

# 論文 乾燥収縮が卓越する部材におけるひび割れ発生条件に関する研究

小林 聖<sup>\*1</sup>・佐野 忍<sup>\*2</sup>・坂田 昇<sup>\*3</sup>・園田 佳巨<sup>\*4</sup>

**要旨：**高欄や地覆コンクリートのように、部材厚が薄く長手方向に長い部材は乾燥収縮が卓越し、数多くのひび割れが発生することが問題となる。ここでは、実構造物におけるひび割れの発生状況を調査し、ひび割れが発生した要因や発生時期など詳細な情報を入手し、ひび割れ発生の傾向と原因について検討した。また、実際の部材と同規模の模擬試験体を作製し、収縮量やコンクリート躯体の温度変化を測定し、その実測値を用いて3次元FEM解析を行った。その結果、地覆コンクリートの1回の打設長さを10m程度とし、目地の位置や構造を考慮することでひび割れを抑制できることを明らかにした。

**キーワード：**地覆コンクリート、乾燥収縮、ひび割れ、解析、目地間隔

## 1. はじめに

高欄や地覆コンクリートのように、部材厚が薄く長手方向に長い部材は乾燥収縮が卓越し、数多くのひび割れが発生する。ひび割れから劣化因子が侵入することで鉄筋腐食が助長されるなどの問題が発生し、早期に構造物の耐久性が低下する可能性が高くなる。また、高欄や地覆コンクリートに発生したひび割れが床版まで進行し、構造物全体の耐久性を低下させる可能性もあり、ひび割れの抑制が求められている。

ひび割れ抑制対策としては、誘発目地を設置し、ひび割れを集中させる設計が考えられる。しかし、地覆コンクリートのような寸法の小さい部材に発生するひび割れ間隔は1m程度であり、ひび割れ間隔に合わせて誘発目地を設置することは実用的ではない。

ここでは、まず実際の部材においてひび割れの発生時期やひび割れ幅、ひび割れの経時的変化を調査し、実現

象の把握を行った。次に、ひび割れに与える収縮の影響を把握するために、実際の部材を模擬した実規模試験体を作製し、コンクリートの収縮量を測定した。さらに、その実測値を用いた3次元FEM解析を行った。

これらの結果に基づいて、高欄や地覆コンクリートに発生するひび割れの要因を把握し、ひび割れの抑制方法について検討した。

## 2. 実構造物のひび割れ調査

実構造物の実現象の把握のために、ここでは、高架橋の地覆コンクリートを対象部材としてひび割れ調査を行った。

### 2.1 実構造物概要

実構造物の全体図を図-1に示す。本構造物はラーメン高架橋であり、柱と梁、スラブが一体となっている一般部と、スラブが橋台に架設される構造の調整桁の2種

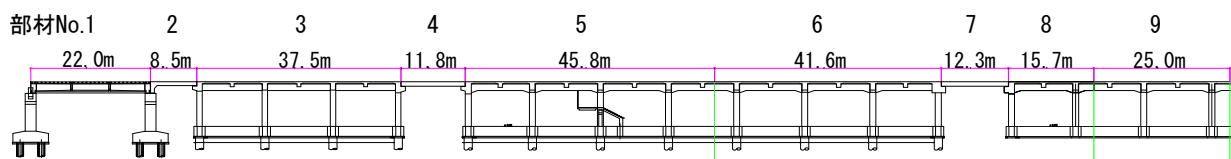


図-1 構造物の概要

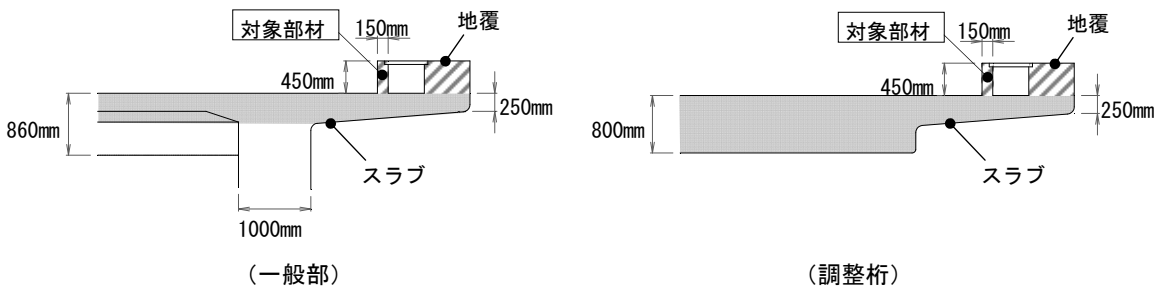


図-2 断面図

\*1 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 修士(工学) (正会員)

