

テーマ

「職人不足の解消につながる生産性向上、省力化技術」

## ICTを活用した コンクリートの情報化施工

Information and Communication Technology  
( 情 報 通 信 技 術 )

建設業界はアナログからデジタルの時代へ

(一社)日本建築社団法人 第56回建材情報交流会  
平成31年2月15日 於:大阪府中央公会堂 B1F大会議室

# コンクリートを取巻く時代背景と今後の指標

- 時代背景

自動車業界・医学界・農業分野などに於いてもICTを駆使した品質管理の高度化や、施工技術のロボット化が著しく進化を遂げつつある現在、未だに遅れている建設業界に於いても近年国土交通省から『i-Construction』などが推奨され、AI（Artificial Intelligence）を使ったIoT（Internet of Things）の管理手法が推進され始めました。

- 今後の指標

少子高齢化時代を迎えた今、省力化・少人化が望まれるなか、型枠などに複合センサを搭載し、配線や設置の手間を省き、無線で情報をモニタリングする手法などを導入することで高度化・近代化した新世代の現場管理が目指せます。

# 新時代の要求

- 若材齢コンクリートに於ける品質担保の必要性

コンクリート構造物に求められる品質性能がますます高まりつつある中、若材齢コンクリートの品質管理は、長期耐久性能に大きく係わる極めて重要な要因です。

しかし、現実には、構造体の立地環境、用途、施工者の取組み方などの違いから徹底した若材齢コンクリートの品質管理は難しく、現場の状況判断に大きく依存しているのが現状であると思われます。

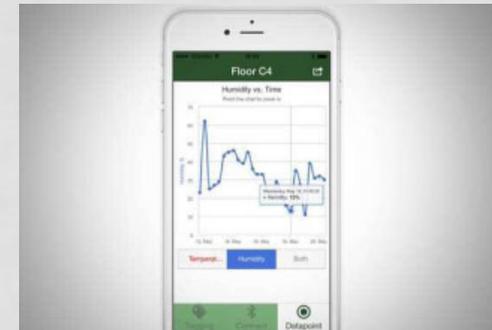
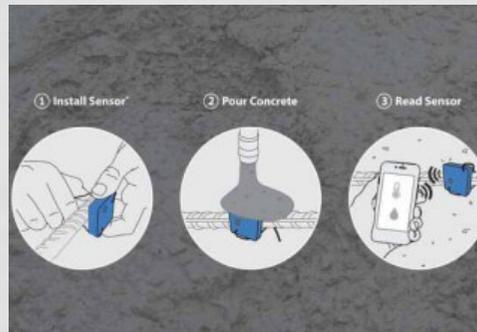
型枠の向う側で起きている水和反応の履歴を、センサを駆使したデータを時々刻々、時系列にして取り出せないものか。

# 海外における センシングテクノロジーの普及と現状



Wireless Sensors Reduce Time and Costs on a Major Building Project  
Leading to a New Corporate-Wide Best Practice

