

## 論文 構造物中のコンクリートの応力測定方法に関する再検討

高瀬 和男<sup>\*1</sup>・倉田 幸宏<sup>\*2</sup>・下村 匠<sup>\*3</sup>・丸山 久一<sup>\*4</sup>

**要旨:** コンクリート構造物内部の応力を測定する方法としては、コンクリートのひずみから推定する方法と共に応力を直接抽出する「有効応力計」による方法がある。この「有効応力計」による方法はコンクリートのひずみを計測するのではなく、コンクリート内に設置されたロードセルに働く「力」を計測する実用的な方法であり、現在かなりの使用実績がある。しかし、本方法は材齢初期のコンクリート温度応力などの計測においては、検証されている文献は少ない。本文では「有効応力計」の測定原理について検証するとともに、材齢初期の計測データからその問題点を明らかにし、その対応策について示したものである。

**キーワード:** 有効応力計, 材齢初期, 温度応力

### 1. はじめに

コンクリート構造物に発生するひび割れは、耐久性能に大きな影響を及ぼすことが知られており、その制御方法については多くの研究が行われている。研究においては、構造物から抽出される多くのデータが研究の重要な要素となり、その計測精度は事実を示す保証となっている。

構造物から抽出されるデータにはコンクリート温度、コンクリートひずみなどとともに「有効応力計」により直接抽出される応力がある。「有効応力計」開発以前の応力評価の方法は、コンクリートひずみを測定しこれにヤング係数を乗じて応力が求められていた。そのひずみには弾性ひずみのほかにクリープ・乾燥収縮ひずみも含まれており、その分離方法が難しかった。

現在一般的に使用されている「有効応力計」は1985年頃に開発された測定器具であり、コンクリートひずみを計測するのではなくコンクリート内に設置されたロードセルに働く「力」を計測する、つまり弾性ひずみに対応する応力を直接検出する実用性が高い方法である<sup>1),2)</sup>。この「有効応力計」の評価については、JCI「マスコ

ンクリートのひび割れ制御指針<sup>3)</sup>にも紹介されているように定量的評価という点では、ある程度の精度で内部応力の発現傾向を把握するには適用できると考えられている。しかし、過去に評価されている測定精度は、計測条件を整理した理論式において精度の評価を行っており<sup>3),4)</sup>、温度応力によるひび割れ発生において重要な材齢初期における計測結果などについて検証を行った文献は少ない。

本論文は、「有効応力計」による構造物内のコンクリートの応力を測定する原理を整理し、材齢初期の計測精度について検証を行った。さらに、その課題を明らかにすると共に適切に応力評価するための対策を示すこととした。

### 2. コンクリート有効応力計

有効応力計は、対象とするコンクリートの力学性状（ヤング係数、クリープ特性の経時変化を含む）が分からなくても応力が測定できることが特徴である。また、一般に応力を直接計測することは困難であり、有効応力計でも荷重変換器であるロードセルを用いて応力の換算を行

\*1 駒井鉄工（株） 富津工場副工場長 工博（正会員）

\*2 石川島播磨重工業（株） 橋梁事業部設計部技術開発グループ課長 工修（正会員）

\*3 長岡技術科学大学 環境・建設系助教授 工博（正会員）

\*4 長岡技術科学大学 理事副学長 Ph.D（正会員）

っている。応力計の構造を図-1に示す。ロードセルと被測定部コンクリート、および柱状コンクリートを直列配置したものである。応力計の長手方向において、ロードセル端面のアンカーによりフランジと柱状コンクリートが、そして柱状コンクリート端面のアンカーにより被測定部コンクリートとが互いに接続されており、引張応力の測定も可能になっている。応

力計の長手方向に平行な4面は、縁切り材により被測定部コンクリートとは切り離されているが、湿気は自由に移動できる構造になっている。これは、周囲の被測定部コンクリートと湿気の移動を自由にすることにより、柱状コンクリートの物性を材齢初期時の状態から充分硬化した状態まで、被測定部コンクリートと同一にするためである。柱状コンクリートの長さをロードセルの長さ比べて充分大きくとり(9:1)、かつロードセルの断面積を大きくしている。

