

# 大型免震構造物における乾燥収縮の計測

松浦恒久（ハザマ技術研究所）  
酒井和三（伊藤喜三郎建築研究所）  
若本武三（伊藤喜三郎建築研究所）  
岩上寛次（ハザマ東京支店）  
島崎和司（神奈川大学建築学科）

## 1. はじめに

RC 構造物では、コンクリートの乾燥収縮等により部材に変形が生じる。乾燥収縮等による部材の変形量は、部材の長さに伴い増加する。一般的な寸法の建物では、変形量が小さいため大きな問題とはならない。しかし、長大な建物では、変形量が大きくなるため注意が必要である。

また、免震構造物では一般の建物に比べて、部材の水平方向の拘束度が小さいため乾燥収縮により基礎梁に収縮変形が生じ、それに伴い免震装置にも水平変形が生じる。免震装置の水平変形は、構造性能に影響を及ぼす可能性があるため注意が必要である。しかしながら、免震装置の施工時の挙動を報告した例はほとんどない[1]。

ここでは大型免震構造物の施工に際し、基礎梁の乾燥収縮による免震装置の水平変形を計測し、解析プログラムなどから導き出された解析結果と計測値との比較・検討を行ったものである。

## 2. 建物概要と計測方法

### 2.1 建物概要

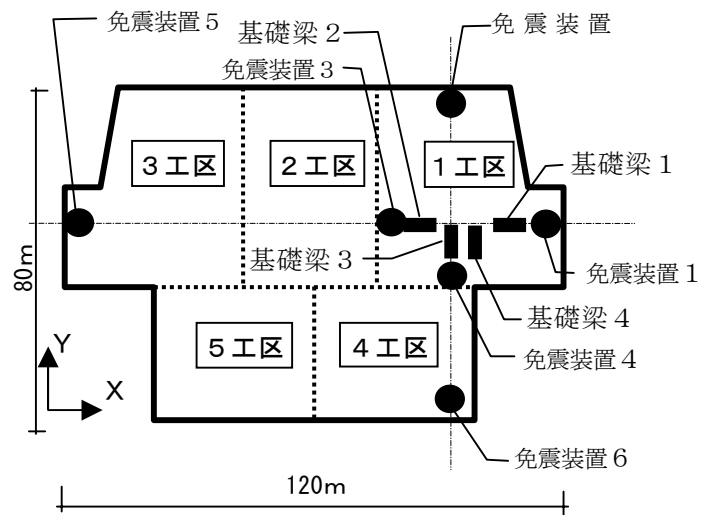
対象とした建物の平面図を図-1に示す。建物は80m×120mの平面形状を持ち、地下1階、地上8階のやや複雑な形状をした平面面積の大きい建物である。地下1階で合計130基の鉛入り積層ゴム、および天然積層ゴムによって支えられている。

コンクリートの打設は図に示した工区分けにより順次行なわれ、主要部位に使用されたコンクリートは呼び強度が30、および33N/mm<sup>2</sup>である。

### 2.2 計測概要

計測位置を図-1に、計測の概要を図-2に、表-1に計測項目と計測機器を示す。

1工区での計測項目は基礎梁の軸方向変形、コンクリートひずみ、鉄筋ひずみ、および免震装置の水平変



●	: 免震装置の変位計測		
■	: 基礎梁の変位・ひずみ計測		
1工区	0日 (7/14)	2工区	18日 (8/1)
3工区	41日 (8/24)	4工区	105日 (10/26)
5工区	118日 (11/8)		

図-1 計測位置と各工区のコンクリート打設日

形である。免震装置の水平変形は1工区以外に3、4工区においても、ダイヤルゲージで計測を行なった。

基礎梁の軸方向変形の計測は高感度変位計と光学式変位計を梁側面に取付けて行なった[2]。

コンクリートひずみは埋込み型ひずみ計で、鉄筋ひずみは溶接ゲージで計測を行った。なお、埋込み型ひずみ計、および溶接ゲージは曲げ成分によるひずみを取り除き、材軸方向成分のみを取り出すために上下2個所に取付けた。

免震装置の水平変形は、ベースプレート基準として高感度変位計、およびダイヤルゲージを用いてX、Yの2方向の相対変位を計測した。変形の原点はコンクリート打設前の変位計を取付けた時点とした。

