



コンクリートひずみ計，鉄筋ひずみゲージ，コンクリート温度計（ひずみ計の熱電対を用いた），水分計を，高架橋コンクリート打設と同時に測定を開始している。環境特性は気温，相対湿度，雨量，日射計を計測しており，これらの測定器は材齢 21 日目に設置完了した。

高架橋内の測定器の設置位置を図-1 に，設置状況を図-3 に示す。また測定器の仕様および設置位置を表-1 に示す。鉄筋ひずみゲージは 2 段配筋の各鉄筋の上下に貼った。コンクリートひずみ計および水分計は厚さ 280mm のスラブの断面中心に設置した。



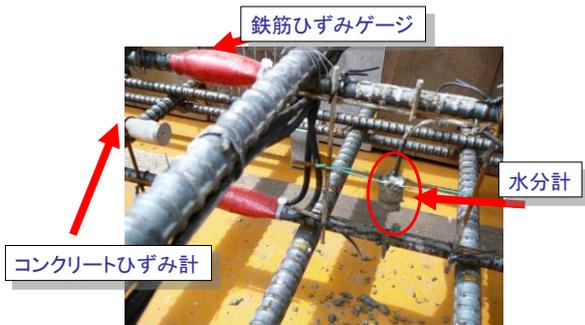
(スラブ測点①)



(スラブ測点②)



(スラブ測点③)



(設置位置詳細)

図-3 測定器取付け位置（測定位置および詳細）

表-1 測定器の仕様

	測定範囲	測定器寸法(mm)	備考	設置位置
コンクリートひずみ計	±5000μ	φ 20×100程度	熱電対あり	スラブ測点1-3
鉄筋ひずみゲージ	±5000μ	3×1.7		スラブ測点1-3 縦梁測点1
水分計	-	φ 15×24程度	印加電圧方式	スラブ測点2
気温・相対湿度計	-40℃～+50℃ 0%～100%RH	-	気温：白金抵抗 湿度：静電容量式薄膜センサー	高架橋近傍
雨量計	1mm (1転倒雨量)	-	転倒ます式	高架橋近傍
日射計	0～2kW/m <sup>2</sup>	-	太陽電池式	高架橋近傍

スラブ測点②は，スラブ中央部で橋軸方向に測定器を設置している。本高架橋は 2 段階施工のため，1 期目を施工した段階では，スラブの端部から約 30cm の位置に設置している。1 期目スラブ打設の約 550 日目に 2 期目のスラブを打設している。

本高架橋に使用したコンクリートの標準配合表を表-2 に，また生コンクリート打設時の現場試験結果を表-3 に示す。コンクリート打設後の作業実績を表-4 に示す。

コンクリート打設日の 4 月 23 日から測定を自動計測で開始し，同年 12 月までは 5 分～10 分ピッチで測定し，その後 2 年間は 30 分ピッチ，以降は 1 時間ピッチでの測定を継続している。環境特性も同様で，少なくとも 1 時間毎の環境特性を測定している。

表-2 コンクリートの標準配合表

呼び強度	スランブ	粗骨材の最大寸法	セメントの種類	空気量	W/C
27	12	20	N	4.5%	50%
セメント	水	細骨材	粗骨材	合成短繊維	高性能 AE 減水剤
340kg	170kg	812kg	994kg	0.46kg/m <sup>3</sup>	3.4%

表-3 生コンクリート打設時の現場試験結果

強度試験		単位水量(平均)	塩化物イオン
現場養生	20.7(4日目)	160.07kg/m <sup>3</sup>	0.03%、 0.051kg/m <sup>3</sup>
標準養生	33.4(7日目)		
スランブ	空気量	コンクリート温度	
12.5	5.0%	16℃	

表-4 コンクリート打設時の作業実績

コンクリート打設	側型枠脱型開始， 妻型枠脱型開始	底型枠脱型開始， 支保工解体開始
材齢0日 (平成21年4月23日)	材齢4日	材齢9日

## 2.2 供試体の測定概要

供試体は，コンクリートの収縮ひずみの大きさと，供試体の寸法の影響や鉄筋による内部拘束の影響を把握するために 3 種類作成した。これにより，内部拘束および

外部拘束を受けるスラブの拘束が収縮ひずみに及ぼす程度を、外部拘束、内部拘束、寸法（体積表面積比：V/S）の影響にそれぞれ分解して評価することとした。

自由収縮（小）供試体は、コンクリートの収縮ポテンシャルを測定するための 100×100×400mm の全周乾燥する無筋供試体である。自由収縮（大）供試体は、断面高さを高架橋スラブと同じ 280 mm とした 280×400×1000mm の無筋供試体である。内部拘束供試体は、自由収縮（大）供試体に、スラブ筋と同鉄筋径で同鉄筋比となるように内部拘束鉄筋（D13 を 4 本）を配置した供試体である（図-4）。