このような機構により、(a)柱状コンクリート部の応力の整流効果、(b)打込み直後から時間経過とともに変化する被測定部コンクリートのヤング係数と、有効応力計全体としての見掛けのヤング係数をできるだけ一致させることができるようになっている。また、柱状コンクリートが被測定部コンクリートと同じ挙動をするため、理論上、応力に無関係なクリープひずみ、収縮ひずみに対しては、検出されないものとなっている。さらには、ロードセルの線膨張係数がコンクリートとほぼ等しいものであることから、温度の影響は無視できるため温度補正は不要である。

### 3. 有効応力計の理論と誤差の検証

#### 3.1 仮定

検証に当たって以下の仮定を行う。

(1) 有効応力計の両端は周辺コンクリートと一

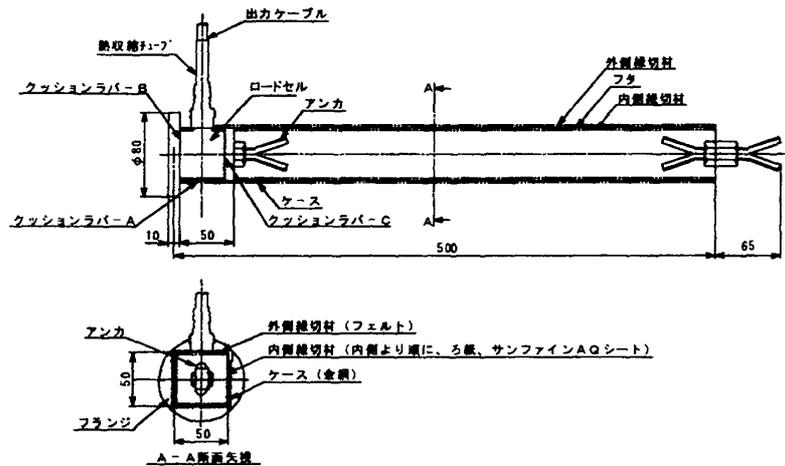


図-1 有効応力計の構造図

体化している(変位が一致する)。これにより、有効応力計全体の伸縮は周辺コンクリートの伸縮と適合する。

- (2) 有効応力計の側面は周辺コンクリートと絶縁されている。すなわち、力の伝達はなく、変位は一致しなくてもよい。
- (3) 有効応力計のケースの軸方向剛性による拘束がない。
- (4) 有効応力計の設置される領域では、有効応力計の空間スケールでの応力の一様性が実現されている。

#### 3.2 無次元係数の導入

有効応力計のコンクリート部分の長さ( $l_c$ )とロードセル部分の長さ( $l_s$ )の比  $m$  を式(1)、コンクリートヤング係数( $E_c$ )とロードセルのヤング係数( $E_s$ )の比  $n$  を式(2)に示す。

$$m = l_c / l_s (\cong 10) \quad (1)$$

$$n = E_c / E_s \quad (2)$$

ここに、材齢初期コンクリートではヤング係数比  $n$  は時々刻々と変化する。

有効応力計の体積( $V_{sc}$ )と周辺コンクリートの体積( $V_c$ )の比  $k$  (一次元状態では断面積比) を式(3)に示す。 $k$  は理想的にはほぼ0である。

$$k = V_{sc} / V_c \quad (3)$$

ここで「周辺コンクリート」とは、図-2のような一軸状態で有効応力計と力学的な並列な関係を満足する領域で、有効応力計の上下端部

で変位が一体化し、軸方向の変位の適合条件を満たす領域のことである。

### 3.3 検討

#### (1)一般的な応力測定精度に関する検討

有効応力計と周辺コンクリートの並列モデルを考える。

応力のつりあいより式(4)、および上下端部での変形適合条件より式(5)が成り立つ。

$$(V_{sc} + V_c)\sigma = V_{sc}\sigma_{sc} + V_c\sigma_c \quad \text{より} \quad (1+k)\sigma = k\sigma_{sc} + \sigma_c \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\sigma_{sc}}{E_{sc}} \quad \text{より} \quad \sigma_{sc} = \frac{E_{sc}}{E_c}\sigma_c \quad (5)$$

これらより、有効応力計の応力  $\sigma_{sc}$  と、構造物中の応力  $\sigma$  との関係は式(6)となる。

$$\sigma_{sc} = \frac{1+k}{k + \frac{n+m}{1+m}}\sigma \quad (6)$$

有効応力計と周辺コンクリートの並列関係が理想的であるとき、つまり有効応力計と周辺コンクリートの体積比  $k$  を 0 とすると式(7)となる。

$$\sigma_{sc} = \frac{1+m}{n+m}\sigma \quad (7)$$

式(7)を図-3に示す。現実には  $m=10$  程度である。この条件下では、コンクリートとロードセル (ロードセルのヤング係数  $E_s$  は  $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ ) のヤング係数比  $n=0.001 \sim 1$  の範囲では、 $n$  による影響は小さく、有効応力計に入力される応力  $\sigma_{sc}$  と構造物中の応力  $\sigma$  との比  $\sigma_{sc}/\sigma$  は 1.1 程度である。

