

論文 コンクリートの収縮ひび割れ性状に及ぼす初期養生, 単位水量, 鉄筋量の影響

中川隆夫^{*1}・大野義照^{*2}・山本純大^{*3}・鈴木計夫^{*4}

要旨: デッキプレート合成スラブの補強筋として使用される溶接金網を埋設したコンクリートにおける、初期養生、単位水量および鉄筋量のひび割れ性状に及ぼす影響をコンクリートの一軸拘束ひび割れ試験によって調べた。その結果、送風養生は湿潤養生に比べひび割れ発生材齢は早くなる。また、材齢90日のひび割れ幅への初期養生の影響は小さい。補強筋量を間隔@150から@75に倍増するとひび割れ幅は約 0.66倍に低減された。単位水量差(20kg/m³)のひび割れ幅低減効果は小さい。付着解析により求めたひび割れ幅の計算値は実測値をほぼ捉えている。

キーワード: 養生方法、乾燥収縮、一軸拘束ひび割れ試験、ひび割れ幅、付着消失長さ

1. はじめに

デッキプレート合成スラブではデッキプレートは型枠として用いられ、硬化後はコンクリートと一体となって引張補強筋の働きをし、ひび割れ制御のために溶接金網や異形鉄筋を敷き並べた施工性及び耐力的にも優れた合理的かつ経済的な床構造として鉄骨構造では広く使われている。合成スラブにおいてひび割れの発生が問題になることがあるが、本報では材料、施工の観点から初期養生、単位水量および補強筋である溶接金網の量を実験要因とし、一軸拘束ひび割れ試験によって溶接金網(線径φ 6mm)を埋設したコンクリートの、風作用下のスラブ打設後の初期養生を想定した送風養生や配合における単位水量差および補強筋量がひび割れ性状に及ぼす影響を調べた。

2. 実験概要

2. 1 使用材料及び調合

表-1 にコンクリートの調合を示す。普通ポルトランドセメントを用いたスランプが 18cm と 10cm の 2 種類のコンクリー

表-1 コンクリートの調合

w/c (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m ³)					空気量 (%)	スランプ ^o (cm)
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤		
60.0	46.8	189	315	799	949	0.788	4.1	18.5
60.0	45.5	169	282	811	1018	0.705	3.8	11

ト(粗骨材: 表乾比重 2.68, 細骨材: 表乾比重 2.56)を使用した。その単位水量差は 20kg/m³である。補強筋は間隔の異なる溶接金網(線径φ 6mm、網目寸法@75×75(鉄筋比 0.47%), @150×150(鉄筋比 0.24%))を用い、引張強度は 6510kgf/cm²で明瞭な降伏点は認められない。

2. 2 試験体の種類および形状・寸法

1) 収縮拘束ひび割れ試験体

図-1 に拘束試験体の形状・寸法を示す。試験体は全長 118cm×幅 35cm×厚さ 8cm で、コンク

*1 大阪大学 技官 工学部建築工学科 (正会員)

*2 大阪大学 教授 工学部建築工学科、工博(正会員)

*3 大阪大学 学部生 工学部建築工学科

*4 大阪大学 教授 工学部建築工学科、工博(正会員)

リートは端部の拘束鋼材およびそれに溶接された 14 本の丸鋼 ($\phi 9\text{mm}$) により固定されている。拘束区間 (65cm) は試験区間である中央平行部区間 (25cm) とその両側の曲線区間 (20cm $\times$ 2) で構成されており、コンクリート中央部の断面形状は幅 15cm $\times$ 厚さ 8cm、断面積 120cm² である。拘束鋼材には平板を加工したみぞ形鋼 (厚さ 2.3mm) を用い、総断面積は 8.4cm² で拘束鋼材比は 7.0% である。

表-2 に試験体の種類を示す。実験要因は養生方法、単位水量 (スランプ)、鉄筋量で同種の試験体を各 2 体、計 16 体を製作した。

2) 自由乾燥収縮試験体・クリープ試験体

乾燥収縮試験体、クリープ試験体ともに長さ 50cm $\times$ 幅 10cm $\times$ 厚さ 8cm の角柱体で、養生方法、単位水量 (スランプ) の異なる 4 種類、各 2 体の計 8 体を製作した。

