

# 報告 鉄筋コンクリート高架橋の乾燥収縮ひずみの測定

鈴木 雄大\*1・小林 薫\*2・鈴木 慎一\*3

要旨：鉄筋コンクリートラーメン高架橋を対象とし、コンクリートの有害なひび割れを制御することを目指している。そのためには実構造物における乾燥収縮に起因したひび割れ発生の有無を評価する手法が必要となる。コンクリート構造物は大規模地震に対応した設計で配筋が密になっており、またコンクリートの収縮量が大きくなりつつあり、ひび割れが発生しやすい条件となっている。これまで実構造物でコンクリートの収縮を測定した例はまだ少ない。そこで実構造物におけるコンクリートの乾燥収縮を把握することとした。  
 キーワード：乾燥収縮，ひび割れ，線膨張係数，表面温度，水分量，日射量

## 1. はじめに

コンクリートはその硬化過程において体積の収縮が起きる。この体積収縮が新設コンクリート構造物の初期ひび割れの発生原因のひとつとなっている。有害なひび割れの発生はコンクリート構造物の耐久性に影響を与えるために避ける必要がある。しかしながら最近では、良質な骨材の減少とともに、コンクリートの収縮量が大きくなっているとの報告もあり、鉄筋量がおおくなって新設コンクリート構造物でひび割れが発生しやすい条件となっている。

RC ラーメン高架橋（以下高架橋という）は、経済性や施工性の観点から鉄道構造物に数多く用いられている。しかし、高架橋の応力状態は不静定力、クリープ、乾燥収縮等の影響が複雑に作用しており、不明瞭な点も多く、コンクリートスラブでは断面を貫通するひび割れの発生も見られる。このようなひび割れを制御するためには、実構造物を対象とした乾燥収縮等の測定結果を元に、ひび割れ発生の有無を評価する手法の確立が必要である。しかし実構造物において、柱や梁を対象として乾燥収縮等を測定した例はいくつかある<sup>1),2)</sup>ものの、コンクリートスラブを対象とした例はまだ少ない。

そこで高架橋の部材のなかでもひび割れが発生しやすく、貫通ひび割れの発生による漏水が発生しやすいコンクリートスラブを対象として、実構造物の乾燥収縮等を測定することとした。今回、180 日間の測定結果について報告する。

## 2. 測定概要

測定を行ったのは、2 線 2 柱式の 3 径間の高架橋である。ただし本高架橋は 2 段階施工の高架橋であり、1 線 1 柱を順に構築して併合する。測定器を設置したのはこのうち第 1 期施工部分の 1 線 1 柱式高架橋の中央径間である。高架橋の諸元および測定器の設置位置を図 - 1 に、高架橋周辺の状況を図 - 2 に示す。