#### (2)コンクリートの収縮の影響

コンクリートに  $\varepsilon_{sh}$  の一様な収縮ひずみが発生したとき、有効応力計に導入される応力を検討する。これは、コンクリートの自由収縮であるので構造物中の応力  $\sigma$  は本来 0 である。

応力のつりあいより式(8)が成り立つ。

$$0 = k\sigma_{sc} + \sigma_c \quad (8)$$

また、収縮においても周辺コンクリートのひずみとロードセルおよび有効応力計内のひずみの和は同一であるため式(9)が成り立つ。

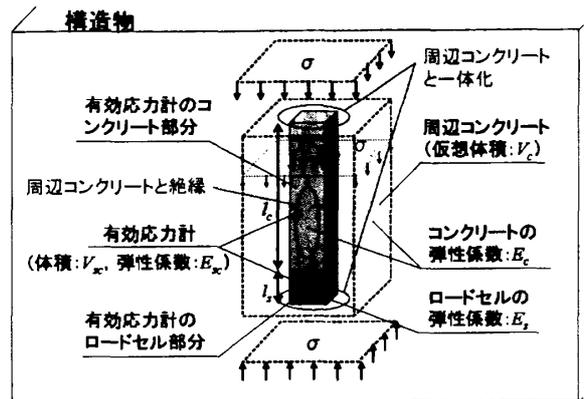


図-2 構造物中の有効応力計の概要

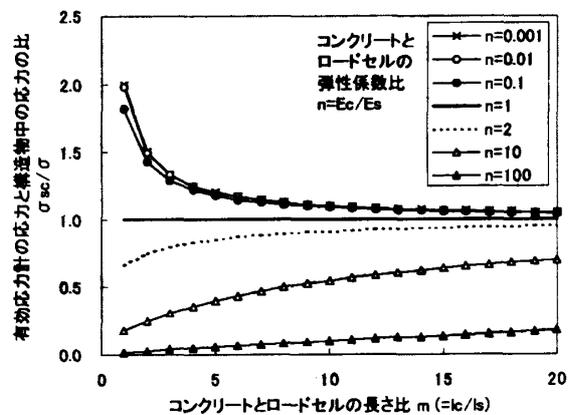


図-3 有効応力計の応力  $\sigma_{sc}$  に関するパラメータスタディ ( $k=0$  のとき)

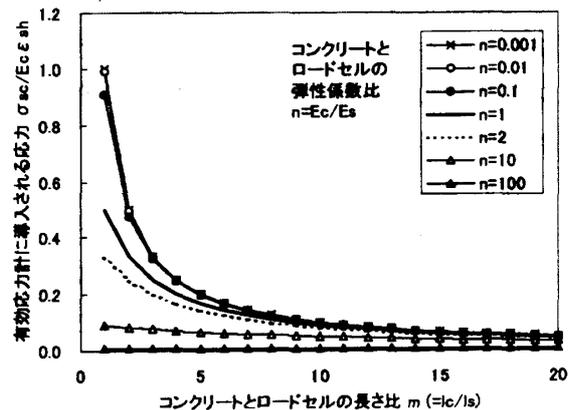


図-4 コンクリートの収縮により有効応力計に導入される応力  $\sigma_{sc}$  に関するパラメータスタディ ( $k=0$  のとき)

$$(l_s + l_c) \left( \frac{\sigma_c}{E_c} + \varepsilon_{sh} \right) = l_s \frac{\sigma_{sc}}{E_s} + l_c \left( \frac{\sigma_{sc}}{E_c} + \varepsilon_{sh} \right) \quad (9)$$

