

乾燥収縮ひずみを制御したコンクリートのひび割れ抑制効果

VERIFICATION OF THE CRACKING REDUCTION EFFECT OF THE CONCRETE CONTROLLED DRYING SHRINKAGE STRAIN

右田周平*, 梅本宗宏*

Shuhei MIGITA and Munehiro UMEMOTO

The authors developed a technique to control the dry shrinkage strain of concrete within the range of 0×10^{-6} to 800×10^{-6} . Regarding concrete with controlled shrinkage strain, cracks do not occur in the ordinary uniaxial restrained crack test, and cracking suppression effect can not be evaluated. Therefore, the test method was changed. A round steel for constraining concrete was installed in the central part of the specimen and it was found that it could be evaluated by using a round steel diameter of 32 mm. Furthermore, the effect of suppressing the cracking of controlled drying shrinkage concrete was confirmed by a real-size test specimen simulating the wall member and the floor member. Cracking occurred in ordinary concrete, but cracks were not confirmed after 2 years in concrete with zero contraction.

Keywords : Concrete, Drying Shrinkage, Shrinkage-Reducing Admixture, Expansive Additive, Full Scale Experiment, Restraint Stress

コンクリート, 乾燥収縮, 収縮低減剤, 膨張材, 実大実験, 拘束応力

1. はじめに

コンクリート構造物におけるひび割れは、建築物の美観を損なうだけではなく、その耐久性の低下に大きな影響を及ぼす。ひび割れの大きな原因はコンクリートの収縮ひずみである。そこで筆者らは、コンクリートの材齢 26 週での収縮ひずみを $0 \sim 800 \times 10^{-6}$ に制御する技術を開発した¹⁾。本研究では、収縮ひずみを制御したコンクリートについて、「JIS A 1151 拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法」の仕様を変更した試験、ならびに、壁部材および床部材を模擬した実大実験により、そのひび割れ低減効果の検討結果を報告する。

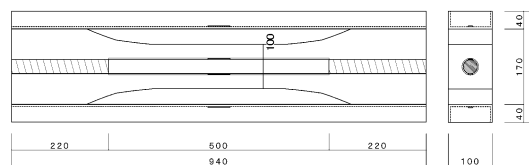


図-1 低収縮用拘束ひび割れ試験体

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
目標乾燥収縮ひずみ	-800×10^{-6} , -400×10^{-6} , 0×10^{-6}
丸鋼直径	丸鋼無し, 13mm, 16mm, 19mm, 32mm

2. 一軸拘束ひび割れ試験の検討

2.1 実験概要

(1) 試験体の概要および実験の要因と水準

JIS A 1151 に用いる試験体は、乾燥収縮ひずみが小さいコンクリートにおいてひび割れが発生しない可能性があるため、収縮を低減したコンクリートに適用可能な一軸拘束ひび割れ試験（以下、低収縮用拘束ひび割れ試験と略記する）の仕様を検討した。低収縮用拘束ひび割れ試験体の概要を図-1 に、実験の要因と水準を表-1 に、要因と水準の組合せを表-2 に示す。JCI 試案²⁾を参考に試験体中心部に、コンクリートを拘束するための丸鋼を設置した。丸鋼の仕様を検討するため、コンクリートの目標乾燥収縮ひずみを 3 水準、丸鋼直径を 5 水準とした。

表-2 実験の要因と水準

No.	試験体名	目標乾燥収縮ひずみ	丸鋼直径 (mm)
1	800-0	-800×10^{-6}	—
2	800-13	-800×10^{-6}	13mm
3	800-19	-800×10^{-6}	19mm
4	400-0	-400×10^{-6}	—
5	400-13	-400×10^{-6}	13mm
6	400-16	-400×10^{-6}	16mm
7	400-19	-400×10^{-6}	19mm
8	400-32	-400×10^{-6}	32mm
9	0-0	0×10^{-6}	—
10	0-19	0×10^{-6}	19mm

* 戸田建設(株)技術開発センター 修士 (工学)

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

(2) 使用材料, 調合, 試験綱目, 試験方法

使用材料を表-3 に, 調合を表-4 に, 試験項目および試験方法を表-5 に, フレッシュコンクリートおよび圧縮強度の試験結果を表-6 に, に示す. 低収縮用拘束ひび割れ試験では, 材齢 72 日まで拘束型枠および丸鋼のひずみを測定し, それ以降は目視においてひび割れ発生の確認を行った.

2.2 実験結果および考察

(1) 試験体の概要および実験の要因と水準

表-6 に示すように, すべての調合において, スランプ, 空気量は目標値を満足した. 圧縮強度は, 調合 No. I と比較した場合, 収縮低減剤を使用した調合 No. II は同程度, 収縮低減剤と膨張材を併用した調合 No. III は 13% 程度強度が低下した. 静弾性係数は, 調合 No. I, II, III が同程度の値となった.

(2) 拘束膨張ひずみを考慮した乾燥収縮ひずみ

膨張材を使用した場合の乾燥収縮ひずみについて, JIS A 1129-3 による乾燥期間 182 日の乾燥収縮ひずみに材齢 7 日の拘束膨張ひずみを足した値を用いて評価することが一般的である. 今回, 膨張材を使用した場合, この値を, 拘束膨張ひずみを考慮した乾燥収縮ひずみ (以下, 拘束膨張・乾燥収縮ひずみと略記する) として示すこととした. 拘束膨張・乾燥収縮ひずみを図-2 に示す. なお, 本研究では, ひずみの膨張側を正, 収縮側を負で示す. 調合 I は -847×10^{-6} , 調合 II は -434×10^{-6} , 調合 III は -49×10^{-6} となり, いずれも目標と同程度となった.

(3) 低収縮用拘束ひび割れ試験

低収縮用拘束ひび割れ試験による拘束型枠のひずみを図-3 に, ひび割れ発生材齢を表-7 に示す. 目標乾燥収縮ひずみを -800×10^{-6} と設定した No.1~3 はいずれもひび割れが発生し, 丸鋼直径が大きいほどひび割れ発生材齢が短くなった. また, 目標乾燥収縮ひずみを -400×10^{-6} とし, 丸鋼直径 32mm とした No.8 についても, 1 体において材齢 172 日にひび割れが発生した. 以上より, 丸鋼直径を大きくして拘束度を高くした場合, -400×10^{-6} 程度のコンクリートにおいて, 拘束ひび割れ試験によって, ひび割れの発生しやすさを評価できると考えられる. なお, 丸鋼の直径が大きいほど拘束度が高くなるが, コンクリート断面や型枠と鉄筋の空きの確保を考慮すると, 丸鋼径を 32mm 程度までとすることが望ましいと考えられる.

2.3 まとめ

収縮を低減したコンクリートに適用可能な一軸拘束ひび割れ試験の仕様を検討した結果, 乾燥収縮ひ

ずみが -400×10^{-6} 程度より大きいコンクリートにおいては, 試験体中心部に径 32mm の丸鋼を設置した試験体を用いることで評価できる可能性があることが明らかとなった. そこで, 以降の検討では丸鋼径 32mm で評価することとした.

3. 低収縮用拘束ひび割れ試験

3.1 実験概要

(1) 試験体の概要

本実験で用いた低収縮用拘束ひび割れ試験の試験体を図-4 に示す. 先の結果より, 拘束度を高める鋼

表-3 使用材料

材料	記号	種類・物性等
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^3
細骨材	S1	山砂, 表乾密度: 2.63g/cm^3
	S2	硬質砂岩砕砂, 表乾密度: 2.63g/cm^3
粗骨材	G1	硬質砂岩砕石, 表乾密度: 2.63g/cm^3
	G2	石灰石砕石, 表乾密度: 2.63g/cm^3
収縮低減剤	Sr	ポリエーテル誘導体
膨張材	Ex	エトリンガイト・石灰複合系
混和材	Ad	高性能 AE 減水剤

表-5 試験項目および試験方法

試験項目		試験方法・測定方法・備考	
フレッシュ	スランプ	JIS A 1101	$18 \pm 2.5\text{cm}$
	空気量	JIS A 1128	$4.5 \pm 1.5\%$
	温度	JIS A 1156	
硬化後	圧縮強度	JIS A 1108	20°C 封かん
	静弾性係数	JIS A 1149	28 日
	拘束膨張ひずみ	JCI-S-009-2012	
	乾燥収縮ひずみ	JIS A 1129-3	
	拘束ひび割れ試験	図-1 に示す型枠を用い, 試験体の作成は JIS A 1151 による	

表-6 コンクリート試験結果

調合 No.	フレッシュコンクリート			硬化コンクリート	
	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 ($^\circ\text{C}$)	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (kN/mm^2)
I	19.0	5.1	21.8	37.3	31.7
II	16.5	4.0	21.4	37.5	33.2
III	19.5	4.6	22.9	32.4	31.9