全工区においてコンクリート打設時に、寸法が100×100×400(mm)のコンクリート供試体を作成し、乾燥収縮ひずみを計測した。供試体数は3体で、内1体はゴム系コーティング材でシーリングを行なった。供試体は現場に設置し、乾燥収縮ひずみは埋込み型ひずみ計により計測した。なお、標準状態での乾燥収縮ひずみを計測するため、気温20℃、湿度60%の恒温恒湿室にも3体を設置し計測を行なった。コンクリート温度は熱電対により、気温、湿度は温湿度計により計測した。

### 3. 計測結果

#### 3.1 気温、コンクリート温度および湿度

気温、コンクリート温度および湿度の計測結果を図-3に示す。なお、経過日数は1工区のコンクリート打設日(7月14日)を基準とした。

気温は材齢50日程度までは約30℃で一定であるが、それ以降は材齢190日程度まで50日で10℃の割合で低下している。その後、気温の上昇が見られる。コンクリート温度はコンクリート打設直後の硬化に伴う水和熱により、気温より高くなっているが、材齢1週間程度で気温と同程度になっている。その後は気温と同じ温度変化を示し、材齢190日程度まで50日で10℃の割合で低下している。その後、気温の上昇に伴ってコンクリート温度も上昇している。

湿度は季節によりかなり変動しているが、計測期間中の平均は70%程度と高湿な状態となっている。これは免震層が地下階であり、躯体工事中は排水が完全でないためと考えられる。

#### 3.2 供試体のひずみ

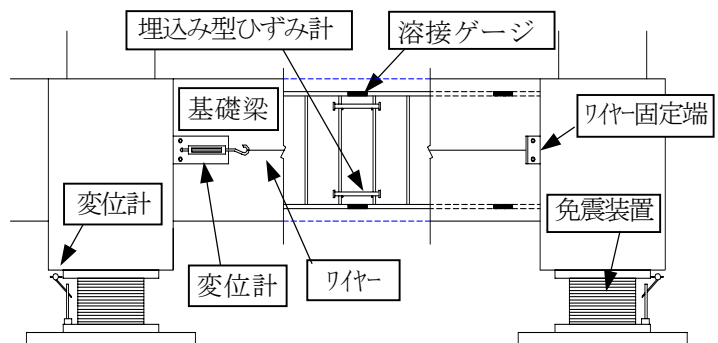


図-2 計測概要

表-1 計測項目および計測器

部位	計測項目	計測機器
免震装置	水平変形	高感度変位計
		ダイヤルゲージ
基礎梁	軸方向変形	高感度変位計
		光学式変位計
	コンクリートひずみ	埋込み型ひずみ計
	鉄筋ひずみ	溶接ゲージ
	コンクリート温度	熱電対
供試体	乾燥収縮量(現場)	埋込み型ひずみ計
	乾燥収縮量(恒温恒湿室)	コンタクトゲージ
免震層	温湿度	温湿度計

図-4に各コンクリート打設日を基準とした供試体のひずみの経時変化を示す。図中のひずみは温度変化によるひずみ成分を除いた乾燥収縮ひずみである。

ひずみの経時変化について見ると、湿度変化の影響を受けてひずみが減少する供試体もあるが、概ね同様な経時変化を示しており、各工区のコンクリートは同様な性状と考えられる。シールを行なった供試体のひずみは、シールを行なわない供試体に比べて 100 $\mu$ 程度少ない。設置場所が高湿なためシールの有無による影響が少なくなったと思われる。恒温恒湿室に設置した供試体のひずみは、現場に設置した供試体のひずみに比べて大きくなっている。これは現場の平均湿度が約 70%であるのに対し、恒温恒湿室の湿度は 60%であるため、乾燥収縮ひずみが大きくなったと考えられる。

既往の乾燥収縮ひずみの算定式と計測値の比較を行なう。乾燥収縮ひずみの算定式は「プレストレストコンクリート設計施工基準・同解説」による式(1)、今本らによる式(2)を用いた[3、4]。なお、計算に用いた湿度は各供試体ごとの平均値とした。