大規模な建築プロジェクトで時間とコストを削減する、ワイヤレスセンサー  
全社的な新しいベストプラクティスにつながる

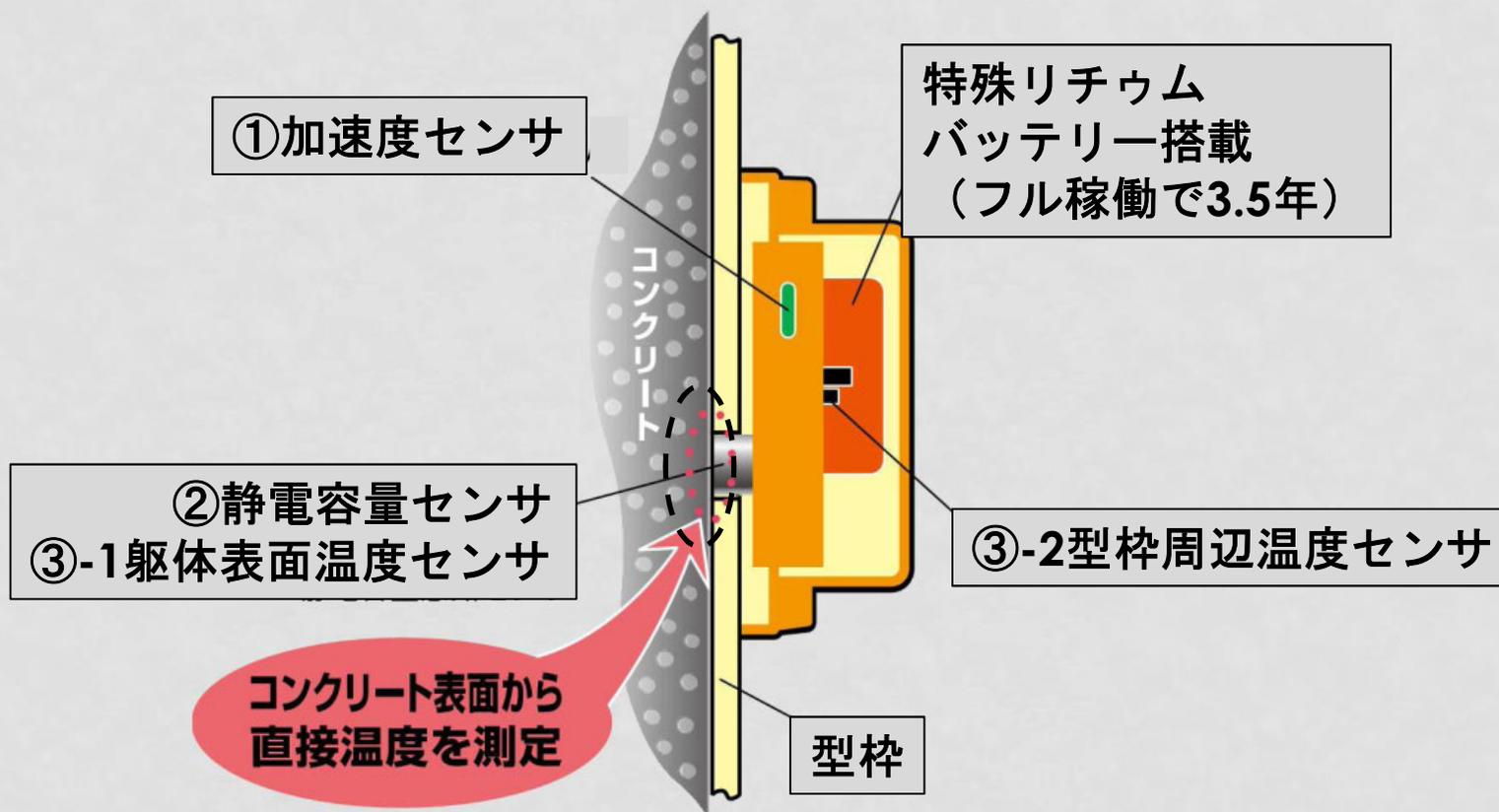


センサを鉄筋などに固定してコンクリート内部に埋設し、情報を無線で読み取る / 毎回使い捨てタイプ

# (例) 型枠の外側にセンサを搭載し 繰返し使用可能なセンサの断面図

日本製  
Made in Japan

電源が無くても稼働



コンクリート直接接触計測方式

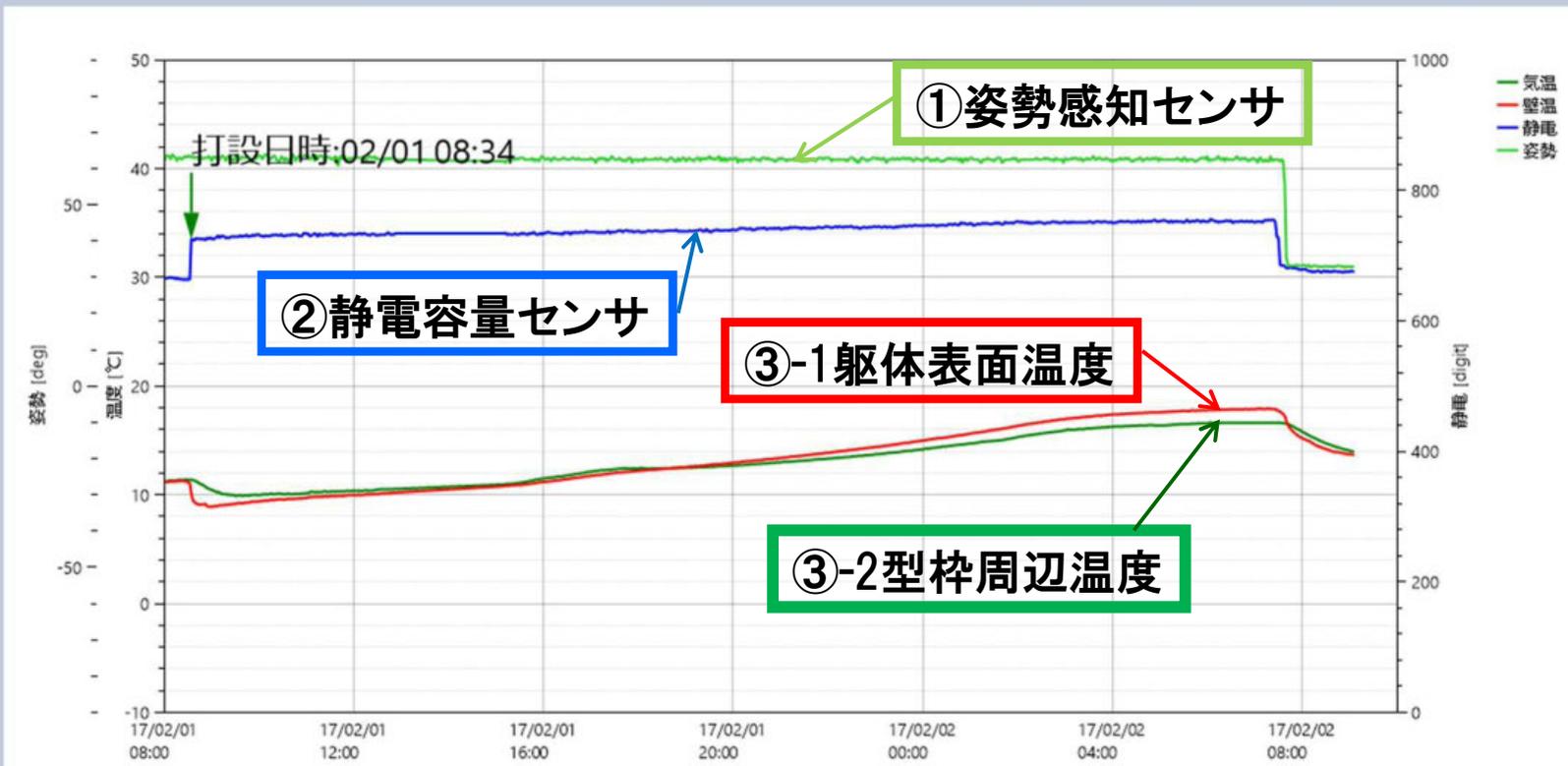
# (例) ドライブレコーダーのように3種類のセンサを使い コンクリート打設工程を検知し記録する

- 施
- ①加速度センサ . . . . → 型枠の設置状況感知  
(横置きから建込みへ変化)
- ↓
- 工
- ②静電容量センサ . . . . → コンクリート打設検知  
(生コンの付着で到達感知)
- ↓
- 工
- ③温度センサ . . . . → 水和反応の履歴  
(躯体表面温度を直に計測)
- ↓
- ③温度センサ . . . . → 強度発現の履歴  
(温度から強度を自動演算)
- ↓
- 程
- ②静電容量センサ . . . . → 型枠脱型状況感知  
(生コンの離脱で脱型を感知)
- ↓
- ①加速度センサ . . . . → 型枠脱型状況感知  
(縦使いから横置きへ変化)
-