表-4 調合

調合 No.	目標乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)	調合									添加量 (kg/m^3)	添加率 ($\text{B}\%$)
		W/B* (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)								
				W	C	S1	S2	G1	G2	Ex		
I	-800	50	47.4	170	340	582	249	965	—	—	—	0.60
II	-400	50	47.4	170	340	582	249	—	961	—	10	0.50
III	0	50	47.4	170	340	582	249	—	961	20	14	0.50

*: 結合剤 (B) はセメント (C) と膨張材 (Ex) とする

材としては径 32 mm の丸鋼を採用し、よりひび割れ発生日数を短縮するために、既往の文献 3) を参考に、試験体中央部側面に面木を用いて高さ 10mm の切欠きを設けた。

(2) 使用材料および割合

本実験で用いた使用材料は、表-3 の使用材料に、

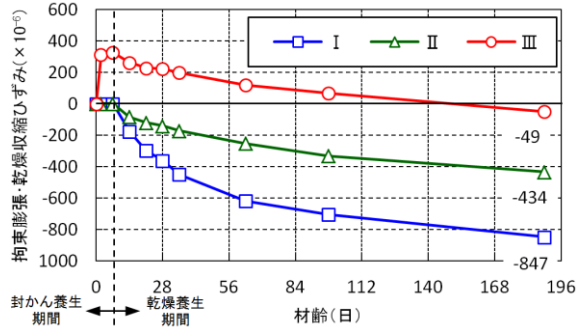


図-2 拘束膨張・乾燥収縮ひずみ

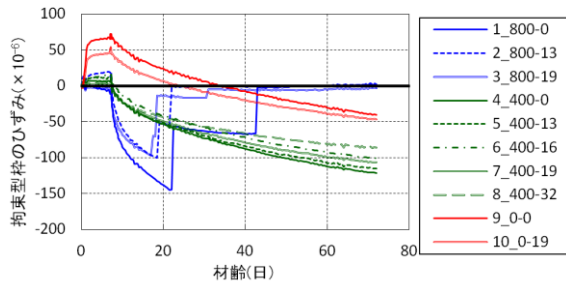


図-3 拘束型枠のひずみ

表-7 ひび割れ発生日数*

No.	試験体名	ひび割れ発生日数 (日)		
		試験体 1	試験体 2	試験体 3
1	800-0	43	22	22
2	800-13	18	22	×
3	800-19	17	18	18
8	400-32	—	—	172

*: 表中にない試験体および「—」はひび割れ未発生
「×」は測定不能となりデータ未取得

表-8 割合

割合 No.	目標乾燥収縮ひずみ (x10 ⁻⁶)	割合									添加量 (kg/m ³)	添加率 (Bx%)		
		W/B* (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)										
				W	C		S1	S2	G1	G2			Ex	Sr
1	-800	50	47.4	170	340	—	582	249	965	—	—	—	0.70	
2	-600				340	—	575	247	—	961	—	—	—	0.70
3					340	—	582	249	965	—	10	10	0.70	
4					340	—	575	247	—	961	—	—	0.50	
5	-400				320	—	575	247	—	961	20	—	0.675	
6					315	—	575	247	—	961	25	—	0.675	
7					320	—	575	247	—	961	20	6	0.50	
8	-250				320	—	575	247	—	961	20	14	0.50	
9					—	320	579	248	—	961	20	10	0.50	

*: 結合剤 (B) はセメント (C) と膨張材 (Ex) とする

中庸熱ポルトランドセメント (密度 3.21g/cm³) を追加した他、細骨材 S1 の表乾密度が 2.56g/cm³ になったものを使用した。コンクリートの割合を表-8 に示す。割合条件としては先の実験と同様に、水セメント比は 50%、単位水量は 170kg/m³ で統一し、スランプと空気量の目標値は、それぞれ 18±2.5cm と 4.5±1.5% とした。目標乾燥収縮ひずみの設定については、-800, -600, -400, -250, -50×10⁻⁶ の 5 水準とし、その乾燥収縮ひずみを制御する割合として、-800×10⁻⁶ 以外は使用材料の異なる 2 種類の割合を用いた。試験項目および試験方法を表-9 に示す。なお、フレッシュコンクリートについては表-5 にある試験と同様とした。拘束膨張試験については、JIS A 6202 付属書 2 の B 法を用いた。

3.2 実験結果

(1) フレッシュ性状と圧縮強度

フレッシュコンクリートおよび圧縮強度の試験結果を表-10 に示す。フレッシュコンクリートの試験結果は目標値を満足した。圧縮強度については、収縮低減剤や膨張材を使用した場合、膨張材置換率の小さい No.3 を除く普通ポルトランドセメント使用のコンクリートで 4~13% の強度低下が認められた。静弾性係数については、収縮低減剤や膨張材使用の影響

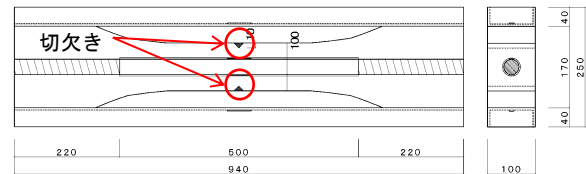


図-4 低収縮用拘束ひび割れ試験体 (切欠き付き)

表-9 試験項目および試験方法

試験項目		試験方法
硬化コンクリート	低収縮用拘束ひび割れ試験	JIS A 1151 について、低収縮コンクリート用に開発させた試験
	拘束膨張ひずみ	JIS A 60102 付属書 2 B 法

は特に認められなかった。

(2) 拘束膨張・乾燥収縮ひずみ

拘束膨張・乾燥収縮ひずみの結果を図-5 に示す。拘束膨張・乾燥収縮ひずみについては、目標乾燥収縮ひずみ-800, -600, -400×10⁻⁶ と設定した調合で、目標値を外れる調合もあったが、-250, -50×10⁻⁶ では、ほぼ目標値を満足した。

(3) 低収縮用拘束ひび割れ試験結果

低収縮用拘束ひび割れ試験の結果を図-6, 7 に、ひび割れ発生確認材齢を表-11 に示す。ひび割れ発生確認材齢は、型枠の拘束ひずみが上昇した時点とした。打込み時から材齢 91 日までの測定結果より、目標乾燥収縮ひずみを-800, -600, -400×10⁻⁶ と設定した試験体 No.1~5 と、-250×10⁻⁶ と設定したうち No.6 にひび割れが発生した。また、目標ひずみが大きいほど早く発生した。その他の試験体 No.7~9 については、ひび割れは発生していない。使用材料別に見る

表-10 コンクリート試験結果

調合 No.	フレッシュコンクリート			硬化コンクリート	
	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
1	18.5	4.2	23.5	39.7	33.3
2	19.0	3.4	23.8	42.9	35.0
3	19.5	4.0	23.1	42.2	32.2
4	19.0	5.4	23.5	37.3	32.5
5	20.5	4.5	24.0	38.2	36.2
6	20.5	4.4	23.5	37.5	32.8
7	19.5	5.6	23.8	36.1	32.9
8	17.0	4.1	24.3	34.6	31.6
9	17.5	5.1	23.7	30.0	29.7

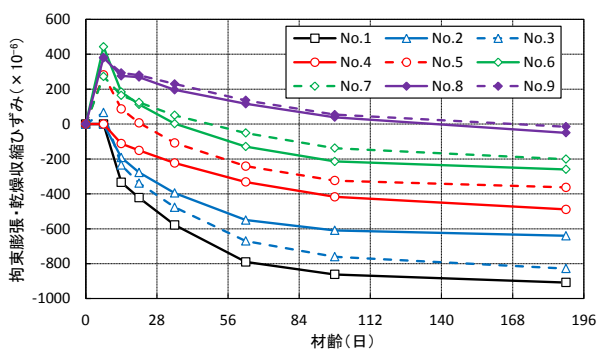


図-5 拘束膨張・乾燥収縮ひずみ

表-11 ひび割れ発生材齢*

調合 No.	ひび割れ発生材齢 (日)		
	試験体 1	試験体 2	試験体 3
1	11	11	10
2	18	18	19
3	17	16	15
4	47	48	39
5	40	44	43
6	61	43	88

* : 表中にない試験体はひび割れ未発生

と、収縮低減剤を使用した調合は単位時間当たりの収縮ひずみの進行が遅くなる傾向にあった。No.6 の実際の拘束膨張・乾燥収縮ひずみは、-260×10⁻⁶ であったことから、この程度収縮を低減したコンクリートであれば本試験方法で測定可能と考えられる。切欠きの効果について、図-3 にある No.8 と、図-6 にある No.4 を比較した結果を図-8 に示す。どちらも目標乾燥収縮ひずみが-400×10⁻⁶ で、使用材料、調合および鉄筋径も同じである。両者を比較すると、ひずみの推移はほぼ同じであるが、切欠きの無い No.8 よりも切欠きの有る No.4 の方が早期にひび割れが発生しており、切欠きをつけることで、早期判定に対する効果が確認された。

