

論文 乾湿繰り返しを受ける RC 部材の長期曲げひび割れ幅について

阿部 司^{*1}・佐藤 良一^{*2}・氏家 勲^{*3}・鳥取 誠一^{*4}

要旨：本研究は屋外および屋内において、およそ3年間にわたりRC部材の長期の曲げひび割れ幅の挙動を計測し、その特性について検討を加えたものである。長期の曲げひび割れ幅は主として乾燥収縮と鉄筋ひずみの増大によって増加し、載荷後3年における乾燥収縮ひずみが 300×10^{-6} の屋外では乾燥収縮に比例して、 600×10^{-6} の屋内では比例しては増加しなかった。その結果、乾燥収縮がひび割れ幅増加に寄与する割合の平均値は、屋外で71%、屋内で49%と屋外の方が屋内と比較して45%高かった。

キーワード：長期曲げひび割れ幅、環境条件、乾燥収縮、

1. まえがき

コンクリートの乾燥収縮が経時的な曲げひび割れ幅の増加に少なからず影響を及ぼすことは周知の事実である。CEB-FIP の MODEL CODE 90(MC90)では、ひび割れ幅増大に及ぼす乾燥収縮の影響として、鉄筋による拘束を無視し、自由乾燥収縮ひずみをそのまま取り入れている[1]。BSでは 600×10^{-6} 以上では自由乾燥ひずみの50%を鉄筋平均ひずみに加算することによって考慮している[2]。しかし、 600×10^{-6} 以下では無視してよいとしている。

一方、わが国の土木学会の標準示方書では、鉄筋腐食の防止に主眼をおいて、長期ひび割れ幅の増加は、コンクリートの乾燥収縮およびクリープの影響を 150×10^{-6} とすることによって考慮している。この考えは、鉄筋が腐食しやすくなる環境、すなわち水の供給があるか、あるいは湿度が高い環境下では、乾燥収縮はそれほど大きくなないという理由によるものであると考えられる。しかし、水の供給があり乾燥収縮ひずみがそれほど大きくな場合であっても、ひび割れ幅増加がそれに対応して小さくなれば、検討を要する可能性がでてくると思われる。

そこで、本研究では、変動温度下で水の供給がなくほぼ単調に乾燥収縮が進行する実験棟内と降雨・日射を受け、進行・回復を繰り返しながら乾燥収縮が進行する屋外の2環境下で、鉄筋比をパラメーターとするRC部材を用いて、3年にわたって計測した長期ひび割れ幅の特性とその機構について検討した。

表-1 コンクリートの配合

2. 実験概要

本実験では普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材は最大寸法13mm、比重2.62、F.M. 6.29、細骨材は比重2.60、F.M. 2.95である。

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 (g/m ³)	
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤	AE助剤
60	53	174	290	960	865	870	7.25

用いたコンクリートは水セメント比60%、単位セメント量290kg/m³で、配合は表-1に示すとおりである。引張鉄筋にはSD295Aの異形鉄筋D19およびD13を用いた。これらの弾性係数は200および198GPaである。実験に用いたRC部材供試体は20x25x240cmの矩形断面ばかりで、その断面図を図-1

*1 宇都宮大学学生 工学部建設学科 (正会員)

*2 宇都宮大学助教授 工学部建設学科、工博 (正会員)

*3 宇都宮大学助手 工学部建設学科、工博 (正会員)

*4 (財) 鉄道総合技術研究所 構造担当研究室主任研究員、工修 (正会員)

に、供試体の一覧を表-2に示す。また、RC供試体と同じ断面寸法を有する長さ50cmの無筋の乾燥収縮用供試

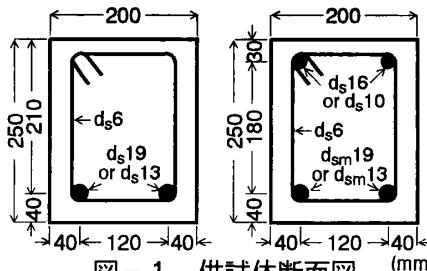


図-1 供試体断面図 (mm)