断面高さが 280mm の供試体は上下面を開放し、側面となる 4 面にはシリコンコーキングを塗布し、体積表面積比（V/S）をスラブとできるだけ合わせるようにした。2 枚重ねのテフロン板の上に供試体を設置し、供試体に作用する外部拘束をできるだけ排除した。

供試体でのコンクリートひずみの測定は、高架橋に設置したものと同一コンクリートひずみ計を用い、供試体中心で供試体長手方向のひずみを測定するように設置した。

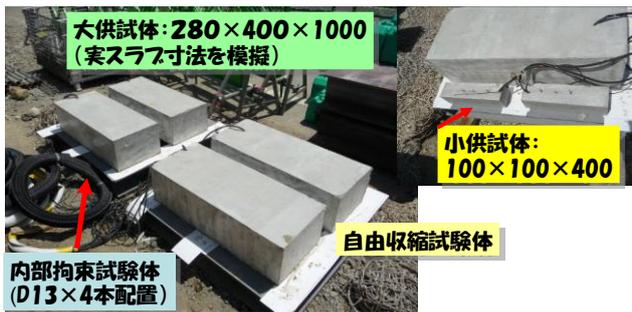


図-4 供試体の寸法，設置状況

### 3. 測定結果

#### 3.1 環境特性

##### (1) 気温，湿度

現地で測定した 5～10 分間隔の気温の測定値から求まる 1 年分の日平均気温を図-5 に示す。記録は測定器を設置した日以降となっている。気象庁は、本高架橋の位置に近い仙台の観測点で、アメダスの 10 分間隔の気温および相対湿度の記録を公開している<sup>4)</sup>。仙台の 1 日平均気温のデータを図-5 に合わせた。

現地計測から求めた日平均気温と、気象庁の日平均気温は通年に渡りよくあっていることがわかる。現地での気温計測は、機器の移設やメンテナンスサイクルの都合から、一部期間で数か月のデータ欠落がある。そこで現地計測とよく合っているアメダスの気温データを現地の気温データとして取り扱うこととした。測定期間中のアメダスの気温データを図-6 に示す。

4 月にコンクリート打設をしており、その後夏の気温上昇期を経て、冬の気温低下期を繰り返すサイクルが表れている。1 回目の夏の最も日平均気温が高くて 25℃前後だったが、以降の夏は 30℃前後となっている。一方冬の最も低い時期の日平均気温は毎年 0℃前後となっている。年間の夏冬の日平均気温差は初年度が 25℃程度であるが、2 年目以降は年間の変動幅は 30℃前後になっていることがわかる。全測定期間（約 2500 日間）の平均気温は、13.1℃であった。