3.3 まとめ

新たに提案した切欠きのある一軸拘束試験の仕様では、目標乾燥収縮ひずみが-400×10⁻⁶ の場合、切欠き無しより早期にひび割れが発生し、早期判定が可能であった。また、-250×10⁻⁶ (実際の拘束膨張・乾燥収縮ひずみ-260×10⁻⁶) でもその可能性が確認された。この結果より、本試験方法を用いれば、収縮を低減したコンクリートの拘束ひび割れ抵抗性について

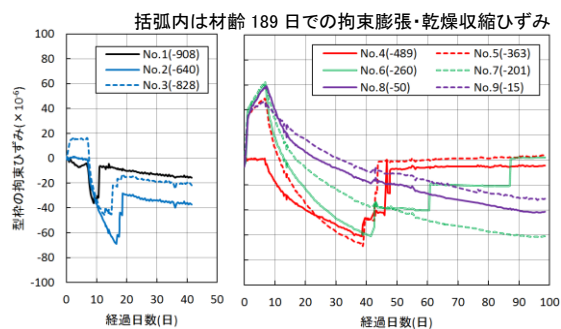


図-6 型枠の拘束ひずみ

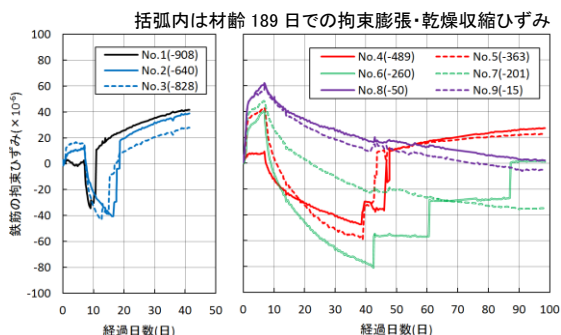


図-7 鉄筋の拘束ひずみ

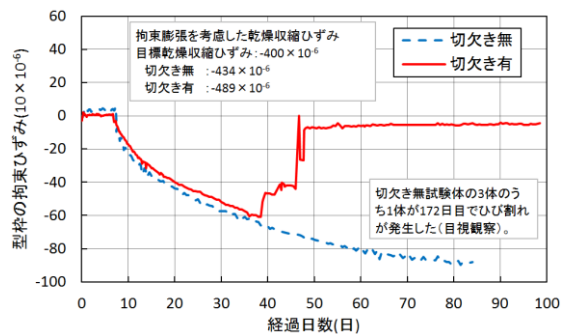


図-8 切欠き有無の比較

て、調合比較の早期判定が可能となると考えられる。

4. 実大試験体によるひび割れ抑制効果の確認

4.1 実大実験概要

(1) 検討対象部材とコンクリート性能

各検討対象部材と実施した試験体の種類を表-12 に、ひび割れ抑制効果の検討対象とした部材種類と使用したコンクリートの概要の一覧を表-13 に示す。検討対象部材は壁およびデッキスラブとし、それぞれ求められる要求性能に応じて調合を選定した。両部材とも実大試験体、無拘束試験体を作製し拘束膨張・収縮ひずみ、ひび割れ状況等を確認した。また、壁については上部の梁から受ける拘束力算定のため上部梁試験体、デッキスラブについては鉄筋から受ける拘束力を分離して算定するため有筋試験体を作製した。全ての試験体においてコンクリートのひずみは低弾性型埋込みひずみ計、鉄筋および鉄骨は箔ゲージ、温度は熱電対を用いて計測した。

(2) 実大壁試験体の概要

図-9 に実大壁試験体の概要およびひずみの計測位置を示す。ひび割れ計測区間の壁は厚さ 180mm、幅 4800mm、高さ 2000mm とし、両端に柱、上下には梁を模した部材を配した。一般的な壁部材を想定し壁の鉄筋比は配力筋、主筋方向共に 0.70%、定着は直線定着、定着長さは鉄筋径の 25 倍とした。コンクリートの打込み順序について、約 3 ヶ月前に壁の下端まで先行して作製し、壁、柱および上部梁を同時に同調合にて打込み作製した。なお、下部梁のコンクリートは Fc42 とし、実大試験体と同一養生を施した試験体の静弾性係数は壁部打設時点で平均 30.7 kN/mm² であり、壁コンクリートの配力筋

方向の拘束度³⁾は試験体下半分、下面に生じる摩擦を考慮しないで計算した場合、0.56 程度である。実大試験体は屋外の平滑な土間コンクリート上に設置し、脱型は打込みから 7 日後に行い、降雨の影響を避けるため試験体上に屋根を設置した。

(3) 小型（壁）試験体の概要

図-10 に小型試験体（無拘束試験体・上部梁試験体）の概要を示す。無拘束、上部梁試験体共に脱型は実大試験体と同時とし、脱型後は断熱材に接する面にアルミテープを貼付け、二重のテフロンシート上に設置し下面の摩擦力を低減させた。上部梁試験体の配筋は実大壁試験体の上部梁と同じである。

(4) 実大デッキスラブ試験体の概要

図-11 に実大デッキスラブ試験体の概要および計測位置を示す。スラブは厚さ 150mm、幅 2000mm、長さ 6000mm とし、スラブ配力筋方向の両端に幅

表-12 検討対象部材と実施試験体

対象部材	実大試験体	小型試験体		
		無拘束試験体	有筋試験体	上部梁試験体
壁	○	○	—	○
デッキスラブ	○	○	○	—

表-13 検討対象部材と使用コンクリート概要

調合名	記号	目標乾燥収縮ひずみ ^{*1} (×10 ⁻⁶)	対象部材		使用材料			
			壁	デッキスラブ	セメント種類 ^{*2}	粗骨材種類	膨張材 (kg/m ³)	収縮低減剤 (kg/m ³)
基準	N	—	○	○	N	硬質砂岩	0	0
高耐久	H	-400	○	○	N	石灰石	20	0
低収縮 1	L1	-250	—	○	N	石灰石	20	6
低収縮 2	L2	-250	—	○	N	石灰石	25	0
収縮ゼロ	Z	0~-100	○	—	M	石灰石	20	10