# IDを持つ個体のセンサから得られる情報 (トンネル二次覆工工事/セントル仕様の実施例)

## センサー情報グラフ

センサID ラップ側SL(R) 2017/02/01 08時 ~ 2017/02/02 10時  壁温  気温  静電  姿勢



画面保存

戻る

# IDを持つ個体のセンサから得られる情報 (橋梁工事/橋脚仕様の実施例)

## センサー情報グラフ

センサID 0008171 2016/12/12 08時 ~ 2017/01/12 08時  壁温  気温  静電  姿勢

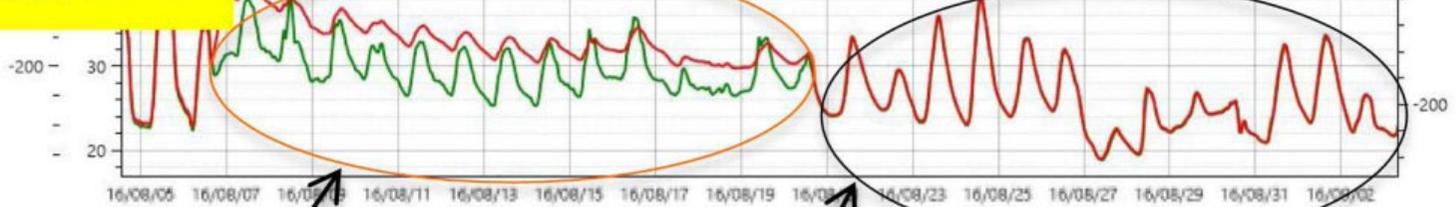
### ① 静電センサ



### ② 加速度センサ



### ③ 温度センサ



熱流有り

熱流無し

画面保存

戻る

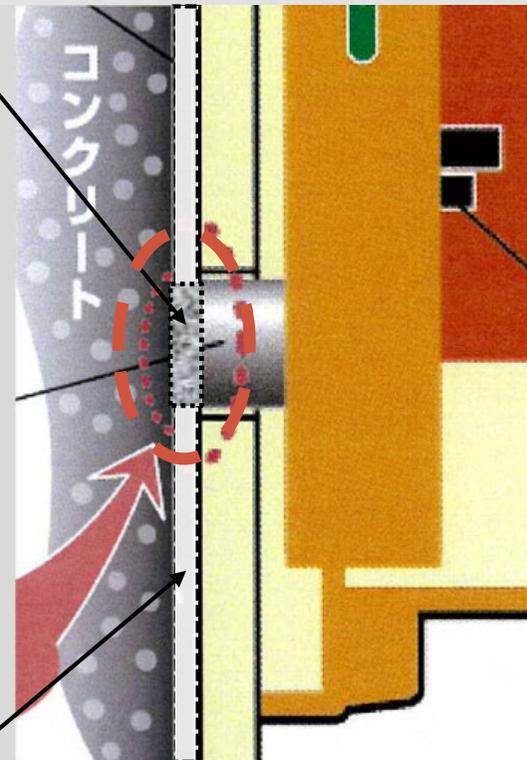


# センサを木製型枠に取付られないか



モルタルなどの付着

※ 生コンの水分で木製型枠が膨張収縮を繰り返すため、センシング部にモルタルなどが付着する結果、測定値の信頼性が失われることとなる。



膨張した木材

# 樹脂型枠とセンサの関係 躯体表面に発生する気泡 & ジャンカ

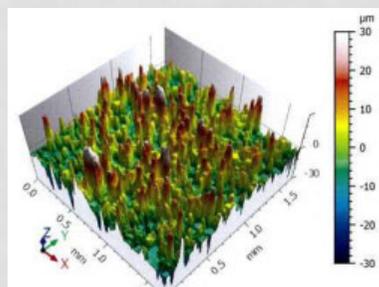
## 樹脂型枠と2000年の建築リサイクル法施行

### ①コンクリート躯体に気泡が発生しやすい

電子顕微鏡解析



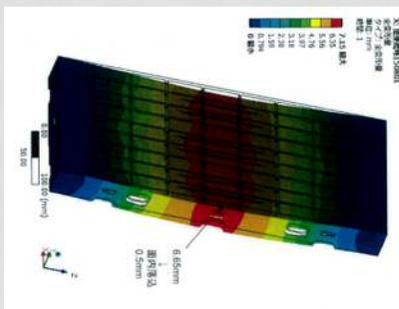
FEM解析



建築仕様  
近日発表

### ②型枠連結部からノロ漏れする

FEM解析



千本格子のイメージ



## 水和反応から熱力学的強度推定が可能な理由 (言葉や文化は違っても化学反応は世界共通)

- 積算温度をアレニウスの反応則に基づいて式変形すると、反応速度は自然対数の逆数を積分したものに比例するので、圧縮強度と一意の関係をもつことは明らかであるが、アレニウスの反応則から整理された有効材齢式の方が、セメントの種類や混和材の種類など、材料の特徴ごとに係数の値を変えるだけで、殆どのコンクリートに於いて、同じ式が利用できるように一般化されている。

また、その係数についても、遅延作用・促進作用といった化学反応上の意味づけがしやすく柔軟性も高く、コンクリートの力学特性に関わる研究論文においても国内外によらず広く利用されており、国際コンクリート連合（旧 CEB-FIP\*現fib）が、品質管理のためのコンクリートの圧縮強度推定式として採用している他、有効材齢式を用いてさまざまな性能評価が行われつつあり 2002年の土木学会示方書に於いては、収縮ひずみとクリープについて有効材齢式が導入されました。

- また、圧縮強度については、そもそも土木学会の示方書に強度推定の考え方がないため、記載こそありませんが、JCI（日本コンクリート工学会）のマスコングリートのひびわれ制御指針などにも有効材齢式が導入されており、高品質のために、圧縮強度もふくめた有効材齢の考え方の導入がますます進んでいくものと思われます。

我が国のコンクリート構造物の建設現場での導入は、未だ一般的ではないかもしれませんが、国際的な趨勢を見ても、今後、益々普及していくものと考えられます。

有効材齢及び積算温度という、両方の品質管理に対応していく方向が望ましいと思いますが、多様なコンクリートに対応しやすい汎用性から考えても、有効材齢式による圧縮強度推定を標準設定とする考え方がより妥当性があると思います。

# 有効材齢式を使った強度推定式

より確かな材齢

有効材齢を求める式



強度推定式

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / t_0} \right]$$

$$f_c(t_e) = \exp \left\{ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{(t_e - s_f) / T_0} \right)^{1/2} \right] \right\} f_{c28}$$

- $f_c(t_e)$  : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $t_e$  : コンクリートの有効材齢 (日)
- $\Delta t_i$  : 温度  $T$  が継続する時間 (日)
- $T(\Delta t_i)$  :  $\Delta t_i$  の期間のコンクリート温度 (°C)
- $t_0$  : 1(日)
- $T_0$  : 1 (°C)
- $f_{c28}$  : コンクリートの28日圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $s$  : セメント種類に関わる定数
- $s_f$  : 硬化原点のための補正項 (日)

