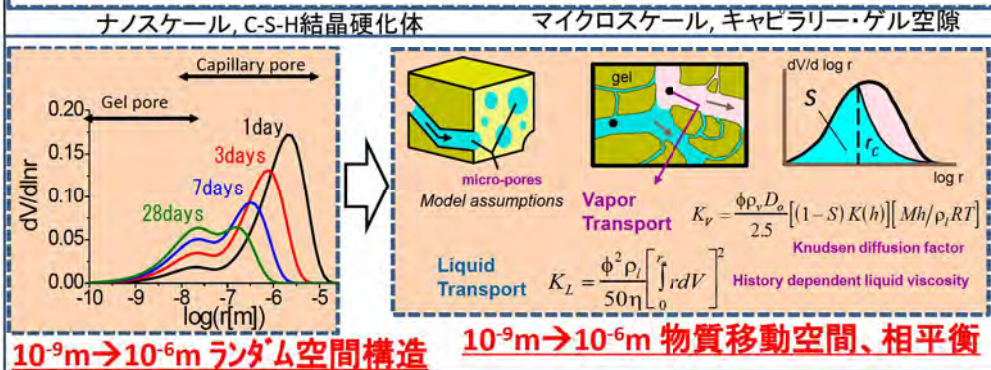
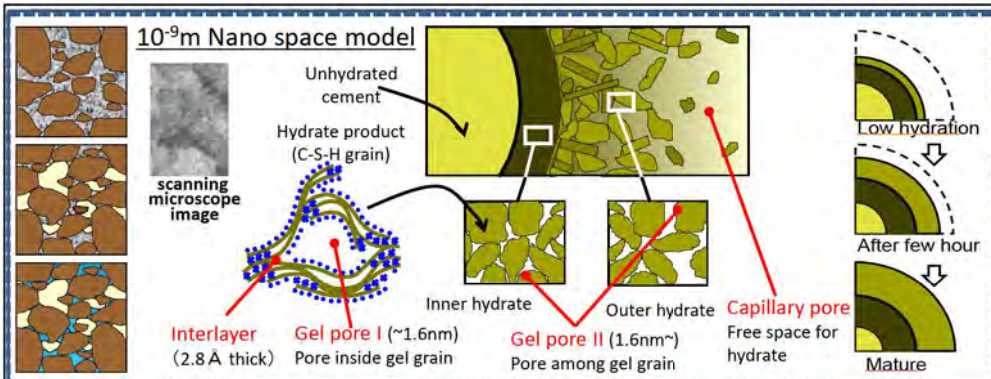


松井真二教授(兵庫県立大学高度産業科学技術研究所)  
 戦略的創造研究推進事業 研究領域「高度情報処理・通信の実現に向けたナノファクトリーとプロセス観測」研究代表者 <http://www.jst.go.jp/kisoken/seika/zensen/08matsui/>  
 4/50

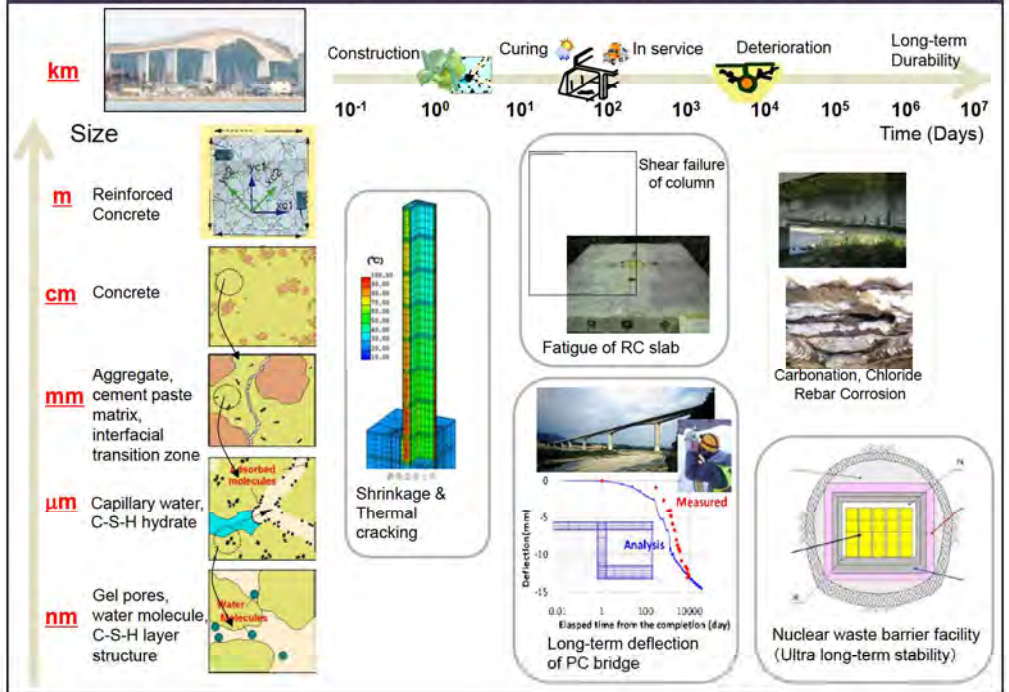
知識や経験が得られた「場所」には、それぞれの「大きさ」「寸法」がある。 REV : referential volume

土木学会が扱う空間と情報は、ナノから地球サイズまで **=空間情報は21世紀の土木の基礎素養=**

本日の話題は  $<10^{-9}m \sim 10^{+3}m>$  の知識構造



**時間と空間を繋ぐマルチスケールモデル (インフラの未来予測)**



30年で30万行のソースコードも25MB、メモリーで1g以下の軽薄短小

有効に使う!

## 知識・経験の階層的な構造化 —相互の因果関係を意識— 設計施工管理に関連した最近3年の話題

- ・100年に及ぶPC構造の長期たわみ・変形  
—分析から制御・設計へ—
- ・建物の地震時動的応答と自然環境作用  
—材料と構造の不可分—
- ・(道路)インフラの耐久性・寿命推定  
—コンクリート工学のみでは見えない—

13/50

### 話題1 過剰たわみ → 補修補強 → 結局、自重崩壊!



Given by Prof. Bazant for academic use (Northwestern University, Home-page)  
Palau: Koror-Babeldaob bridge. Sudden Collapse at 20 year after construction

14/50

### 中央ヒンジ中空箱型PC橋梁: 30年以上にわたる貴重な長期モニター

建設以後、2~3年は設計での予想にほぼ等しい変形とたわみを呈するが、10~20年が経過すると、設計予測の数倍のたわみが発生する。しかし、プレストレスは抜けていない。なぜ?

