

# 鉄筋コンクリートのひび割れ幅に及ぼす乾燥収縮の影響

コンクリート研究室 櫻井哲哉  
指導教官 下村 匠  
丸山久一

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は、一般に曲げひび割れの発生を許して供用されるので、設計においては、ひび割れ幅や間隔など発生するひび割れ性状の予測が重要となる。また、鉄筋コンクリート部材は長期間供用されるため、長期曲げひび割れ幅の予測は、部材の耐久性から重要となると考えられる。

曲げひび割れ幅の増大は、ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮、クリープなどの影響によるものと考えられており、その中でも乾燥収縮による影響が最も大きい<sup>1)2)</sup>。また、ひび割れを有した状態でのコンクリートの乾燥収縮は通常の角柱供試体を用いた乾燥収縮試験とは異なることや、ひび割れ幅やひび割れ間隔により収縮量が異なることが予想される。

さらに、実構造物におけるコンクリートの乾燥収縮は、部材内の鉄筋によって拘束される。コンクリート標準示方書〔設計編〕<sup>3)</sup>においては、鉄筋比 1.0%の収縮ひずみは無筋コンクリートに比べ乾燥開始 3 日以内であれば、 $70 \times 10^{-6}$ の拘束効果があるとしている。しかし、ひび割れの入った状態で生じたコンクリートの収縮に対しては、ひび割れの存在のために鉄筋のひずみ拘束作用は減少すると考えられる。

そこで本研究では、これらのひび割れ間コンクリートの乾燥収縮が長期曲げひび割れ幅に及ぼす影響を系統的に明らかにすることを目的とし、ひび割れの有無、ひび割れ間隔、ひび割れ面の形状を検討要因として鉄筋コンクリート供試体の乾燥収縮試験を行い、検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

実験に用いた供試体は、図-1 に示すように断面  $100 \times 100$  のコンクリート角柱に D13 異形鉄筋を 1 本埋め込んだものである。また、鉄筋の拘束を検討する供試体は、表-1 に示すように  $100 \times 100 \times 300$ mm の角柱供試体に径の異なる鉄筋を 5 種類変化させ、それぞれ 1 本埋め込んだものである。

ひび割れ間隔、ひび割れ面の形状、鉄筋量の違いにより、表-1 に示す全 19 体の供試体を試験した（鉄筋拘束検討用 D13 とひび割れ間隔 300mm シール無は重複）。ここに示す自由収縮、シール有供試体はシール無と同寸法の供試体において鉄筋を埋め込まないものおよび端面をエポキシ系接着剤で被覆したものである。

ひび割れ有、無供試体は、図-1 に示すようにひび割れ間隔にかかわらず測定位置は供試体の両端から 100mm とした。また、ひび割れ有供試体には、予め設けておいた供試体の切欠き部分の上下面に線荷重を加え、割裂ひび割れを導入した。

### 2.2 実験方法

実験は長さ変化および重量変化について行った。コンクリートの長さ変化は供試体両側面の収縮量をダイヤルゲージにて測定した。重量変化は供試体の重量を電子天秤で測定した。

コンクリート部材の乾燥収縮によるひび割れ幅の増大量は、ひび割れ間コンクリートの収縮量と同等であると考えられることができる。加えて、ひび割れ幅を介しての測定は困難であることが予備試験により確認されたことより、ひび割れ間コンクリートの長さ変化を測定することによ

表-1 供試体ケースおよび寸法

ひび割れ間隔(mm) (標点間距離)	供試体名	供試体長さ (mm)	断面 (mm <sup>2</sup> )	使用鉄筋	鉄筋比 (%)
100	自由収縮	100	100 × 100	—	—
	シール無	100		D13	1.267
	シール有	100			
	ひび割れ無	300			
	ひび割れ有	300			
自由収縮	200	—			
200	シール無	200		D13	1.267
	シール有	200			
	ひび割れ無	400			
	ひび割れ有	400			
	自由収縮	300			
300	シール無	300		D13	1.267
	シール有	300			
	ひび割れ無	500			
	ひび割れ有	500			
	300 (鉄筋拘束検討用)	D13	300		
D16		300	D16	1.986	
D19		300	D19	2.865	
D22		300	D22	3.871	
D29		300	D29	6.425	