2.3 実験方法

試験体の製作ならびに試験は、恒温・恒湿 (20 $\pm$ 1 $^{\circ}\text{C}$ 、60 $\pm$ 5%) 室で実施した。収縮拘束試験体は以下の方法で養生ならびに測定を行った。クリープ試験は材齢 14 日に持続応力 60kgf/cm² の载荷を行った。

(1) 養生方法

1) 湿潤養生 (W) コンクリート打設後、材齢 3 日まで湿布養生を行い、脱型後試験体を立てて気乾状態で保存した。

2) 送風養生 (D) コンクリート打設 5~6 時間後より送風機 2 台を使用して送風を開始 (風速 2.5~3.0m/s) した。材齢 3 日の脱型時までコンクリートは型枠中にあり、風が直接当たっているのはコンクリート表面 (打設面) のみである。脱型後は試験体を長手方向を横に倒して (試験体の側面を上下方向にして) 置き、コンクリート全面に風が当たるよう材齢 7 日まで送風養生を行った。送風終了後は試験体を立てて (試験体の長手方向を上下にして) 気乾状態で保存した。

送風方法はベニヤ板 (長さ 180cm $\times$ 幅 90cm、板厚 12mm) を長手方向に 2 枚繋ぎ合わせて、幅 90cm、長さ 360cm の板 3 枚で 90 $^{\circ}$ 角の門型枠を作製し、その中に試験体を 2 段に設置して送風機 2 台をを 2 段に重ねて一方から他方へと一方向の送風養生を行った。風速は送風口近傍ではおよそ 3.0m/s であったのに対してその反対側出口ではおよそ 2.5 m/s であった。

なお、試験体脱型後、乾燥を防止するため試験体の打設面、底面以外の側面にはエポキシ樹脂を塗布してシールを施した。

表-2 試験体一覧表

試験体番号	養生方法	配筋	単位水量
W75-18	湿潤養生 (W)	$\phi 6@75\times 75$	189kg/m ³
W150-18		$\phi 6@150\times 150$	スランプ 18cm
W75-10		$\phi 6@75\times 75$	169kg/m ³
W150-10		$\phi 6@150\times 150$	スランプ 10cm
D75-18	送風養生 (D)	$\phi 6@75\times 75$	189kg/m ³
D150-18		$\phi 6@150\times 150$	スランプ 18cm
D75-10		$\phi 6@75\times 75$	169kg/m ³
D150-10		$\phi 6@150\times 150$	スランプ 10cm

試験体番号の (W, D) は養生方法、(75, 150) は配筋量、(18, 10) は単位水量の違いを表す。

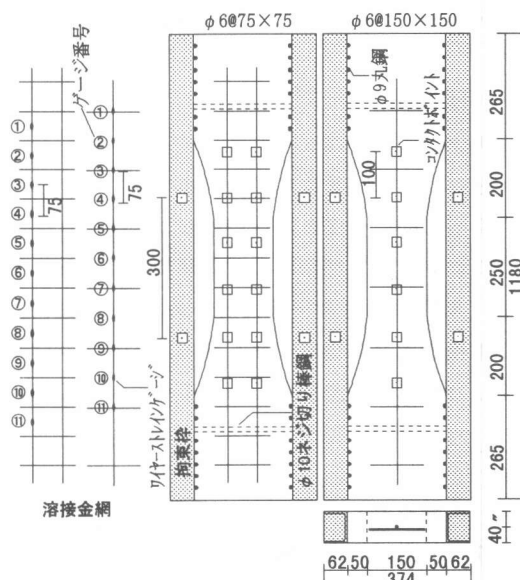


図-1 試験体図、およびコンタクトゲージ、ワイヤーストレインゲージ貼付位置図

(2) 測定方法

1) 収縮拘束ひび割れ試験体

コンタクトストレインゲージ(C.G)を用いて試験体中央部長手方向 30cm 区間における、埋設鉄筋上に位置するコンクリートと拘束鋼材のひずみ(検長 30cm)、およびひび割れ発生後のひび割れ幅測定のため、長手方向 5 区間の変位を検長 10cm で測定した。ワイヤーストレインゲージ(W.G)を用い、埋設鉄筋の長手方向に沿って 7.5cm 間隔で貼付した 11 箇所のひずみと拘束鋼材の中央長手方向のひずみを測定した。なお、コンタクトポイント、ワイヤーストレインゲージの貼付位置を図-1中に示す。

