

論文 RC ラーメン高架橋スラブを模擬した梁付4辺固定スラブの収縮特性に関する解析的検討

鈴木 雄大*1・小林 薫*2・石田 哲也*3

要旨: コンクリートの乾燥収縮によるひび割れが生じやすいRC ラーメン高架橋スラブを模擬した梁付4辺固定スラブ供試体を制作し、拘束を受けるスラブコンクリートの収縮ひずみを測定した。スラブコンクリートの収縮ひずみは梁との接合部での外部拘束が大きく影響した。供試体の収縮ひずみ測定中の気温や湿度を考慮した収縮ひずみ解析を行い、解析で4辺固定スラブの収縮特性を捉えられることを確認した。

キーワード: スラブ, 解析, 乾燥収縮, ひび割れ

1. はじめに

打設後のコンクリートは、水和反応に伴って生じる自己収縮と乾燥に伴って生じる乾燥収縮により、体積収縮を生じる。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鉄筋量が多くなり、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。

コンクリートの乾燥収縮は構造物のひび割れ発生の主要な原因の一つである。コンクリートの乾燥収縮に起因するひび割れが問題になる部位として、建築構造物では一般に壁体や屋根スラブがあげられ、これらの実構造物のコンクリート収縮ひずみを計測した例^{1), 2)}もある。一方土木構造物は建築構造物に比べて部材断面が大きい構造物に対する検討例が多く、RC ラーメン高架橋(以下、高架橋という)のスラブのような薄い部材を対象とした測定例はまだ少ないと思われる。

建築構造物のコンクリートひび割れ制御指針³⁾ではコンクリートの拘束度(拘束したときの乾燥収縮率(建築物) / 拘束しないときの乾燥収縮率(実験室))が0.5~0.75程度でひび割れが生じると示されているが、土木学会コンクリート標準仕様書⁴⁾では収縮の特性値を1200 μ と設定する設計法が示されているものの拘束度に関する記載は見られず、拘束度の観点から土木構造物を評価した研究例も少ない。

高架橋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が見られる(図-1)。このようなひび割れを制御するためには、実構造物におけるひび割れ発生機構を適切に評価する必要がある。このため、実構造物においてコンクリートの乾燥収縮を測定することが望

ましいが、実際の測定には多くの困難が伴うため、その測定例はまだ少ない^{5), 6), 7)}。特に、部材が薄くひび割れが生じやすく、漏水に対する補修が実施されることが多い高架橋スラブを対象とした例は少なく、ひび割れ発生条件が明らかになったとはいえないと考える。

筆者らは高架橋スラブのひび割れ発生機構の解明のために、実構造物を模擬した梁付スラブ試験体を用いてコンクリートの収縮ひずみを測定した⁸⁾。本論文では、その結果をもとに試験体が暴露された環境特性を考慮した収縮ひずみ解析を行い、測定結果と比較した。

なお本論文では、コンクリートの収縮ひずみの測定に用いたセンサーは、コンクリートと鉄筋の付着あるいは、コンクリートとセンサーの付着に伴って生じる長さ変化を測定しており、厳密には自己収縮と乾燥収縮をあわせた長さ変化を乾燥収縮と称する。



図-1 高架橋スラブのひび割れ例

2. 試験体概要

ビームスラブ形式のRC 高架橋を模擬した縮小試験体として、1 スパン分のスラブとスラブ周囲4辺の梁を模擬した梁付スラブ試験体を製作した⁸⁾。梁付スラブ試験体の製作と同時に、コンクリートの自由収縮ひずみを測定するために自由収縮試験体も製作した。コンクリート打設と同時に試験体の収縮ひずみと試験体周囲の環境特性の測定を開始した。

*1 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所品川工事区 工修 (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センターフロンティアサービス研究所 主管研究員 博(工) (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科 教授 博(工) (正会員)