セメントの種類	Sの値	S <sub>f</sub> の値
普通ポルトランドセメント	0.31	0.5
早強ポルトランドセメント	0.21	0
中庸熱ポルトランドセメント	0.60	0
低熱ポルトランドセメント	1.06	0
高炉セメントB種	0.54	0
フライアッシュセメントB種及びC種	0.58	0

# 国土交通省の動き

2015.04  
平成27年4月

資料4

型枠脱型の判定手法における積算温度  
などを用いた強度推定法の適用に関する  
研究について

(問合わせ)

材料研究グループ 土屋 直子

Tel 029-864-6621

E-mail [tsuchiya@kenken.go.jp](mailto:tsuchiya@kenken.go.jp)

# 国土交通省の動き-1

## 型枠脱型の判定手法における積算温度などを用いた強度推定法の適用に関する研究について

- ✓ 鉄筋コンクリート建物のコンクリート工事では、コンクリートの変形・損傷などが生じないように十分に強度が発現してから型枠を取り外すことが必要。

※昭和46年建設省告示110号「型枠及び支柱の取り外しに関する基準を定める件」では、型枠存置日数あるいは圧縮強度試験により達成すべき強度が規定されている。

- ✓ コンクリートの強度発現は、コンクリートの水和反応時の温度と相関がある。
- ✓ 現場では、工期短縮・コストカットのためにコンクリート試験体を用いた圧縮試験により強度発現を確認

 温度によりコンクリートの強度推定を行う手法が型枠脱型の判定に用いることができれば、合理的で効率的なコンクリート工事が可能となる。

# 国土交通省の動き-2

✓ コンクリートの強度発現は、コンクリートの水和反応時の温度と相関がある。

水和と発熱温度の関係 (例えば、鈴木、前川、1990、岸、前川1994)

部位、セメント種類・調合、外気気温による。

$$H_i = \gamma_i \beta_i \lambda_i \mu_i H_{i,20} (Q_i) \exp\left\{-\frac{E_i}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right\}$$

ここで、 $H_i, T_0$  は基準温度  $T_0$  (K) における鉱物  $i$  の基準水和発熱速度 (W/kg)、 $-E_i/R$  は温度活性 (WK/kg) であり、積算発熱量  $Q_i$  (kJ/kg) の関数である。 $\gamma_i$  はフライアッシュや有機流和剤による遅延効果を表す係数、 $\beta_i$  は自由水の減少による発熱速度の低減を表す係数、 $\lambda_i$  は  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  に依存したスラグやフライアッシュの発熱速度の変化を表す係数、 $\mu_i$  は鉱物組成の相違によるエーライト (C3S) とピーライト (C2S) の発熱速度の変化を表す係数である。

$$H = \sum p_i H_i = p_{C3A} (H_{C3AET} + H_{C3A}) + p_{C4AFET} (H_{C4AFET} + H_{C4AF}) + p_{C3S} H_{C3S} + p_{C2S} H_{C2S} + p_{SG} H_{SG} + p_{FA} H_{FA}$$

$H_i$  は鉱物  $i$  の水和発熱速度 (W/kg)、 $p_i$  は鉱物  $i$  の鉱物組成比

## 有効材齢と圧縮強度の関係式

(CEB-FIP model code 1990)

$$f_{cm}(t) = \beta_s(t) f_{cm} \quad (2.1-53)$$

with

$$\beta_s(t) = \exp\left\{s \left[1 - \left(\frac{28}{t/t_1}\right)^{1/2}\right]\right\} \quad (2.1-54)$$

where

$f_{cm}(t)$  is the mean concrete compressive strength at an age of  $t$  days  
 $f_{cm}$  is the mean compressive strength after 28 days according to eq. (2.1-1)

$\beta_s(t)$  is a coefficient which depends on the age of concrete  $t$   
 $t$  is the age of concrete (days) adjusted according to eq. (2.1-87)

$t_1 = 1$  day

$s$  is a coefficient which depends on the type of cement (for cement classification, refer to Appendix d, clause d.4.2.1):  $s = 0.20$  for rapid hardening high strength cements RS, 0.25 for normal and rapid hardening cements N and R, and 0.38 for slowly hardening cements SL.

$$t_r = \sum_{(-)} \Delta t_i \exp\left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0}\right] \quad (2.1-87)$$

where

$t_r$  is the temperature adjusted concrete age which replaces  $t$  in the corresponding equations

$\Delta t_i$  is the number of days where a temperature  $T$  prevails

$T(\Delta t_i)$  is the temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) during the time period  $\Delta t_i$

$T_0 = 1^{\circ}\text{C}$ .

$T < 80^{\circ}\text{C}$

$$f_{cm}(T) = f_{cm}(1.06 - 0.003T/T_0) \quad (2.1-89)$$

where

$f_{cm}(T)$  is the compressive strength at the temperature  $T$

$f_{cm}$  is the compressive strength at the temperature  $20^{\circ}\text{C}$  from eq. (2.1-1)

$T$  is the temperature in ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_0 = 1^{\circ}\text{C}$ .

## 有効材齢と圧縮強度の関係式 (建築学会マスコン指針)

$$f_c(t_e) = \exp\left\{s \left[1 - \left(\frac{28}{(t_e - s_f)/t_0}\right)^{1/2}\right]\right\} f_{c28}$$

$f_c(t_e)$ : コンクリートの圧縮強度

$f_{c28}$ : コンクリートの 28 日圧縮強度

$s$ : セメントの種類に関わる定数

$s_f$ : 硬化原点のための補正項

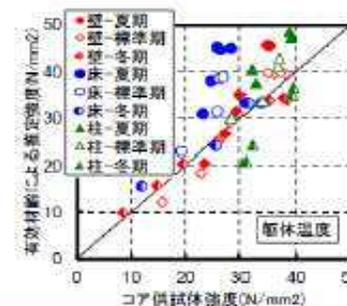
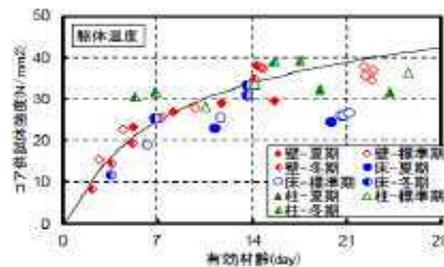
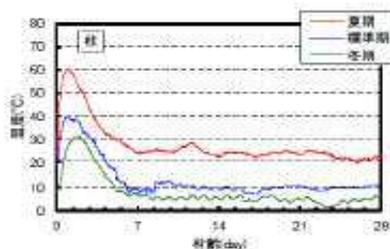
実験係数