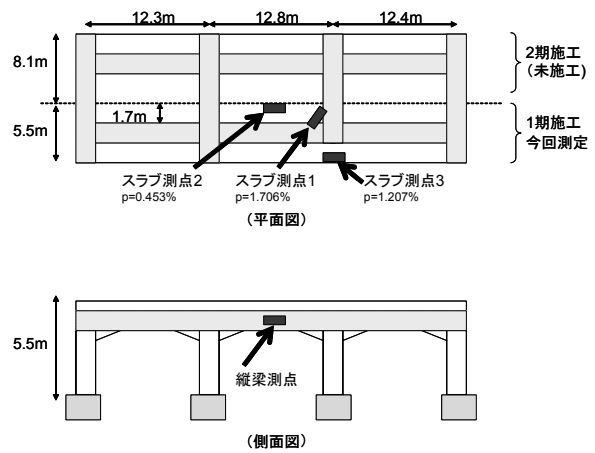


図 - 1 高架橋諸元



図 - 2 高架橋周辺状況

本高架橋は、橋軸方向をおおよそ南西から北東方向に向けて構築されている。

近隣の建物は高架橋から離れており、スラブ中央部では午前午後で日射量にはほとんど差が無いことを測定により確認している。

測定対象部材はコンクリートスラブとスラブを支持する縦梁とした。高架橋に設置した測定器は、コンクリ

\*1 東日本旅客鉄道（株） 研究開発センター フロンティアサービス研究所 工修（正会員）

\*2 東日本旅客鉄道（株） 研究開発センター フロンティアサービス研究所課長 博（工）（正会員）

\*3 東日本旅客鉄道（株） 東北工事事務所 工事管理室副課長（正会員）

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), コンクリート上面温度計 (上面に熱電対を設置した), 水分計である。同時に環境計測のため, 気温計, 相対湿度計, 雨量計, 日射計, を設置した。測定器の設置状況を図 - 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。



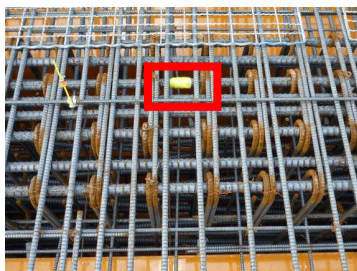
(スラブ測点 1)



(スラブ測点 2)



(スラブ測点 3)



(縦梁測点 1)

図 - 3 測定器取り付け位置 (スラブ, 梁断面図)

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	±5000 μ	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	±5000 μ	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/m²	-	太陽電池式	高架橋近傍

スラブ測点 1 は, 隅角部に生じやすいひび割れを捕らえるため, スラブの隅角部に対して斜めに測定器を設置した。なおスラブのハンチが無い場所としている。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。なお, 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。スラブ測点 3 は, 橋脚近傍の張出しスラブ端部で橋軸方向に測定器を設置している。

本高架橋の梁およびスラブ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。

測定は自動計測で実施し, コンクリート打設から概ね材齢 2 ヶ月程度までは 5 分ピッチ, それ以降は 10 分ピッチで測定した。

表 - 2 コンクリートの標準配合表

呼び強度	スラブ	粗骨材の最大寸法	セメントの種類	空気量	塩化物含有量	単位水量	
27	12	20	N	4.5%	0.3kg/m³以下	175	
セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤	W/C	s/a	その他
340	170	812	994	3.4	50%	45.1%	合成短繊維
太平洋セメント(普通ポルトランドセメント)		相馬郡新地町 化学法A	利府町赤沼化学法A(密度 2.63g/cm³ 総乾 2.67g/cm³ 表乾)	ボソリス 15SC(AE 減水剤 標準形 1) (密度 2.66g/cm³ 表乾)			バルテック PW・Jr(1袋/m³=0.455kg)

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)	32.9(8日目)	160.07kg/m³	0.03%、 0.051kg/m³
標準養生	33.4(7日目)	42.0(28日目)		
スラブ	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

### 3. 測定結果

#### 3.1 コンクリートスラブの測定結果

##### (1) コンクリートひずみ

コンクリートのひずみはスラブ上にコンクリートを打設し終わった時点測定を開始点として, そのときのひずみ計の測定値をゼロとした。

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いることから, 個々のひずみ計の公正係数を用いてゼロ点公正した。

また、コンクリート自体の温度変化による体積変化が生じることから、ひずみ計で測定されるひずみには温度ひずみが含まれている。一般に硬化コンクリートの線膨張係数は  $10 \times 10^{-6}$  程度であるが、弱材齢時の線膨張係数はこれよりも小さい。本測定ではコンクリート温度およびコンクリートひずみの測定時間間隔が5分と短いため、測定結果から線膨張係数を求め、測定結果を用いて温度ひずみを補正することとした。ここで任意の24時間では、コンクリートの線膨張係数は変化せず、また自己収縮および乾燥収縮の進行は無視できるほど小さいと仮定して線膨張係数を求めた。ゼロ点公正されたひずみ測定値を24時間毎にまとめ、24時間でのコンクリート温度変化とそのとき測定されたひずみ変化量から線膨張係数を算出した。なおここで求めた線膨張係数には、鉄筋による拘束の影響が含まれており、拘束を受けないコンクリートの線膨張係数はこれよりも高くなると考えられる。