2.1 形状寸法

脱型後の梁付スラブ試験体全景写真を図-2 に示す。梁付スラブ試験体の概要図および収縮ひずみ測定位置を図-3 に示す。コンクリートの収縮ひずみを熱電対付きの埋込ゲージで測定し、鉄筋ひずみをひずみゲージで測定した。

梁付スラブ試験体は、鉄道用高架橋の梁およびスラブを 1/3 の寸法で模擬し、スラブの平面寸法を 1200 mm × 2400 mm (辺長比 1:2) とした。ただしスラブ厚さは、ダブル配筋 (D10 を使用) として鉄筋かぶりを確保するために 140 mm とした。梁は断面寸法を幅 300 mm × 高さ 400 mm とした。なお梁・スラブの接合部にはハンチは設けず、高架橋柱は考慮していない。



図-2 梁付スラブ試験体

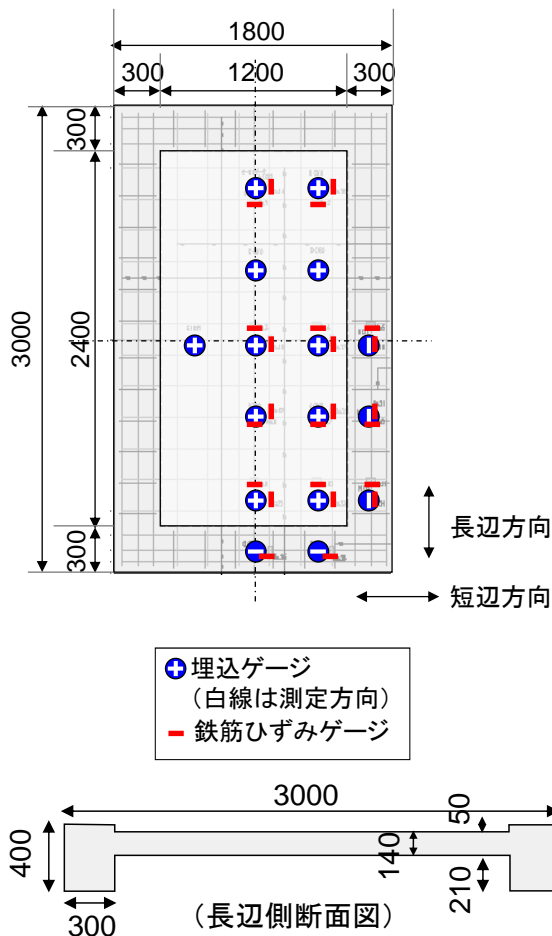


図-3 梁付スラブ概要図および測定位置図



図-4 梁付スラブ配筋状況

配筋状況の写真を図-4 に示す。梁付スラブ試験体の鉄筋比は、鉄道用高架橋の実例を参考に、スラブ鉄筋比 0.5% (D10 鉄筋を 200 mm ピッチでダブル配筋) として、2 方向を同鉄筋比とした。同様に梁鉄筋比を 1.9% とした。なおスラブと梁の接合部は、配筋の都合からスラブ面を梁上面より 50 mm 下げている。

梁付スラブ試験体の製作と同時に、図-5 に示す 100 × 100 × 400 mm の無筋自由収縮試験体と、断面高さがスラブと同一の 140 × 140 × 400 mm の無筋自由収縮試験体を各 2 体製作した。140 × 140 × 400 mm の無筋自由収縮試験体は、梁付スラブ試験体と同じ環境条件における自由収縮ひずみ量を把握することを目的としている。このため梁付スラブ試験体のスラブ厚さと同じ厚さ 140 mm の断面とした。また梁付スラブの上下面からの乾燥が卓越する状態に近づけるために、自由収縮試験体の上下面を除く 4 面をコーキング剤で表面被覆し、体積表面積比 (V/S) を梁付スラブ試験体と合わせた (V/S=70mm)。なおコーキング剤には、1 成分形シリコン系弾性コーキング剤を使用した。