\*2 鹿島建設(株)九州支店 土木営業部 (正会員)

\*3 鹿島建設(株) 土木管理本部 土木技術部長 博士(工学) (正会員)

\*4 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 教授 博士(工学) (正会員)

表-1 施工およびひび割れ調査材齢

部材 No.	構造	スラブ		地覆		ひび割れ本数 (本)				下端まで貫通した 1m 当りの ひび割れ本数 (本)	1m 当りの 全ひび割れ 本数 (本)	
		スパン (m)	打設日	打設日	調査 材齢 (日)	全数	ひび割れ幅 の分類		ひび割れパターン の分類			
							0.1mm 以上	0.1mm 未満	上端 のみ			下端まで 貫通
1	一般部	22.0	2/16	3/1	111	19	3	16	15	4	0.1	0.9
2	調整桁	8.5	11/1	11/7	226	1	0	1	1	0	0.0	0.1
3	一般部	37.5	8/23	9/2	292	34	22	12	22	12	0.6	0.9
4	調整桁	11.8	10/27	11/7	226	1	0	1	1	0	0.0	0.1
5	一般部	45.8	11/16	11/29	569	93	52	41	49	44	1.1	2.0
6	一般部	41.6	9/1	9/13	646	72	30	42	31	41	0.7	1.7
7	調整桁	12.3	4/17	4/21	60	0	0	0	0	0	0.0	0.0
8	一般部	15.7	2/17	2/23	118	10	0	10	10	0	0.0	0.6
9	一般部	25.0	6/12	6/25	44	16	1	15	16	0	0.0	0.6

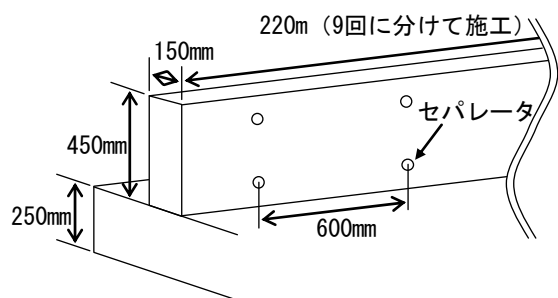


図-3 地覆コンクリートの寸法

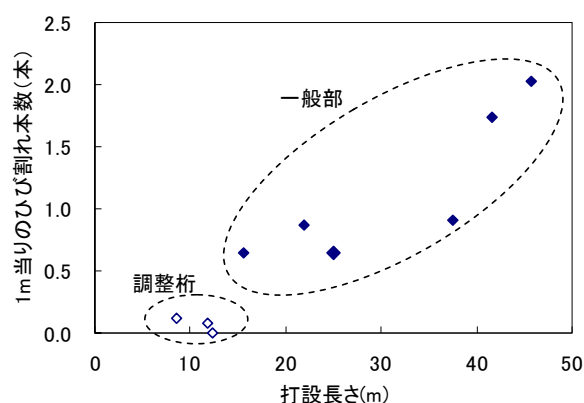


図-4 打設長さと1m当りのひび割れ本数の関係

類に分かれている。各部材の断面図を図-2に示す。一般部は、スラブ厚さは250mmであり、スラブの下には梁が構築され、柱が約12mのピッチで設置されている。調整桁は、地覆コンクリートの下の断面形状は一般部と同じスラブ厚さ250mmであるが、断面中央部はスラブ厚さが800mmである。地覆コンクリートの寸法を図-3に示す。図に示すように、地覆コンクリートは幅150mm×高さ450mmの断面であり、総延長は220m(調整桁を含む)である。地覆コンクリートは9回に分けて施工されており、ひび割れ調査時における地覆コンクリートの材齢は44日から646日の間であった。スラブの打込みから地覆コンクリートの打込みまでの打継ぎ間隔は4日から14日であった。スラブおよび地覆コンクリートの施工時期は2月から11月のほぼ通年の期間であった。