り間接的にひび割れ幅を測定した。そのため、通常の長さ変化試験に用いられている供試体の測定位置とは異なり、図-1 に示すようにひび割れ面（または供試体端面）にコンタクトチップを添付してひび割れ間コンクリートの収縮量の測定を行った。また、基長はひび割れ間隔に応じて、100、200、300mm と変化させた。

配合は、水セメント比 50%の普通コンクリートとした(表-2)。供試体は、材齢 1 日で脱型し、材齢 28 日まで 20 の水槽内にて水中養生した。その後、ひび割れ導入し、飽水状態から 20 60% R.H.の恒温恒湿室内にて乾燥を開始した。

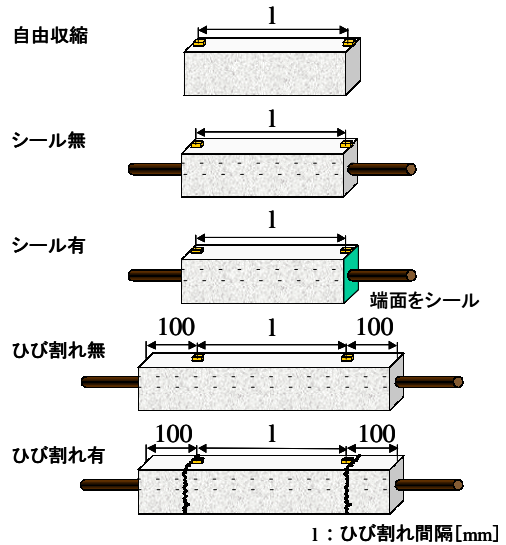


図-1 供試体形状・収縮量測定位置

### 3. 実験結果

#### 3.1 ひび割れの有無による比較

図-2 にひび割れ間隔 300mm における乾燥収縮試験結果を示す。シール無供試体は側面および端面からの乾燥、ひび割れ有供試体は側面およびひび割れ面からの乾燥、ひび割れ無供試体は側面からのみの乾燥の影響を受ける。また、シール無供試体はひび割れ幅が無限に大きいときのひび割れ間コンクリートであり、ひび割れ

表-2 コンクリート配合

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	S	G	混A	混B
20	50	45	165	330	799	999	0.99	0.99

- W : 水道水
- C : 普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm<sup>3</sup>)
- S : 信濃川産川砂(表乾密度2.61g/cm<sup>3</sup>, 吸水率2.4%, F.M.2.56)
- G : 石灰岩碎石(表乾密度2.67g/cm<sup>3</sup>, 吸水率0.6%, F.M.6.99)
- 混A : AE減水剤
- 混B : AE助剤

無供試体は、部材中央部のコンクリート（通常の乾燥収縮試験に用いられる供試体と同様）であるため、三者の比較より、一般の部材とひび割れ間コンクリートとの乾燥収縮の違い（ひび割れ面または端面からの乾燥の影響）がわかる。

乾燥収縮試験結果より、シール無、ひび割れ有、ひび割れ無の順に大きな値を示した。また、三者のひずみ差はひび割れ面または端部からの乾燥の影響を示していることより、ひび割れが存在することにより収縮量が増大したと考えられる。加えて、ひび割れ面からの乾燥は完全に端面を乾燥させた場合のものより小さいことから、ひび割れ幅により乾燥の速度が異なると考えられる。

### 3.2 シールの有無による比較

図-3(a)にシールの有無による乾燥収縮試験結果を示す。同図より、収縮ひずみはシール無供試体のほうが大きくなるが、その差は少ない。シール無供試体は、側面および端面からの乾燥の影響を受ける。一方、シール有供試体は、同寸法の供試体の端面を樹脂でシールしてあるので、乾燥の影響は側面からのみである。したがって、両者を比較することにより、端部からの乾燥が側面の収縮量にどのような影響を及ぼすのかがわかる。実験の結果、シールの有無による収縮量の影響はほとんど現れなかった。図-3(b)に逸散水量の経時変化の結果を示す。同図より、逸散水量はシール無供試体のほうが大きい。これは、シール有供試体の乾燥面数が減少したためであり、シール面からは水分の逸散が行われていないことを示している。よって、長さ変化が一致した原因はシール効果（シール面からの乾燥の遮断）がなかったためではないと考えられる。

次に端面からの乾燥が側面に及ぼす影響について検討する。シールの有無に関わらず、側面からの乾燥は一定である。したがって、測定した側面の収縮量が同じであるなら、端面も同様の変形を示したことになる。今回の実験結果よ