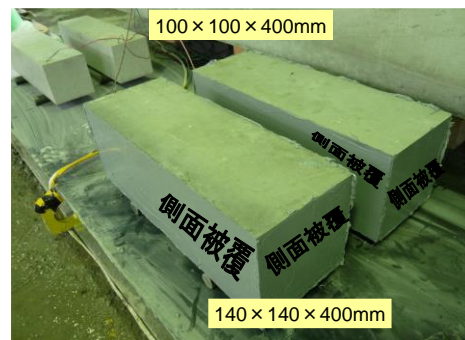


図-5 自由収縮試験体

2.2 配合および製作方法

試験体の収縮ひび割れの発生を励起するために、コンクリートは森戸ら⁹⁾の配合例を参考にして単位水量 315 kg とし、あらかじめ収縮量が大きいことを確認している

材料を使用した。コンクリートの配合およびフレッシュ性状を表-1に示す。

梁付スラブ試験体および自由収縮試験体は同じ日（8月5日）に、同じコンクリートを使用して製作した。梁付スラブ試験体の梁とスラブは一体打設とした。打設後は気中養生ののち、材齢5日で脱型して室内環境においた。

脱型後は梁付スラブが上下面からも乾燥するように、60cm間隔に並べた20cm角の木材ブロックで梁部分を支持し、スラブ下面の通風を確保した。

表-1 コンクリート配合およびフレッシュ性状

示方配合 ⁹⁾	W/B (%)	単体量 (kg/m ³)						
		水	セメント	石灰石微粉末	細骨材	粗骨材	増粘剤	AE剤
B配合	60	315	525	200	350	692	2.0	0.16

試験結果	打設日	外気温	コン温度	フロー	Air
B配合	8月5日	35.0℃	32.0℃	52.0cm	4.6%

2.3 測定内容

梁付スラブ試験体には図-6のようにコンクリートひずみ測定用の熱電対付き埋込ゲージおよび鉄筋ひずみゲージを設置した。埋込ゲージはスラブ断面高さ中心に設置した。無筋自由収縮試験体には、試験体中心に試験体中心に埋込ゲージを設置した。梁付スラブ試験体および自由収縮試験体のコンクリート温度は埋込ゲージの熱電対で測定した。測定は梁付スラブ試験体へのコンクリート打設完了と同時に開始した。試験体の測定と同時に、試験体の周囲の気温および湿度も測定した。

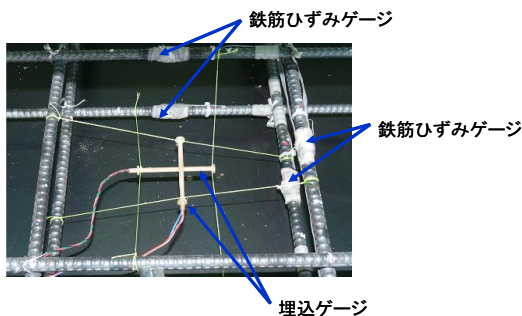


図-6 センサー配置状況

3. 測定環境

試験体のコンクリート打設は、直射日光を避けた屋根のある小屋の中で実施した。材齢5日目に脱型し、その後試験室内に移動した。試験室内の環境は一定ではないが、屋外に比べて環境変動は緩やかである。試験体は降雨を一切受けていない。

試験体を設置した試験室の気温および相対湿度の測定結果を図-8に示す。気温と相対湿度は10分間隔で測

定した。

試験体の温度は、コンクリートの収縮ひずみを測定する埋込ゲージに付帯する熱電対で測定した。試験体温度を図-9に示す。試験体温度は、脱型前の材齢4日頃までは気温よりも高く、梁部分の温度は57℃に上昇した。同時点のスラブ中央の温度は46℃、スラブ周辺部で49℃まで上昇した。脱型後は、梁とスラブの温度が同程度となった。このことから、脱型後の試験体のスラブ・梁部材間の温度応力による拘束の影響は少ないものと考えられる。