*1 : 26 週の乾燥収縮ひずみと 7 日の拘束膨張ひずみを足し合わせた値

*2 : N 普通ポルトランドセメント、M 中庸熱ポルトランドセメント

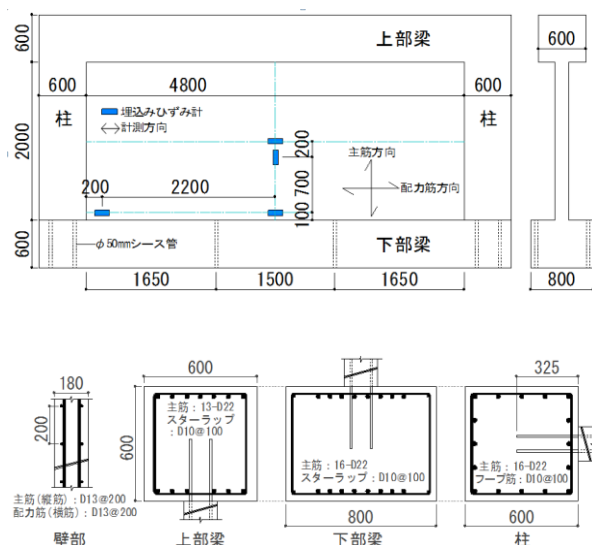


図-9 実大試験体の概要および計測位置

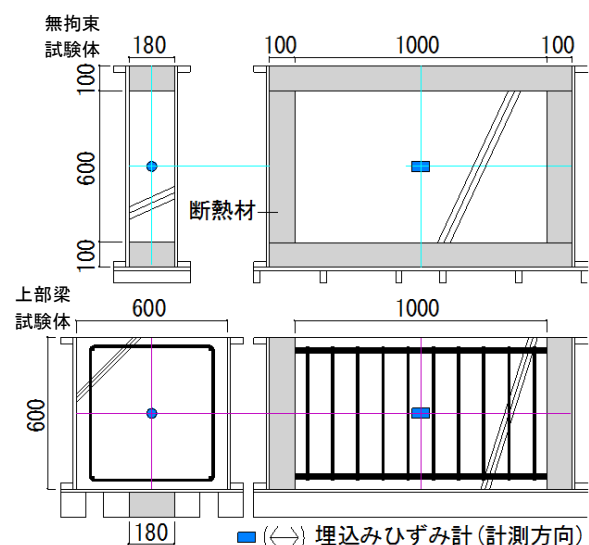


図-10 小型試験体（壁）概要

200mm のスタッドボルトを溶接した鉄骨梁を配した。また、ひび割れを早期に発生させるため、鉄骨内部に拘束用コンクリートを打込み剛性を高め、スラブに生じる拘束力を増加させた。試験体は一軸拘束状態でのひび割れ発生状況を確認することを目的とし、配筋方向にのみ拘束力が導入されるよう拘束コンクリートの主筋方向の中央にはスタイロフォームを設置した。デッキプレートはフラットタイプ、φ5mm の丸鋼がラチス状に溶接固定されたものを使用した。拘束用コンクリートの静弾性係数はスラブコンクリート打込み時点で 36.8 kN/mm² であり、スラブコンクリート配筋方向の拘束度はおおよそ 0.75 程度である。設置場所は屋外であり、幅 100mm の H 型鋼上に二重のテフロンシートを挿み 4 点で支持した。打設後材齢 7 日までビニールシートで表面を覆い、その上からブルーシートを掛けて散水養生を行った。7 日目にスラブ側面型枠を脱型し乾燥を開始した。側面にはアルミテープを貼り、壁試験体と同様に、降雨の影響を避けるため屋根を設置した。計測位置は

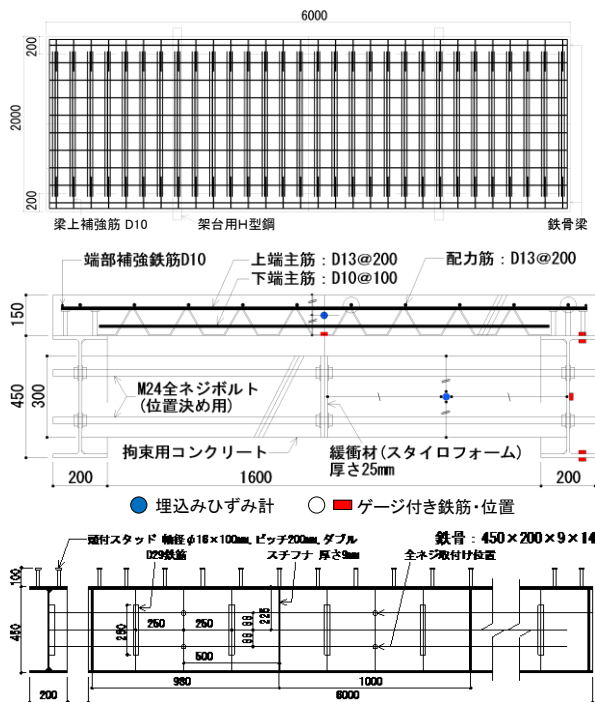


図-11 実大デッキスラブ試験体の概要

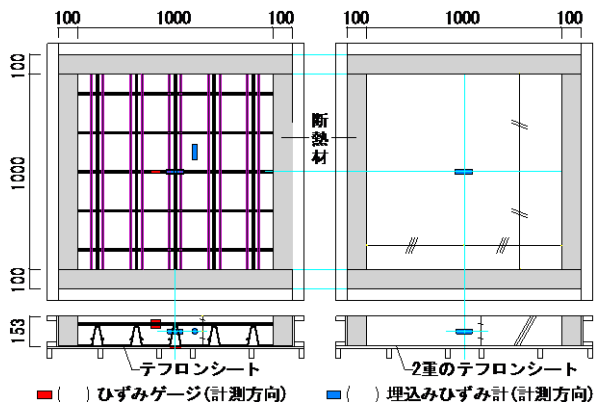


図-12 小型試験体（デッキスラブ）の概要

基本的に試験体配筋方向・中央位置断面とし、N および H のみ同断面主筋方向の上端主筋およびデッキプレートのひずみを計測した。

(5) 小型試験体（デッキスラブ）の概要

図-12 に小型試験体（無拘束試験・有筋試験体）の概要を示す。試験体は1000mm角の正方形平板とし、厚さおよび有筋試験体の配筋は実大試験体と同一とした。脱型は行わず実大試験体と同一養生を施した。

4.2 実大実験に使用したコンクリート

(1) 使用材料および調合

使用材料を表-14 に、コンクリートの調合を表-15 に示す。各コンクリートの使用材料の組合せと調合は、目標とする乾燥収縮ひずみとなるように、先の実験（「2. 一軸拘束ひび割れ試験の検討」や「3.低収縮用拘束ひび割れ試験」）の結果を参考した。水結合材比 (W/B) は、N (基準コンクリート) および H (高耐久コンクリート) は 50.0% とし、L1・L2 (低収縮コンクリート 1・2) および Z (収縮ゼロコンクリート) は、膨張材と収縮低減剤の使用により強度が低下すると考えられたため、強度の確保を目的として 45.0% とした。収縮低減材料として、エトリンガイト・石灰複合系の低添加型の膨張材および収縮低減剤を使用した。膨張材はセメントの内割とし、H・L1・Z では 20kg/m³、L2 では 25kg/m³ 添加した。また、収縮低減剤は、L1 では 6kg/m³、Z では 10kg/m³ 添加し、水の一部として計量した。

(2) 試験項目

試験項目を表-16 に示す。フレッシュコンクリートの各試験は荷卸し時に実施し、それぞれの目標値は表中に示した値とした。硬化コンクリートの低収縮コンクリート用拘束ひび割れ試験は、先の実験の通

表-14 使用材料

種類	記号	種類・物性等
セメント	N	普通ポルトランドセメント, 密度 3.15g/cm ³
	M	中庸熱ポルトランドセメント, 密度 3.21g/cm ³
水	W	地下水
細骨材	S1	行方産陸砂, 表乾密度 2.58g/cm ³ , 粗粒率 2.50
	S2	佐野産石灰石砕砂, 表乾密度 2.69g/cm ³ , 粗粒率 3.10
粗骨材	G1	つくば産砕石 2005, 表乾密度 2.69g/cm ³ , 実積率 60.0%
	G2	佐野産石灰石砕石 2005, 表乾密度 2.70g/cm ³ , 実積率 60.0%
膨張材	Ex	エトリンガイト・石灰複合系, 低添加型
収縮低減剤	Sr	ポリエーテル誘導体
混和剤	Ad	高性能 AE 減水剤, ポリカルボン酸系

表-15 調合

調合記号	W/B (%) ^{*)1}	セメント種類	単位量 (kg/m ³)							添加量 (kg/m ³) Sr ^{*)2}
			W	C	S1	S2	G1	G2	Ex	
N	50.0	N	167	334	581	261	968	—	—	—
H	50.0	N	167	314	581	258	—	972	20	—
L1	45.0	N	170	358	539	242	—	986	20	6
L2	45.0	N	170	353	542	242	—	986	25	—
Z	45.0	M	162	340	565	253	—	991	20	10

り、JIS A 1151 を参考にした試験方法で、試験体内部にφ32mm の丸鋼を設置した。

(3) フレッシュコンクリートの試験結果

荷卸し時におけるフレッシュコンクリートの試験結果を表-17 に示す。スランプ、空気量、コンクリート温度および塩化物量は、いずれの調合においても目標値の範囲であり、フレッシュ性状は良好であった。

(4) 強度試験および静弾性係数試験の結果

圧縮強度試験および静弾性係数試験の結果を図-13 に示す。材齢 28 日の標準の結果を見ると、N, H, L1, L2, Z はそれぞれ 36.3N/mm², 41.3N/mm², 39.6N/mm², 44.9N/mm², 43.4N/mm² であった。材齢 28 日の 20℃封緘および現場封緘は、いずれの調合においても同一材齢の標準より若干小さい強度となった。材齢 28 日の標準を見ると、粗骨材に硬質砂岩を用いた N は 27.9kN/mm² であったが、石灰石砕石を用いた調合ではいずれも 35kN/mm² 程度であり、建築学会式⁴⁾ で示されているとおり骨材の影響により 2 割程度大きくなった。割裂引張強度試験の結果を表-18 に示す。割裂引張強度は、材齢 28 日の 20℃封緘で圧縮強度と比較すると、ばらつきは見られるが圧縮強度の 1/13~1/16 程度であり、膨張材および収縮低減剤の使用による影響は見られなかった。