(Int. conf. Concreep in 2009, Kashiko-jima, JAPAN)

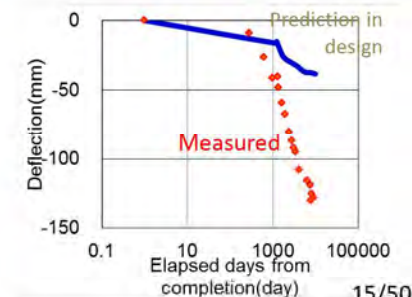
Tsukiyono oh-hash bridge  
(Gunma prefecture, Japan)



渡辺泰充氏 国島正彦氏 (元清水建設)

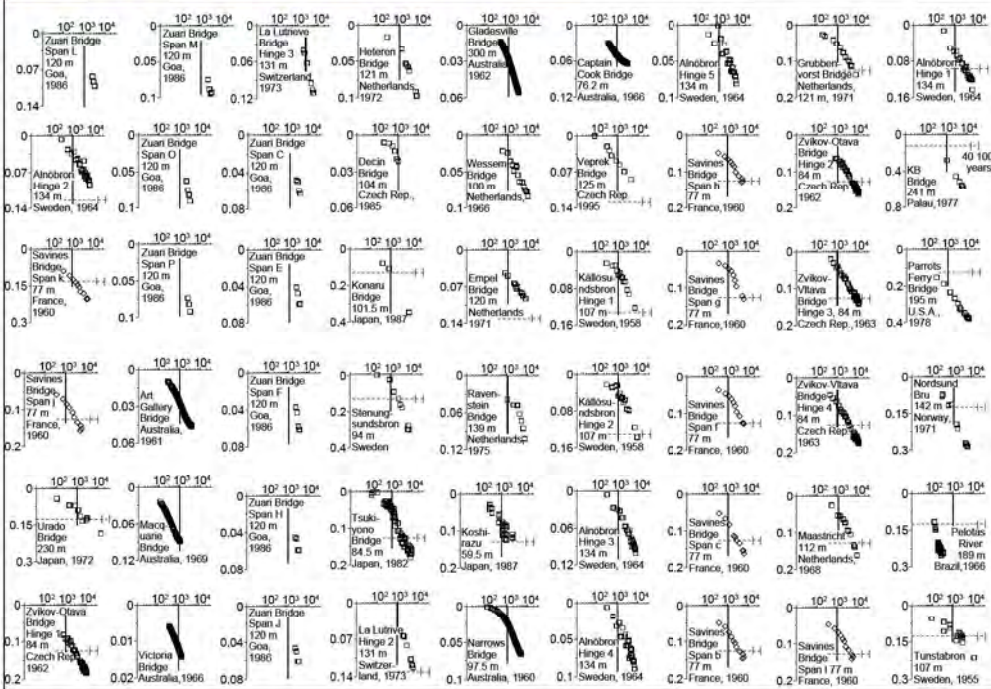


Inside the box viaduct; dry!

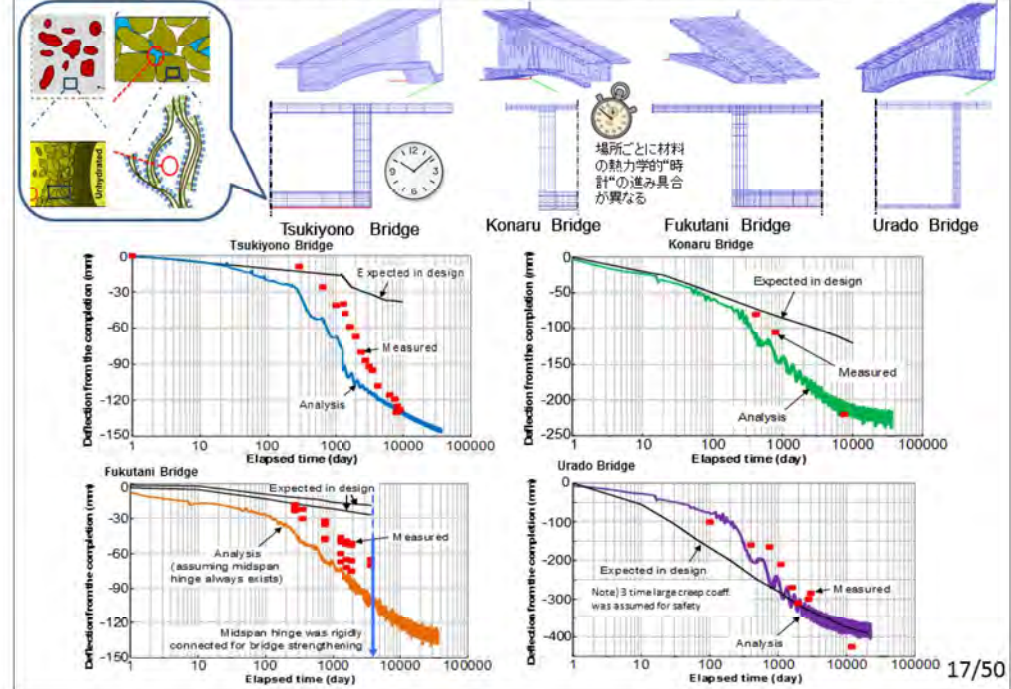


15/50

過剰たわみ問題は、実は世界中で発生 Bazant, etc. Fib symposium 2011 in Prague



中空箱型PC上部構造の長期予測 → 2012年版示方書改訂



150年後にたわみが戻る？(熱力学的に自然に同化)

引き潮とともに、大きな溜まりから水が抜ける(乾燥と共に大きな空隙から蒸発する)

