

論文 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

鈴木 雄大*1・小林 薫*2

要旨：RC ラーメン高架橋のスラブにおける乾燥収縮ひび割れの抑制には、自由状態・拘束状態でのコンクリートの収縮ひずみの把握に加え、拘束状態が変化する実構造物の乾燥収縮を定量的に把握することが重要である。高架橋スラブの拘束状態を再現する梁付スラブ模型試験体を製作し、収縮ひずみを測定した。収縮ひずみは鉄筋による内部拘束よりも、スラブと梁の接合部での外部拘束が大きく影響することを把握した。梁付スラブ試験体の拘束度を検討した結果、0.43～0.70 程度であった。

キーワード：乾燥収縮，体積表面積比，拘束度，内部拘束，外部拘束，スラブ

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。

そこで本論文では、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乾燥収縮を測定し、模型試験体でのコンクリートの収縮ひずみと拘束の関係を把握するとともに、コンクリート拘束度の検討を行った。また、拘束度について著者らが実施している高架橋スラブの測定結果⁷⁾との比較を行った。

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

高架橋の縮小試験体として、高架橋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。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。

*1 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 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課長 博(工)(正会員)

2.1 形状寸法

脱型後の梁付スラブ試験体写真、配筋図面、配筋状況の写真を図-2～4に示す。図-3には梁付スラブ試験体に設置した鉄筋ひずみゲージ等によるひずみ測定位置を表記した。

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1200mm×2400mm（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）として鉄筋被りを確保するために140mmとした。梁は断面寸法を幅300mm×高さ400mm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。

梁付スラブ試験体の鉄筋比は、鉄道用高架橋の実例を



図-2 梁付スラブ試験体

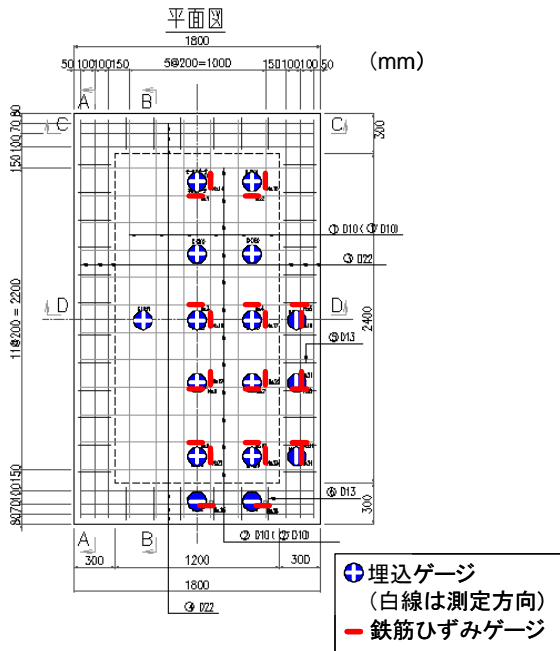


図-3 梁付スラブ配筋図および測定位置図

参考に、スラブ鉄筋比0.5%（D10鉄筋を200mm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50mm下げている。

梁付スラブ試験体の製作と同時に、100×100×400mmの無筋自由収縮試験体と、140×140×400mmの無筋自由収縮試験体を各2体製作した（図-5）。140×140×400mm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140mm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-4 梁付スラブ配筋状況

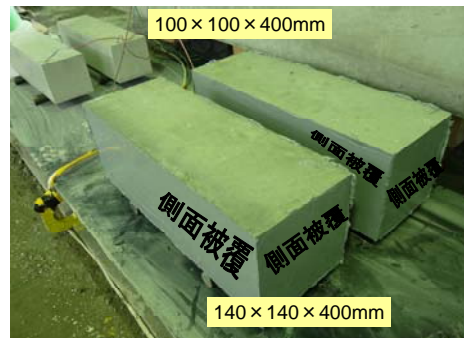


図-5 自由収縮試験体

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⁸⁾の配合例を参考にして単位水量315kgとし、あらかじめ収縮量が大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4日で脱型して室内環境においた。