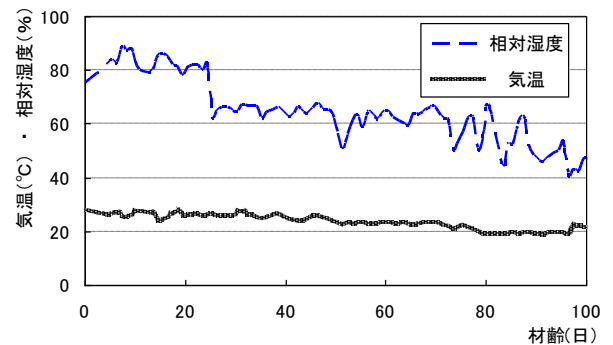


図-8 試験室環境の温度、相対湿度

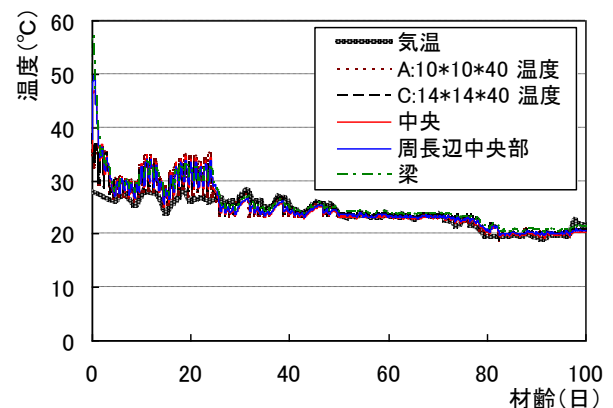


図-9 試験体温度および気温

4. 収縮ひずみ解析

梁付スラブ試験体と、100×100×400mmの無筋自由収縮試験体、140×140×400mmの自由収縮試験体のそれぞれの収縮ひずみ解析を行った。

気温と相対湿度の環境特性の変化を考慮したコンクリート収縮ひずみ解析を行うために、東京大学コンクリート研究室で開発された熱力学連成解析プログラム「Ducom-Com3」を使用して解析を行った。

梁付スラブ試験体の解析モデルを図-10に示す。試験体の対称性を考慮して解析モデルは1/4モデルとした。解析モデルのスラブ部の要素の平面寸法は50mm×50mmとした。厚さ140mmのスラブの要素分割は20mm, 50mm,

50mm, 20mm とした。

2種類 of 自由収縮試験体の解析モデルを図-11 (a), (b) に示す。100×100×400mm 試験体の解析モデルは1/4モデルで要素分割は全て 10mm の立方体とした。140×140×400mm モデルの高さ方向の要素分割は、梁付スラブの解析モデルと同様に 20mm, 50mm, 50mm, 20mm とした。

梁付スラブの対称面を除いた解析モデル表面に、熱や水分移動を考慮する境界要素を設けた。環境特性として気温と相対湿度を解析で考慮した。

材齢 100 日時点の試験体の表面には微細なクラックが無数に確認されたが、明らかに貫通ひび割れと確認できるひび割れは生じていなかった。そこでコンクリートの引っ張り強度は 100N/mm² として、ひび割れの生じない解析とした。

解析ステップはコンクリート打設完了から脱型までの 5 日間を 145 ステップに細かく分割し、その後は 10 分 1 ステップとした。

収縮ひずみの測定は解析モデルの節点間距離から算出した。梁付スラブはスラブの断面高さ中心で収縮ひずみを算出した。自由収縮試験体は解析モデルの中心の 2 節点の変位から算出した。