線膨張係数は、午前から夕方にかけての温度上昇期と、夕方から早朝にかけての温度下降期の2通り求めることができる。温度測定の結果(図-4)から、温度上昇している時間は下降時間に比べて短く、温度変化が急激になる傾向あり、温度上昇時はひずみ-温度関係は非線形になっている。一方温度変化が緩やかな温度下降時はほぼ線形関係にあった。ここでは温度変化に対してコンクリート変形が十分に追従するように温度変化時間が長い温度下降期を用いて算出した。コンクリートひずみおよび温度の測定値は、18時頃最高値になり、翌朝9時頃に最低値を記録する傾向が見られたため、この時間の変化量から線膨張係数を求めることとした。求めた線膨張係数の経時変化を図-5に示す。

線膨張係数は、打設直後はばらつきが非常に大きいが、材齢7日以降は落ち着き、数値としての意味を持つようになったと考えられる。

材齢7日の線膨張係数は、 $5 \times 10^{-6}$  ( / ) 程度であり、材齢が進むにつれて増大傾向にある。材齢180日では  $9 \times 10^{-6}$  ( / ) 程度になった。

一方、鉄筋の線膨張係数は  $11 \sim 12 \times 10^{-6}$  ( / ) であり、弱材齢時ではコンクリートよりも高く、コンクリートと鉄筋にはひずみの差が生じたものと想定される。

ゼロ点公正および20 相当に温度補正されたコンクリートひずみを図-6に示す。

コンクリート打設直後のスラブのひずみは収縮・膨張の変動が見られるが、材齢7日頃から収縮傾向が顕著に現れており、この時点で  $-50 \mu \sim -120 \mu$  程度になった。

スラブ測点2(中間スラブ端部)のコンクリートひずみは、スラブ測点1(スラブ隅各部)のひずみやスラブ測点3(張出しスラブ端部)のひずみと比較し、大きな収縮を示した。