スラブが上下面から乾燥するように、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 ^{a)}	W/B (%)	単位量 (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	外気温	Con温度	フロー	Air				
B配合	8.0℃	15.0℃	54.5cm	3.5%				

2.3 測定内容

梁付スラブ試験体の図-3 の図中に示した位置に、図-6 のようにコンクリートひずみ測定用の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の厚さ中心に設置した。無筋自由収縮試験体には、試験体中心に試験体長辺方向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。

コンクリートの乾燥収縮は試験体の置かれた環境の影響を受けるため、試験体設置場所の気温および湿度も測定した。

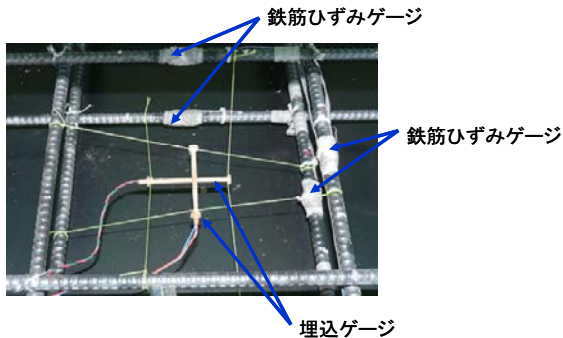


図-6 センサー配置状況

3. 測定結果

3.1 自由収縮試験体

無筋自由収縮試験体のコンクリート収縮ひずみおよび各種試験体温度を図-7 に示す。収縮ひずみは温度ひずみが除去されている。

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な状態を維持する。

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。

体積表面積比(V/S)を梁付スラブ試験体と合わせた 140 × 140 × 400mm 試験体 (V/S=70mm) の収縮ひずみの進行は、100 × 100 × 400mm 試験体 (V/S=22mm) よりも緩

やかであり、V/S の影響が表れている。

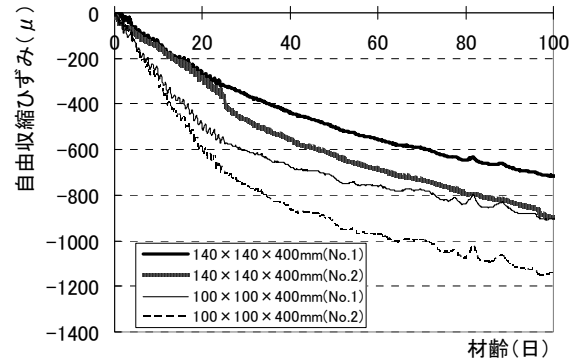


図-7 自由収縮試験体ひずみ

3.2 試験室環境および試験体温度

コンクリートの乾燥収縮の進行は環境条件の影響を大きく受けるため、試験体が設置された環境を把握することが重要である。このことから試験体を設置した試験室の気温および相対湿度を測定した(図-8)。