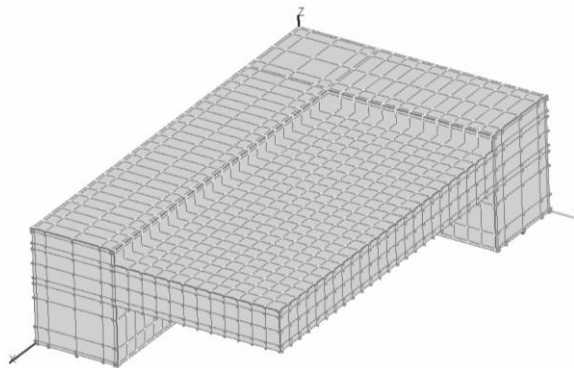


図-10 4 辺固定スラブ解析モデル (1/4 モデル)

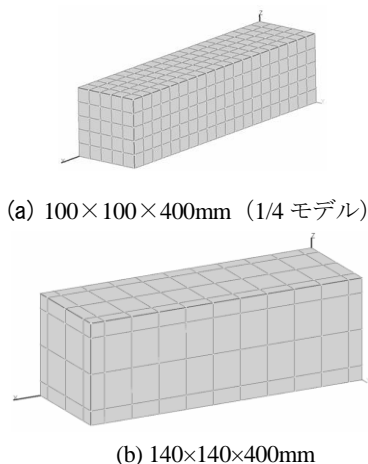


図-11 自由収縮試験体解析モデル

5. 解析結果および測定結果

5.1 自由収縮試験体

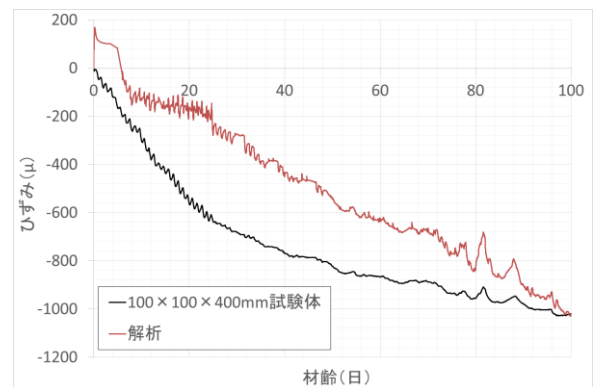
自由収縮試験体のコンクリート収縮ひずみの測定結果と、その解析結果を図-12 (a), (b) に示す。自由収縮試験体の測定値は、それぞれ 2 体の試験体の平均値を示す。

コンクリートは打設後に硬化熱で膨張しており、解析ではこれを示すプラスのひずみとなる。測定結果では、コンクリートが非常に柔らかい段階のみにおいて埋込ゲージがコンクリート熱膨張に追従できないためほとんどプラスにならないものと考えられる。

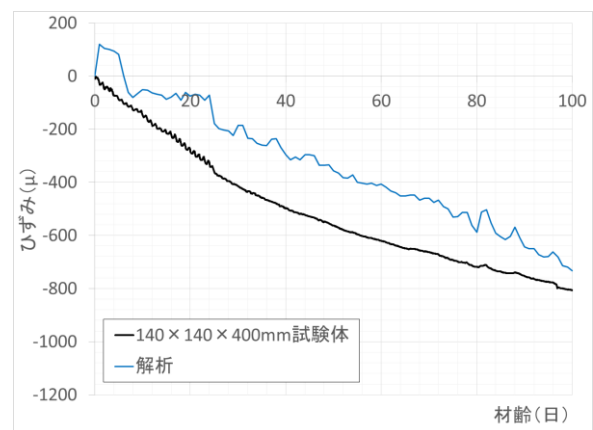
コンクリートの収縮ひずみは材齢 100 日時点で、増大を続けている。収縮ひずみの増加傾向は、試験体形状にかかわらず同じ特徴を示しており、材齢 24 日程度まで収縮ひずみの増加量が大きく、その後収縮ひずみの増加はやや緩やかになる。

材齢 100 日時点で、100×100×400mm 試験体の収縮ひずみは平均値で 1000 μ 程度、140×140×400mm 試験体の収縮ひずみは平均値で 800 μ 程度となった。