## 2.2 調査結果

ひび割れ調査の結果を表-1に示す。表に示すように、一般部においては、1m当り0.6~2.0本の割合でひび割れが発生していることが確認された。一方、調整桁ではひび割れはほとんど発生していなかった。ひび割れ幅は、全ての部材において0.2mm未満であった。そのため表-1には0.1mm以上と0.1mm未満のひび割れ本数を示した。

一般部および調整桁すべてのひび割れについて、1回の打設長さと1m当りのひび割れ本数の関係を図-4に示す。図に示すように、一般部は1回の打設長さの増加に伴い、1m当りのひび割れ本数が増加することが確認

された。一方、調整桁ではひび割れがほとんど発生しなかった。この理由として、調整桁は柱と梁が無い場合、一般部よりも拘束が小さいと考えられること、および1回の打設長さが10m程度と短いことの両者の影響でひび割れがほとんど発生しなかったことが考えられる。

次に、地覆コンクリートのひび割れには2種類のパターンが存在することが確認された。各ひび割れパターンを図-5および図-6に示す。パターン1は、部材上端のセパレータの直上の隅角部やセパレータとセパレータの中間部分の隅角部にひび割れが発生しており、パターン2は、上端から下端まで貫通したひび割れが発生している。一般部について、地覆コンクリートの材齢と1m当りのひび割れ本数の関係を図-7に示す。図に示すように、地覆コンクリートの材齢経過に伴い、1m当りのひび割れ本数が増加していることが確認された。また、パターン2のように下端まで貫通している1m当りのひび割れ本数を合わせて図に示す。図に示すように、材齢経過に伴い上端のみおよび下端まで貫通したひび割れが増加するとともに、下端まで貫通したひび割れの比率が高くなる傾向が確認された。これは、ひび割れの主要因として温度と乾燥収縮が考えられるが、温度ひび割れの場合は初期に下端まで貫通したひび割れが発生する。

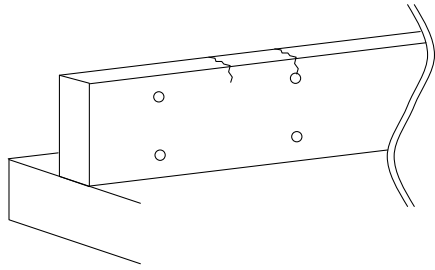


図-5 ひび割れパターン 1

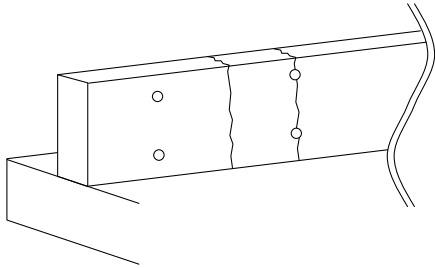


図-6 ひび割れパターン 2

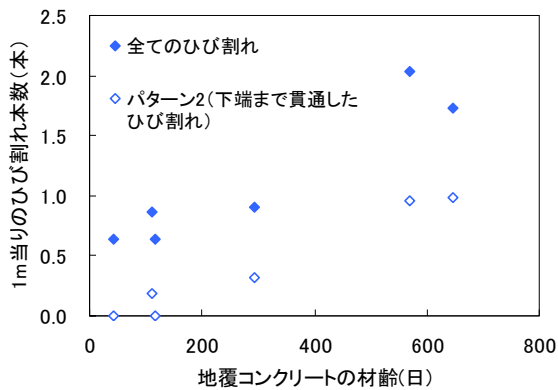


図-7 一般部における材齢と1m当りのひび割れ本数の関係

地覆コンクリートのように部材厚が薄い場合は温度変化が小さいため、乾燥収縮が卓越し、経時的な乾燥収縮の増大により、上端のひび割れが下端まで貫通したものと考えられる。