4.3 硬化コンクリートの性状

(1) 中性化

促進中性化試験結果を図-14 に示す。中性化深さは、促進期間 13 週 (=3.6√週) において N と H が同程度、

表-16 試験項目

試験項目	試験方法	備考
フレッシュ コンクリート	スランプ	JIS A 1101 目標 18±2.5cm
	空気量	JIS A 1128 目標 4.5±1.5cm
	コンクリート温度	JIS A 1156
	塩化物量	JASS 5 T-502 目標 0.30kg/m ³ 以下
硬化 コンクリート	圧縮強度	JIS A 1108 養生：標準 材齢：28 日 養生：現場封緘 材齢：7,13,28,91,365 日
	静弾性係数	JIS A 1149 圧縮強度と同時に測定
	割裂引張強度	JIS A 1113 養生：現場封緘 材齢：7,13,28,91,365 日
	乾燥収縮ひずみ	JIS A 1129-3 乾燥期間：0.7,28,56,91,182,365 日,2 年
	拘束膨張ひずみ	JCI-S-009-2012 膨張材使用の調合のみ
	拘束ひび割れ	JIS A 1151 を参考 φ32mm 丸鋼, 切欠き無し,
	促進中性化	JIS A 1153 促進期間：1,4,8,13,26 週

表-17 フレッシュコンクリートの試験結果

調合	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	塩化物量 (kg/m ³)
N	19.5	5.2	24.3	0.04
H	18.5	4.3	24.9	0.04
L1	19.0	5.6	25.8	0.04
L2	16.5	4.0	24.8	0.05
Z	20.0	3.6	24.1	0.03

L1, L2 および Z は N と比べて小さくなる傾向を示した。いずれの調合も、中性化の進行は一般的なコンクリートと同様に時間の平方根に比例しており、図-15 に示すように、中性化速度係数と標準養生材齢 28 日の圧縮強度の結果に負の相関が認められる。このことから、今回認められた調合ごとの中性化の進行の差異は、圧縮強度の影響によるところが大きいことが推察される。

(2) 拘束膨張ひずみ・乾燥収縮ひずみ

拘束膨張・乾燥収縮ひずみの結果を図-16 に示す。膨張材を使用した調合 H, L1, L2 および Z の養生期間 7 日間の拘束膨張ひずみは、150~200×10⁻⁶ となった。

(3) 低収縮用拘束ひび割れ試験

図-17 に低収縮用拘束ひび割れ試験におけるコンクリートの収縮拘束応力の経時変化を示す。収縮拘

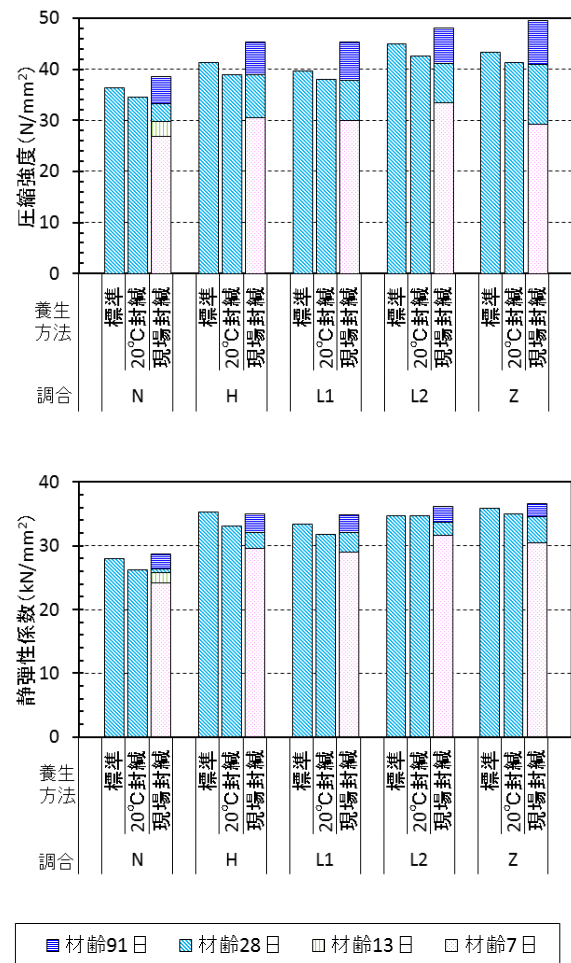


図-13 圧縮強度および静弾性係数試験結果

表-16 割裂引張強度試験

調合	20℃封緘		現場封緘		
	28 日	7 日	13 日	28 日	28 日
N	2.52	2.80	2.44	2.58	2.77
H	2.53	2.53	—	2.79	3.38
L1	2.33	3.02	—	2.74	3.57
L2	3.04	2.82	—	3.10	3.96
Z	2.81	2.65	—	2.62	3.09

束応力の算定は、力の釣り合い条件から (1) 式を用いた。図-17には、各調合の引張強度の経時変化の予測値を併記している。引張強度は 20℃封かん養生材齢 28 日での測定結果から CEB-FIP Model Code 90 式⁵⁾を用いて予測した。

$$\sigma_c = -\frac{(E_m \cdot \varepsilon_m \cdot A_m) + (E_s \cdot \varepsilon_s \cdot A_s)}{A_c} \quad (1)$$

ここに、 σ_c : コンクリートの収縮拘束応力 (N/mm²)
 $E_{m,s}$: 鋼材 (型枠、鉄筋) の弾性係数 (N/mm²)
 $\varepsilon_{m,s}$: 鋼材 (型枠、鉄筋) のひずみ ($\times 10^{-6}$)
 $A_{m,s}$: 鋼材 (型枠、鉄筋) の断面積 (mm²)
 A_c : コンクリートの純断面積 (mm²)

材齢 91 日までの低収縮用拘束ひび割れ試験の結果、ひび割れが確認されたのは N のみで、材齢 13 日 (乾燥開始から 6 日後) と比較的早い材齢でひび割れが生じた。収縮拘束応力の経時変化を見ても、同様の経過日数で引張強度予測値を上回っており、ひび割れの発生に伴う応力の急激な低下が確認された。H, L1 および L2 は、収縮拘束応力が引張強度予測値を上回っているにもかかわらず、ひび割れの発生には至っていない。さらに、H および L2 では、引張強度予測値を上回った後に、応力が緩やかに低下している。この原因は定かではないが、拘束力によって生じたクリープ変形により、コンクリートの弾性係数が見かけ上低下し、応力が導入されにくい状態にある可能性が考えられる。今後は長期的な計測を継続するとともに、クリープの影響も考慮した分析を行う予定である。

4.4 材齢 2 年でのひび割れ状況

(1) 壁試験体

実大壁試験体の材齢 2 年経過時のひび割れ状況を図-18 に示す。図中の破線は、材齢 15 ヶ月観察時、実線が材齢 2 年観察時のものである。試験体 N については、2 年経過までに中央主筋方向に発生したひび割れの幅が 0.25mm から 0.3mm へと拡大し、比較的短いひび割れが若干増えたが、H については、中央主筋方向に発生したひび割れの幅も拡大しておらず、ひび割れの進展は認められなかった。なお、Z については、2 年経過時においてもひび割れは発生していない。

(2) デッキスラブ試験体

実大デッキスラブ試験体の材齢 2 年経過時のひび割れ状況を図-19 に示す。N については、2 年観察時に新たに中央部にひび割れが発生し、ひび割れの進展が認められた。H については、ひび割れが認められたものの、比較的短く、方向も不規則なことから、表面部の乾燥収縮ひび割れで、鉄骨等の拘束によるひび割れではないと考えられるため、省略する。なお、L1, L2 については、2 年経過時においてもひび割れは発生していない。