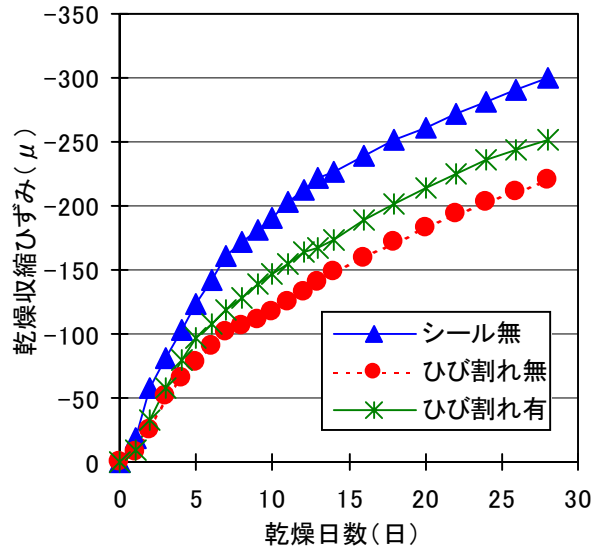
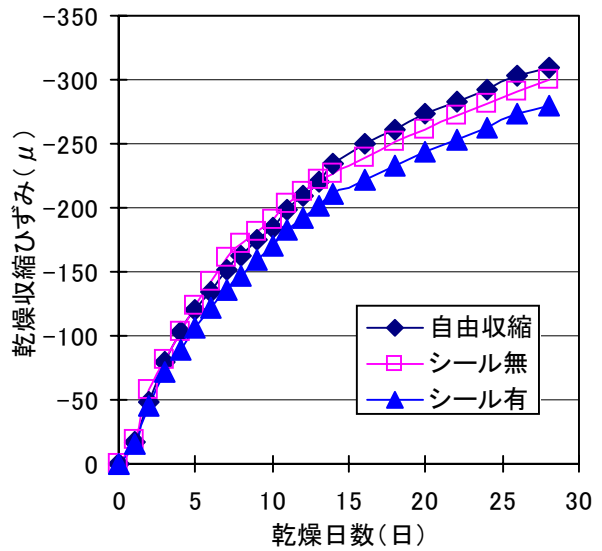
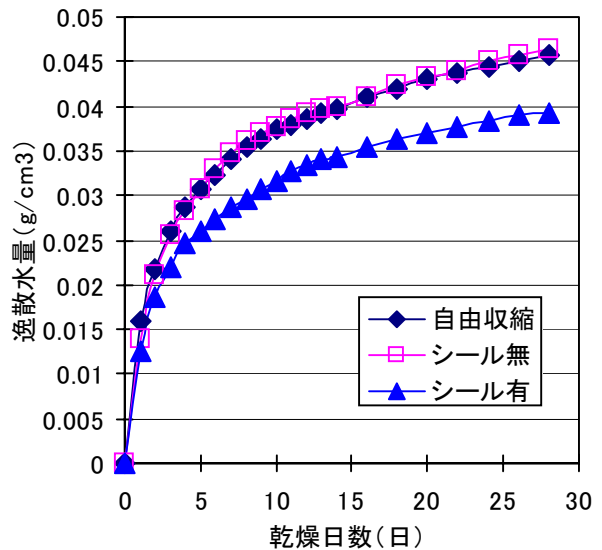


図-2 ひび割れ有無の比較(ひび割れ間隔 300mm)



(a) 長さ変化試験結果



(b) 重量変化試験結果

図-3 シール有無の比較(ひび割れ間隔 300mm)

り端面のシールの影響は、逸散水量には影響したが、収縮ひずみに対しては影響しなかった。したがって、端面に被覆した樹脂は水分の逸散を防止する効果はあるが、側面の変形を拘束する効果はなく、端部と同じ変形を示したと考えられる。

以上のことより、ひび割れ面（端面）からの乾燥がひび割れ間コンクリートの収縮に及ぼす影響は側面からの乾燥の影響に比べ極めて少ないといえる。しかし、ひび割れ面であるひび割れ間コンクリートの端部は側面の収縮の影響を強く受けるため、端面にシールした場合においても収縮量はシール無と同程度の値となったと考えられる。