# 国土交通省の動き-3

## 型枠脱型の判定手法における積算温度などを用いた強度推定法の適用に関する研究について

◆ 温度履歴による有効材齢を用いた強度推定の評価方法の型わく取りはずしの判定への適用性について検討した。

温度履歴結果 → 有効材齢と圧縮試験強度の関係から実験係数取得 → 有効材齢による推定強度と従来のコア強度試験の結果と比較



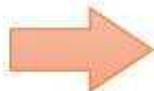
13種類の方法による模擬部材を季節ごとに作成し、温度測定およびコア強度の試験を通じて検討した。

# 国土交通省の動き-4

## 型枠脱型の判定手法における積算温度などを用いた強度推定法の適用に関する研究について

### ◆有効材齢と圧縮強度の関係

- 部材の種類にかかわらず有効材齢を用いた既往の強度推定式の傾向によく合致する。
  - 実験により得られた係数を用い検討した結果  
→柱・壁の推定強度はコア供試体の圧縮強度とほぼ同等、あるいは小さくなる(一部を除く)傾向が見られるため、考え方の方針は間違いではない。
  - 特に初期材齢においてはいずれの試験水準においても安全側での評価となっている。
- ※更なる実験検討や温度の測定方法、積算方法の確立が必要



初期材齢については、温度によりコンクリートの強度推定を行う手法が型枠脱型の判定に用いることが可能であると考えられる。

チヨット息抜き!

## 建設現場の謎々Word

なぜ? 何故?

### 【言葉の由来】

- ネコ (一輪車)
- ウマ (四本脚の台)
- ケレン (鉄部に付着した錆や塗料などを取る作業)



Cleaning	or	Kehren
英語	掃除	ドイツ語

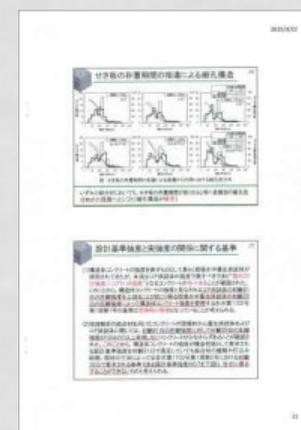
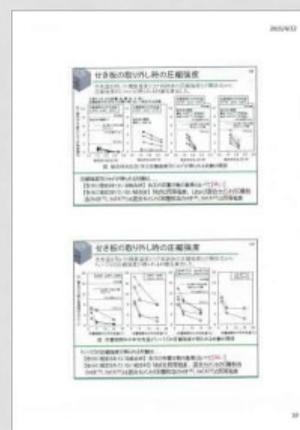
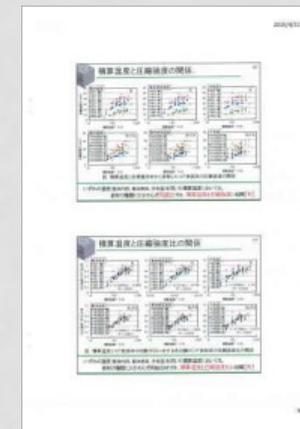
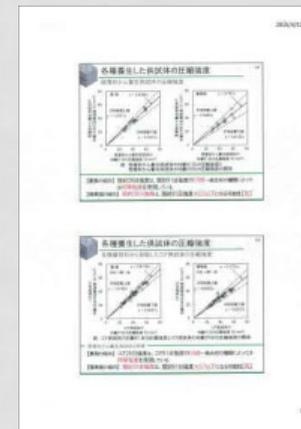
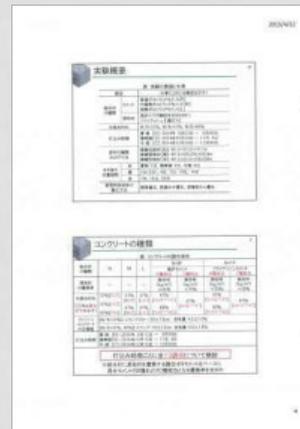
# 平成26年度 建築基準整備促進事業報告会

平成27年4月23日

平成 26 年度  
建築基準整備促進事業報告会  
配布資料  
<1 日目・午後の部>

平成 27 年 4 月 23 日

国土交通省  
住宅局 建築指導課  
住宅生産課  
国土技術政策総合研究所





# 告示6頁下段の拡大画面 建築基準法第76条第2項に追記

平成28年3月17日

第一第一号中「又は」の下に「次のイ若しくはロに掲げる方法により求めた」を加え、同号に次のように加える。

イ 日本工業規格A—108（コンクリートの圧縮強度試験方法）—120—12によること（コンクリートの圧縮強度試験に用いる供試体が現場水中養生、現場封かん養生又はこれらに類する養生を行ったものである場合に限る。）

ロ 次の式によって計算すること。

$$f_{cs} = \exp \left[ s \left[ 1 - \left( \frac{28}{(t_e - 0.5) / t_0} \right)^{1/3} \right] \right] \cdot f_{cs}$$

この式において、 $f_{cs}$ 、 $s$ 、 $t_e$ 、 $t_0$ 及び $f_{cs}$ はそれぞれ次の数値を表すものとする。

$s$  コンクリートの圧縮強度（単位：一平方メートルにつきニュートン）  
セメントの種類に応じて次の表に掲げる数値

セメントの種類	数値
普通ポルトランドセメント	0・31
早強ポルトランドセメント	0・21
中庸ポルトランドセメント	0・60
低熱ポルトランドセメント	1・06
高炉セメントB種及び高炉セメントC種	0・54
フライアッシュセメントB種及びフライアッシュセメントC種	0・58

$t_e$  次の式によって計算したコンクリートの有効材齢（単位：日）

$$t_e = \frac{1}{24} \sum \Delta t_i \cdot \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T_i / T_0} \right]$$

この式において、 $\Delta t_i$ 、 $T_i$ 及び $T_0$ はそれぞれ次の数値を表すものとする。

$\Delta t_i$  (—) 回目のコンクリートの温度の測定（以下単に「測定」という。）から、  
回目の測定までの期間（単位：時間）

$T_i$  回目の測定により得られたコンクリートの温度（単位：摂氏度）

$T_0$  1（単位：摂氏度）

$f_{cs}$   $t_0$  日本工業規格A五三〇八（レディーミクスコンクリート）—120—14に規定する呼び強度の強度値（建築基準法（昭和二十五年法律第二百一十号）第三十七条第二号の国土交通大臣の認定を受けたコンクリートにあつては、設計基準強度に当該認定において指定された構造体強度補正値を加えた値）（単位：一平方メートルにつきニュートン）