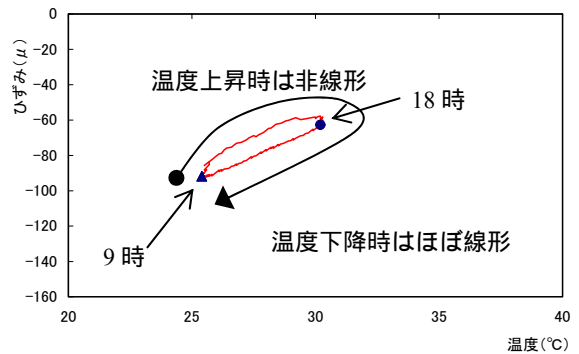


図-4 24時間のコンクリートひずみ変化

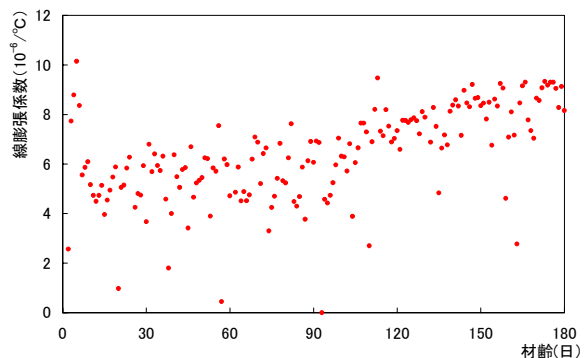


図-5 スラブの線膨張係数

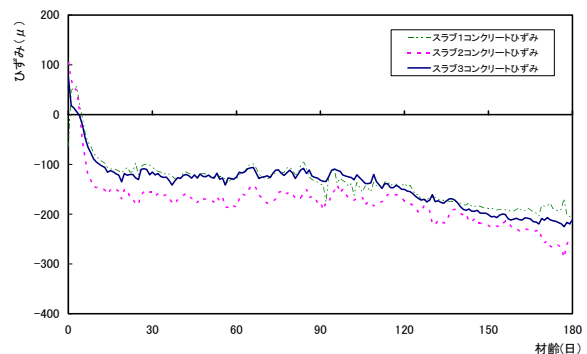


図-6 コンクリートスラブのひずみ

材齢7日目でのひずみの差はほぼ  $50 \mu$  となり、その後はこの差をほぼ保っている。この差は温度収縮によるものとは考えられない。また、スラブ測点2および3は、両者ともにスラブ端部であり、乾燥条件にも大きな違いは無いと考えられる。このことから、材齢7日時点で収縮量に差が生じ初めたのは、鉄筋による内部拘束の影響によるものと考えられる。スラブ測点3(張出しスラブ端部)周辺にはひび割れ防止鉄筋が配置されており、スラブ測点2(中間スラブ端部)に比べて収縮測定方向に配置された鉄筋量が多くなっている。



ひずみは材齢 15 日から 100 日程度までは大きな変動は無く、-100  $\mu$  から -200  $\mu$  の値を示した。その後徐々に収縮ひずみが大きくなっている。

### (2) 鉄筋ひずみ

各取り付け位置における鉄筋ひずみの測定結果を図 - 7 ~ 図 - 9 に示す。鉄筋ひずみは、打設直後に引張・圧縮の変動が見られたが、材齢 5 日以降は圧縮傾向が顕著に見られた。各測定箇所とも、上側鉄筋の圧縮が大きく、下側鉄筋との差は 50  $\mu$  程度であった。

材齢 180 日時点の鉄筋ひずみは、スラブ測点 2 (中間スラブ端部) が最も大きい値を示した。これはスラブの側転の中で、スラブ測点 2 の鉄筋比が最も小さいこととも一致している。

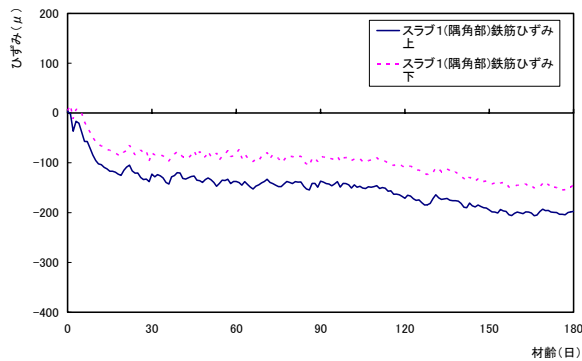


図 - 7 鉄筋ひずみ (スラブ測点 1)

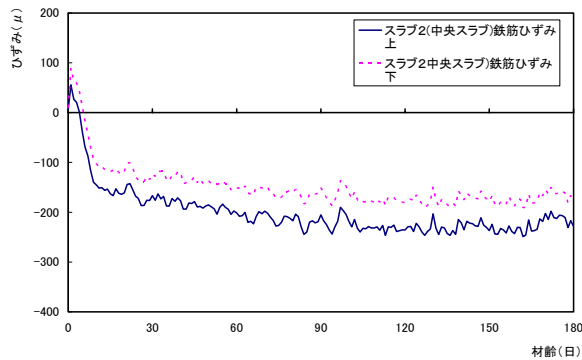


図 - 8 鉄筋ひずみ (スラブ測点 2)

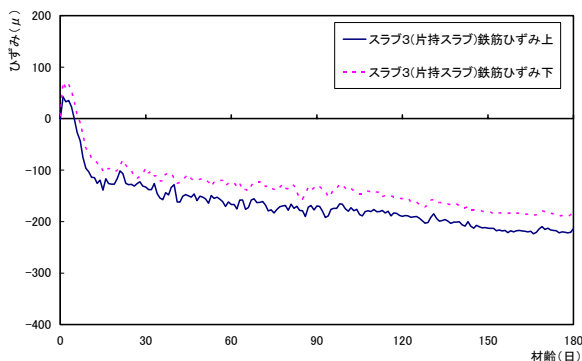


図 - 9 鉄筋ひずみ (スラブ測点 3)

### 3.2 縦梁の測定結果 (鉄筋ひずみ)

縦梁のスパン中心の鉄筋にひずみゲージを貼り付けている。梁のスパン中心にはコンクリートひずみ計は設置していないが、ひずみゲージからコンクリートのひずみを想定できる。