2 つの試験体に関する収縮ひずみの解析結果は、材齢 100 日時点で測定結果の収縮ひずみを精度よく表現することができた。材齢 80 日頃の相対湿度の変動によると想定される収縮ひずみの変動が、解析において精度よく表している。



(a) 100×100×400mm



(b) 140×140×400mm

図-12 自由収縮試験体ひずみ

5.2 梁付スラブ

(1) 変形特性

梁付スラブの解析で得られた材齢 100 日時点の変形図を図-13 に示す。梁付スラブの変形特性を際立たせるために変位は 500 倍にして表示している。

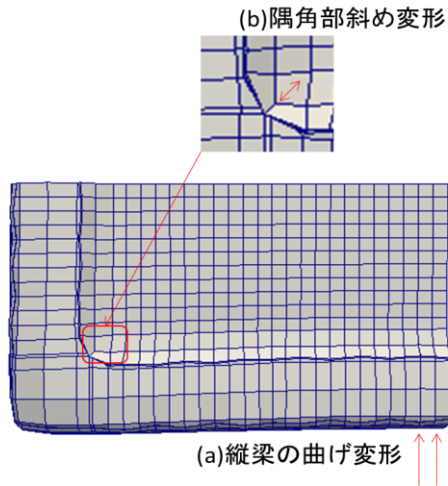


図-13 梁付スラブ変形図（平面図）

梁付スラブの変形特性として図-13 に示すように(a)梁の曲げ変形と(b)スラブ隅角部の斜め変形があげられる。

(a)梁の曲げ変形は、スラブコンクリートの収縮に伴い、梁がスラブ側に引張を受けることで曲げ変形したものと考えられる。平面形状が長方形のスラブでは、長辺方向の梁（縦梁）の中央部の変位量の方が、短辺方向の梁（横梁）の変位量よりも大きくなっている。

梁が曲げ変形することに伴い、梁の接合部にあたるスラブ隅角部では、図-13 の拡大図(b)に示すようにスラブが対角線方向に細長く斜めの変形形状を示した。一般的に RC ラーメン高架橋スラブのような 4 辺固定スラブにおいてみられる隅角部のひび割れは、このような斜めに細長くなる変形特性が進行した結果生じたひび割れであると考えられる。

図-14 はスラブ隅角部付近の主ひずみの方向を図示している。主ひずみの向きはスラブ隅角部付近では梁に対

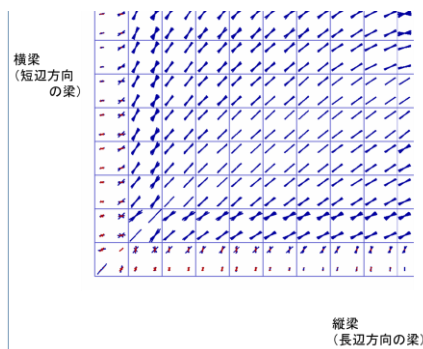


図-14 スラブ隅角部付近の主ひずみ方向図（平面図）

して斜め方向になっており、隅角部から離れるに従って梁方向に向きを変えている。スラブ中央部では長辺方向のひずみが卓越しており、これがスラブ中央部に生じるひび割れの要因になっているものと考えられる。

(2) コンクリート収縮ひずみ

梁付スラブの測定箇所のうち、代表的な測定点 4 箇所を図-15 に示す。測定箇所(a)はスラブ中央に位置し、4 辺の梁からもっとも離れている。測定箇所(b)は長辺方向の梁近傍に位置し、測定箇所(c)は短辺方向の梁近傍に位置する。測定箇所(d)は、長辺方向と短辺方向の梁が結合するスラブの隅角部に位置する。