$$S_{t-t_0} = S_n (\phi_t - \phi_{t_0}) / \phi_n \tag{1}$$

$$\phi_t = a b_1 / (1.5 + 0.25 t) \quad (t \text{は週})$$

$$S_n = 5 \times 10^{-4} a b_2 \quad (a=1.0, b_1=b_2=0.5)$$

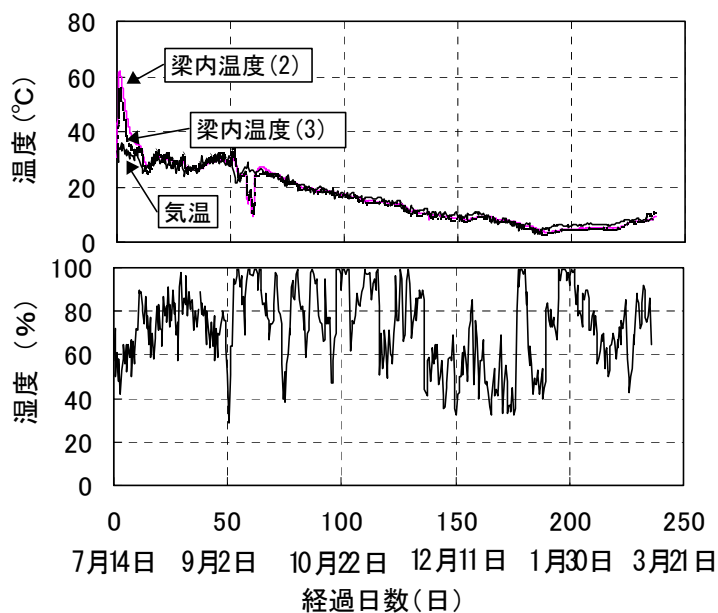


図-3 気温および湿度

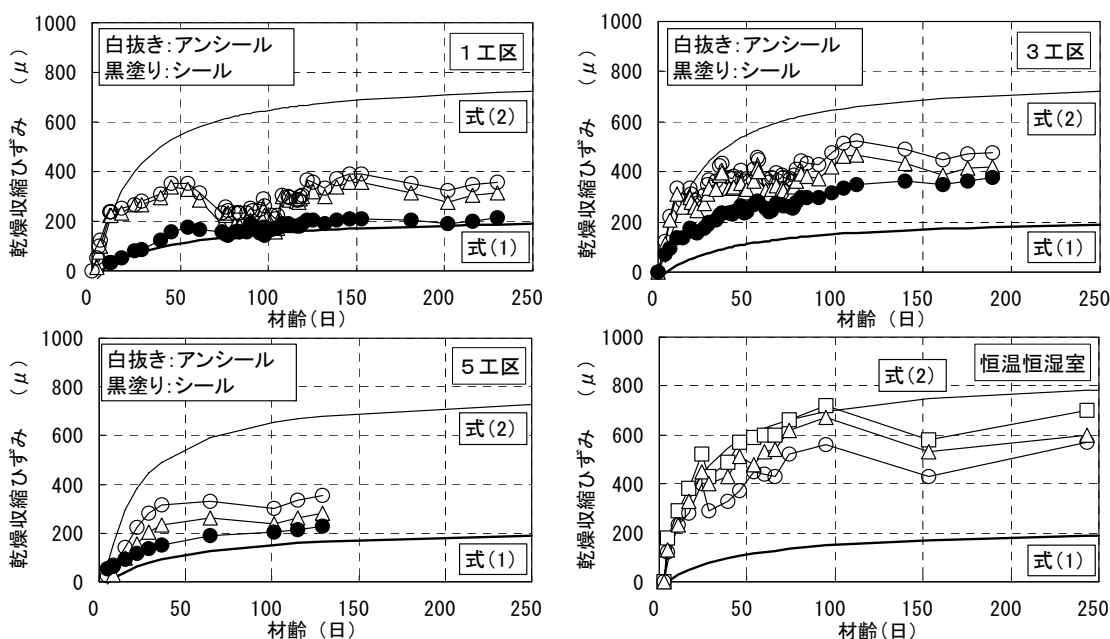


図-4 供試体の乾燥収縮ひずみ

$$\begin{aligned}
& \phi_n : \text{クリープ係数最終値、} S_n : \text{最終乾燥収縮ひずみ } (\times 10^{-6}) \\
& S_{t-t_0} : t_0 \text{以降における乾燥収縮ひずみ} \\
& \varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_0 \cdot [(t-t_0)/(t-t_0) + \beta] \quad (2) \\
& \varepsilon(t, t_0) : \text{乾燥開始材齢 } t_0 \text{における材齢 } t \text{ 日の乾燥収縮ひずみ} \\
& \varepsilon_0 : \text{終局乾燥収縮ひずみ } (\times 10^{-6})、\varepsilon_0 = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4、\beta = k_5 \\
& k_1 : \text{相対湿度の係数、} k_1 = 1100 \exp(-0.0069 \text{R.H.})、\text{R.H.} : \text{相対湿度}(\%) \\
& k_2 : \text{標準養生 28 日圧縮強度の係数、} k_2 = 1.27 \exp\{-0.0039(f_{28}/f_0)\} \\
& f_{28} : \text{標準養生 28 日圧縮強度(MPa)、} f_0 : 1 \text{ (MPa)} \\
& k_3 : \text{体積表面積比の係数、} k_3 = \exp\{-0.0017(f_{28}/f_0) + 0.00485\} \cdot [(v/s)/l_0 - 2.22] \\
& v/s : \text{体積表面積比(cm)、} l_0 = 1 \text{ (cm)} \\
& k_4 : \text{乾燥開始材齢の係数、} k_4 = 1.32(t_0/t_i)^{-0.192}、t_i : 1 \text{ (日)} \\
& k_5 : \text{乾燥速度に関する体積表面積比の係数} \\
& k_5 = 20.0 \exp\{-0.00153(f_{28}/f_0) + 0.0968\} \cdot [(v/s)/l_0 - 2.22]
\end{aligned}$$