これらより、有効応力計の応力  $\sigma_{sc}$  と、コンクリートの収縮ひずみ  $\varepsilon_{sh}$  との関係を示す。

$$\sigma_{sc} = \frac{1}{m+n+k(1+m)} E_c \varepsilon_{sh} \quad (10)$$

ここでも有効応力計と周辺コンクリートの体積比  $k$  を 0 とすると式(11)となる。

$$\sigma_{sc} = \frac{1}{n+m} E_c \varepsilon_{sh} \quad (11)$$

式(11)を図-4に示す。現実には  $m=10$  程度である。この条件下では、 $n>0.001$  の範囲で、 $\sigma_{sc}/(E_c \varepsilon_{sh})$  値は 0~0.1 程度である。ただし、 $n$  が 1 より小さい範囲であれば、 $\sigma_{sc}/(E_c \varepsilon_{sh})$  はほぼ 0.1 となる。つまり、構造物が非拘束状態で、コンクリートが一様に収縮した場合であっても、コンクリートの自由収縮ひずみの 10% を有効ひずみとして検出してしまうことになる。

#### 4. 無拘束条件下における有効応力計の検証実験

##### 4.1 目的

筆者らは過去の実験において、無拘束条件下かつコンクリート周辺からの乾燥収縮を防いだ場合においても、材齢初期から有効応力計の検出値にはコンクリートの圧縮応力が継続して生じる結果を得ていた。この検証として、無拘束条件下におけるコンクリートの体積変化が、有効応力計の検出値に与える影響を把握することを目的として実験を行った。

検討項目は、以下のとおりである。

- (1) 無拘束条件下におけるコンクリートの体積変化をコンクリートの自己収縮に限定し、この体積変化が有効応力計の検出値に与える影響を実験的に検証する。
- (2) 実験結果を元に、3次元有限要素法による解析を実施し、実験結果を再現する解析条件を見出し、有効応力計の検出値に与える要因を限定する。

##### 4.2 実験概要

実験概要図を図-5に示す。

底面をテフロンシートで縁切した曲

げ強度試験用の鋼製型枠 (10×10×40cm) の中央に、有効応力計 (市販品 T 社製: 2×2×20cm) および測温機付埋込型ひずみ計 (10cm) を設置

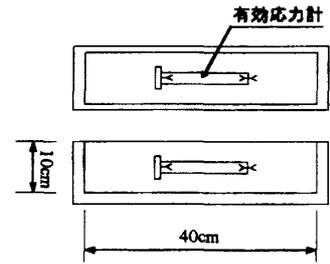


図-5 実験概要図

し、計測器が型枠の軸と平行になるようにモルタル試料を詰め、供試体とした。また、凝結終結前に型枠の止め具を緩め、打込みから 24 時間で、脱型し、表-1 の養生を実施した。なお、養生期間中の供試体は、ローラー支点による 2 点支持で拘束の影響を排除した。

実験水準を表-1、実験で適用した使用材料を表-2、モルタル配合を表-3に示す。

##### 4.3 実験結果

実験結果を図-6に示す。

図-6より、単位粉体量は 1000kg/m<sup>3</sup> であり、埋込型ひずみ計の温度計測値は、材齢 1 日まで

表-1 実験水準

		計測器	養生条件
Case1	A	有効応力計	アルミシールによる封緘養生
	B	埋込型ひずみ計	
Case2	A	有効応力計	アルミシールによる封緘後、水中養生
	B	埋込型ひずみ計	

表-2 使用材料

材料	名称	産地、メーカー
セメント C	普通ポルトランドセメント	T 社製
細骨材 S	川砂 (比重:2.62, F.M.2.85)	姫川水系産
混和材 SF	シリカフェーム	市販品 A
混和剤	高性能 A E 減水剤	N 社製
A E 助剤	空気量調整剤	N 社製

表-3 モルタル配合

配合	W/B (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	SF	S	Add
1/1 モルタル	30.0	300	920	80	1000	調整

W=水, B(粉体量)=C+SF

に 10℃の温度上昇を確認した。また、ひずみ計測の結果、自己収縮により急激に収縮し、その後は緩やかな収縮ひずみを示した。一方、有効応力計の検出値は、無拘束条件下であるにも関わらず、材齢 1 日までに 1 N/mm<sup>2</sup> の圧縮応力を示し、温度降下に伴い引張側にシフトするが、温度降下以後は、圧縮応力の増加を示した。やはり、有効応力計は温度応力を計測しているようである。

本実験における Case-2 はより確実に乾燥収縮の影響を防ぐための方法であり、両 Case の温度降下以降の収縮ひずみの結果を見ると差はなく Case-1 の封緘状態でも乾燥収縮は十分に防げたと考える。