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。

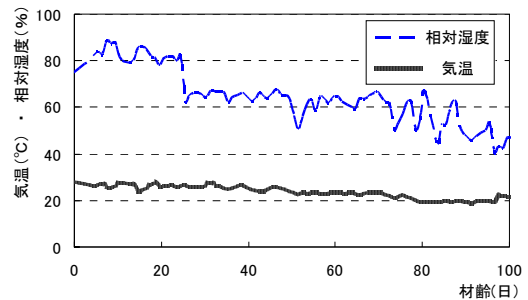


図-8 試験室環境の温度, 相対湿度

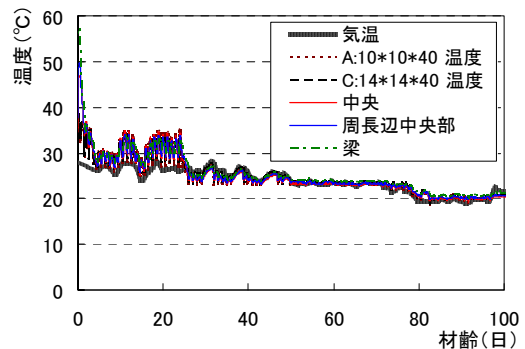


図-9 試験体温度および気温

3.3 コンクリートスラブ

(1) 鉄筋ひずみ

鉄筋ひずみの測定箇所のうち，図-10 に示す代表的な測定点4箇所 (a)~(d) の試験体長辺および短辺方向の鉄筋ひずみの測定結果を図-11 に示す。

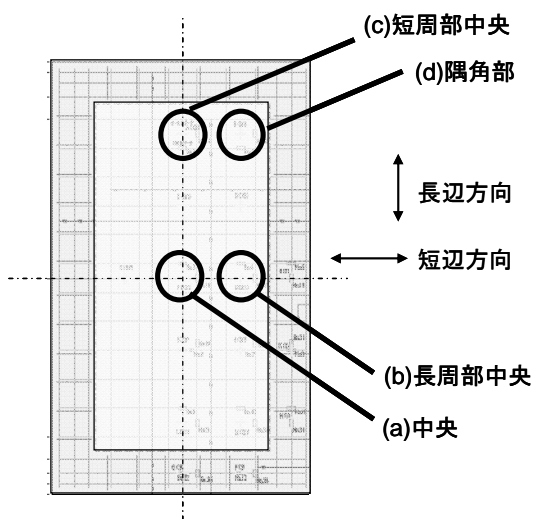


図-10 代表的な測定箇所

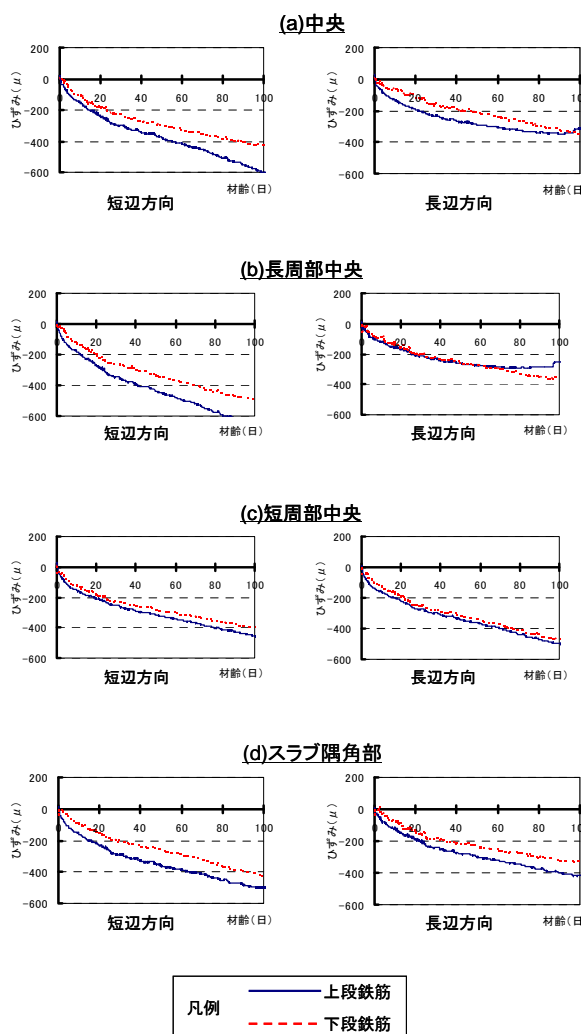


図-11 梁スラブ試験体鉄筋ひずみ
コンクリートと鉄筋には付着があるため，コンクリー

トの収縮ひずみが大きいところでは鉄筋ひずみも大きくなる。スラブのダブル配筋の上下段の鉄筋はともに圧縮ひずみとなっている。測定箇所の多くでは，上段鉄筋のほうが下段鉄筋よりも圧縮ひずみが大きい。これは試験室内の気流によるスラブ上面からの乾燥が卓越して乾燥収縮が促進された影響だと推定される。

短辺方向の鉄筋ひずみは，上下鉄筋ともに圧縮ひずみが増加し，材齢の経過とともに上下鉄筋の圧縮ひずみの差は大きくなる傾向がみられる。一方，(a)中央および(b)長周部中央の長辺方向鉄筋ひずみは，はじめ上段鉄筋の圧縮ひずみが大きい，材齢が経過するにつれて徐々に圧縮ひずみが減少した。この間，下段鉄筋は圧縮ひずみが増加し続けている。