小さな溜まり水が最後まで残る。しかし、所々大きなたまり水が残る。ゆっくり水が小さな溜まり水に遅れて抜けていく。

100年にわたり、徐々にキャピラリー空隙からゲル空隙(収縮駆動力)に水分が移動

話題2 weak coupling

JMA Kobe 100%

2008/01/13

TCR 00:00:17:11

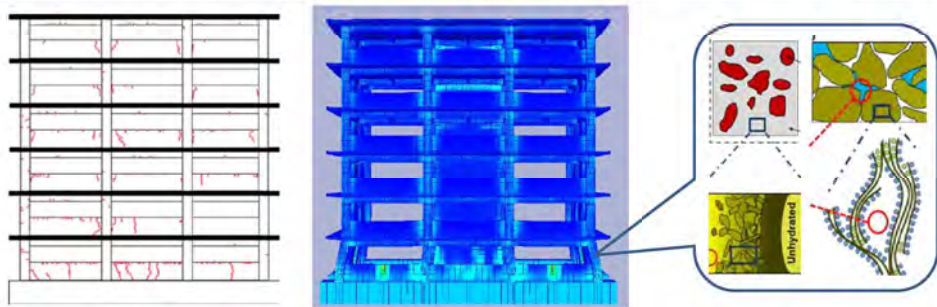
独立行政法人防衛科学技術研究所

JMA Kobe 100%

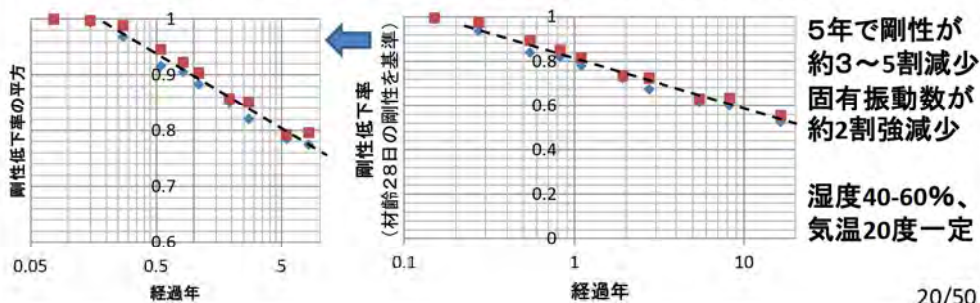
TCR 00:00:17:11

独立行政法人防衛科学技術研究所

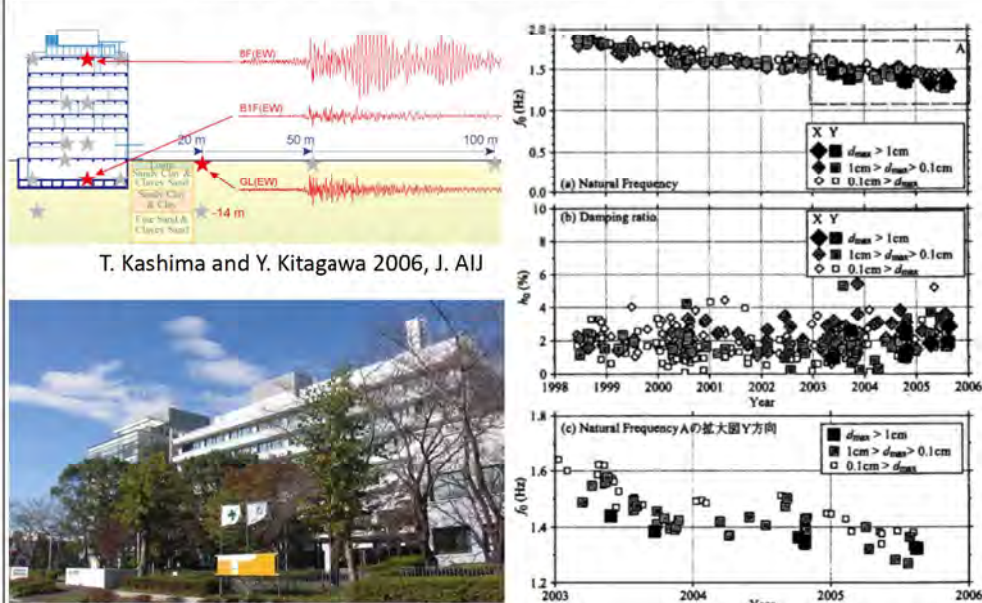
# 乾燥に伴うひび割れと水分逸散の加速 → 構造剛性の低下



実構造のひび割れと乾燥に伴う変形分布 (解析 変位100倍)

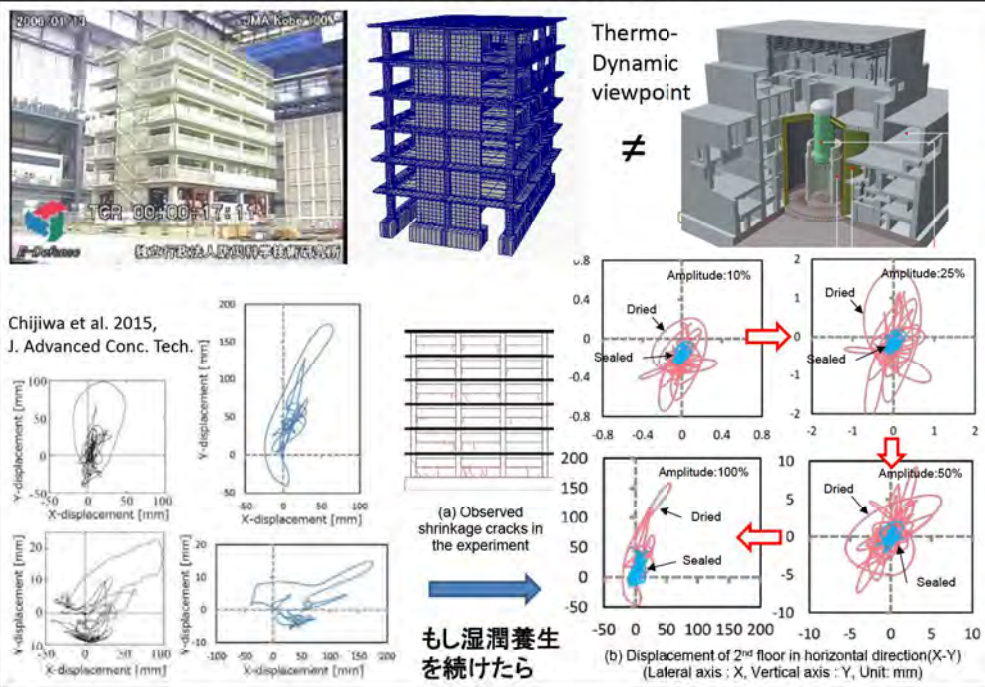


# 実建築物の固有振動数(剛性)の変化



3~5年で固有振動数が20~30%減少、初期剛性が30~50%も低下

# 話題2: 水の移動と建築構造耐震



# 世紀を超えた社会基盤インフラの有り様 戦略的な維持管理に



オリンピック 東京開催 in 1964

新幹線, 都市内/都市間高速道路 in 1964



約100万台/日の自動車(首都高速)  
50年に及ぶ公共交通基盤 → 一部で大規模な修繕も必要

話題3: 複合劣化: 疲労, 鋼材腐食, ASR, 凍結融解

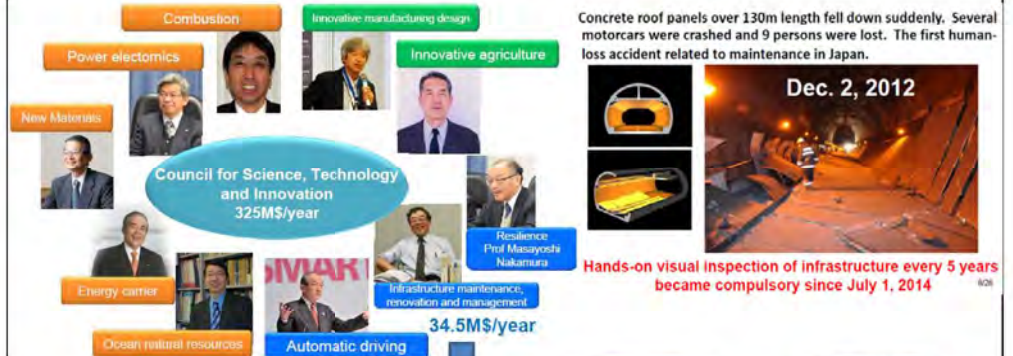


全国インフラ維持管理の経費  
190兆円 (今後50年)  
(1000兆円のストック)