第一第二号ただし書中「ただし」の下に「次のイ又はロに掲げる方法により求めた」を加え、「圧縮強度試験の結果」を削り、「別表は欄」を「同表は欄」に、「一平方センチメートルにつき百二十キログラム」を「一平方メートルにつき十二ニュートン」に、「九十キログラム」を「九ニュートン」に改め、同号に次のように加える。

イ 前号イに掲げる方法によること（コンクリートの圧縮強度試験に用いる供試体が現場水中養生、現場封かん養生又はこれらに類する養生を行ったものである場合に限る。）

ロ 日本工業規格A—107（コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法）—120—12の圧縮強度試験によること（コンクリートの圧縮強度試験に用いる供試体が、コンクリートから切り取ったコア供試体又はこれに類する強度に関する特性を有する供試体である場合に限る。）

# (例) 躯体表面温度カラー分布

上段：センサ個体IDナンバー



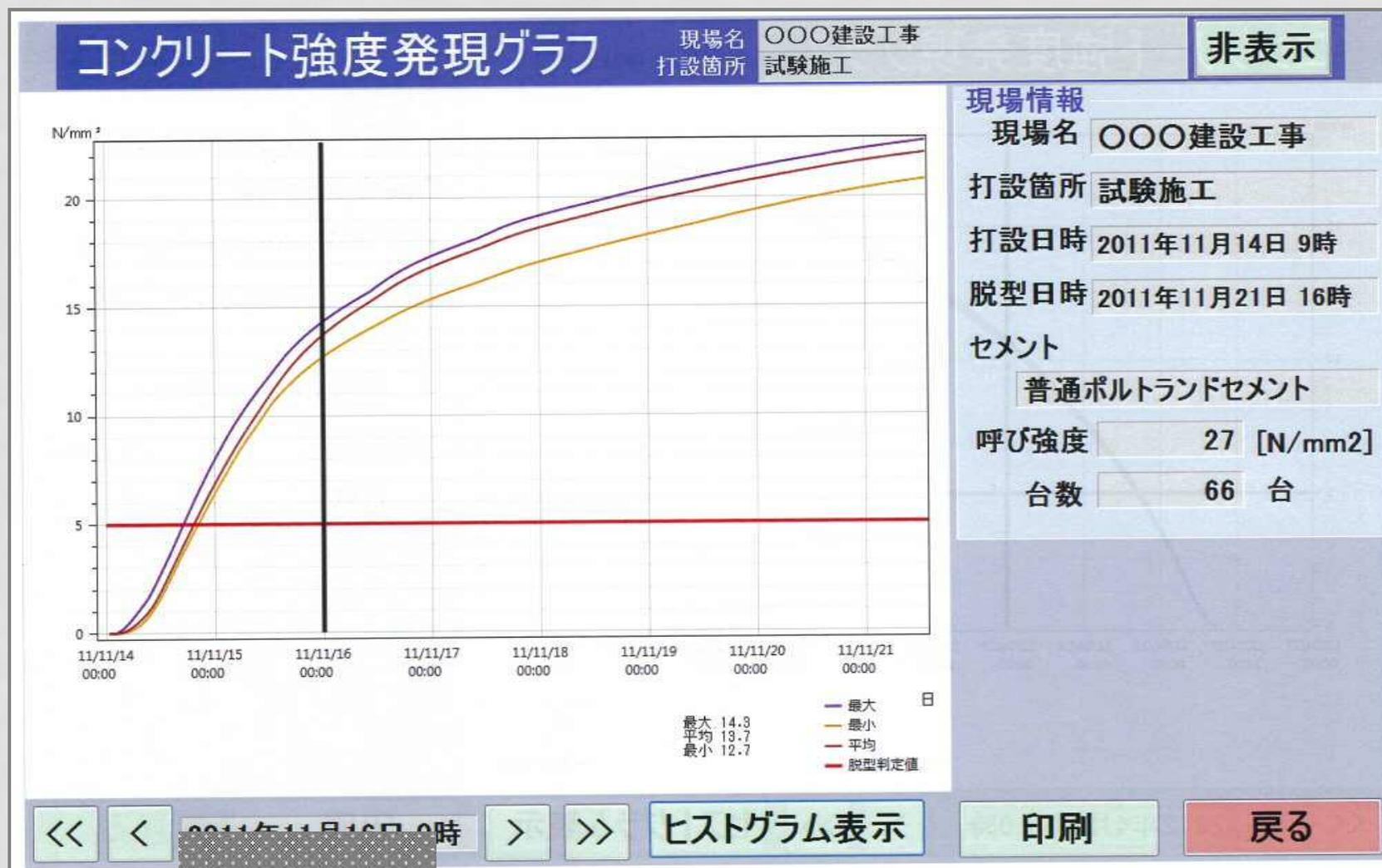
下段：測定温度

# (例) 躯体表面強度カラー分布

上段：センサ個体IDナンバー



# 水和反応の強度発現を連続的にタイムリに 情報収集・データ管理・記録



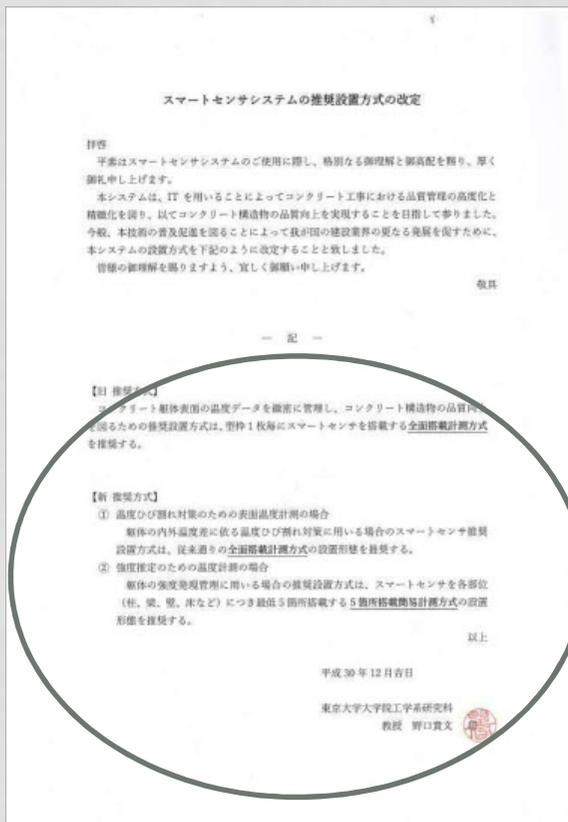
# センサ型枠の全面搭載から部分搭載へ改定

オーバースペックから適正搭載へ

2018/12/14

## センサ設置基準の改定

## 左記の改定文面 拡大



### 【旧 推奨方式】

コンクリート躯体表面の温度データを緻密に管理し、コンクリート構造物の品質向上を図るための推奨設置方式は、型枠1枚毎にスマートセンサを搭載する全面搭載計測方式を推奨する。