### 3.3 ひび割れ間隔による比較

図-4 にひび割れ間隔の違いによるひび割れ幅増加量の変化を示す。同図の縦軸に示す変化量とは、供試体が実際に収縮した長さである。比較に用いるシール無供試体は、ひび割れ幅が無限に大きい時のひび割れ間コンクリートである。ひび割れ幅の増大量は、ひび割れ間コンクリートの収縮量と同等であると考えることができる。そこで、変化量をひび割れ幅増加量として評価することとした。同図より、ひび割れ間隔の増加に伴い、ひび割れ幅が増加していることが分かる。また、ひび割れ間隔 100mm 供試体に比べ 200、300mm 供試体の収縮量はそれぞれ 2 倍、3 倍となっている。これより、どの供試体においても側面の乾燥による端部の変位は同じであることがわかる。また、供試体端部以外の軸方向の収縮量はどの部位をとっても等しいため、ひび割れ間隔の長い供試体ほど収縮量が大きくなったと考えられる。

また、端面のシールの有無やひび割れの有無での比較における差に比べ、ひび割れ間隔の比較による収縮量の変化は極めて大きいことが分かる。このことより、ひび割れ間隔はひび割れ幅の増加量に大きな影響を及ぼすと考えられる。

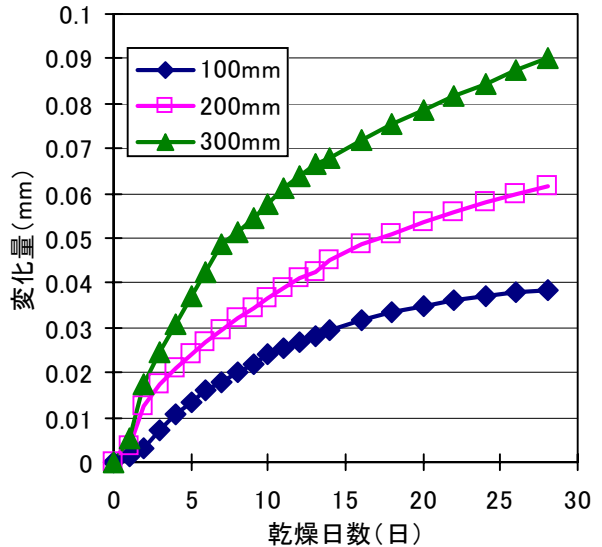
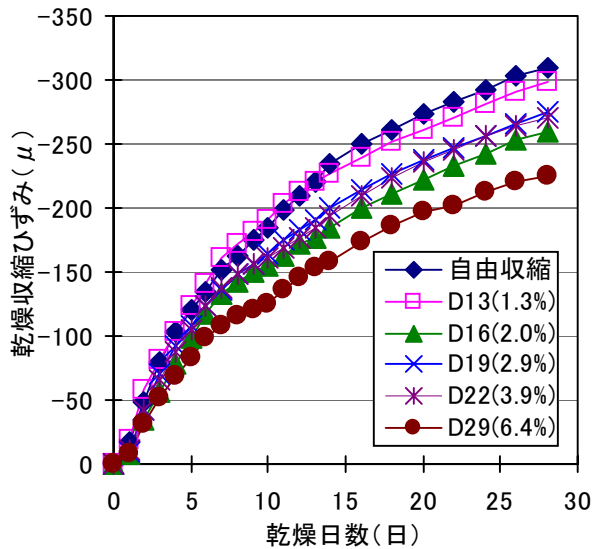
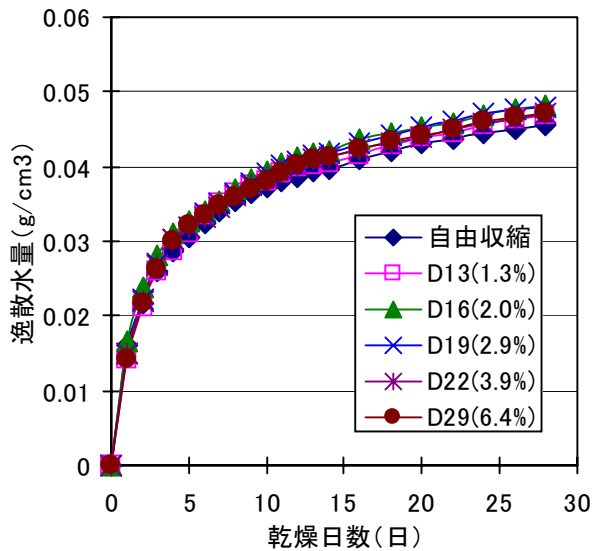