60% 一道路資産/全インフラ  
60~70% 一橋梁/道路資産  
80~90% 一床版/橋梁

交通を止められない! 26/50

戦略的イノベーション創造プログラム(SIP): 2014~



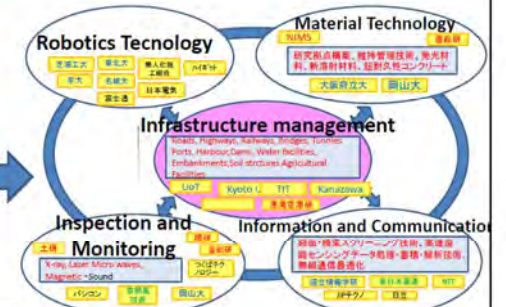
Concrete roof panels over 130m length fell down suddenly. Several motorcars were crashed and 9 persons were lost. The first human-loss accident related to maintenance in Japan.



Dec. 2, 2012  
Hands-on visual inspection of infrastructure every 5 years became compulsory since July 1, 2014

11プロジェクトの一つとして  
Infrastructure maintenance,  
renovation and management  
がスタート(藤野P. Director)  
約1500人、200以上の企業・  
官公・大学が参画

25/50



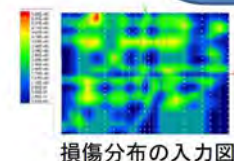
非破壊計測技術



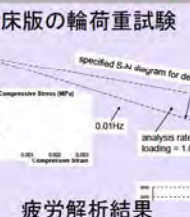
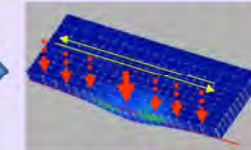
データ同化手法によるRC  
床版の余寿命解析  
床版サブプロ(岩城教授)

更新・補修・補強が予定され  
ている劣化床版のフィー  
ルド提供・点検データ・過去  
資料の提供を受ける。

データ同化



マルチスケール解析



将来予測  
余寿命評価

補修・補強対策

維持管理の合理化、  
構造物の長寿命化  
を実現

繊維補強したRC床版

27/50

既往の動的応答解析+メソスケール力学モデル→疲労寿命推定  
複合劣化が扱える ← 知識経験の融合

FATIGUE

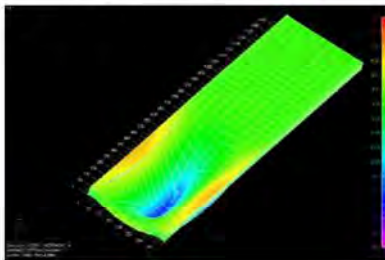


10<sup>6</sup>-10<sup>7</sup> cycles, lower stress level  
single sided, 10-50 years

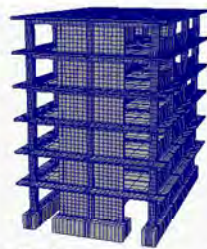
EARTHQUAKE



10-20 cycles, much high strain level (e-defense)  
reversed cyclic, 10-60 sec

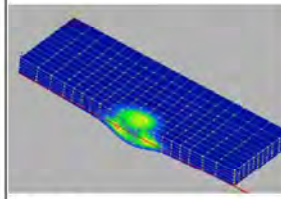
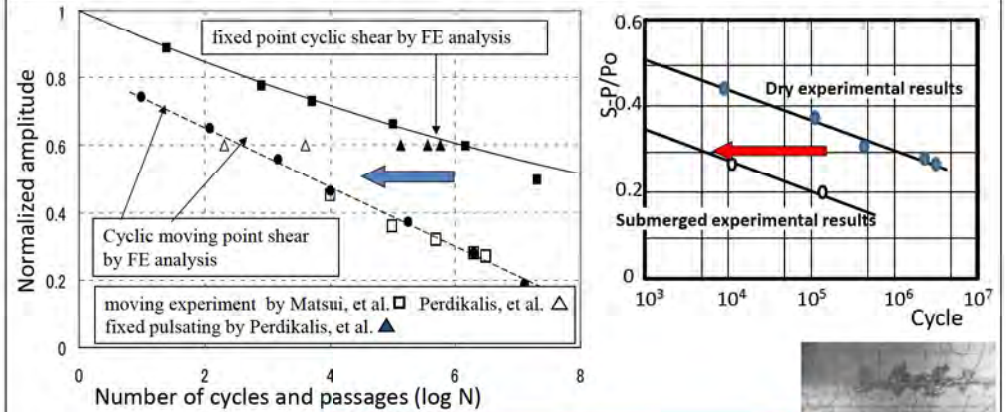


Maekawa et al. 2006,  
Chijiwa et al. 2015  
Journal of Advanced Concrete Tech.