### 【新 推奨方式】

#### ① 温度ひび割れ対策のための表面温度計測の場合

躯体の内外温度差に依る温度ひび割れ対策に用いる場合のスマートセンサ推奨設置方式は、従来通りの全面搭載計測方式の設置形態を推奨する。

#### ② 強度推定のための温度計測の場合

躯体の強度発現管理に用いる場合の推奨設置方式は、スマートセンサを各部位（柱、梁、壁、床など）につき最低5箇所搭載する5箇所搭載簡易計測方式の設置形態を推奨する。

以上

平成30年12月吉日

東京大学大学院工学系研究科  
教授 野口貴文

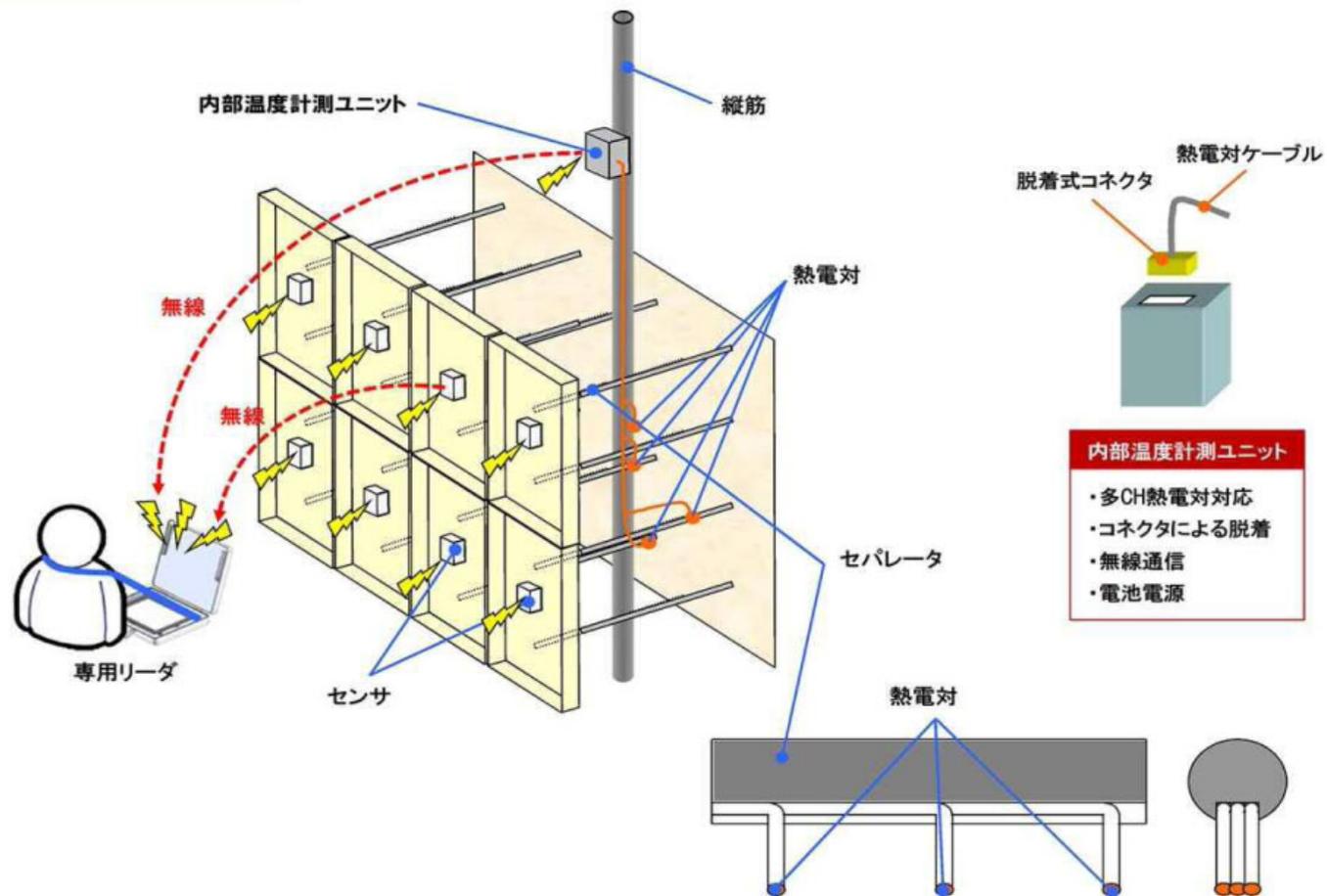


# 野口貴文教授との御縁



# マスコンの内部温度拘束による 温度ひび割れの一元管理

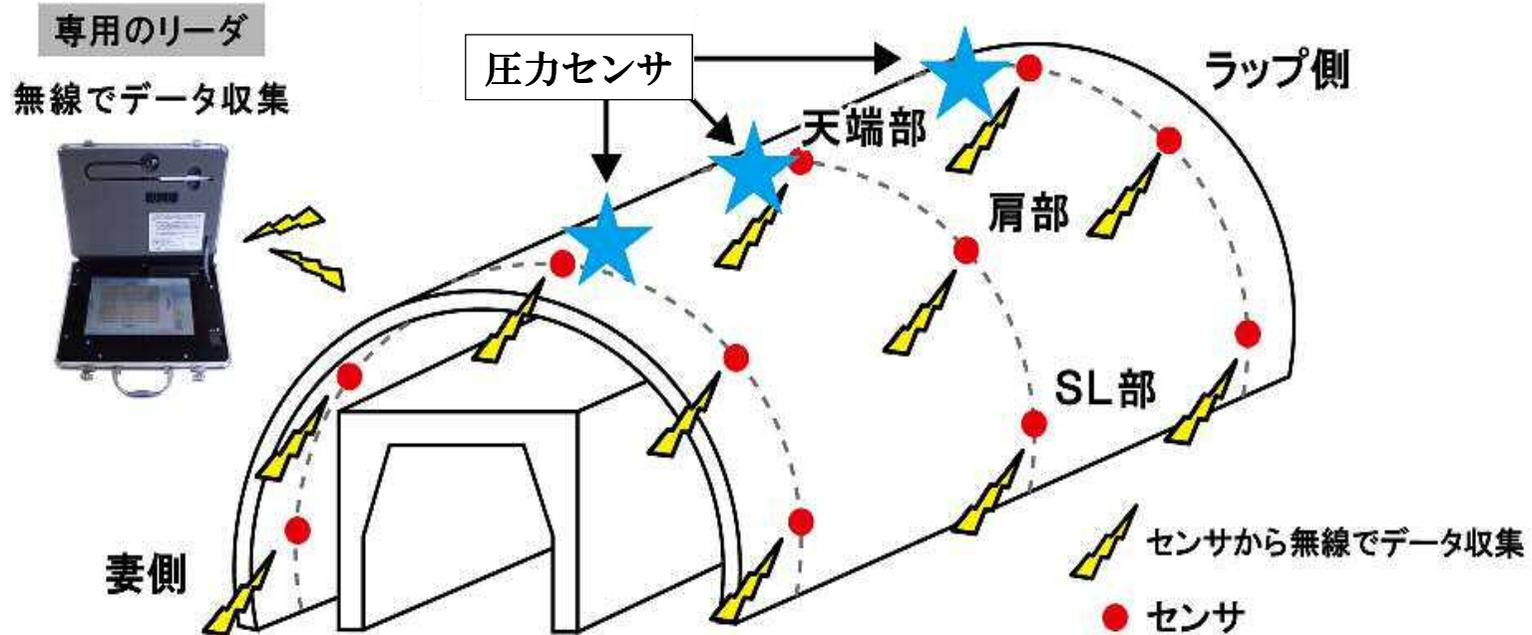
## コンクリート内部温度計測ユニット



セントル設置～打設位置確認～水和熱感知記録～圧力管理  
(加速度センサ) (静電容量センサ) (温度センサ) (圧力センサ)

## 若材齢の脱型強度判定

型枠設置から打設状況から脱型までの施工行程を一元管理・記録



# 適性強度に基づく床版14Nの脱型判断や プレストレストの緊張タイミングの確認・検証・記録

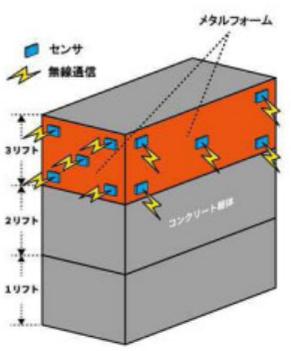
## センサシステム

コンクリートの情報化施工・i-Construction

センサシステム導入のメリット

緊張強度  
ひび割れ対策  
の確認・検証・記録

内部温度測定ユニット併用で内外温度差を一元管理。  
適切な脱型基準で養生期間を最適化できます。  
工期短縮・コスト削減も可能  
省人・省力化にも有効  
無縁なので配線手間が不要です。4週8休も可能!  
躯体そのものの強度管理ができる  