図-4 ひび割れ間隔の比較(シール無供試体)



(a) 長さ変化試験結果



(b) 重量変化試験結果

図-5 鉄筋の拘束による比較

### 3.4 鉄筋の拘束による比較

図-5(a)に鉄筋量を変化させた場合の乾燥収縮試験結果を示す。同図より鉄筋比の増加に伴い、コンクリートの乾燥収縮が減少していることがわかる。これは、鉄筋の拘束により乾燥収縮が抑制されたためであると考えられる。

鉄筋の拘束によるコンクリートの収縮の抑制はコンクリート表面に微細なひび割れが生じることにより行われると考えられる。図-5(b)に鉄筋量を変化させた場合の重量変化試験結果を示す。同図より、鉄筋量に関わらずどの供試体の重量変化も同じ傾向を示している。コンクリート表面に生じる微細なひび割れは、収縮を抑制する効果はあるが、そのひび割れからは水分の逸散が行われないため、逸散水量はどの供試体も同じとなると考えられる。

また、先述のようにコンクリート標準示方書 [設計編]においては、鉄筋比 1.0%の収縮ひずみは無筋コンクリートに比べ乾燥開始 3 日以内であれば、 $70 \times 10^{-6}$  の拘束効果があるとしている。しかし、自由収縮と D13 供試体との比較では両者にほとんど差はなく 1.0%程度の鉄筋比では、無筋コンクリートほぼ同じ値となった。これは、ひび割れの入った状態で生じたコンクリートの収縮に対しては、ひび割れの存在のために鉄筋のひずみ拘束作用が減少したためであると考えられる。

ひび割れ有供試体は、図-1 に示すようにひび割れ幅が無限に大きいときのひび割れ間コンクリートである。したがって、今回の実験では、ひび割れの入った状態で生じたコンクリートの収縮を測定したことになる。しかし、示方書ではひび割れのないコンクリートの収縮を定義しており、ひび割れの有無により鉄筋の拘束作用に大きな違いがあると考えられる。ひび割れの有無による鉄筋拘束作用を比較したグラフを図-6 に示す。同図より、ひび割れが生じることにより鉄筋の拘束作用が弱まることわかる。しかし、ひび割れ有供試体の標点は端部にあるた

め収縮量はひび割れ面の変形を示すものである。換言すれば、実験により得られたひび割れの有無による鉄筋拘束作用の違いは、測定位置（端部と中央部）の変形の違いを示すものである。これより、鉄筋比  $p = 1.3\%$ におけるひび割れ間コンクリートのひび割れ面（端面）の変形は、 $p = 0\%$ の自由収縮供試体（無筋コンクリート）の端面の変形と同様の傾向を示すことがわかる。したがって、鉄筋の拘束についても供試体端部と中央部では効果が異なり、中央部に比べ端面では鉄筋によって変形を拘束されることは少ないと考えられる。