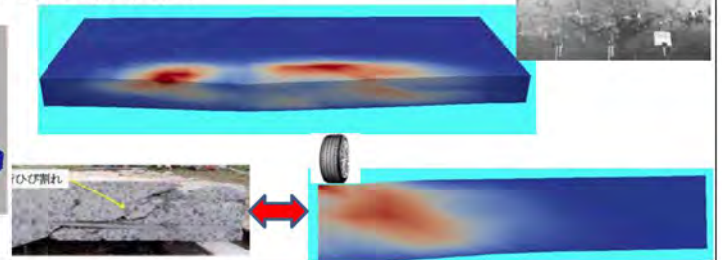


28/50

移動荷重 → 疲労寿命の大幅な劣化(2乗) → 滞留水でさらに1~2乗



29/50

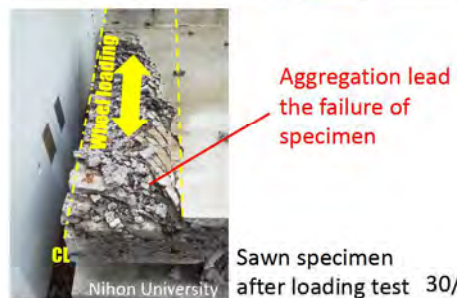


床版上面のコンクリートの砂利化

Aggregation on Highway bridge deck



Wheel loading test of RC slab specimen



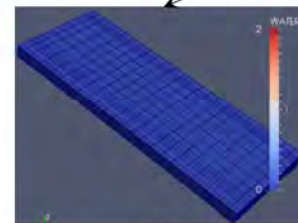
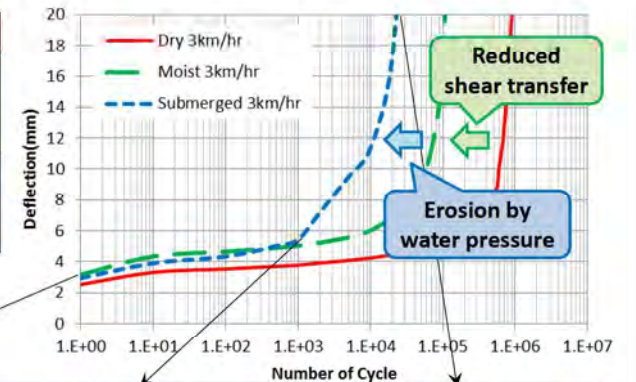
Aggregation lead the failure of specimen

Sawn specimen after loading test 30/50

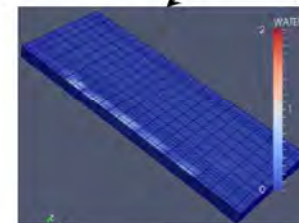
湛水によって損傷が加速、疲労寿命が1/100以上に低下

Dry air	High cycle loads
Wet condition	Fracture energy, strength, shear transfer
Stagnant water (condensed)	Furthermore, Erosion, disintegration

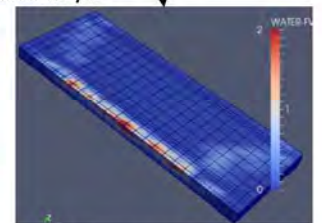
Load level = illegal level



走行N=1回



走行N=1,000回



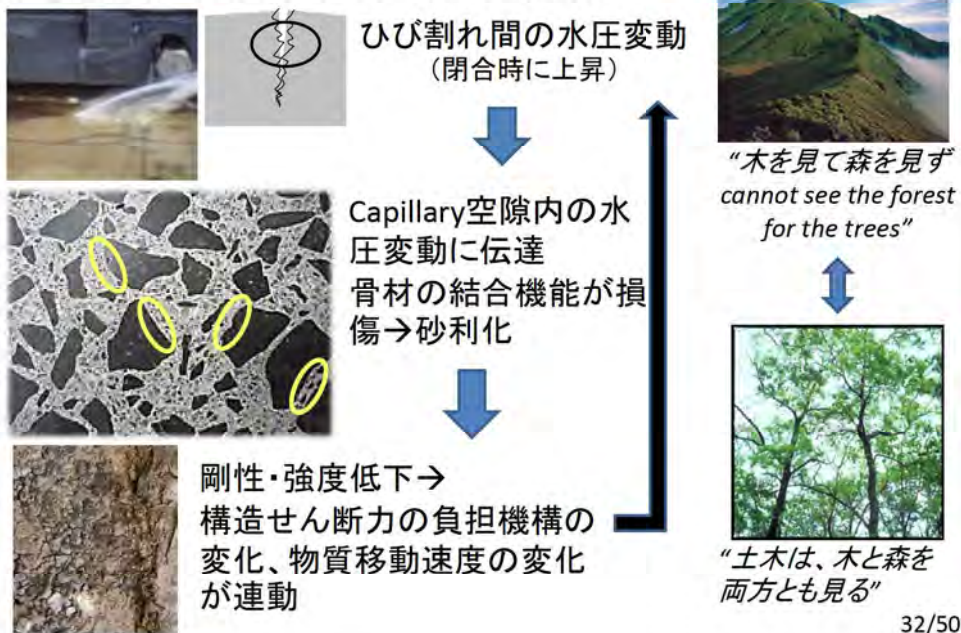
走行N=30,000回

31/50



# ひび割れ開閉→高cycle水圧変動→Capillary空隙内圧変動→砂利化

Maekawa et al (2015). *Journal of Material in Civil Eng.*, ASCE



様々な場で、複数の物理化学事象が、因果関係と  
相関関係を持ちながら並行

精度は？ 妥当性は？ 信頼できるの？

→ **検証、実証の繰り返し PDCAで鍛えこむ**

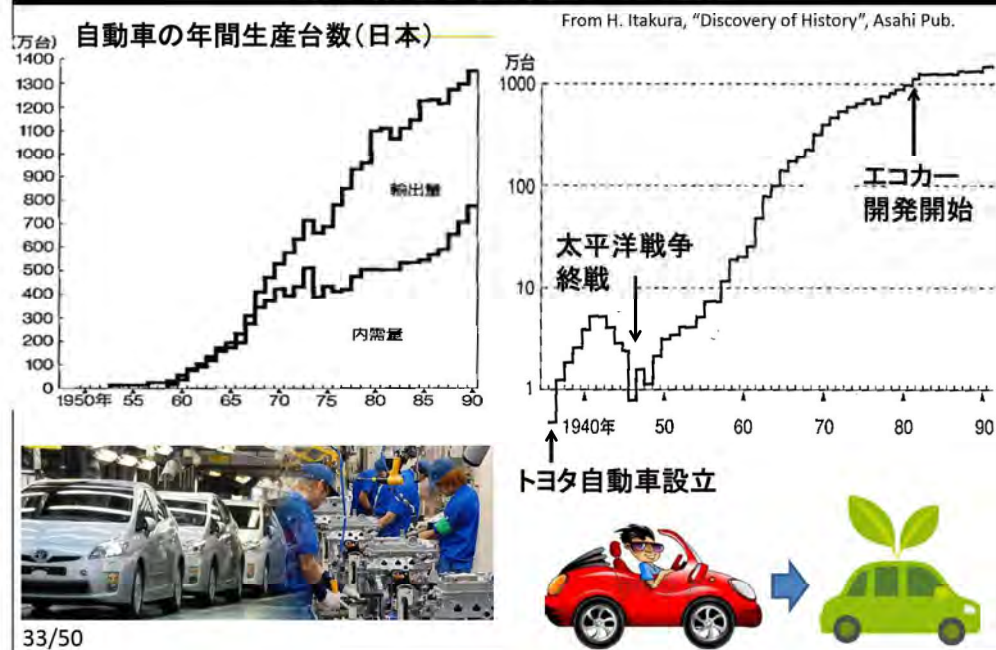
(微細な空間での挙動を計測しようとすることで、現実から  
乖離したものを計測してしまう)