縦梁の鉄筋ひずみの測定結果を図 - 10 に示す。縦梁の鉄筋ひずみは上部主鉄筋と下部主鉄筋で測定した。鉄筋ひずみ上下で大きく異なる値となった。コンクリート打設後、材齢 7 日までは圧縮・引張が生じ、その後は徐々に圧縮側のひずみが進展した。上部鉄筋は -400  $\mu$  程度に対し、下部鉄筋は -100  $\mu$  となった。上下の鉄筋ひずみの差は、上下の鉄筋に縦梁コンクリートの乾燥収縮による圧縮ひずみが生じると同時に、縦梁の自重による曲げにより上部鉄筋が圧縮される一方、下部鉄筋が引張を受けることから生じていると考えられる。

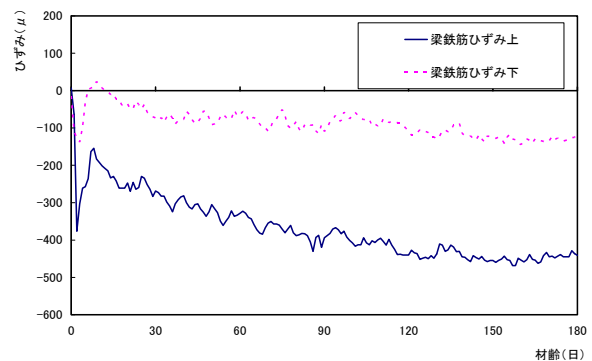


図 - 10 鉄筋ひずみ (縦梁)

### 3.3 環境の測定結果

#### (1) コンクリート温度の測定結果

コンクリートスラブの温度および気温、表面温度を図 - 11 に、縦梁のコンクリート温度および気温、表面温度を図 - 12 に示す。

高架橋の打設完了時間が 16:00 頃であり、この時点での温度は縦梁、スラブともに 18~19 であった。打設したコンクリートの荷卸時の温度が 16 と記録されていることから、この時点では水和熱はまだ卓越していない状態だと考えられる。

打設後の温度変化は縦梁とスラブで異なる。打設後の夜間にかけて気温低下とともにスラブ温度も一旦低下したが、縦梁温度は上昇し続け、ピーク時で約 44 となった。

スラブ測点 1 (スラブ隅各部) の温度は他のスラブ温度より若干高い傾向があり、ピークを超えたあとの下降も緩やかになっている。これはスラブ隅各部がスラブより温度が高い梁に近接する位置にあるためだと考えられる。材齢 7 日頃には各測定点のスラブ温度はほぼ同じ値となった。

温度の測定結果のうち、材齢 50 日から 7 日間の温度変化を拡大したものを図 - 13 に示す。材齢 50 日付近の測定結果から、24 時間の中での温度変化を比較した。外気温とコンクリート表面温度を比較すると、温度がピークとなる時間はほぼ同じであった。スラブ温度は気温や表面温度のピークよりも少し遅れてピークを迎える。梁温度は、スラブよりもさらにピークの発生が遅れている。温度変化もスラブと比べて梁は緩やかであり、これはコンクリートボリュームが大きく、熱容量が大きいことが現れているものと考えられる。

これらの測定結果から、コンクリートスラブの表面と

内部やスラブと梁の境界部で、温度差によるわずかなひずみ勾配が生じていることになる。

## (2) 日射量と降水量、相対湿度の測定結果

降水量を図 - 14 に、相対湿度を図 - 15 に、日射量を図 - 16 にそれぞれ示す。なお雨量計、湿度計、日射計は材齢 21 日に設置している。雨量計を設置するまでの降水量データは、高架橋に近い気象庁の測定点の気象観測データ<sup>3)</sup>を使用している。コンクリート中の自由水分量の測定結果を図 - 17 に示す。なお自由水分量の測定結果は、打設時のコンクリート中の自由水量を 100%とした百分率