### 3. ひび割れ発生についての考察

前述のように、1回の打設長さと1m当りのひび割れ本数の間には高い相関関係があり、1回の打設長さが10m程度で1m当りのひび割れ本数がほぼ0になることが確認された。しかし、その事例は調整桁についてのものであり、一般部のように柱および梁による拘束が無いことによる影響が考えられた。そこで、まず一般部および調整桁について、1回の打設長さを同じ条件にして、温度および乾燥収縮解析を行い、拘束条件の違いについて検討した。解析にあたっては、後述の模擬試験体による収縮試験を行い、この試験結果を反映させた。

表-2 使用材料

材料	記号	摘要
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント、 密度：3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S1	海砂、密度：2.55g/cm <sup>3</sup> 、粗粒率：2.40
	S2	砕砂、密度：2.87g/cm <sup>3</sup> 、粗粒率：3.00
粗骨材	G1	砕石 2015、密度：2.92g/cm <sup>3</sup> 、 実積率：59%
	G2	砕石 1505、密度：2.92g/cm <sup>3</sup> 、 実積率：59%
AE 減水剤	AD	リグニンスルホン酸塩ポリカルボン酸系化合物
合成短繊維	F	ポリプロピレン

表-3 コンクリートの配合

スランブ (cm)	W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							F
		W	C	S1	S2	G1	G2	AD	
12.0	48.2	169	351	480	360	632	422	4.21	0.05vol%

表-4 試験項目

項目	方法
収缩量	コンタクトゲージ
コンクリート温度	熱電対

### 3.1 模擬試験体における収縮試験

実構造物における地覆コンクリートの収縮特性を把握することを目的とし、実規模試験体を作製し、実環境に暴露しながら収縮量を測定した。

#### (1) 試験概要

コンクリートの使用材料を表-2に、配合を表-3に示す。コンクリート試験体の断面は実構造物と同一の幅150mm×高さ450mmとし、長さは10mとした。試験体のケースは2種類とし、ケース1は実構造物と同一の配筋を施したもの、ケース2は鉄筋なしとし、各々1体ずつ作製した。なお、底版や端部の拘束による影響を排除するために、試験体の底版および端部に縁切り用として実績のあるシート（ポリ塩化ビニル製、厚さ0.2mm）を敷いて縁切りした。

打込みは6月に実施し、試験体上面は湿布養生を行い、打込みから7日後に脱型した。

脱型後のコンクリート試験体の暴露状況を写真-1に示す。乾燥による収縮特性のみを抽出するために、水分の供給がないように雨がかりのない場所にコンクリート試験体を暴露した。