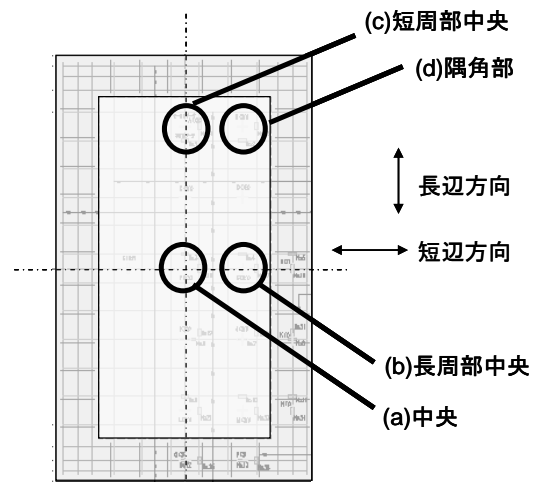


図-15 代表的な測定箇所

(a)~(d)の各測定箇所ですラブ長辺方向と短辺方向のスラブコンクリートの収縮ひずみを測定した。測定結果を図-16~19 に示す。

初めにスラブコンクリートの収縮に及ぼす拘束を梁端部と梁中央部で比較した。長辺方向の測定結果は、(b)で 240μ 程度、(d)で 320μ 程度となっており、梁中央寄りの(b)の収縮ひずみが小さくなっている。短辺方向の測定結果は(c)が 320μ 程度、(d)が 360μ 程度となっており、梁中央寄りの(c)の収縮ひずみが小さくなっている。これ