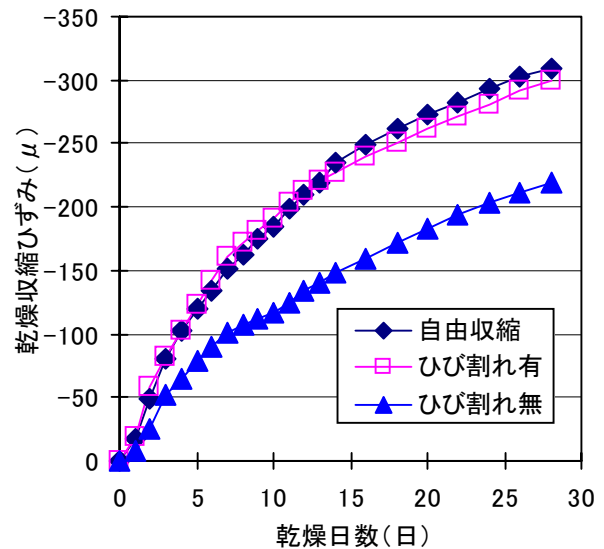


図-6 ひび割れの有無による鉄筋拘束の影響

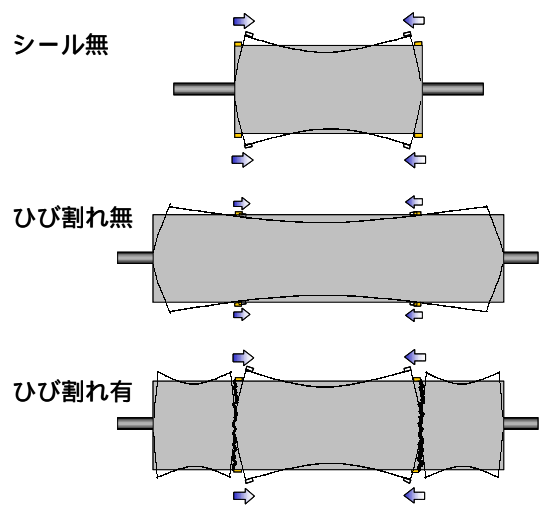


図-7 各供試体の乾燥後の変形

#### 4. ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮

棒状の供試体に軸方向の力を与えたとき、端部が中央部などその他の部位と違う変形（挙動）を生じることは、経験的に知られている。したがって、コンクリートが収縮することにより、軸方向に力が生じたと考えれば、端部は中央部より大きく変形する。一方、供試体の中央部での変形は図-1 に示すように端部から 100mm だけ離れた位置に標点があるため、端部の変形の影響を受けにくかったと考えられる。換言すれば、端部から 100mm（断面の代表寸法）程度離れば、端部の変形の影響はないといえる。

シール無，ひび割れ有，ひび割れ無供試体の乾燥後における変形の比較を行う。シール無供試体およびひび割れ有供試体はひび割れ面に沿った側面に標点を設置してある。一方，ひび割れ無供試体は部材中央部に標点がある。したがって，三者の乾燥収縮ひずみの差は，測定位置の違いにより生じたと考えられる。図-7 に乾燥後の各供試体における変形のモデル図を示す。

実験で用いたひび割れ無供試体は，端部から 100mm だけ離れた点を標点としているため，端部の変形の影響はほとんど受けない。一方，シール無，ひび割れ有供試体はひび割れ面（または端面）に沿った側面に標点を設けているため，端部の変形の影響を強く受ける。したがって，三者の乾燥収縮ひずみの差は，測定位置の違いにより生じたと考えられる。特に，シール無とひび割れ無供試体は同一供試体における測定ではないが，供試体の端部と中央部における変形の違いを比較していることになる。また，ひび割れを生じることにより，ひび割れ面も自由面（端面）と同じ変形を示すことがわかる。したがって，ひび割れ面からの乾燥がひび割れ間コンクリート側面の収縮量に及ぼす影響は極めて少ないが，ひび割れ面であるひび割れ間コンクリート端面は側面からの収縮の影響を強く受け，ひび割れ面は大きく変形する。そのため，部材中央部に比べ収縮量は大きくなり，ひび割れ幅

は増大すると考えられる。

また，シールの有無による比較からひび割れ面（端面）からの乾燥がひび割れ間コンクリート全体の収縮量に及ぼす影響は側面からの乾燥の影響に比べ極めて少ないことが明らかとなった。しかし，ひび割れ面であるひび割れ間コンクリートの端部は側面からの収縮の影響を強く受け，ひび割れ部は大きく変形する。そのため，部材中央部に比べ収縮量は大きくなり，ひび割れ幅は増大すると考えられる。

#### 5. まとめ

ひび割れ間コンクリートの乾燥収縮が長期曲げひび割れ幅に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし，鉄筋コンクリート供試体の乾燥収縮試験を行った。その結果，次のことが明らかとなった。

- (1) ひび割れを有することによるコンクリートの乾燥収縮は，ひび割れ面からの乾燥の影響を受けるため，部材中央部に比べ，収縮量は大きい。
- (2) ひび割れ面からの乾燥が部材全体の収縮量に及ぼす影響は少ないが，ひび割れ部は大きく変形するため，ひび割れ幅は増大する。
- (3) 鉄筋の拘束によるコンクリートの乾燥収縮の抑制はひび割れの存在のために拘束作用が減少することが確認された。

#### 参考文献

- 1) 李 振宝，大野義照，尚 自端，鈴木計夫：鉄筋コンクリート梁の長期ひび割れ幅，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.879-884，1997.6
- 2) 佐藤良一，氏家 勲，鈴木雅博，北條泰秀：鉄筋コンクリートの曲げ部材の長期変形挙動およびその解析法に関する研究，土木学会論文集，No.634/V-45，pp.27-41，1999.11
- 3) 土木学会：[平成 8 年度制定]コンクリート標準示方書 [設計編]，pp.26-29，1996.3