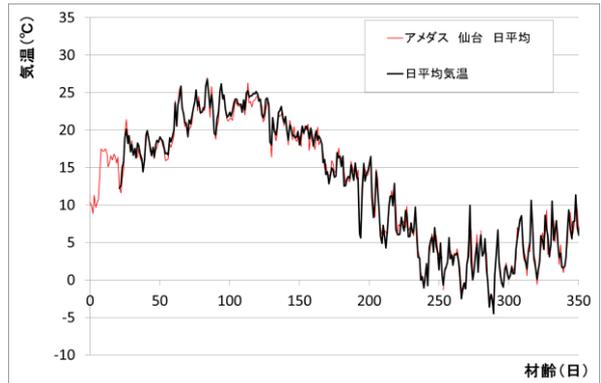


図-5 測定結果とアメダス（気温）

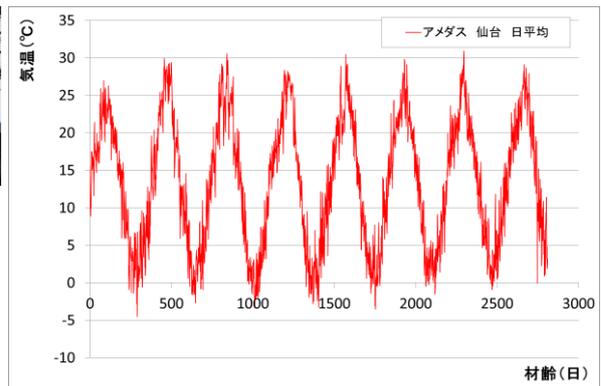


図-6 日平均気温（アメダス）

気温と同様に、4 月のコンクリート打設から 1 年間の現地測定の結果とアメダスの日平均相対湿度を図-7 に示す。

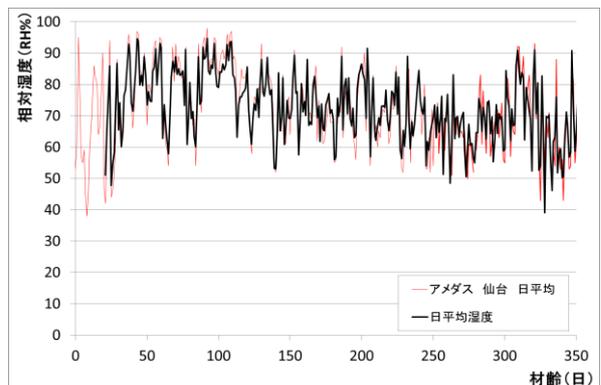


図-7 測定結果とアメダス（相対湿度）

現地計測から求めた日平均相対湿度と、気象庁の日平均相対湿度は通年に渡りよくあっていることがわかる。気温と同様に相対湿度も複数のデータ欠落があるため、アメダスのデータを現地のデータとして取り扱うこととした。測定期間中のアメダスの日平均相対湿度データを図-8に示す。

日平均相対湿度は、季節変動としては夏季に比較的相対湿度が高く、冬季には下がる傾向がみられる。

全測定期間(約2500日間)の平均相対湿度は、70.5RH%であった。

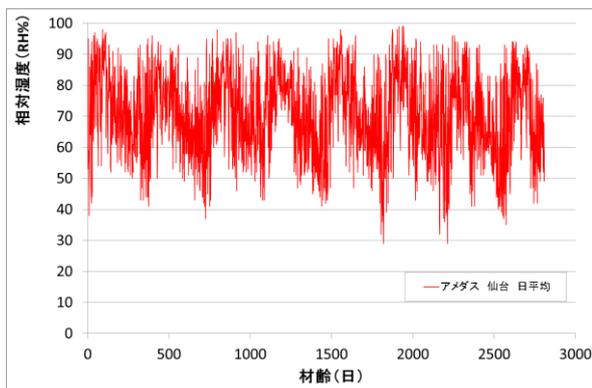


図-8 日平均相対湿度(アメダス)

### (2) 降水量

降水量は1時間毎の時雨量を図-9に示す。季節変動として、夏季に時雨量が高くなる傾向があり、冬季には降雨時間も降雨量も少なくなっていることがわかる。毎年時雨量10mm/h程度の降雨は複数回記録されており、最も大きいときで3年目に39mm/hを記録した。

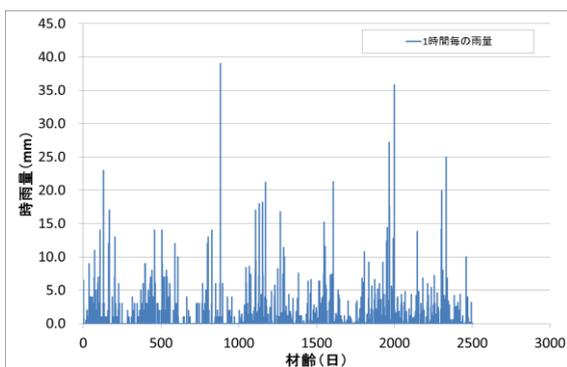


図-9 時雨量

降雨の程度を把握するために時雨量別の発生回数を図-10に示す。雨量計で検知できる0.2mm/h以上の雨が降った日のうち、時雨量別の発生回数を示す。時雨量0~1mm/hの雨を観測したのが、降雨のうち65%を占めている。降雨時間の全体の92%を時雨量3mm/h以下が占めており、気象用語で「弱い雨」に分類される、地面がす