計算結果を図-4に併記する。式(1)は実構造物を対象にした式であり、供試体に対しては部材断面寸法の影響を表す定数  $a$  を過小評価している。このため式(1)は計測値を過小評価している。式(2)は湿度の変化のない恒温恒湿室に設置した供試体に対しては良い対応を示しているが、湿度変化のある現場に設置した供試体に対しては過大評価している。

### 3.3 基礎梁のコンクリートひずみ

図-5に基礎梁のコンクリートひずみ  $\varepsilon_c$  の経時変化を示す。ひずみの原点はコンクリート温度が気温と等しくなった材齢6日を基準とした。図中には計測したコンクリートひずみ  $\varepsilon_c$  から温度変化の影響を取除いた乾燥収縮ひずみ  $\varepsilon_s$ 、および計算値も併記してある。

コンクリートひずみ  $\varepsilon_c$  は各梁とも同様な経時変化を示し、コンクリート温度の低下する材齢50日程度から急激にひずみが増加し、材齢190日程度からコンクリート温度の上昇に伴い、ひずみの減少が見られる。一方、乾燥収縮ひずみ  $\varepsilon_s$  は、湿度が高くなる材齢50日以降ひずみの増加率が減少している。コンクリートひずみ  $\varepsilon_c$  に占める乾燥収縮ひずみ  $\varepsilon_s$  は3~4割程度で、コンクリートひずみ  $\varepsilon_c$  の主成分は約6~7割を占める温度変化によるものと言える。

コンクリートひずみの計算においては、実測した熱線膨張係数  $\gamma$  を用いて温度変化  $\Delta t$  による影響を式(1)、(2)に加味した式(3)、(4)によった。なお、梁断面が  $1800 \times 500 \times 4425 \sim 7725(\text{mm})$  と大断面であることに加えて、鉄筋量比  $p_g$  が最大0.7%程度であるため、鉄筋によるひずみの拘束は無視した。

$$S_{t-t_0} = S_n (\phi_t - \phi_{t_0}) / \phi_n + \gamma \Delta t \quad (3)$$

$$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_0 \cdot [(t-t_0)/(t-t_0) + \beta] + \gamma \Delta t \quad (4)$$

$$\gamma = 6.93 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

基礎梁2については、乾燥収縮ひずみ  $\varepsilon_s$ 、コンクリートひずみ  $\varepsilon_c$  とともに良い対応を示しているが、基礎梁3については、計算値が計測値を  $100 \mu$  程度上回っている。

図-6に梁の軸方向変形の経時変化を示す。図中の計算値は式(3)、(4)で得られた乾燥収縮ひずみに計測区間長を掛けて求めた。いずれの基礎梁の計算値も計測値と良い対応を示しており、

基礎梁の軸方向変形は乾燥収縮ひずみ  $\epsilon_s$  に温度変化を考慮することで予測できる。また、基礎梁の軸方向変形は乾燥収縮と温度変化によるものと言える。