計測の結果からは乾燥の影響がない温度降下以降の収縮ひずみにおいて有効応力計は何らかの応力を計測していることがわかる。

#### 4.4 解析検討

3次元有限要素法により実験結果を再現し、有効応力計の検出値に与える影響を特定する。

解析モデルを図-7に示す。解析モデルは、外殻部を取り除いて柱状部と周辺コンクリートを完全に縁切りしたモデルを採用した。また、外殻部とコンクリート柱状部が一体となった仮想柱状部として外殻部の軸方向の剛性を考慮した。

外殻部は、金属メッシュとフェルトで挟み合わせた複合材料であり、仮想柱状部の断面剛性を式 (12) とした。

$$AE = A_c E_c + A_f E_f \quad (12)$$

ここに、 $A$  はモデル化した仮想柱状部の断面積、 $E$  はモデル化した仮想柱状部のヤング係数である。添え字の  $c$  は柱状部を、 $f$  は外殻部を表す。

したがって、モデル化した仮想柱状部の弾性係数は、式 (13) となる。

$$E = \frac{A_c E_c + A_f E_f}{A} = \frac{400 E_c + 160 E_f}{400} \quad (13)$$

ただし、 $A_f = (20 \times 4) \times 2 = 160 \text{ mm}^2$  で近似した。

解析ソフトは温度応力解析専用プログラム (ASTEAMACS) を用いた。温度および収縮ひず

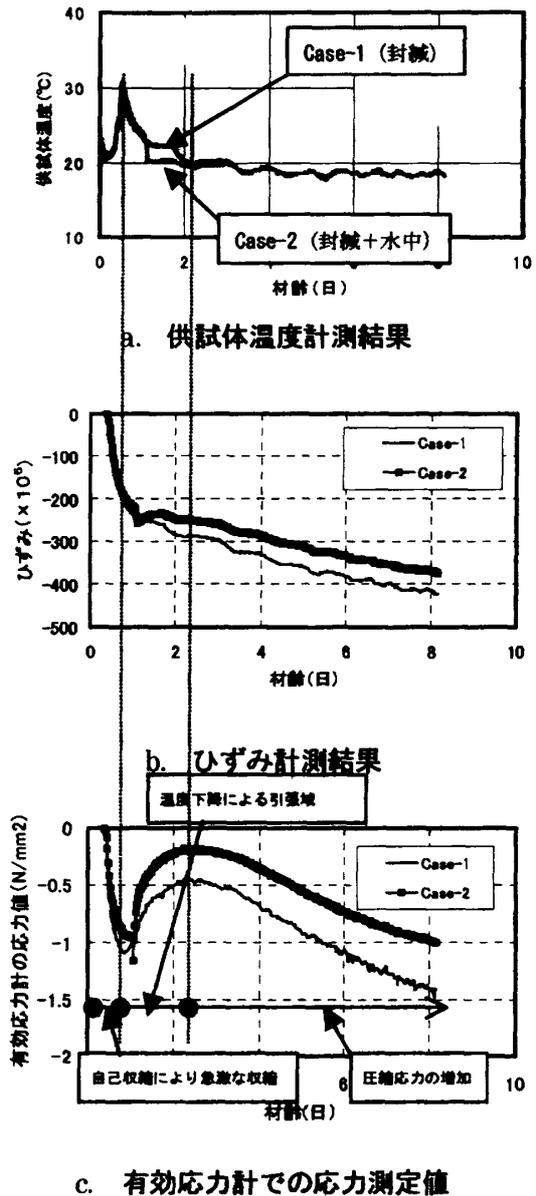


図-6 実験結果

みが計測された値を再現するように温度データおよび収縮ひずみを設定した。

また、コンクリートのヤング係数  $E_c(t)$  は、式 (14) に示す JSCE 示方書式を用いた。ただし、材齢  $t$  日の圧縮強度  $f'_c(t)$  は実験時に行った圧縮強度試験からの近似式を求め適用した。

$$E_c(t) = \Phi(t) \times 4.7 \times 10^3 \sqrt{f'_c(t)} \quad (14)$$

ここに、温度上昇時におけるクリープの影響によるヤング係数の補正係数  $\Phi(t)$  は JSCE 示方書に示されている値を適用した。

仮想柱状部の応力を図-8に示す。なお、拘

束なしのケースが外殻部の剛性を考慮しないコンクリートだけの解析結果であり、他は外殻部のヤング係数  $E_f$  ( $N/mm^2$ ) を変化させたケースである。変化ケースについては凡例に示す。