Simulation 結果から、思わぬマクロな現象の存在が  
見えてくる。→ “**気づき**”への導き→あらゆる領域、  
境界や地平線を拡大 (土木学会100周年宣言):

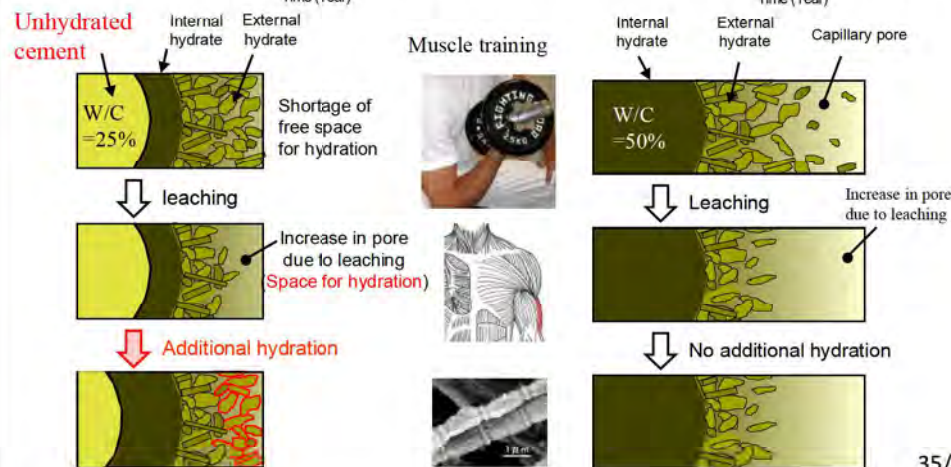
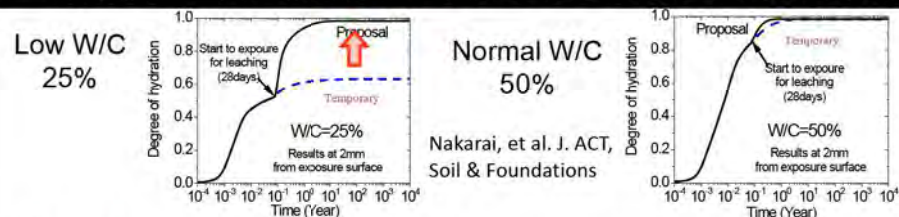
人工知能では置き換えることのできない、人間活動とは？

# 俯瞰的視点を得るための有効な方法

対数で分析 → 知識のタンスも同じ



# 気付(1) 自己修復→自己強化??: 思わぬアイデアの気づき



# 正しい筋トレと無理のない運動

## “血と汗と涙”... 汗だけ流す(特にシニア)

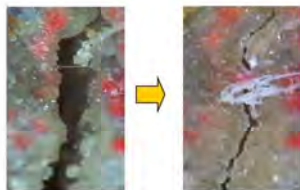
### トレーニング

- 過大な負荷はダメ ...
- 運動後は栄養摂取 ... (蛋白+少しの糖分)
- 休養も大切 ...



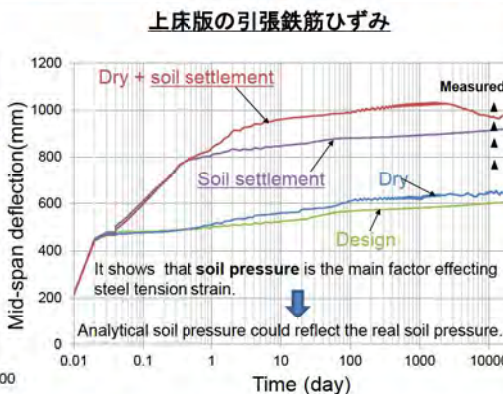
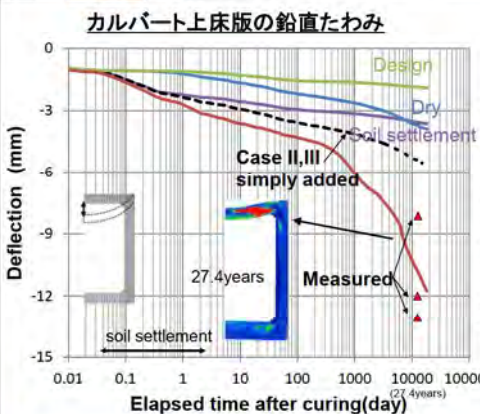
### コンクリート

自己修復可能なひび割れ幅  
未水和セメントが無いと自己修復・強化不可能  
浸透拡散によるイオン溶出  
CSH析出には時間を要する



36/50

## 15年程度が経過した段階で、地中構造に遅れ破壊が予見



埋め戻し土の圧密、乾燥度の勾配、持続荷重の複合作用 → 遅れせん断破壊が予見! → まさか。。。  
Kunieda et al 2014, Aging of Materials and Structures, TU Delft

## 気付(2) 思わぬ損傷の存在:遅れ破壊 Maekawa et al. 2016, J. ACT

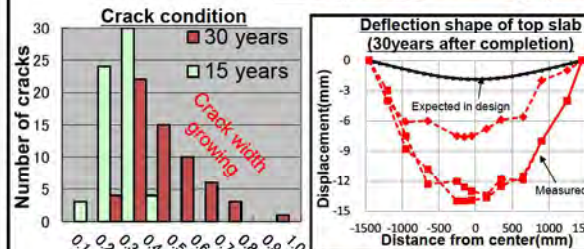
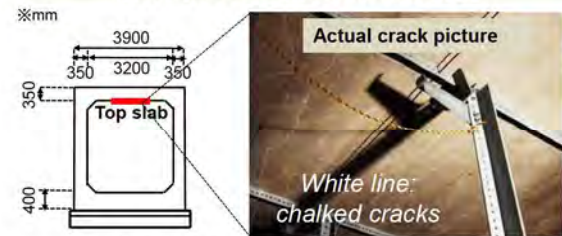