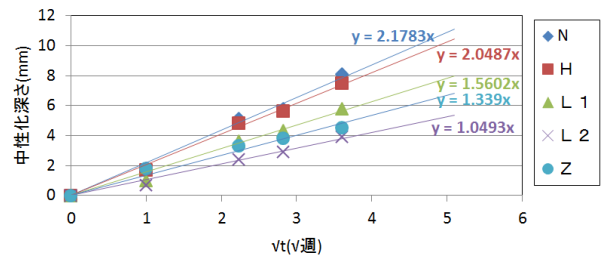


図-14 促進中性化試験結果

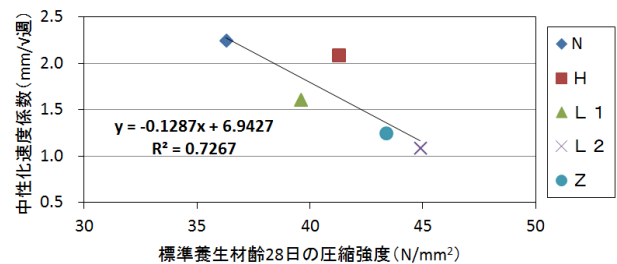


図-15 中性化速度係数と圧縮強度の関係

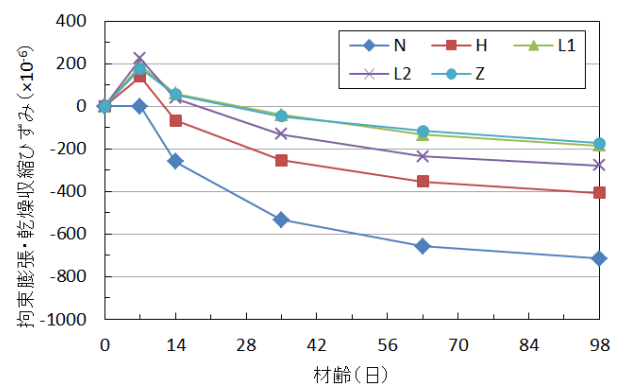


図-16 拘束膨張・乾燥収縮ひずみ

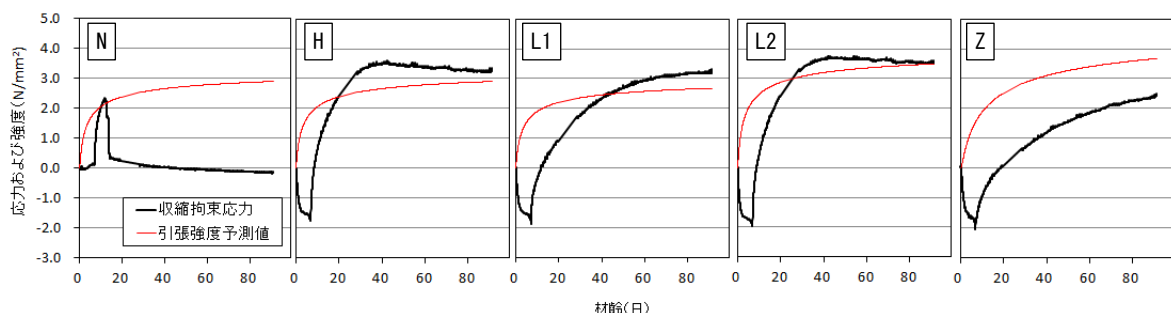


図-17 収縮拘束応力および割裂引張強度予測値の経時変化

5. 実大試験体に生じる応力・ひずみの検討

5.1 温度ひずみの補正

ひずみや応力の検討は全て温度ひずみを取除いた膨張・収縮ひずみ（以下、実ひずみと表記）で比較を行った。本実験では自己温度補償ゲージを用いており、温度ひずみはゲージと測定対象の線膨張係数の差に温度差を掛け求めた。その際、測定対象の線膨張係数は実ひずみと材齢の関係が年間を通じて最も直線的となる値を採用し、10.2から11.8程度となったが、一部、13程度となる部位が存在した。この原因について、上下非対称のデッキスラブの場合、温度変化に伴う拘束力が複雑に働くためと考えている。温度変化に伴う部材の挙動については、今後の検討課題としたい。

5.2 ひずみ測定結果 (N)

図-20 にひずみを計測した鉄筋の位置を、図-21 に鉄骨梁フランジ、ウェブ、鉄筋および拘束コンクリートの内部の埋込みひずみ計の軸方向ひずみの経時変化を示す。上フランジは、材齢初期から収縮し 300 日頃に -140×10^{-6} 程度で収束後、わずかに回復する傾向を示した。下フランジは、材齢 100 日頃まで膨張し、その後は収縮する傾向を示した。材齢 350 日付近から再度膨張し、500 日頃から収縮する傾向を示した。ウェブは打設直後に 20×10^{-6} 程度まで膨張し、その後、収縮する傾向を示したが、ほとんど変化は

見られなかった。拘束コンクリート中心の埋込みひずみ計は、400 日時点でおおよそ -90×10^{-6} 程度まで収縮し、その後の変動は見られなかった。鉄筋は全ての材齢 300 日程度までは収縮する傾向を示し、材齢 330 日付近で端部と中央が局所的に膨張後、中央は回復する傾向を示し、中間は収縮する傾向を示した。

5.3 ひずみ測定結果 (H, L1, L2)

試験体の鉄骨梁フランジ、ウェブおよび鉄筋のひずみの経時変化を図-22 に示す。フランジのひずみは、試験体 H においては試験体 N と同様、上フランジと下フランジの符号が逆転し、梁に曲げ変形が生じていることを確認した。また、コンクリートに膨張が

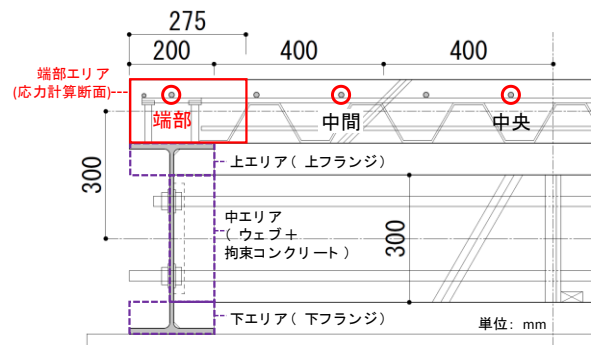


図-20 ひずみ計測位置

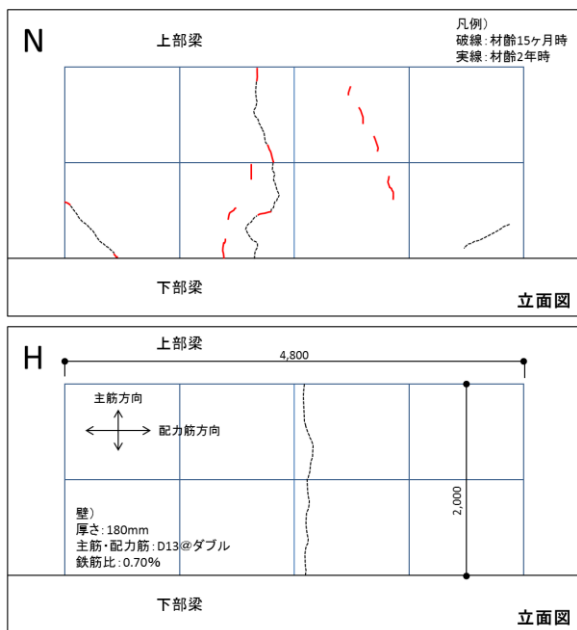


図-18 壁試験体ひび割れ発生状況

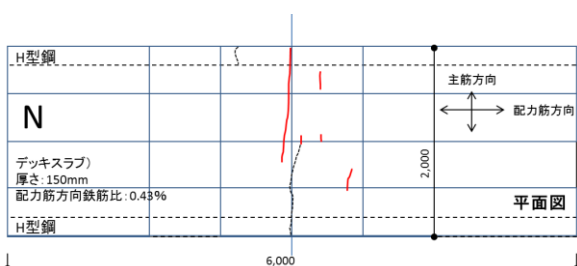


図-19 デッキスラブ試験体ひび割れ発生状況

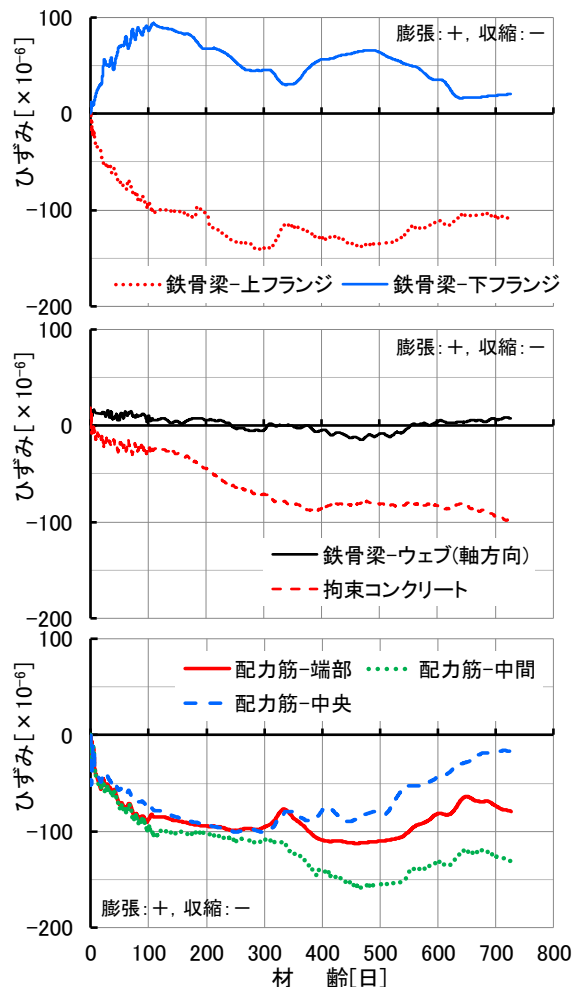


図-21 実大デッキスラブ試験体のひずみ (N)