2) 乾燥収縮・クリープ試験体

角柱試験体の4面における、中央 30cm 区間のひずみをコンタクトストレインゲージを用いて測定した。乾燥収縮試験体には各 2 体のうち 1 体にワイヤーストレインゲージを貼付した溶接金網鉄筋を断面中央(埋設深さ 4cm)に、軸方向に沿って埋設し、材齢初期からの収縮量を測定した。

3. 実験結果及び考察

3.1 コンクリートの強度試験

表-3にコンクリートの強度試験結果を示す。湿潤養生に比べ送風養生は初期材齢において割裂強度が低い値を示すが圧縮強度はほとんど変わらない。ただし試験体は材齢3日まで円柱型枠内にあり、送風養生の場合この間上部円形表面にのみ風が直接当たっている。

3.2 乾燥収縮・クリープ試験

送風養生試験体のワイヤーストレインゲージを用いて測定した乾燥収縮ひずみは材齢3日(脱型時)において 1.0×10^{-4} で、一方湿潤養生試験体のひずみは零であった。脱型後の収縮量はコンタクトゲージによる測定に対応している。図-2にコンタクトゲージを用いて測定した無筋コンクリートの自由乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。ただし、送風養生試験体の材齢3日の収縮ひずみに脱型前の収縮量を 1.0×10^{-4} として実測値に加えた。送風養生試験体は湿潤養生試験体に比べ材齢20日頃までは収縮量が若干大きいもののその後は次第に湿潤養生試験体の方が収縮量は大きくなっている。単位水量の差による違いは、湿潤養生はほとんどないが送風養生は単位水量の少ない方が収縮量は約 1.0×10^{-4} 小さい。既往の研究[1][2]によると風作用下において乾燥初期の収縮が促進され、長期の収縮量は小さくなることが示されており、本実験結果に対応している。湿潤養生試験体および送風養生試験体の材令90日における単位クリープひずみはそれぞれ W-18: 1.31、W-10: 1.56、D-18: 1.71、D-10: 2.02×10^{-4} N/mm² である。

3.3 拘束試験

表-3 コンクリートの強度試験結果

割裂強度(N/mm ²)				
	7日	14日	21日	28日
W-18	2.23	2.70	2.69	—
W-10	2.40	2.23	2.49	2.54
D-18	1.83	2.09	2.14	—
D-10	1.97	1.85	2.18	2.19

圧縮強度(N/mm ²)			
	3日	7日	28日
W-18	13.2	21.1	25.3
W-10	13.6	20.0	24.0
D-18	14.0	20.5	24.1
D-10	13.7	19.6	22.2

ヤング係数($\times 10^4$ N/mm ²)			
	3日	7日	28日
W-18	1.91	2.08	2.19
W-10	1.92	2.19	2.17
D-18	1.82	2.24	2.22
D-10	2.10	2.34	2.01

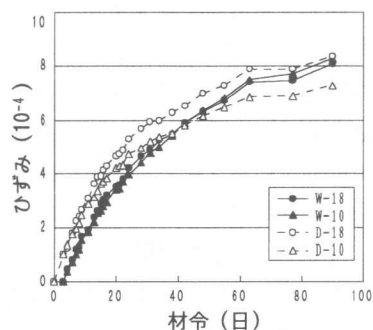


図-2 自由乾燥収縮ひずみの経時変化

(1) 拘束試験体のひずみの経時変化

図-3にコンクリートと拘束鋼材のひずみの材齢3日以降の経時変化の一例を示す。図中の計算値は逐次計算[3]によりくびれを有する変断面を考慮し求めたものである。湿潤養生試験体、送風養生試験体ともに実測値と計算値はほぼ一致している。ひび割れが生