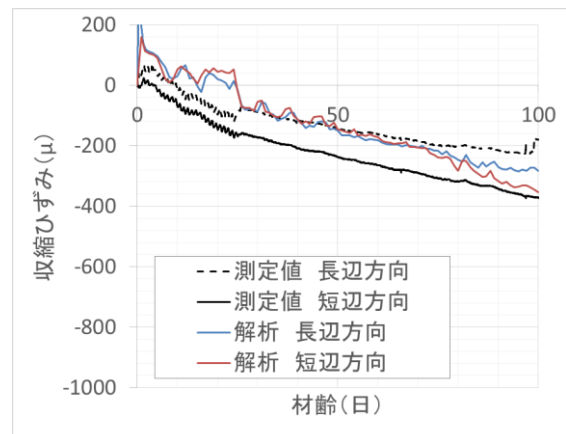


図-16 スラブ収縮ひずみ (a) 中央

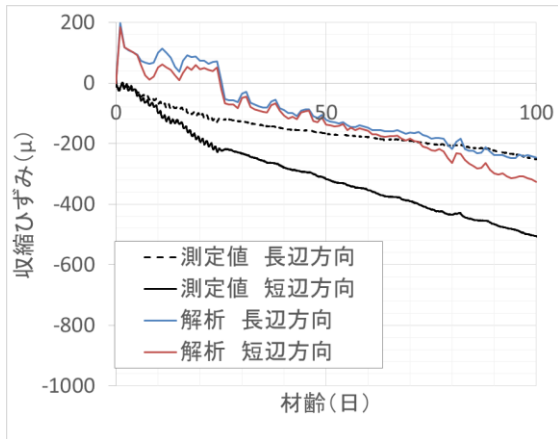


図-17 スラブ収縮ひずみ (b)長周部中央

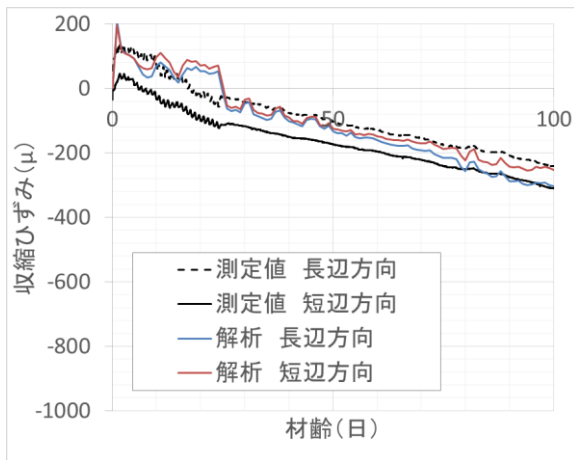


図-18 スラブ収縮ひずみ (c)短周部中央

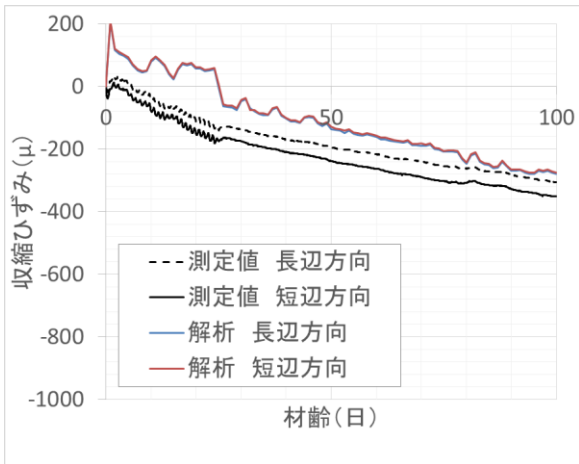


図-19 スラブ収縮ひずみ (d)隅角部

はスラブの梁軸方向の拘束は梁の中央部に近いほど大きいことを示しており、この傾向は解析でも表現されている。

続いて梁からの距離がスラブの梁方向の拘束に及ぼす影響を確認した。短辺方向の収縮ひずみは(a)で 380μ 、(c)で 320μ と (a)の収縮ひずみが大きく、梁から離れるほど梁方向の拘束は小さくなる傾向がみられた。

長辺方向の梁の中央部に近い(a)と(b)では、短辺方向の梁に近い(c)よりも、収縮ひずみの長辺方向と短辺方向の差が大きい。収縮ひずみの差がスラブ中央部に生じる短辺方向のひび割れの要因になっていると考えられる。

5. まとめ

高架橋スラブを模擬した4辺固定の梁付スラブ試験体と自由収縮試験体について気温と相対湿度の変化を考慮した収縮ひずみ解析を行い、以下の通り解析で4辺固定スラブの変形特性や収縮特性を捉えられることを確認した。

- (1) ひび割れを考慮しない設定での自由収縮試験体の収縮ひずみ解析の結果、材齢100日時点で測定結果をおおむね精度よく表現した。
- (2) 梁付スラブ解析の変形図から、高架橋スラブに発生することがあるひび割れに発展すると考えられるような、梁の曲げ変形やスラブ隅角部の斜め変形という変形特性を表現した。
- (3) 梁付スラブのスラブ中央部で短辺方向の収縮ひずみが卓越する傾向を解析で表現した。
- (4) 梁付スラブの梁近傍では梁の拘束により梁軸方向の収縮ひずみが小さくなる傾向を解析で表現した。

参考文献

- 1) 今本啓一, 各種コンクリート壁体の収縮挙動, 日本建築学会構造系論文集, No.568, pp.15, 2003
- 2) 中西正敏, 鉄筋コンクリート構造物の乾燥収縮ひずみの実測例, 日本建築学会論文報告集, 号外, 1967
- 3) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート造構造物の収縮ひび割れ制御指針・施工指針(案): 同解説, 2004
- 4) 土木学会, 土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕, 2007
- 5) 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, 1994
- 6) 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, 1938
- 7) 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, コンクリート年次論文報告集, Vol.32, No.1, 2010
- 8) 鈴木雄大・小林薫, 梁付4辺固定スラブのコンクリート乾燥収縮ひずみと拘束度に関する基礎研究, コンクリート年次論文報告集, Vol.33, No.2, 2011
- 9) 森戸重光・半井健一郎, 収縮応力および収縮ひび割れがRCはりのせん断耐力に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.673, 2010