鉄筋ひずみの測定結果をもとにした，梁付スラブの鉄筋ひずみ分布模式図を図-12 に示す。図では鉄筋ひずみの平均値を矢羽の数で表現している。実測点は赤線で示し，その他の点は対称関係で補完した。

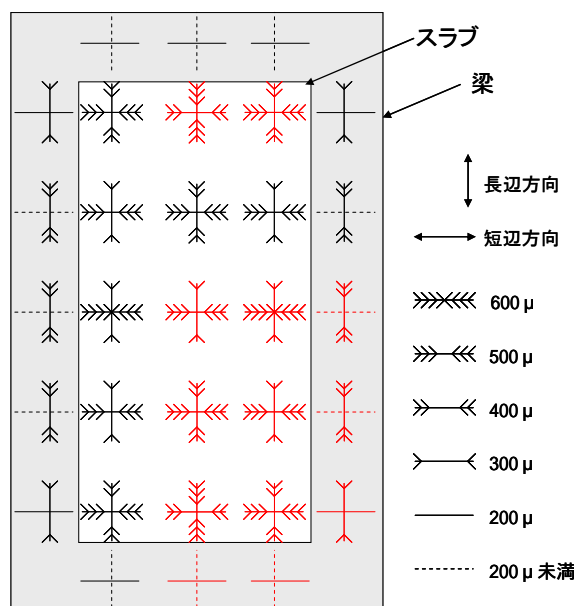


図-12 鉄筋圧縮ひずみ平面分布模式図

スラブ鉄筋ひずみの分布は，短辺方向は圧縮ひずみで500 μ ~ 600 μ となり，長辺方向のひずみ300 μ ~ 500 μ よりも大きく，両者のひずみの差は(b)長周部中央最で最も大きく，その差は300 μ 程度となった。また，スラブ中央に比べてスラブ周辺部の梁直角方向の鉄筋ひずみが大きい値を示した。

梁内部の梁軸直角方向の鉄筋ひずみは，スラブ鉄筋の梁内定着部付近のひずみを表し，スラブ鉄筋よりも小さい200 μ 以下の値を示した。

梁鉄筋ひずみは，梁隅角部に比べて梁中心部の軸方向ひずみ大きい傾向を示した。

試験体のスラブ鉄筋は梁内部で折り曲げ定着し，スラブと梁を同時打設し，現時点でスラブと梁の間にひび割

れは見られない。スラブ鉄筋ひずみに比べ、梁内部のスラブ鉄筋端部でのひずみは小さい値を示している。これらより、スラブおよび梁において鉄筋の付着すべりによる内部拘束の不均衡はないものとする。またスラブは上下面ともに解放されておりスラブ面が一様に乾燥することから、スラブコンクリートに拘束がないと仮定した場合の自由収縮ひずみはスラブ各部分で同一であると考えられる。これに対して、試験体の測定箇所によって収縮ひずみに差がみられ、梁による外部拘束の影響が大きいと考えられる。

鉄筋の圧縮ひずみは、コンクリートが拘束を受けた結果生じているひずみであり、圧縮ひずみが小さい箇所はコンクリートの拘束が大きく、その逆もしかりである。

鉄筋ひずみは、長辺側の梁付近における短辺方向の鉄筋ひずみが最も大きな圧縮ひずみを示しており、この部分の短辺方向の拘束が弱いことを示している。同箇所の長辺方向の鉄筋ひずみは小さく、長辺方向の拘束が大きいことを示している。

スラブコンクリートは梁近傍で梁軸方向の拘束を受け、その拘束は梁中央部に近いほど大きい。長短辺それぞれの梁近傍のスラブひずみを比較した結果、梁が長いほど拘束が大きく、梁から離れるほど梁軸方向の拘束は小さくなっている。