### 3. 4 免震装置の水平変形

図-7に全体座標系による免震装置の水平変形の経時変化を示す。水平変形の基準はコンクリート打設前の状態とした。

免震装置1は材齢とともに変位が増加している。免震装置3は材齢40日程度までは1工区の中心方向に変形が進んでいるが、その後は2工区のコンクリート打設の影響を受け2工区側へ変形方向が変化している。免震装置の水平変位は材齢約190日にかけて減少傾向にある。

基礎梁の軸方向変形が乾燥収縮と温度変化に起因するものであると言えるため、免震装置の水平変形についても、乾燥収縮と温度変化によるひずみより変位を計算する。

免震装置の水平変位の計算は、免震装置間の距離に式(3)により求められるひずみを掛けて求めた。なお、ひずみに掛ける免震装置間の距離は、免震装置1、3が均等に变形すると仮定した1工区の1/2の長さとして、一方の免震装置に変形が集中すると仮定した1工区の全長の2つを用いた。

免震装置1の水平変位は計算値との比較より免震装置1-3間の梁の軸方向変形が免震装置1に集中した形となっている。免震装置3の水平変位は他工区の影響を受け、単純な算定では求まらず、施工工程の影響を考慮する必要がある。

### 4. 解析

免震層上部の基礎梁を平面に置換し、解析プログラムを使って乾燥収縮、温度変化による免震装置の変形量を算定する[5]。

解析条件として、コンクリート温度を気温と同様に变化するものとして材齢50日までは30℃、以降50日~200日までは50

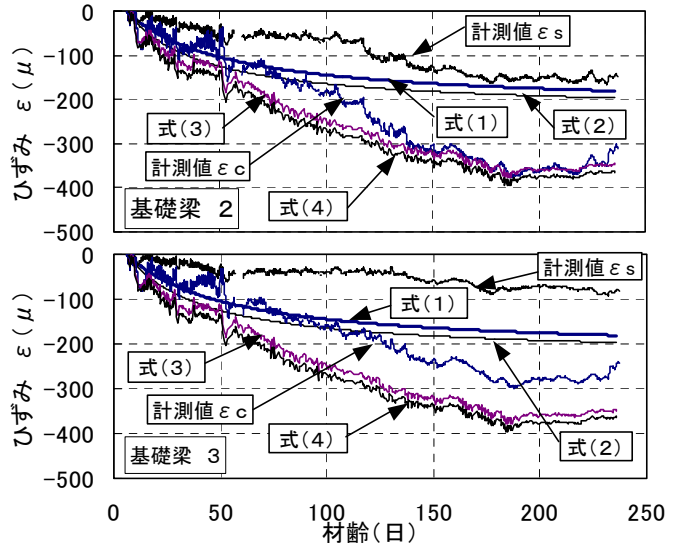


図-5 基礎梁のコンクリートひずみ

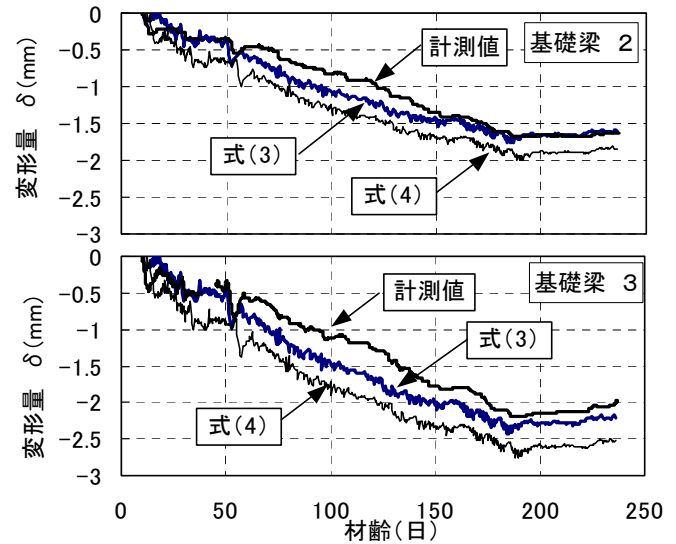


図-6 基礎梁の軸方向変形

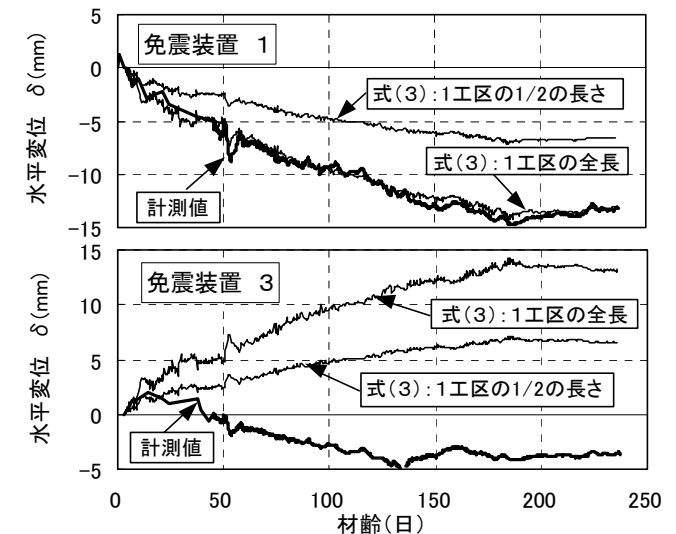


図-7 免震装置の水平変形

日で 10℃低下し、200 日以降 50 日で 10℃上昇するとした。工区分けと工事工程は実状に合わせた。また、免震装置の拘束による応力は影響が小さいので無視した。クリープ係数と乾燥収縮ひずみ最終値は基礎梁の計測結果を基に式 (1) の値を用いた。

図-8 に免震装置 1、3、5 の X 方向の変形量について解析結果と計測結果を示す。解析値は免震装置 3 の変形方向の逆転も再現できており、計測値と概ね適合している。免震装置の水平変位は乾燥収縮、温度変化および実際の施工状況を考慮した逐次計算により予測が可能であり、乾燥収縮等による免震装置の水平変位を最小にする工区分けの設定が可能になる。