っかり湿るが水たまりはできない程度の雨であったことがわかる。

これまで測定した期間で、降雨が観測された日の計算上の平均降雨量は2.3mm/hであった。

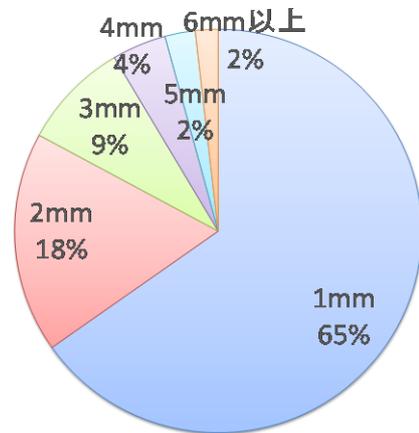


図-10 時雨量

### 3.2 高架橋スラブのひずみ

高架橋の中央スラブの測定結果を図-11に示す。この測定点には、コンクリートひずみ計と、上下の鉄筋にひずみゲージを設置している。測定されたひずみはスラブコンクリートを打設し終わった時点を選定開始点(ひずみゼロ)とした。

ひずみ計自体の温度変化により、測定されるひずみのゼロ点が若干ずれることが知られており、個々のひずみ計の校正係数を用いてゼロ点校正した。ひずみゲージは温度補正機能付きのものを用いた。

図-11のコンクリートひずみはコンクリート自体の温度変化による温度ひずみを含んでいる。筆者らは、既往の報告<sup>9)</sup>で、コンクリート打設から180日目までの線膨張係数の変化を調べ、打設後徐々に線膨張係数が増加し、材齢180日で $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度になったことを確認した。

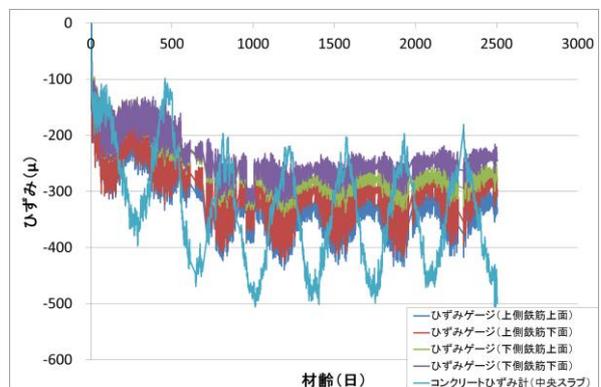


図-11 スラブ(中央部)のひずみ

アメダスの日平均気温(図-6)から確認された通り、材齢300日目以降の最高日平均気温と最低値との差であ

る年間気温変動幅は 30℃程度であり、年別の差はほとんどなかった。コンクリートひずみも、材齢 1000 日目以降は年別の違いは少なく、ひずみ計の年間測定値は -500～-200  $\mu$  の変動幅 300  $\mu$  程度で推移していることがわかる。

材齢 1000 日目まではコンクリートひずみは全体的に収縮が進展する傾向が見られた。その後、材齢 1000 日目以降の年間変動には年ごとの違いは表れていない。スラブコンクリートには梁とスラブの接合部の収縮ひずみ差による外部拘束が作用すると考えられるが、材齢 1000 日目以降の測定値が変動しないことから、この時点では拘束は定常状態になっているものと考えられる。

鉄筋ひずみは、上側鉄筋の圧縮（収縮ひずみ）が大きく、下側鉄筋との差は材齢 100 日目時点での 50  $\mu$  程度から、徐々に 100  $\mu$  程度まで広がり、その後差がほとんど変わっていない。

スラブの鉄筋ひずみは、コンクリートの収縮ひずみの増大とともに鉄筋の収縮ひずみも増大し、材齢 1000 日目以降はコンクリートひずみと同様に、鉄筋ひずみも季節的な変動以外は生じていない。

### 3.3 供試体のひずみ

供試体のうち、100×100×400mm の自由収縮（小）供試体の測定結果を図-12 に示す。測定値はコンクリート自体の温度変化による温度ひずみを含んでいる。

材齢 300 日目頃に 800  $\mu$  程度の収縮ひずみとなった後、材齢 450 日目頃には 250  $\mu$  となり、550  $\mu$  程度も収縮ひずみが減少した。その後は季節変動を伴いながら徐々に収縮ひずみが増大し、材齢 2500 日目付近では 600  $\mu$  程度となっている。