梁がスラブに及ぼす外部拘束の大小関係を模式図で示すと図-13のようになると考える。

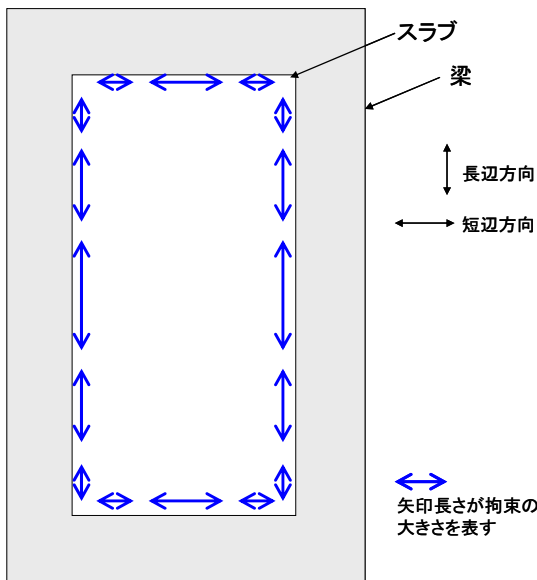


図-13 外部拘束分布模式図

(2) コンクリートひずみ

コンクリートの収縮ひずみの測定結果を、模式図にしたものを図-14に示す。実測値を赤線で示し、測定していない箇所は対称関係で補完した。

埋込ゲージの測定結果にはばらつきがあり、対称位置

同士の測定値にも違いがみられた。また梁・スラブともに鉄筋ひずみに比べて100μ程度小さい値を示した。

埋込ゲージの測定結果が、鉄筋ひずみゲージの測定結果に比べて小さな圧縮ひずみを示したが、これに対する原因は特定できていない。

埋込ゲージがゲージ両端の2点間の局所的ひずみを測定しているのに対し、鉄筋ひずみは連続したフシでコンクリートと付着をしているため、局所的なばらつきの影響を受けにくく、平均的な収縮ひずみを示しているのではないかと推定している。

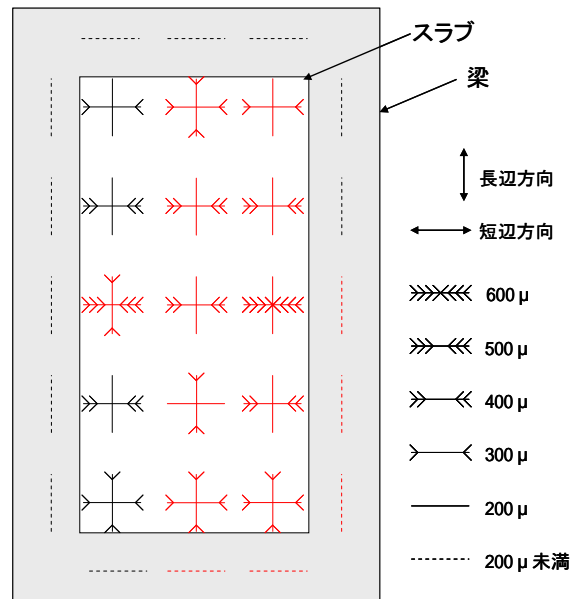


図-14 コンクリート収縮ひずみ分布模式図

3.4 拘束度の算出と実構造物との比較

梁付スラブ試験体の収縮ひずみと自由収縮試験体の収縮ひずみから、拘束度を算出する。拘束度は文献によって定義が不明確な場合があるが、拘束度が大きいほど実構造物でのコンクリートの収縮ひずみが小さくなり、ひび割れが生じやすくなるという直観と一致するように、次に示す定義⁹⁾とした。

$$\text{拘束度} = \frac{\text{自由収縮ひずみ} - \text{実測収縮ひずみ}}{\text{自由収縮ひずみ}}$$

また、縮小試験体である梁付スラブ試験体と実構造物の拘束度を比較するため、著者らが高架橋の収縮ひずみを測定した結果⁷⁾を基に拘束度を算出した。実構造物でのコンクリートひずみの測定にはコンクリートひずみ計を使用しており、測定値は材齢180日時点とした。

拘束度の算出には、一般に自由収縮ひずみにJIS試験体100×100×400mmでの収縮ひずみを用いることが多い。しかし実構造物コンクリートと同様の条件(V/S, 相対湿度, コンクリート温度)でのコンクリート収縮ひずみを用いることで、実構造物における拘束度が求まると考える。そこで拘束度を算出するための自由収縮ひず