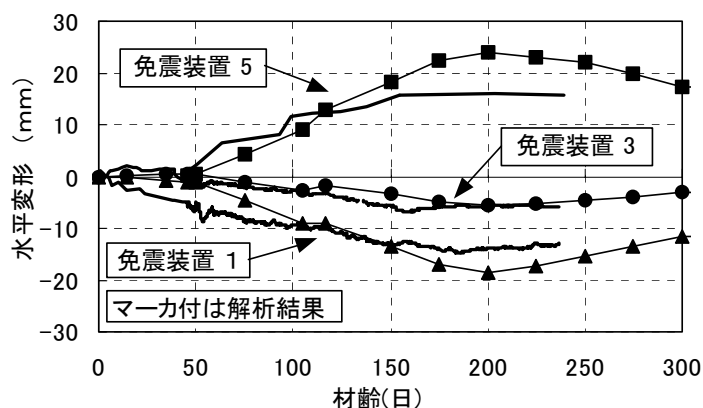


図-8 計測値と解析値の比較

## 5. まとめ

大型免震構造物の施工に際し、コンクリート供試体、基礎梁のコンクリートの乾燥収縮、および免震装置の水平変形の計測を行なった。計測結果と既往の計算式、および解析プログラムなどから導き出された結果との比較、検討を行ない以下の知見が得られた。

- 1) 供試体の乾燥収縮ひずみは、湿度変化を受けない場合には計算式と良い対応を示す。
- 2) 基礎梁の軸方向変形は、乾燥収縮と温度変化によるひずみより計算することができる。
- 3) 免震装置の水平変形は、基礎梁コンクリートの乾燥収縮と温度変化によるものと考えられる。

また、逐次計算により免震装置の水平変位の予測が可能である。

## 謝辞

式 (2) の適用につきましては大同工業大学山本教授のコメントを頂き、計測データの整理には神奈川大学卒論生の多川君、沼田君、本山君の協力を得ました。皆様に感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 能森雅巳：長大な免震建物の自己収縮を拘束する免震装置の変形性状に関するクリープ解析、日本建築学会大会梗概集 BII、pp.757 - 758、2000.9
- [2] 田中靖彦・戸田哲雄・井上超：光学ストランドによる構造物のモニタリングシステムに関する基礎的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 A、pp.841-842、2000.9
- [3] 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説、1998
- [4] 今本啓一・山本俊彦：鉄筋コンクリート部材のクリープ乾燥収縮特性 (その1：コンクリートのクリープ・乾燥収縮予測式)、日本建築学会東海支部研究報告集 pp.105-108、2001.2
- [5] Young - jin Kang : spcframe-computer program for nonlinear segmental analysis of planar prestressed concrete frame, UCB/SEMM-87/07