### Status of development



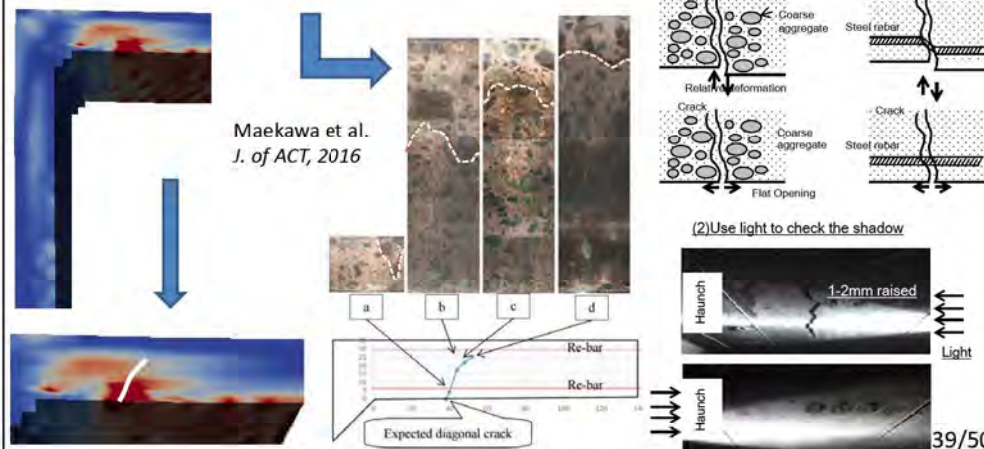
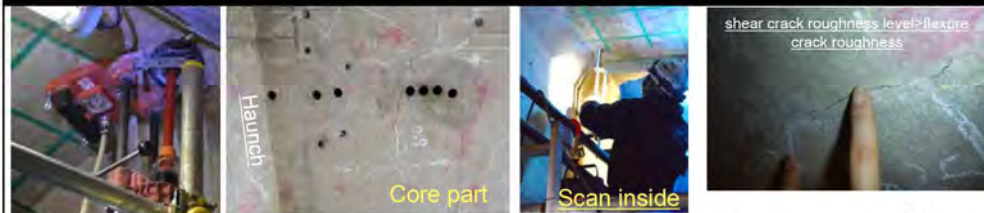
都市の動・静脈系  
共同溝、洞道、カルバート

建設後、数年~20年後に、過剰変位が発生。設計値の実に10~20倍のたわみが発見



Deflection excess 3~4times of prediction  
機構の解明→  
補修補強の要否、対策の可否を決める。

## 実際に発見:これまで想定していなかったリスク

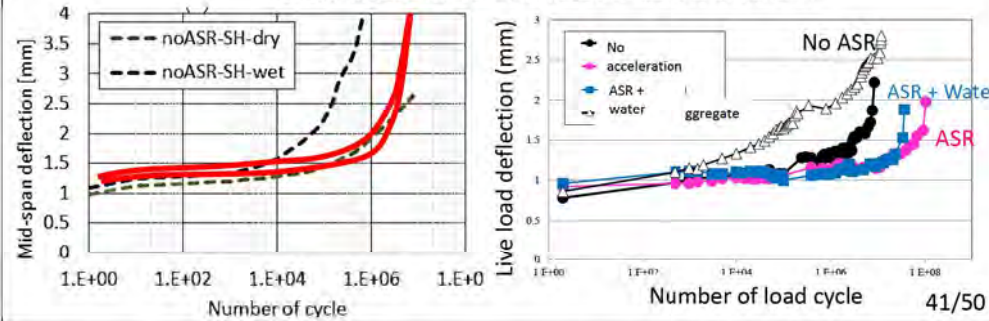


39/50

### (3) ASRによるひび割れと構造寿命、水に対する構造感度の変化



Takahashi and Maekawa, 2016, Sao Paulo ASR conf.  
 ASR損傷により、疲労寿命は健全な床版寿命の**10倍に増加!**  
 (プレストレスト効果による応力振幅減少) しかも、  
 水が滞留しても、ゲルがひび割れ閉合に抵抗し、水圧が上がらない  
 ので**寿命劣化(砂利化)が構造的に起こらなくなる!**



### 自己充填コンクリート: 多相・多階層の考え方と粒の力学

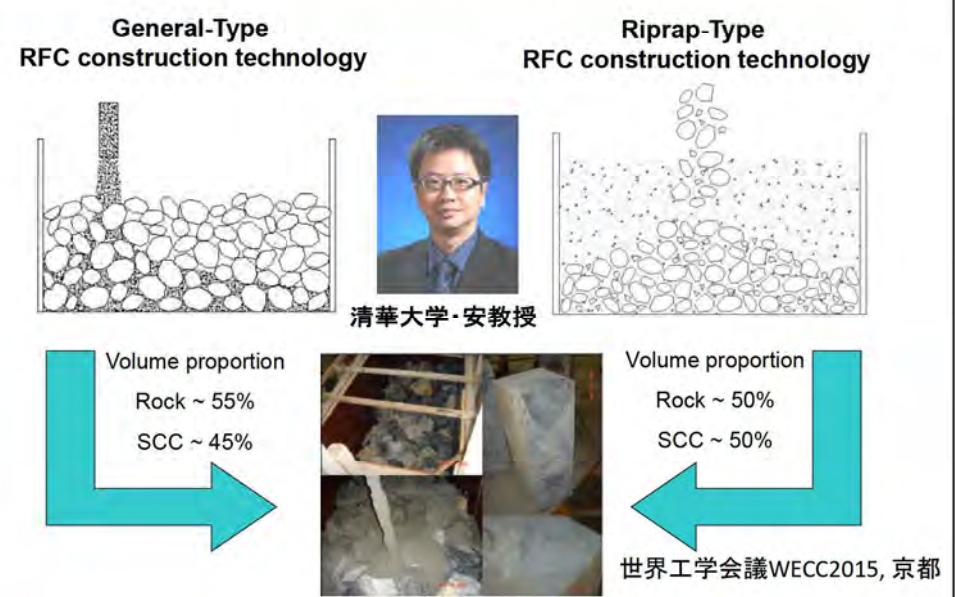


時実利彦博士  
脳生理学者

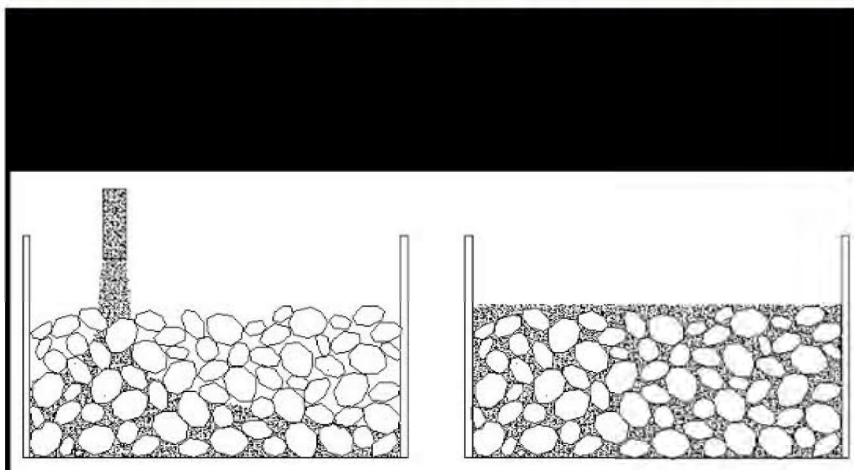
半世紀前に今日の情報化社会と次の世紀を予見(1962):  
 高度な知的活動(革新,芸術,社会...)を伴う職業とサービス業(心を持つ人間)  
**あらゆる既存領域の拡大に向けて:人工知能に任せられない仕事**