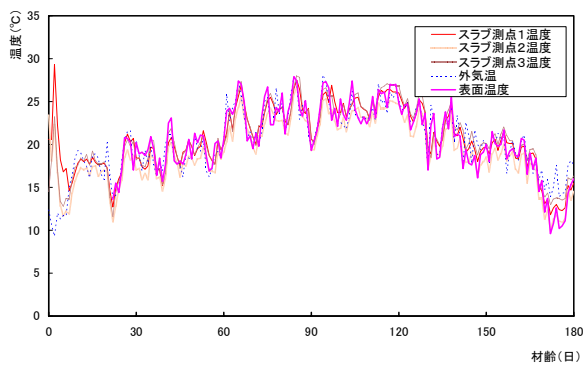


図 - 11 コンクリートスラブ温度および気温

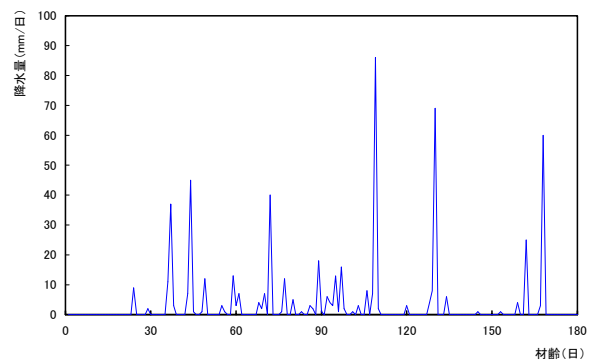


図 - 14 降水量

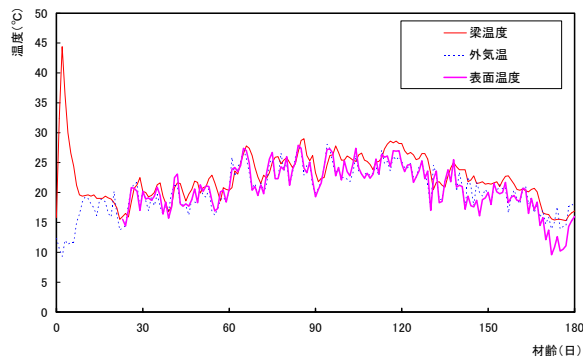


図 - 12 縦梁温度および気温

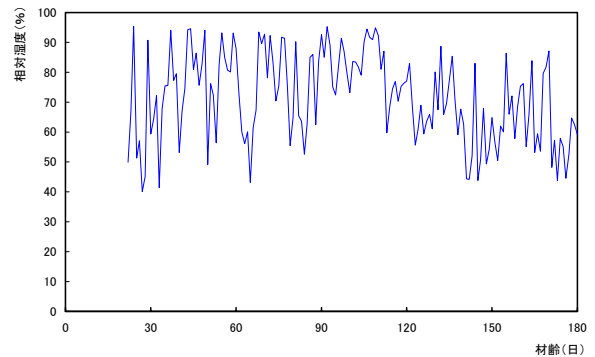


図 - 15 相対湿度

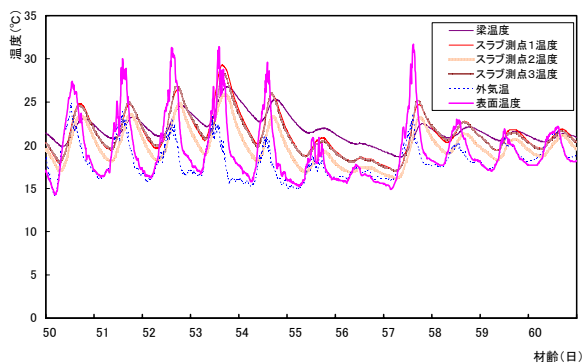


図 - 13 スラブ温度および気温 (材齢 50 日付近)