生じる材齢初期においては、上フランジが最大 40×10^{-6} 程度、下フランジは -16×10^{-6} 程度であり、材齢 42 日程度で逆転した。その後、下フランジはひずみが減少する傾向を示さず、 28×10^{-6} 程度で一定となった。上フランジは材齢 400 日頃まで収縮し、以降は -43×10^{-6} 程度で一定となり、変化は無かった。L1 および L2 の膨張ひずみは、どちらも上フランジが 60×10^{-6} 程度であった。しかし、L1 については材齢 10 日頃には 0 となった。最小ひずみは、L1 については測定期間である材齢 727 日、L2 は材齢 534 日にどちらも -84×10^{-6} 程度であった。なお、L1 および L2 は下フランジのひずみは測定していない。ウェブのひずみについて、膨張ひずみは、H は 10×10^{-6} 、L1 および L2 は 17×10^{-6} 程度であった。膨張後、H と L1 はわずかに収縮する傾向を示した。L2 については材齢 470 日頃に -30×10^{-6} まで低下したのち、回復する傾向を示した。鉄筋のひずみは、全ての試験体において中央よりも端部の膨張ひずみ、収縮の経時変化量が小さかった。H の膨張ひずみは 40×10^{-6} 、L1 および L2 は 65×10^{-6} 程度であった。ひずみの最小値は中央で H が -79×10^{-6} 、L1 が -111×10^{-6} 、L2 が -65×10^{-6} 、端部で H が -68×10^{-6} 、L1 が -97×10^{-6} 、L2 が -115×10^{-6} 程度であった。L2 の中央について、材齢 260 日頃を境にひずみが急激に回復する傾向を示した。鉄骨梁、鉄筋の全ての計測位置において、H のひずみの最小値が L1、L2 よりも小さい結果であった。

5.4 応力の計算方法

スラブコンクリートに生じる拘束応力は式(2)から式(11)により、軸力の偏芯を考慮した力の釣合い⁶⁾により求めた。記号の定義を表-17 に示す。中立軸は鉄骨梁中心とした。上下フランジのひずみからそれぞれ求まる P_{su} , P_{sd} 、式(3)~(5)の連立方程式を解き、式(5)からモーメントが単独で働く場合の P_{sm} 、式(6)から軸力が単独で働く場合の P_{sa} 、また、鉄骨梁を 3 つのエリアに分割し (図-20) それぞれのエリアごと

に軸力を算出した P_{sa}' の計 5 つの軸力を検討した。計算に際し、拘束応力は最初にひび割れが発生した鉄骨梁直上を端部エリアとして範囲を限定し求めた。同エリアの鉄骨梁軸力の負担面積は、後述する応力の計算結果と割裂引張強度 f_t の 70% 値 (以下、ひび割れ発生強度) から逆算し $4.1 \times 104 \text{mm}^2$ (試験体端より 275mm の範囲) に設定した。拘束コンクリートは、埋込みひずみ計の結果から乾燥収縮が進行している可能性を考慮し全断面とせず、スチフナで挟まれるフランジ端部よりウェブ側の範囲を有効断面積として採用した。

$$\sigma_c = (P_{su} + P_b + P_{sc}) / A_c \quad (2)$$

$$\sigma_u = P_{su} (1/A_s + e/Z) \quad (3)$$

$$\sigma_d = P_{sd} (1/A_s - e/Z) \quad (4)$$

$$(\sigma_u - \sigma_d) / 2 = P_{sm} \cdot e / Z \quad (5)$$

$$(\sigma_u + \sigma_d) / 2 = P_{sa} / A_s \quad (6)$$

$$\sigma_u = E_s \cdot \varepsilon_{su} \quad (7)$$

$$\sigma_d = E_s \cdot \varepsilon_{sd} \quad (8)$$

$$P_b = \varepsilon_b \cdot A_b \cdot E_s \quad (9)$$

$$P_{sc} = \varepsilon_w \cdot A_{sc} \cdot E_c \quad (10)$$

$$P_{sa}' = \varepsilon_{su} \cdot A_{su} + \varepsilon_w \cdot (A_{sw} \cdot E_s + A_{sc} \cdot E_c) + \varepsilon_{sd} \cdot A_{sd} \cdot E_s \quad (11)$$

5.5 応力の計算結果 (N)

図-23 に試験体の軸力、拘束応力およびひび割れ発

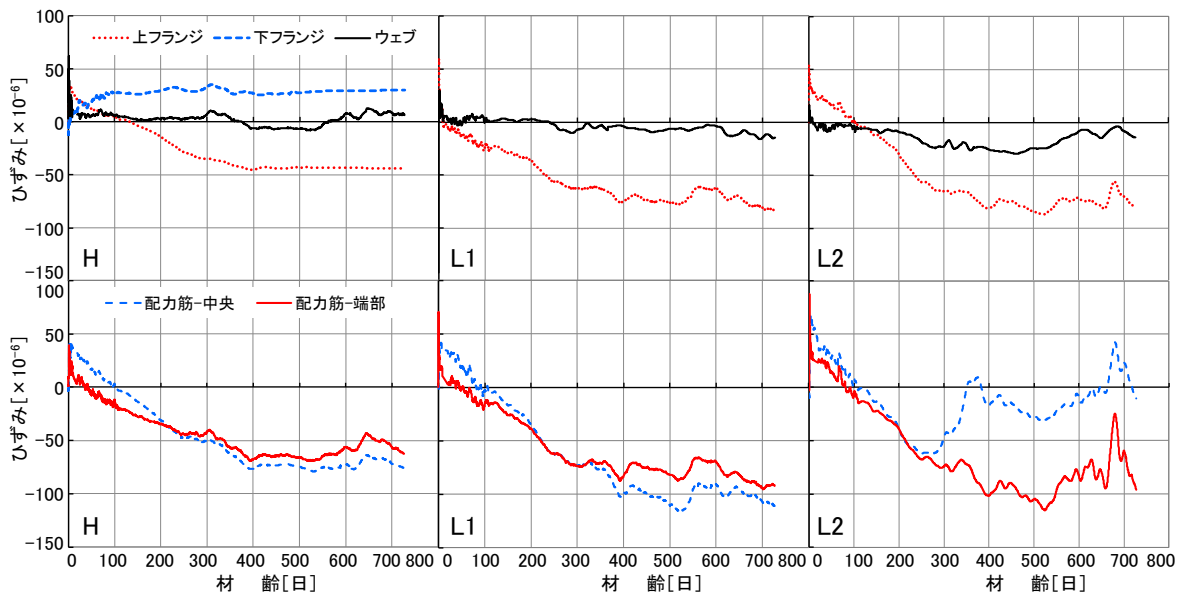


図-22 実大デッキスラブ試験体のひずみ (H, L1, L2)

生強度の経時変化を示す。 P_{su} , P_{sd} , P_{sm} および P_{sa} は、ひび割れ発生日に全ての値が一致する傾向を示した。 曲げ変形は材齢 100 日まで増加した後、一定となる傾向を示した。 応力は P_{su} を用いて計算した。 材齢 300 日で最初のピークに達し、その際、ひび割れが発生したと考える。 これはひび割れ観察による梁上のひび割れ発生日とおおよそ一致し、ひび割れ発生時の応力をひび割れ発生強度と仮定すると、鉄骨梁による軸力を負担するエリアは試験体端から 275mm 程度と推定された。 応力は最初のピーク以降一度低下し、470 日頃にかけてもう一度ピークを示した。

5.6 応力の計算結果 (H, L1, L2)

図-24 に各試験体のスラブコンクリートに生じる軸力、拘束応力 σ_c 、割裂引張強度 f_t の 70% 値 (以下、ひび割れ発生強度と表記) の経時変化を示す。 拘束応力は全ての試験体が初期に圧縮され、その後引張となった。 L1 は材齢 10 日, L2 は 94 日, H は 140 日頃に圧縮から引張側に転じ、H は材齢 400 日頃, L2 は 518 日頃にピークを示し、それ以降は低下する傾向を示した。 L1 は材齢 727 日まで増加する傾向を示した。 材齢初期の膨張による圧縮応力は H が 1.53N/mm^2 , L1 が 1.47N/mm^2 , L2 が 1.23N/mm^2 程度であった。 最大拘束応力は大きい順に L2 が 1.92