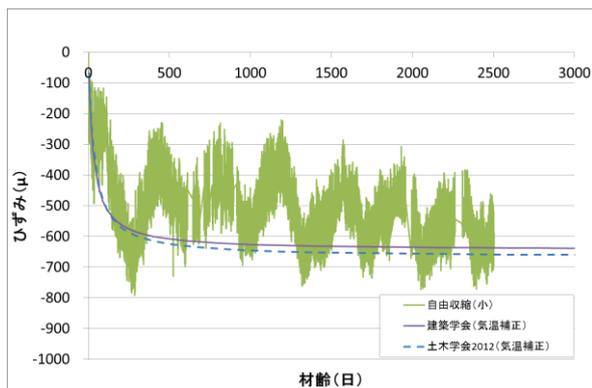


図-12 自由収縮（小）ひずみ

自由収縮（小）供試体の収縮ひずみと、建築学会<sup>6)</sup>および土木学会<sup>7)</sup>の収縮ひずみ予測式の比較を図-12 に示す。予測式に入力する相対湿度は、全測定期間（約 2500 日間）のアメダスの平均値である 70.5RH% とした。また予測式で求まる 20℃を基準としたひずみを、全測定期間のアメダスの平均気温 13.1℃相当のひずみになるように、線膨張係数  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  で補正した。

自由収縮（小）供試体の収縮ひずみは、打設直後から材齢 300 日目までに 800  $\mu$  程度まで増大した。収縮予測式は気温変動を含まないが、全体的な変動傾向はとらえている。しかし収縮予測式は測定結果よりも収縮を大きく算定する傾向がみられる。これは実環境の降雨による吸水のために、現場環境では乾燥の進行が抑えられるからだと考えられる。

自由収縮（大）供試体と内部拘束供試体の測定値を、スラブひずみと自由収縮（小）供試体と合わせて図-13 に示す。材齢 500 日目までは、乾燥しやすさの程度（V/S の大きさ）や拘束の程度によってコンクリートの収縮ひずみが変わることが明確に表れている。乾燥しやすく拘束が最も小さい 100×100×400mm の自由収縮（小）供試体の収縮ひずみが一番大きく、乾燥条件（V/S）をスラブと合わせた自由収縮（大）供試体、内部鉄筋の拘束を加えた供試体、梁などの外部拘束を受けるスラブの順番に収縮ひずみが小さくなった。

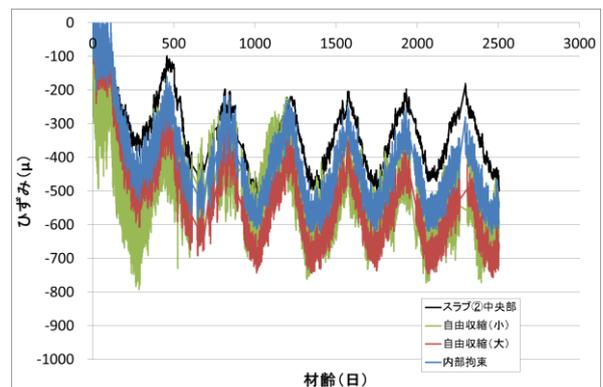


図-13 スラブおよび供試体ひずみ

乾燥のしやすさ（V/S の大きさ）と内部拘束、外部拘束が収縮ひずみに及ぼす影響を把握するために、それぞれの収縮ひずみの差分を図-14 に示す。

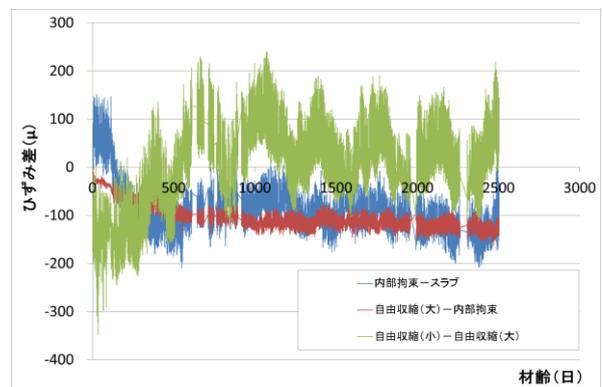


図-14 収縮ひずみ差分

青線の内部拘束供試体とスラブの差分は、スラブに作用する外部拘束の影響を表すと考えられる。材齢 500 日目付近までは外部拘束が徐々に大きく 200  $\mu$  程度になり、

その後は  $130\mu$  程度となっている。材齢 2500 日目付近での自由収縮（小）供試体の収縮ひずみが  $600\mu$  程度であることから、スラブの外部拘束の拘束度は  $22\%$  ( $=130/600 \times 100$ ) 程度と評価できる。

赤線の自由収縮（大）供試体と内部拘束供試体の差は、鉄筋の内部拘束の影響と考えられ、材齢とともに緩やかに増加し、材齢 2500 日目付近では  $130\mu$  程度となっている。内部拘束の拘束度は  $22\%$  程度と評価できる。