体も作製した。これら供試体は材齢35日の載荷時まで湿潤養生を行い、所定の荷重を与えると同時に屋内および屋外で乾燥を開始した。

図-2は載荷試験の方法を示しており、中央の純曲げ区間80cmでひび割れ幅および鉄筋ひずみの計測を行った。荷重は、Dm19-16とD19-0およびDm13-10とD13-0を抱き合わせて載荷し、表-2に計算値が示されているように、圧縮鉄筋のない部材の計算引張鉄筋応力度が200MPaになるように与えた。純曲げを与えた区間の40cmの範囲で、

2cmピッチで貼付したひずみゲージによって引張鉄筋ひずみを計測した。ひずみゲージは、ゲージ貼付による付着のみだれをなるべく少なくするために鉄筋の縦リブ位置に切削した4x3mmの溝に貼付し、防水処理した。その際、長期間での計測に耐えらるようポリエスチル樹脂系接着剤を用いて1日間加圧し、その後80°Cで12時間の養生を施した。ひび割れ幅の計測には設定荷重までの静的載荷においてはパイ型変位計(標点距離100mm、感度 $1950 \times 10^{-6}/\text{mm}$)を用い、その後、発生したひび割れを挟んで標点距離が20mmとなるよう引張鉄筋位置(下縁から4cm)にコンタクトストレインゲージ(精度 $1/1000\text{mm}$)で時間経過に伴うひび割れ幅の増加量の計測を行った。また、乾燥収縮ひずみは埋込型ひずみ計を用いて計測した。載荷時の圧縮強度および弾性係数は屋外で40.6MPa、31.2GPa、屋内で39.4MPa、30.1GPaであった。

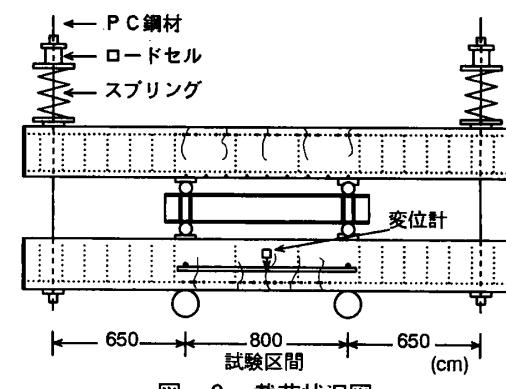


図-2 載荷状況図

表-2 供試体一覧

供試体名	環境条件	鉄筋引張-圧縮	A_s (cm^2)	p (%)	A'_s (cm^2)	p' (%)	$\sigma_{s,t}$ (MPa)	$\sigma_{e,c}$ (MPa)
Dm19-16	屋外	ds19-ds16	4.788	1.14	3.806	0.91	228.8	14.6
Dm19-16	屋内	ds19-ds16	4.788	1.14	3.806	0.91	229.1	14.3
D19-0	屋外	ds19-0	5.490	1.31	0	0	201.1	15.3
D19-0	屋内	ds19-0	5.490	1.31	0	0	201.4	15.1
Dm13-10	屋外	ds13-ds10	1.826	0.43	1.384	0.33	263.3	10.3
Dm13-10	屋内	ds13-ds10	1.826	0.43	1.384	0.33	263.7	10.2
D13-0	屋外	ds13-0	2.414	0.57	0	0	200.8	9.5
D13-0	屋内	ds13-0	2.414	0.57	0	0	201.0	9.4

Dm:溝切り鉄筋, $p = A_s/(bd) \times 100$, $p' = A'_s/(bd) \times 100$

$\sigma_{s,t}$:引張鉄筋応力度(計算値), $\sigma_{e,c}$:コンクリート上縁の応力度(計算値)