将棋やクイズ番組など「人工知能vs人間」の戦いが話題になっています。  
 第三次AIブーム: Deep learning, 機械学習、知識表現・獲得、遺伝アルゴリズム、  
 data mining, 音声認識、ビッグデータ.....  
 2014年のオックスフォード大学の研究報告では、「今後10年から20年ほどで、人工知能を含むITの進化の影響によって、米国の702の職業のうち約半分が失われる」

### さらに多相化(5相)したRFC

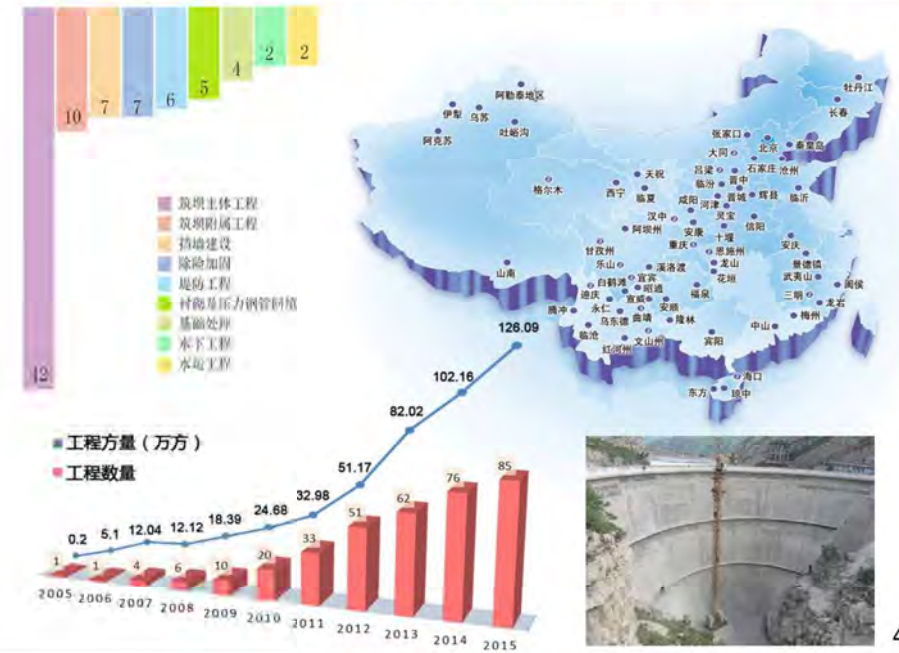


# 河川構造、水利ダム：2002-03年中国でスタート



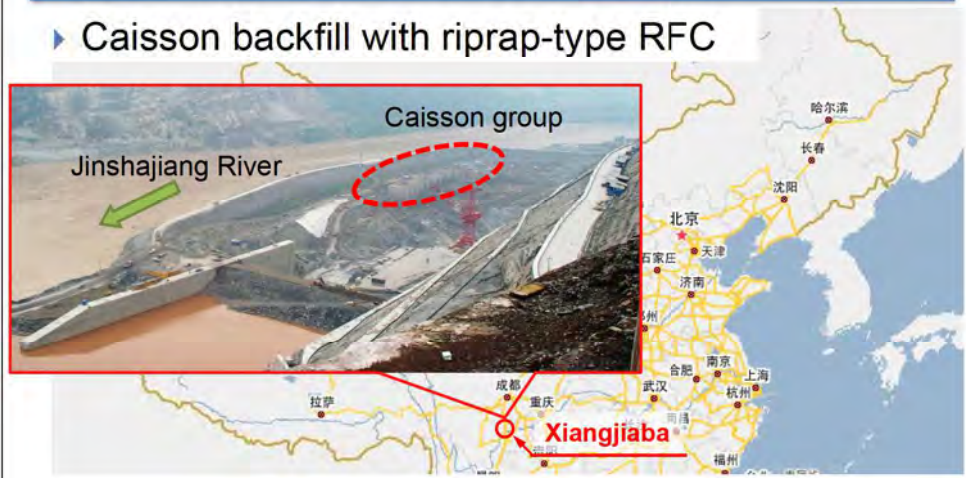
Rock-Filled Concrete

# 現在のRFCによる水資源開発プロジェクト



# 長江上流(金沙江): 仮締め切り用ケーソン基礎

## ▶ Caisson backfill with riprap-type RFC



- ▶ 四川省 揚子江
  - ▶ 中国で3番目に大きい水力発電所
  - ▶ 中国最大のケーソン群(長江流域)
- 技術を実装する知恵と根拠とフットワーク (技術者の仕事)

Caisson (Unit: m)

43.0-57.4

4.4 5.2 4.4

23.0

従来工法で30日を4日で完成  
作業員は危険現場にいないので、死傷事故ゼロ

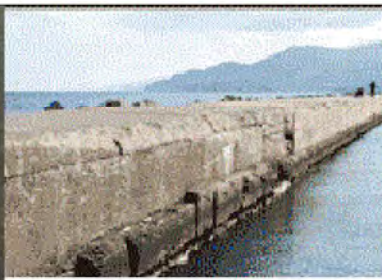


JSCE Homepage

広井 勇博士  
(1862-1928) The first Japanese doctorate of civil engineering and professor of civil Eng.



Specified textbook of US Univ. published at his age of 26.



Otaru-harbor : Break water construction : The first infrastructure project of Japan: 16% of the annual budget of the Japanese Government: Project Manager



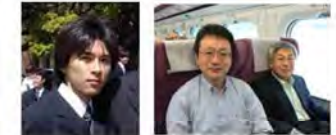
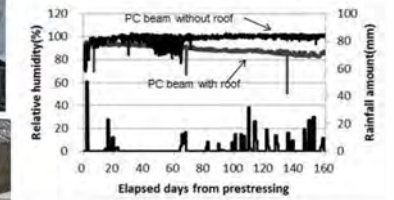
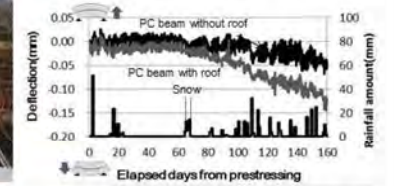
50, 100, 150....years tests of concrete used for the breakwater  
Volcanic ash included for elevated durability under marine environment.



材料-施工-構造システムの推移  
評価技術・データ分析 → PDCAを回す。

49/50

### 120年後を待たずに30年で検証を可能にし、次の世代に改良を託す —熱力学的に自然に溶け込むのは何時？ 微細空隙構造の相互作用の検証—



茨城県“墓守”をお願いしています  
石岡市柿岡