躯体の表面から直接強度を推定するのでテストピイスは不要。  
専用リーダーで一元管理  
型枠建込み・充填感知・強度確認・脱型までの施工情報を記録。



働き方改革  
目標達成!

専用リーダー

これは効率がイイぞ!  
工期短縮もできそうだ!



# センサ搭載型枠の実施例

(脱型強度や緊張強度の確認・温度ひび割れ制御)



橋脚



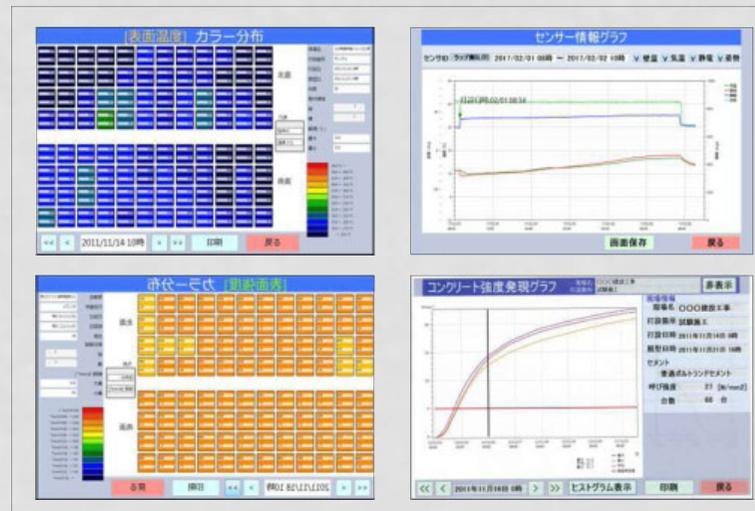
トンネル (セントル・フィルム工法)



ダム



海洋土木 (防潮堤・防波堤)



リーダ内でデータを基に自動演算して画面表示し記録

# おわりに

- ここまでご説明してきたセンシング技術や次世代型枠は、現在、社会資本整備における土木工事、いわゆる公共工事に盛んに投入されるようになりましたが、今後は建築分野においても、RC構造の現場打ちコンクリートの品質担保や、二次製品のPC工場などにおける品質証明であったりと、コンクリートに限らず多方面に亘る建築材料のデジタル化が進むものと考えられます。
- 生産性の向上と省力化へ向けて、益々進化して行く建築材料と共に、様々なセンシング技術も共存共栄を図ってまいりたいと考えます。

後世に残る高品質の躯体づくりに日々研鑽し、

建設業界の更なる発展と、省力化・少人化の達成を目指し

安心・安全な明るい未来と、ICTで管理された建設現場の実現へ向けて

皆様の御理解とご賛同とご協力を賜りますよう、宜しくお願い申し上げます。

又、皆様のご健勝と、貴社の益々のご隆盛を祈念しつつ本講演を終了させていただきます。

## ご清聴ありがとうございました

児玉株式会社

本社 大阪市中央区谷町7丁目5-8

問合せ先

エンジニアリング事業部

福岡市博多区豊2丁目4番23号

執行役員 事業部長 西島 茂行

連絡先 092-474-5360

携帯電話 080-5278-2557