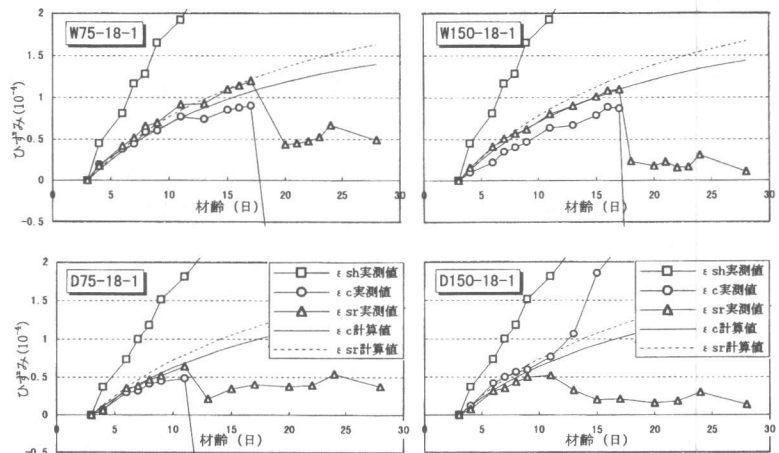


図-3 コンクリートと拘束鋼材のひずみの経時変化

じて拘束鋼材ひずみが零に戻らないのは溶接金網鉄筋が引張力を負担していることによる。

(2) ひび割れ発生材齢、ひび割れ状況

表-4にひび割れ発生材齢を示す。送風養生試験体のうち単位水量の少ないD-10シリーズは材齢4～7日の間に初ひび割れが断面の一部に発生し、その後の進展によって貫通に至っている。単位水量の多いD-18シリーズは材齢

表-4 ひび割れ発生材齢

試験体 種類	発生材齢 (日)	貫通材齢 (日)	試験体 種類	発生材齢 (日)	貫通材齢 (日)
W75-18-1	19	19	D75-18-1	12	12
W75-18-2	15	15	D75-18-2	13	13
W150-18-1	18	18	D150-18-1	11	13
W150-18-2	17	17	D150-18-2	10	10
W75-10-1	21	21	D75-10-1	4	13
W75-10-2	22	22	D75-10-2	7	22
W150-10-1	16	16	D150-10-1	4	9
W150-10-2	20	20	D150-10-2	7	14

10～13日の間にひび割れが発生し、D150-18-1を除き、初ひび割れが全断面を貫通している。なおD150-18-1は初ひび割れが試験体の片側側面に発生し、2日後に貫通に至った。また、D75-10-2を除き、貫通後新たにひび割れは発生していない。D75-10-2は打設面と底面のずれた位置に初ひび割れが発生し、その後他の箇所新たなひび割れが1本発生し、計2本のひび割れが生じている。湿潤養生試験体はW-10シリーズが16～22日の間に、W-18シリーズが15～19日の間に全断面を貫通する初ひび割れが発生し、その後新たなひび割れは発生していない。ひび割れはD-10、D-18、W-18、W-10の順に発生しており、湿潤養生に比べて送風養生を行った方がひび割れ発生材齢は早くなっている。D-10はD-18に比べてひび割れの発生が早く、コンクリート表面からの水分の散逸による組織の密実さの低下が考えられる。なお、ひび割れの発生に及ぼす補強筋量の差は認められず、補強筋量(本数が2倍)の増加によるひび割れ分散性の効果は本実験のコンクリート断面形状(幅15cm×厚さ8cm)においては認められなかった。

(3) ひび割れ幅

図-4にひび割れ幅の経時変化を示す。ひび割れ貫通後は乾燥収縮や溶接金網鉄筋とコンクリート間の付着劣化によりひび割れ幅が増加している。ひび割れ発生後のひび割れ幅増加量は湿潤養生に比べ送風養生の方が小さく、また@150に比べ@75の方が小さい。前者は各々の自由乾燥

収縮ひずみの経時変化に対応している。

図-5 に各試験体の材齢 90 日におけるひび割れ幅の平均値を示す。同図中黒塗りの部分はひび割れ発生時の初ひび割れ幅である。補強筋量が異なる@75,@150 の各シリーズはともに W-18、W-10、D-18、D-10 の順にひび割れ幅は小さく、補強筋量を間隔@150 から@75 へ倍増（本数が 2 倍）することによって約 0.66 倍にひび割れ幅が低減されている。単位水量、鉄筋量が同じ試験体でひび割れ幅を比較すると、養生方法の違いによって送風養生は湿潤養生の約 0.83 倍のひび割れ幅となっている。養生方法、鉄筋量が同じ試験体で比較すると、単位水量の低減（20kg/m³）によって W-10、D-10 はそれぞれ W-18、D-18 に比べひび割れ幅は小さくなっているがその差は僅少である。