#### (2) 試験項目および方法

試験項目を表-4に示す。表に示すように、コンクリート試験体の収縮量を測定した。収缩量は、図-8に示すように、試験体の端部にH型鋼を設置し、試験体の端

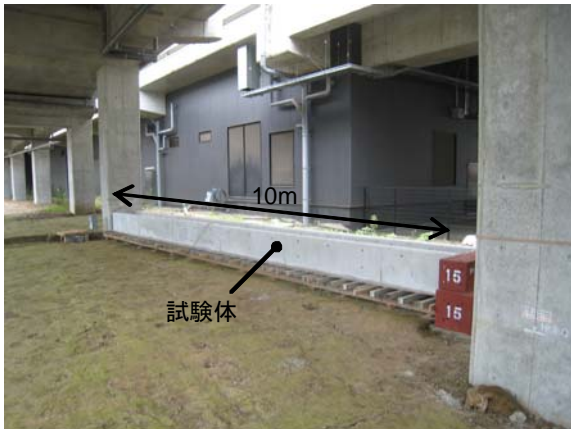


写真-1 暴露状況

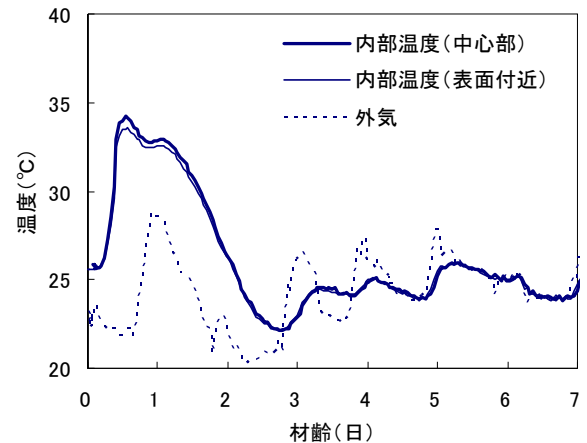


図-10 温度測定結果

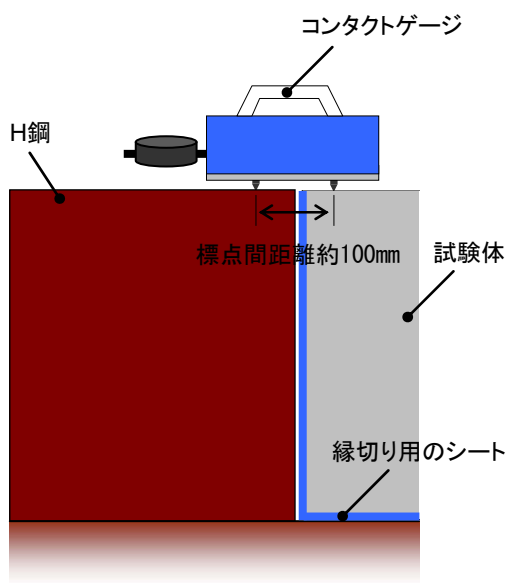


図-8 収縮量測定方法

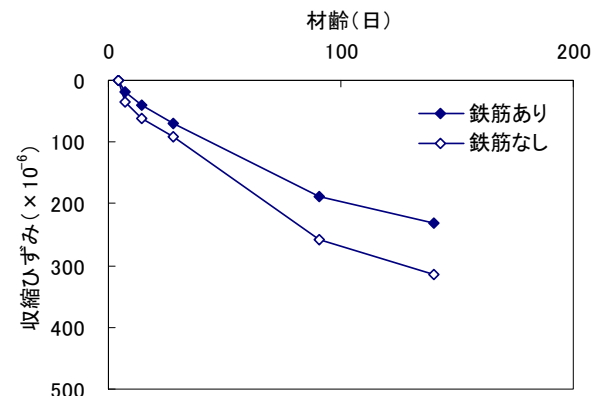
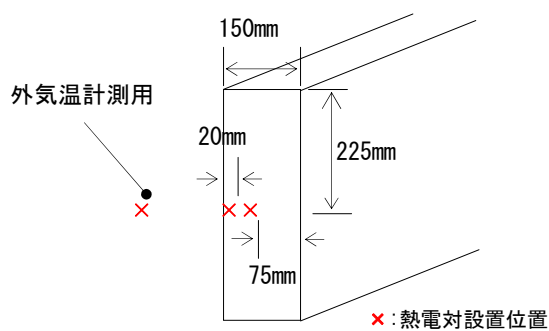


図-11 材齢と収縮ひずみの関係



(スパン中心断面)

図-9 熱電対設置位置

部上面とH型鋼上面に貼付した標点間の距離をコンタクトゲージにより定期的に測定した。なお、H鋼は温度により若干長さ変化が生じると考えられたため、外気温の変化が無いように、H鋼の長さ変化を無視することとした。また、試験体中心部に熱電対を設置し、コンクリート試験体の内部温度を測定した。熱電対はスパン中央断

面に図-9のようにスパン中心断面の中央部と表面部および外気中に設置した。

### (3) 試験結果

コンクリート試験体の内部温度変化を図-10に示す。図に示すように、内部温度は打込みから0.5日後に最高温度34°C程度までしか上昇しておらず、温度変化がひび割れに及ぼす影響は小さいものと考えられる。