緑線は自由収縮供試体の寸法による収縮ひずみの差分を表しており、材齢 500 日目付近までは乾燥しやすい小さい供試体の収縮ひずみが  $200\mu$  程度大きくなったが、その後ひずみの差はほとんどなくなっていった。これは V/S の大きい供試体も材齢の経過とともに乾燥が進んだためと考えられる。

### 3.4 水分量

コンクリート中の自由水分量の測定結果を図-15 に示す。自由水分量は、打設時のコンクリート中の自由水量を  $100\%$  とした百分率で表示している。測定値はコンクリート温度の影響を受けるため文献8)の方法で補正した。ただし材齢によって温度変化が水分量の測定値に与える影響度が変化したため、年ごとに補正值を算出した。

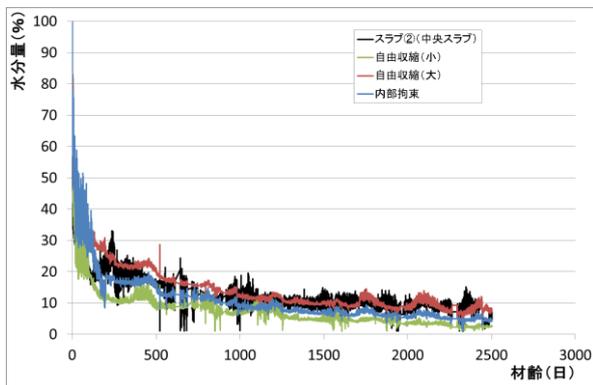


図-15 水分量

自由収縮（小）供試体の乾燥が他に比べて早く進行した。部材の断面高さが等しいスラブと自由収縮（大）供試体、内部拘束供試体の水分量は同程度で、乾燥も同程度に進行した。

相対湿度（図-8）と水分量（図-15）とを比較した結果からも、相対湿度が変動してもスラブ厚さの中央部での水分量はほとんど変動しなかった。

過去に筆者らは、降雨がスラブ中心部の水分量には影響しないこと、周辺空気の相対湿度の変動がスラブの水分量に影響しないことを報告<sup>5)</sup>している。今回、材齢約 550 日目に 2 期施工のスラブを打ち継いでいるが、これによる既設スラブ側の水分量変動は見られなかった。

## 4. まとめ

新設高架橋を対象にコンクリートひずみや鉄筋ひずみの測定と、実環境の環境特性の測定を約 2500 日間（約 6 年 10 か月）行った。高架橋および供試体の収縮ひずみ等の測定結果から、以下の結果を得た。

- 1) 高架橋スラブの材齢 2500 日目時点の外部拘束の拘束度は  $22\%$  程度であり、供試体内の鉄筋による内部拘束の拘束度も  $22\%$  程度と評価された。
- 2) 季節変動を含めた平均相対湿度を用いた予測式の収縮ひずみは、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  の自由収縮（小）供試体の長期的な収縮ひずみポテンシャルを概ね評価できた。
- 3) 収縮予測式が測定結果よりも収縮ひずみが大きくなるのは、現場環境では降雨による吸水により、乾燥が抑制されているからだと考えられる。
- 4) 降雨時の 9 割以上が時雨量  $3\text{mm/h}$  の弱い雨であり、全測定期間の降雨観測日の計算上の平均降雨量は  $2.3\text{mm/h}$  であった。
- 5) V/S が小さい自由収縮（小）供試体は、ほかの供試体およびスラブと比較して水分量の減少が早い。断面高さが等しい自由収縮（大）および内部拘束供試体とスラブの水分量は概ね一致した。
- 6) 2 期施工のコンクリートの打継ぎによる 1 期スラブの水分量には、打継ぎによる変動は見られない。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：耐久性力学に基づく収縮影響評価研究委員会，2012.10
- 2) 岩田道敏，石橋忠良，斉藤啓一，近藤純司：ラーメン高架橋の長期応力変動について，コンクリート年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.633-638，1994
- 3) 石橋忠良，北後征雄，吉野伸一，斉藤啓一，松田猛：RC ラーメン高架橋の温度・乾燥収縮の影響に関する調査（1），構造物設計資料，No.77，pp.18-24，1938.3
- 4) 気象庁：各種データ・資料，<http://www.jma.go.jp/>
- 5) 鈴木雄大，小林薫，鈴木慎一：鉄筋コンクリート高架橋の乾燥収縮ひずみの測定，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.473-478，2010
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案），2006
- 7) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書
- 8) 佐野禎，末吉良敏，平田隆祥，十河茂幸：印加電圧方式によるコンクリートの水分率推定方法に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.589-594，2005