4. ひび割れ幅の計算

4. 1 付着消失長さ

ひび割れ近傍の鉄筋とコンクリートのひずみ分布を模式図に示せば図-6 のようになる。同図において、 ϵ_{sh} はひび割れ発生直前の自由収縮ひずみを、 ϵ_{sr} は同じく外部拘束鋼材によって拘束された溶接金網鉄筋埋設のコンクリートひずみを、 ϵ_e と ϵ_{creep} はそれぞれひび割れ発生直前のコンクリートの伸び弾性ひずみとクリープひずみを表している。ひび割れが発生するとひび割れ位置の鉄筋のひずみは増え ϵ_{st}' となり、一方ひび割れ近傍のコンクリートは拘束がなくなりそのひずみはクリープひずみだけが残る $\epsilon_{sh} - \epsilon_{creep}$ となる。ひび割れから離れた位置では鉄筋とコンクリートは一体でそのひずみはひび割れの発生により外部拘束が緩和されるのでひび割れ幅は鉄筋の伸びとコンクリートの収縮の和として表され、図-6 の灰色の部分の面積がひび割れ幅に相当する。また同図の網掛け部分の面積が等しくなるように長さ L_b を定義すれば、ひび割れ幅は式(1)で計算される。ここで、 L_b を付着消失長さと呼ぶ。 L_b はコンクリートの強度、鉄筋の表面状態、鉄筋応力などによって決まる値である。

$$W = \left\{ \epsilon_{st}' + (\epsilon_{sh} - \epsilon_{creep}) \right\} \times L_b \cdots (1)$$