収縮ひずみの測定結果を図-11に示す。収縮ひずみは収縮量の測定結果より算出した。図に示すように、材齢に伴い収縮量が増加し、材齢140日において、鉄筋ありの試験体は約 $220 \times 10^{-6}$ 、鉄筋なしの試験体は約 $300 \times 10^{-6}$ の収縮ひずみであり、鉄筋の拘束により収縮ひずみが $80 \times 10^{-6}$ 程度低減されている結果となった。

### 3.2 解析的検討

上記の実験にて得られた収縮ひずみの実測値を考慮した3次元FEM解析により、実際の部材に発生するひび割れを再現することを検討した。

#### (1) 解析モデルおよび解析条件

解析モデルを図-12に示す。図に示すように、モデルは一般部と調整桁の2種類とした。また、1回の打設長

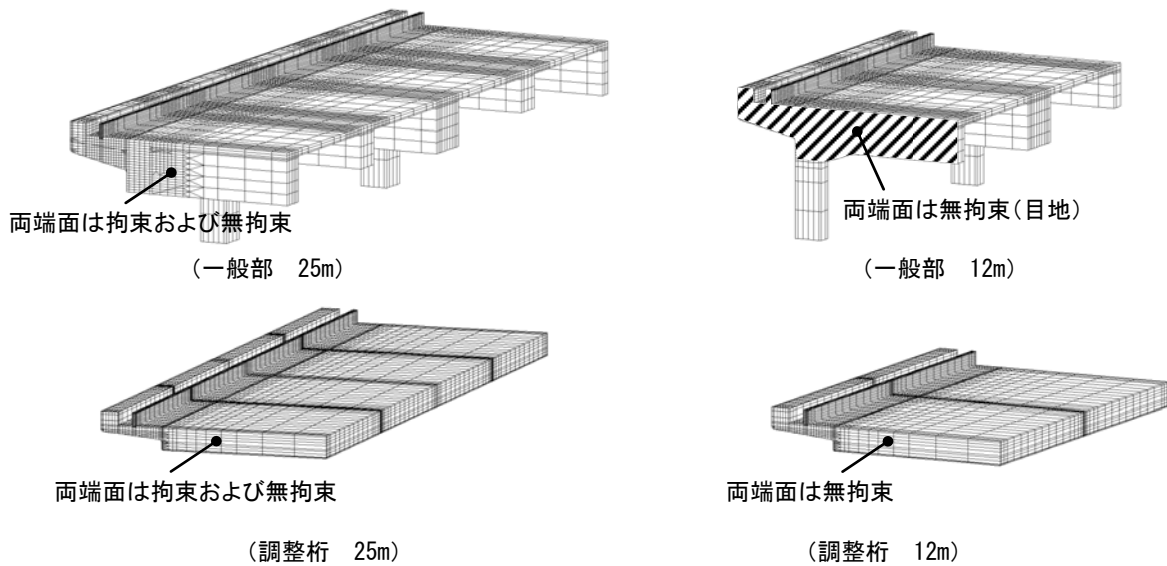


図-12 解析モデル

表-5 解析条件

項目	単位	設定値
打込み温度	(°C)	外気温+5°C
比熱	(kJ/kg°C)	1.15
熱伝導率	(W/m°C)	2.7
密度	(kg/m <sup>3</sup> )	2414
圧縮強度(材齢 28 日)	(N/mm <sup>2</sup> )	33.2 <sup>※1</sup>
引張強度(材齢 28 日)	(N/mm <sup>2</sup> )	2.55 <sup>※1</sup>
ヤング係数(材齢 28 日)	(kN/mm <sup>2</sup> )	30 <sup>※1</sup>
ポアソン比	—	0.2
線膨張係数	(1/°C)	10×10 <sup>-6</sup>
乾燥収縮	(×10 <sup>-6</sup> )	実測値 <sup>※2</sup>