みとして、100×100×400mm 試験体および、V/S を合わせた試験体（以下、V/S 一致試験体という）を本体試験体と同環境に置き、それぞれの収縮ひずみから算出した。（表-2）

表-2 測定結果から算出した拘束度

(a) 梁付スラブ試験体

試験体名称	収縮ひずみ (平均値)	構造物 測定箇所	収縮ひずみ (平均値)	拘束度 自由(小)	拘束度 自由(大)
自由収縮試験体(小) 100×100×400mm	1021 μ	センター 長辺方向	330 μ	0.67	0.59
		センター 短辺方向	513 μ	0.50	0.36
		長梁中央 長辺方向	305 μ	0.70	0.62
自由収縮試験体(大) (試験体と同じV/S) 140×140×400mm	806 μ	長梁中央 短辺方向	577 μ	0.43	0.28
		隅角部 長辺方向	374 μ	0.63	0.54
		隅角部 短辺方向	464 μ	0.55	0.42

(b) 高架橋スラブ⁷⁾

試験体名称	収縮ひずみ (平均値)	構造物 測定箇所	収縮ひずみ	拘束度 自由(小)	拘束度 自由(大)
自由収縮試験体(小) 100×100×400mm	500 μ	測定点1 スラブ隅角部	212 μ	0.58	0.37
		測定点2 スラブ張出先端部 (スパン中央)	252 μ	0.50	0.25
自由収縮試験体(大) (スラブと同じV/S) 280×400×1000mm	335 μ	測定点3 スラブ張出先端部 (柱近傍)	201 μ	0.60	0.40

梁付スラブ試験体の拘束度は 100×100×400mm 試験体の自由収縮ひずみから算出すると 0.43~0.70 となった。V/S 一致試験体 (V/S=70 mm) の収縮ひずみから算出すると 0.28~0.59 となった。

高架橋スラブでは同様に、100×100×400mm 試験体から算出すると 0.5~0.6、V/S 一致試験体 (V/S=140 mm) から算出すると 0.25~0.40 となった。

建築構造物の収縮ひび割れ指針が想定している標準的な建築物が、スパン長 6~8m、鉄筋比 0.4%程度、拘束度が 0.3~0.5 程度で、誘発目地が 1 スパンあたり 2~3 本設置されている構造物である¹⁰⁾。鉄筋比の影響は拘束度に反映されていると考え、ここでは拘束度のみを著者らの測定結果と比較すると、高架橋スラブの拘束度 (0.5~0.6)の方が一般的な建築物¹⁰⁾よりも拘束度が高い結果となった (100×100×400mm 試験体を計算に用いた場合)。

梁付スラブ試験体の拘束度は、100×100×400mm 試験体から求めた値が、V/S 一致試験体 (V/S=70 mm) から求めた値より約 1.0 小さい。高架橋スラブの両拘束度の差は比較的大きく、V/S 一致試験体 (V/S=140mm) から求めた値が、100×100×400mm 試験体から求めた値より 0.2~0.25 小さい。この結果より、V/S が大きい実構造物の拘束度の算出時に、V/S が小さい 100×100×400mm 試

験体の自由収縮ひずみを用いると、実構造物の拘束度を過大に算定する可能性が示唆される。

4. まとめ

高架橋スラブを模擬した梁付スラブ試験体と自由収縮試験体を製作し、それぞれのコンクリートの乾燥収縮ひずみを測定した結果、以下の知見を得た。

- (1) スラブに生じる外部拘束は、梁とスラブの接合部付近の拘束の影響が大きく、4 辺固定スラブでは長辺方向スパン中央部において、スラブが梁と接する箇所での拘束が最も大きい。
- (2) 梁付スラブ試験体の拘束度は 0.43~0.70 (100×100×400mm 試験体から算出)、および 0.28~0.59 (V/S 一致試験体から算出) となり、実構造物で測定された拘束度より大きめの値となる。

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、pp18、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) 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
- 9) 中西正敏・奈良禎徳、コンクリートの乾燥収縮応力に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、P.95、1979
- 10) 日本コンクリート工学協会、コンクリートの収縮問題検討委員会報告書、2010