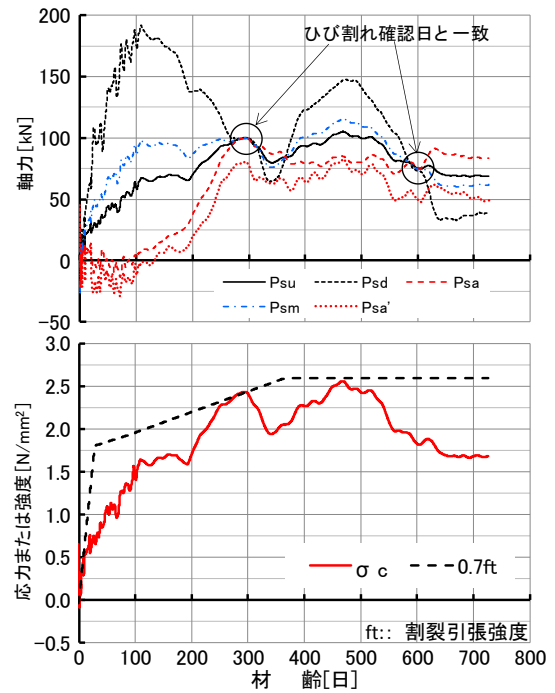


図-23 試験体軸力・応力・ひび割れ発生強度 (N)

表-17 式(2)~(11)の記号の定義

記号	定義	単位
P_{su}	上フランジひずみより求めた鉄骨の軸力	N
P_b	鉄筋の軸変形による軸力	N
P_{sc}	拘束コンクリートの軸変形による軸力	N
P_{sd}	下フランジひずみより求めた鉄骨梁の軸力	N
P_{sm}	上下フランジひずみの差分より求めた鉄骨梁の軸力	N
P_{sa}	上下フランジひずみの和より求めた鉄骨梁の軸力	N
P_{sa}'	上下フランジ、ウェブのひずみより3つのエリア毎に求めた軸力の合計値	N
σ_c	端部エリアのコンクリート拘束応力	N
σ_u	鉄骨梁上フランジの応力	N/mm^2
σ_d	鉄骨梁下フランジの応力	N/mm^2
E_s	鋼材のヤング係数	N/mm^2
E_c	拘束コンクリートのヤング係数の 65% 値	N/mm^2
ϵ_{su}	鉄骨梁上フランジひずみ	—
ϵ_w	鉄骨梁ウェブひずみ	—
ϵ_{sd}	鉄骨梁下フランジひずみ	—
ϵ_b	端部鉄筋ひずみ	—
Z	鉄骨梁の断面係数	mm^3
A_c	端部エリアのコンクリート断面積	mm^2
A_s	鉄骨梁断面積	mm^2
A_{su}	鉄骨梁上エリアの断面積	mm^2
A_{sw}	鉄骨梁中エリアの断面積	mm^2
A_{sc}	拘束コンクリートの有効断面積	mm^2
A_{sd}	鉄骨梁下エリアの断面積	mm^2
A_b	端部エリアに存在する鉄筋断面積	mm^2
e	中立軸からスラブ中心までの距離	mm

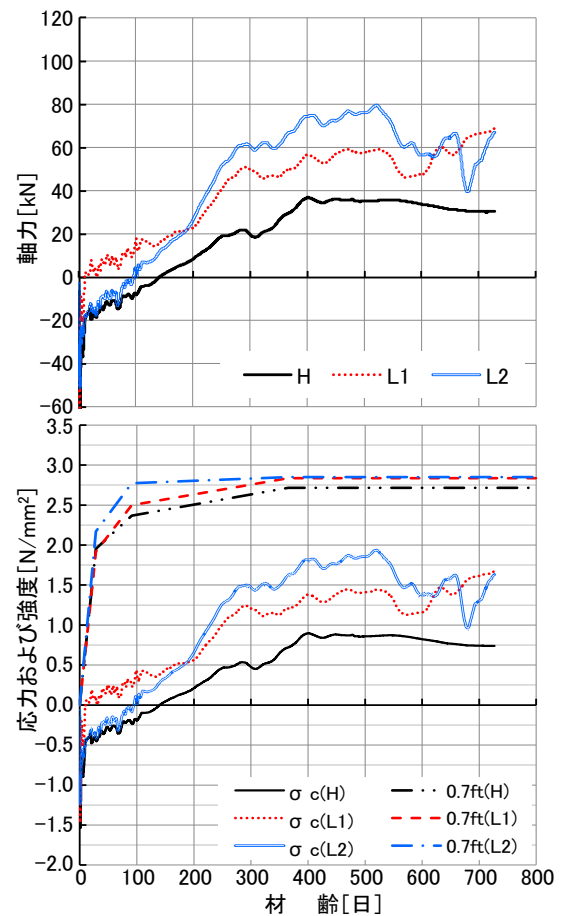


図-24 試験体軸力・応力・ひび割れ発生強度 (H, L1, L2)

N/mm², L1 が 1.62 N/mm², H が 0.88 N/mm² 程度となり, 全ての試験体において拘束応力がひび割れ発生強度を下回った。

5.7 応力強度比の検討

図-25 に各試験体におけるスラブコンクリートの応力強度比の経時変化および試験体 N のピーク時の材齢を示す。最大値は H が 0.34, L1 が 0.57, L2 が 0.68 程度であった。また試験体 N のピークである材齢 286 日時点の値と比較した場合, H は 0.20, L1 は 0.44, L2 は 0.54 程度であった。

6. おわりに

乾燥収縮ひずみを制御した, 低収縮コンクリートのひび割れ抑制効果を検討するにあたり実施した一連の実験について, 得られた知見を以下に示す。

- 1) 一軸拘束ひび割れ試験の仕様について, 乾燥収縮ひずみが -400×10^{-6} 程度より大きいコンクリートにおいては, 試験体中心部に径 32mm の丸鋼を設置した試験体を用いることで, ひび割れの発生しやすさを評価できる可能性がある。また, 試験体中心部に切欠きを設けることで, 低収縮コンクリートのひび割れ抵抗性について, 調査比較の早期判定が可能だと考えられる。
- 2) 低収縮コンクリートを用いた実大試験体の材齢 2 年経過時のひび割れ観察を行った結果, 材齢 15 ヶ月からのひび割れの進展が認められず, ひび割れが進展した無対策の N と比較して, ひび割れ抑制効果を確認することができた。
- 3) デッキスラブ試験体のコンクリートに生じる拘束応力を, 鉄骨梁と鉄筋のひずみから求めた軸力を用い, 力の釣合いにより算定した。
- 4) 実大デッキスラブ試験体について, 低収縮コンクリートを使用した試験体については, 材齢 2 年においてひび割れは発生せず, 基準コンクリートに対して応力強度比が H 調合では 80%, L1 調合は 56%, L2 調合は 46%程度の低減が認められた。
- 5) 拘束応力の最大値と割裂引張強度の 70%とした場合, 鉄骨梁直上のコンクリートが鉄骨梁による軸力を負担するエリアは, 端からおおよそ 275mm 程度と推定される。

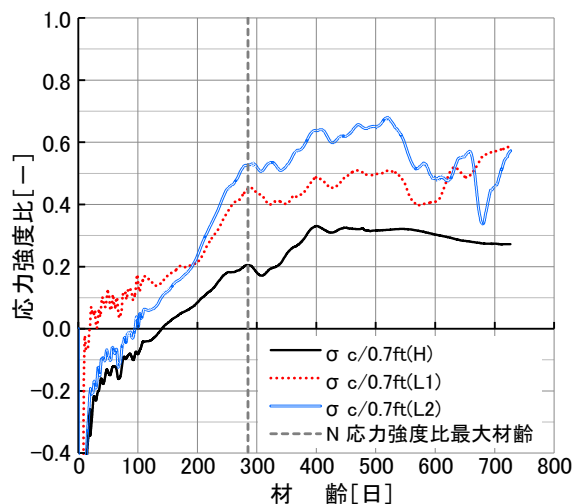


図-25 応力強度比の経時変化

以上の結果を基に, 今後は, コンクリートの仕様や打込み場所の拘束条件から, 実構造物におけるひび割れの発生予測を行なっていく予定である。

謝辞

本実験は, 安藤ハザマ, 熊谷組, 佐藤工業, 西松建設, フジタ, 前田建設工業との共同研究として実施したものです。ここに記して, 謝意を表します。

参考文献

- 1) 井戸他「コンクリートの乾燥収縮ひずみ制御方法に関する実験的研究」, 戸田建設技術研報告第 42 号, 2016.11
- 2) 日本コンクリート工学協会「混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会報告書」, pp.209-211, 2010.9
- 3) 井上他「ハイブリッド高性能 AE 減水剤を用いた低収縮コンクリートの開発と建築物への適用によるひび割れ低減効果の検証」, 日本建築学会技術報告集 第 16 巻 第 34 号, pp.849-854, 2010 年
- 4) 日本建築学会, 「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事」, p.192, 2015
- 5) Thomas Telford 「COMIT EURO-INTERNATIONAL DU BETON : CEB-FIP Model Code 90」, 1990
- 6) 六車熙「プレストレストコンクリート」コロナ社, p.161, 1963.7