※1：圧縮強度はコアによる実測値とし、引張強度、ヤング係数および圧縮強度の履歴はマスコンクリートのひび割れ制御指針 2008 に準じた

※2：図-11 の鉄筋ありの実測値を使用

さとして、それぞれ 12m および 25m の 2 ケースについて解析を行った。拘束条件は、1 回の打設長さ 25m については両端を拘束した場合と、無拘束とした場合とし、拘束の有無がひび割れ発生状況に及ぼす影響を検討した。また、1 回の打設長さ 12m については両端を無拘束とした場合のみとし、打設長さがひび割れ発生状況に及ぼす影響を検討した。なお、一般部の 12m のモデルについては、柱による拘束が大きいものと考えられたため、柱部分に目地を設け、かつ目地間を鉄筋でつながない状況を想定した。目地設置位置を図-12 にハッチングで示した。

解析条件を表-5 に示す。配合については模擬試験体の配合を用いた。ここでは温度応力と収縮応力を考慮することとし、コンクリートの断熱温度上昇はマスコンクリートのひび割れ制御指針 2008<sup>2)</sup> (以下、マスコン指針

と称する) に示されている式(3)を適用した。

$$Q(t)=Q_{\infty}[1-\exp\{-r(t-t_{0,Q})\}] \quad (3)$$

ここで、 $Q$ ：材齢  $t$  日までの断熱温度上昇量(°C)、 $Q_{\infty}$ ：終局断熱温度上昇量(°C)、 $r$ ：断熱温度上昇速度に関する係数、 $t$ ：材齢(日)、 $t_{0,Q}$ ：発熱開始材齢(日)を表す。なお、圧縮強度はコアによる実測値とし、引張強度、ヤング係数および圧縮強度の履歴はマスコン指針に準じた。

収縮応力として乾燥収縮を考慮し、模擬試験体(鉄筋あり)により測定した実測値を部材断面に一樣に与えた。

施工時期は、表-1 に示す部材 No.9 を参考とし、スラブの施工を 6 月初旬、地覆コンクリートの施工を 14 日後とした。なお、境界条件は、スラブにおいては、上面は材齢 7 日まで湿潤養生、側面および底面は材齢 28 日まで合板型枠を存置とした。地覆コンクリートにおいては、材齢 4 日まで合板型枠を存置とし、脱型後は材齢 7 日まで湿潤養生とした。

## (2) 解析結果

各要素における材齢 48 日までの最小ひび割れ指数の分布図を図-13 に示す。なお、着目点は全てのケースにおいて、地覆コンクリートの中心の上端とし、温度変化に伴う若干のひび割れ指数低下部分においては、ここでは考察の対象外とした。図に示すように、1 回の打設長さが 25m で両端拘束のケースでは、地覆コンクリートにおける一般部の最小ひび割れ数が 0.78 (主応力 4.47N/mm<sup>2</sup>)、調整桁のひび割れ指数が 0.83 (主応力 4.18N/mm<sup>2</sup>) であり、調整桁のひび割れ指数の方がわずかに大きくなり、これは、調整桁の方が一般部よりも拘束度が小さいためであるが、ともにひび割れが発生する可能性が非常に高い結果となった。1 回の打設長さが 25m 程度では一般部、調整桁にかかわらずひび割れが発生するものと推察される。