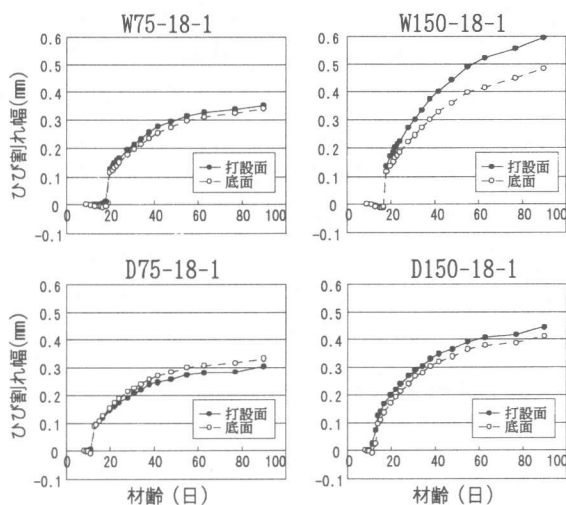


図-4 ひび割れ幅の経時変化

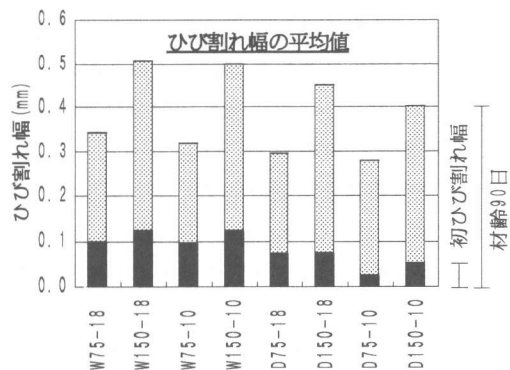


図-5 材齢 90 日におけるひび割れ幅

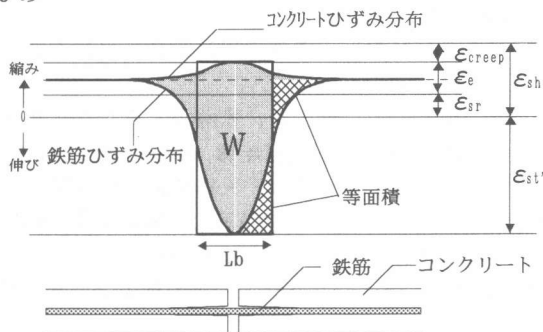


図-6 ひび割れ近傍模式図

実測した鉄筋ひずみ分布より求めた $Lb1$ と式(1)より求めたひび割れ幅(計算値1)を表-5に示す。計算値1は実測値にほぼ近い値を示している。

4.2 付着解析

ひび割れ位置での鉄筋引張力、両引き試験から得た τ - s 関係を bi-linear 関係で近似したもの($K=78.49\text{N/mm}^3$, $\tau_y=2.94\text{N/mm}^2$)を用いて付着解析にて計算した解析結果と実測値の一例を図-7に示す。図中の番号はゲージ位置に対応する。鉄筋ひずみの測定間隔が7.5cmと広く、ひび割れ位置を正確に捉えていないため計算値の精度は若干低くなっているが、全体の傾向を捉えている。鉄筋ひずみ分布の積分値より得られたひび割れ幅(計算値2)と付着消失長さ($Lb2$)を前掲の表-5に示す。計算値2は実測値をほぼ捉えている。

表-5 ひび割れ幅, Lb 計算結果 :単位(mm)

	実測値	計算値1	$Lb1$	計算値2	$Lb2$
W75-18-1	0.120	0.111	120	0.129	130
W150-18-1	0.124	0.118	190	0.091	123
W75-10-1	0.092	0.107	118	0.137	133
W150-10-1	0.113	0.096	143	0.103	123

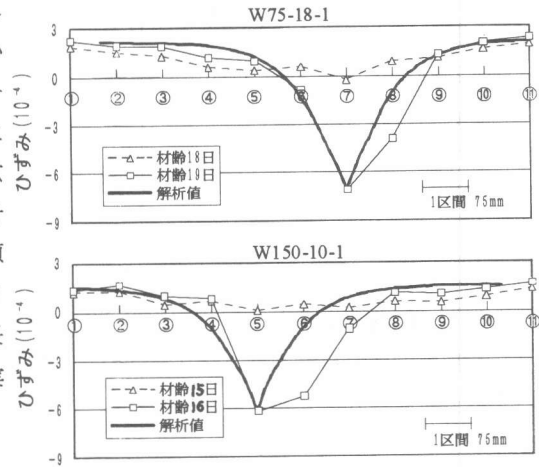


図-7 鉄筋ひずみ分布

5. まとめ

コンクリート材齢90日までの収縮拘束ひびわれ試験結果より次のことがいえる。

- 1) 送風養生を行った場合、湿潤養生に比べひび割れ発生材齢は早くなる。初ひび割れ幅は小さく、ひび割れ発生後のひび割れ幅の経時変化も小さく材齢90日では約0.83倍のひび割れ幅となっている。ひび割れ発生後のひび割れ幅の経時変化は各試験体のその後の自由乾燥収縮ひずみの経時変化に対応している。
- 2) 補強筋量を間隔@150から@75に倍増することによってひび割れ幅は約0.66倍に低減する。
- 3) 単位水量(20kg/m^3)の低減によるひび割れ幅減少効果はほとんど認められなかった。
- 4) 付着消失長さを求めることにより行った計算結果はひび割れ幅の実測値をほぼ捉えている。

なお、本研究は合成スラブ工業会の「デッキプレート床ひび割れ研究会」における研究の一環として行ったものである。

参考文献

- [1] 庄谷征美：「風作用下におけるコンクリートの収縮特性に関する研究」セメント技術年報32, pp361-364, 1978
- [2] 笠井芳夫、横山清、松井勇、白須富士男：「初期養生と拘束程度を変えたコンクリートのひび割れ」セメント技術年報, pp393-396, 1984
- [3] 太田寛、鈴木計夫、大野義照、中川隆夫：「コンクリートの収縮拘束ひび割れ試験」第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp25-28, 1981
- [4] 山本純大、中川隆夫、大野義照、鈴木計夫、藤岡宏：「デッキプレート合成スラブ用補強筋を埋設したコンクリートの収縮拘束ひび割れ試験」日本建築学会大会学術講演梗概集, 1996