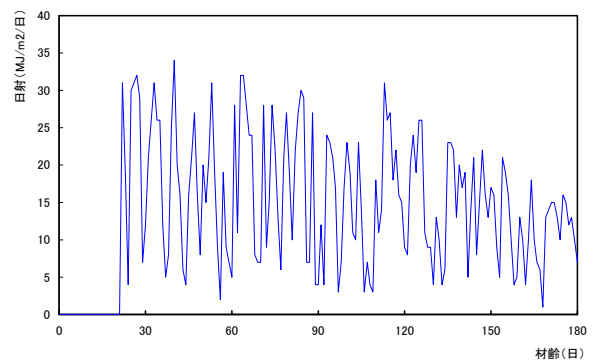


図 - 16 日射量

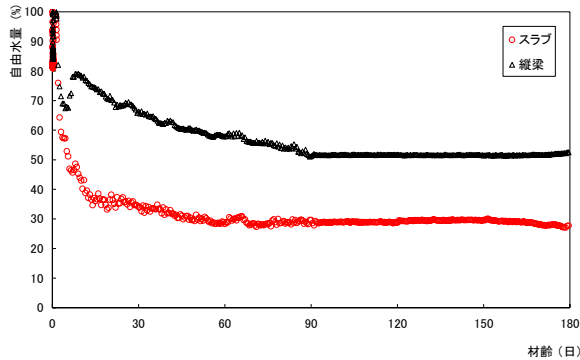


図 - 17 自由水分量

で表示している。また温度変化による変動を補正している。

水分量は徐々に減少したが、材齢 90 日以降は水分量の変化は小さかった。変動が小さくなってからの縦梁の水分量は打設時の 60%程度に低下したのに対し、スラブの水分量は 30%程度まで低下しており、スラブは梁よりも乾燥状態にある。これは縦梁と比較してスラブの部材厚さが小さく、乾燥が進みやすい状況にあるためと考えられる。

降水量（図 - 14）とスラブひずみ（図 - 6）や水分量（図 - 17）の関係は、たとえば降水量が 80(mm/日)程度であった材齢 110 日付近を見て明らかな通り、降雨によりコンクリートスラブのひずみ変化量はわずかであり、ひずみ計近傍に設置した水分量の変動も非常に小さかった。スラブ厚さの中央部までは降雨によるコンクリートの吸水の影響は顕著に現れないようである。

相対湿度と水分量とを比較した結果からも、相対湿度の変動が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。

日射量は天候と連動しており、降雨が観測されるときの日射量は小さく、コンクリートの温度変化も小さい結果となる。

#### 4. まとめ

高架橋を対象として、コンクリートひずみや鉄筋ひず

みを測定し、実構造物の乾燥収縮ひずみの大きさ等を調べ、以下の結果を得た。

- 1) コンクリートスラブの収縮ひずみは、材齢 7 日頃に顕著に進み、材齢 15 日以降は変動が小さくなった。材齢 15 日から 100 日にかけてのひずみは、 $-100\mu$  から  $-200\mu$  であり、中間スラブ端部（スラブ測点 2）の収縮が比較的大きかった。
- 2) スラブコンクリートにおいて、鉄筋比が大きいとコンクリートの収縮が小さくなる傾向が見られた。
- 3) 鉄筋ひずみは、コンクリートの収縮の進展に伴い、圧縮ひずみが増加する傾向が見られた。また、スラブ、縦梁ともに、上側主鉄筋の圧縮ひずみが下側主鉄筋よりも大きい。
- 4) スラブや縦梁、気温の温度変化を測定した結果、それぞれにピーク温度が発生する時間にずれが見られ、これは部材断面寸法の影響と考えられる。
- 5) スラブ厚さの中央部で測定した結果、降雨によるコンクリートスラブのひずみ増分はわずかであった。また、コンクリート内の自由水分量の増分はほとんど見られなかった。
- 6) スラブは縦梁に比べて部材厚さが小さく、乾燥が進みやすい状況にある。

#### 謝辞

本報告の一部測定を実施するにあたり、国土交通省建設技術研究開発助成制度の支援をいただきました。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 岩田・石橋・斉藤・近藤，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.1，1994
- 2) 石橋・北後・吉野・斉藤・松田，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，pp18-24，1938.3
- 3) 気象庁，気象観測データ，<http://www.jma.go.jp/>