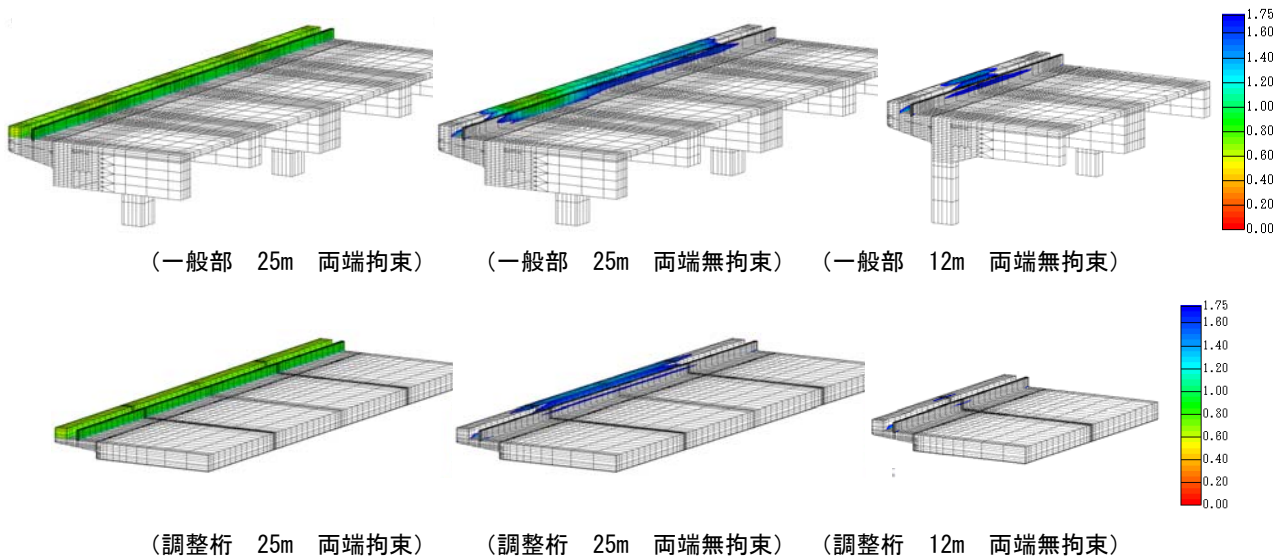


図-13 ひび割れ指数の分布図

打設長さが25mで両端無拘束のケースでは、一般部のひび割れ指数は0.82（主応力 $4.38\text{N/mm}^2$ ）、調整桁は1.28（主応力 $2.80\text{N/mm}^2$ ）となり、いずれも両端拘束のケースよりもひび割れ指数は大きくなる結果となった。しかし、一般部においては、地覆コンクリートの柱の直上位置でひび割れ指数が低い値となっており、両端の拘束だけでなく、柱の拘束がひび割れ発生に影響を与えていると考えられる。調整桁においては、ひび割れ指数が大きく向上することが確認された。これは、両端の拘束が無く、さらに柱や梁などの拘束体が無いことが影響していると考えられる。

一方、1回の打設長さが12mのケースでは、一般部のひび割れ指数は1.80（主応力 $0.85\text{N/mm}^2$ ）、調整桁は1.95（主応力 $0.74\text{N/mm}^2$ ）となり、ひび割れの発生する可能性が低い結果となった。一般部については、解析条件を与える際に想定したとおり、柱の拘束や隣接する部材の拘束を受けないような条件とすることにより、ひび割れ指数を大幅に大きくできたものとする。

以上の結果より、12mのモデルのように、1回の打設長さを10m程度として目地の位置や構造を考慮すれば、一般部、調整桁ともに収縮に伴うひび割れの発生を低減できる可能性が示唆された。

今後は、一般部において、柱上に目地を設けて、かつ目地間を鉄筋でつながない条件で施工を行い、ひび割れ抑制効果を確認する予定である。

## 5. まとめ

今回のラーメン高架橋におけるひび割れ調査により得られた知見を以下に示す。

一般部においては、地覆コンクリートの材齢増加に伴い、または、地覆コンクリートの1回の打設長さが長い

ほど、1m当りのひび割れ本数が増えることが確認された。一方、調整桁においては、ひび割れはほとんど発生していなかった。

以上の調査結果に基づき模擬試験および解析的検討を行い、得られた知見を以下に示す。

- (1) 模擬試験体における収縮試験により、鉄筋ありの試験体による収縮ひずみは、鉄筋の拘束により収縮ひずみが $80 \times 10^{-6}$ 程度低減されることが確認された。
- (2) 解析的検討により、ひび割れ発生の要因については、部材の打設長さと拘束条件が影響を及ぼしていることが示唆された。
- (3) 地覆コンクリートの1回の打設長さを10m程度とし、目地の位置や構造を考慮することでひび割れを低減できると考えられる。

**謝辞：**本研究の遂行に際しまして、九州大学濱田秀則教授、佐川康貴准教授、玉井宏樹助教にご助言を頂きました。また、実験に際しまして、鹿島建設(株)九州支店の坂元春美氏、九鉄工業(株)の武田賢一氏、丸昭建設(株)の山口宏氏に多大なご協力を頂きました。ここに紙面を借りて感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】，2007
- 2) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針，2008