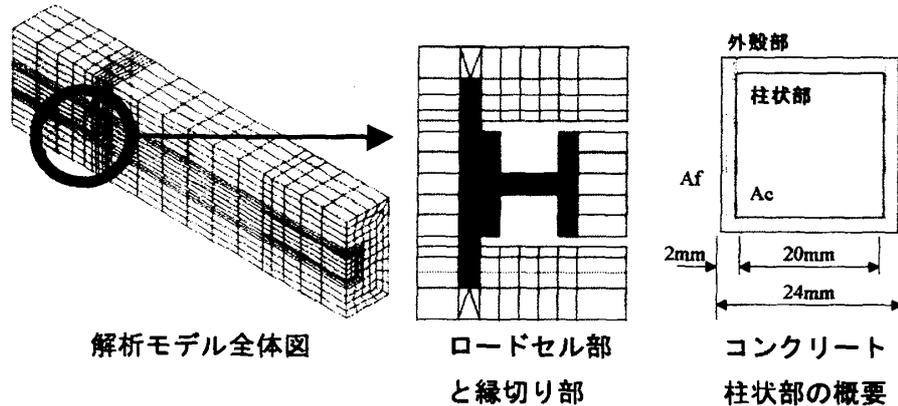


図-7 解析モデル

図-8より、外殻部の剛性を適当に設定するこ

とで、実験において有効応力計から計測された応力を再現できることが確認された。外殻部のヤング係数を小さく設定すると材齢初期の温度応力および収縮に伴う応力は小さく、逆に大きく設定するとどちらも大きくなる。よって、外殻部の剛性が無拘束条件下におけるコンクリートの収縮においても応力発生の一因となっていることがわかった。

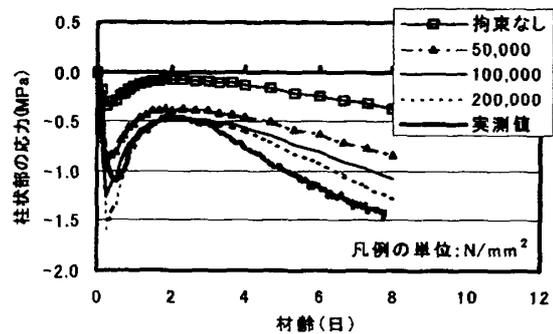


図-8 コンクリート柱状部の応力検討

## 5. まとめ

以下に検討結果を示す。

- (1) 有効応力計の理論式より、コンクリートとロードセルのヤング係数比  $n=0.001\sim 1$  の範囲では、 $n$  による影響は小さく、有効応力計に入力される応力  $\sigma_{sc}$  と構造物中の応力  $\sigma$  との比  $\sigma_{sc}/\sigma$  は 1.1 程度である。
- (2) 有効応力計は理論上、コンクリート一様収縮に対しては応力を計測しない。しかし、計器の寸法制限からコンクリートの自由収縮ひずみの 10% を有効ひずみとして検出する。
- (3) 有効応力計を用いた実験では、収縮状態において圧縮応力が徐々に増加していくことが判明した。その応力は、外殻部の剛性により発生していることが考えられ、その剛性を小さくすることにより理論値に近くなることが予測された。また、外殻の影響により材齢初期の応力計測結果にも大きな違いがあることがわかった。

本研究は長岡技術科学大学において有効応力計の調査研究会を設置し活動したものである。

また、活動に際しては鹿島建設株式会社日紫喜剛啓氏に多くの助言を頂いた。紙面を借りて各位に感謝致します。

## 参考文献

- 1) 中内博司, 吉川弘道, 庄野昭; マスコンクリートの温度応力解析, 間組研究年報, pp.159-179, 1980
- 2) 夏目忠彦, 徳山清治, 日紫喜剛啓; 新型のコンクリート応力計と PC 斜張橋のクリープ測定への応用, プレストレストコンクリート, Vol.27, No.1, 1985.1
- 3) 日本コンクリート工学協会; マスコンクリートのひび割れ制御指針, 参考資料 3 コンクリートの物性および構造物の挙動測定用機器と測定方法の概要, pp.105-108, 1986
- 4) 竹下治之, 浅沼潔, 横田季彦; マスコンクリート中の計器特性について, 第 2 回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, pp.1-8, 1984.3