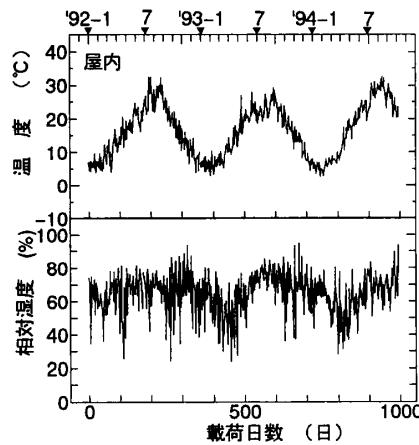


図-3 屋内の温湿度

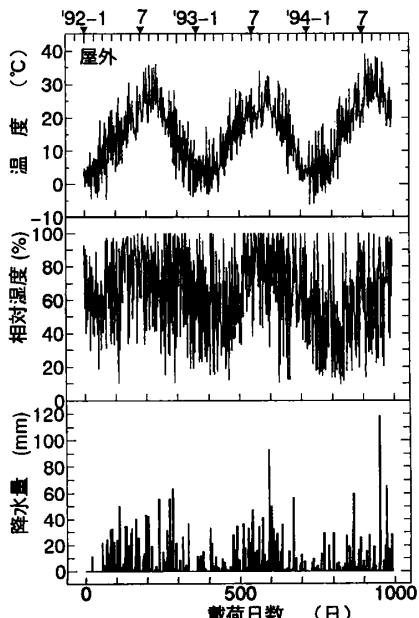


図-4 屋外の温湿度・降水量

3. 実験結果および考察

図-3、4は屋外および屋内の温度と相対湿度を、また

図-4には降水量をそれぞれ示している。屋内の試験期間中の平均温度は15.3°C、平均湿度は66.1%R.H.、屋外のそれは平均温度13.8°C、平均湿度69.1%R.H.であった。

図-5、6は、屋内外の乾燥収縮ひずみとコンクリート温度の経時変化を示したものである。乾燥収縮は、屋外のほうが屋内より小さく1000日で約1/2である。これは、降雨の影響により収縮ひずみの回復が顕著であるためである。同図にはMC90、ACI-209式[3]および阪田らの予測式[4][5]を用いた結果も示してある。これらの式はいずれも降雨の影響を考慮していないが、屋外の場合はMC90式が、屋内の場合は阪田らの予測式が最もよく一致している。

図-7、8は鉄筋比が大きい供試体Dm19-1、6、D19-0と小さい供試体Dm13-10、D13-0から得られた最大ひび割れ幅の経時変化を屋内と屋外とを比較して示したものである。なお、Dmの供試体のひび割れ幅が大きい傾向があるのは鉄筋に設けた溝の断面欠損によって鉄筋応力度が大きくなつたためである。また、載荷後一週間以降に新たに発生したひび割れ幅は小さいので無視している。最大ひび割れ幅の増加量は、鉄筋比が大きい19mm筋の場合、時間経過に伴う増加率は屋内の方が高い傾向にあり、乾燥収縮の屋内外での差の影響が認められる。一方、鉄筋比が小さい13mm筋の場合の増加率は屋外の方が大きく、ひび割れ間隔にも依存するため断定的にはいえないが、乾燥収縮が小さいことによって最大ひび割れ幅の増加量が必ずしも小さくならないことが示されてる。

次に、図-9、10は、図-7、8を用いてそれぞれの供試体の経時変化に伴う最大ひび割れ幅の増加量を示したものである。また、増加量の値が表-3に示されている。これらの図および表

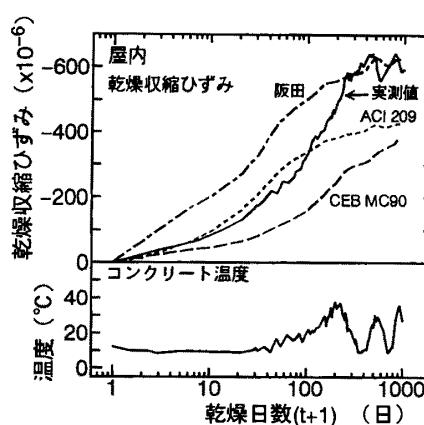


図-5 コンクリートの乾燥収縮

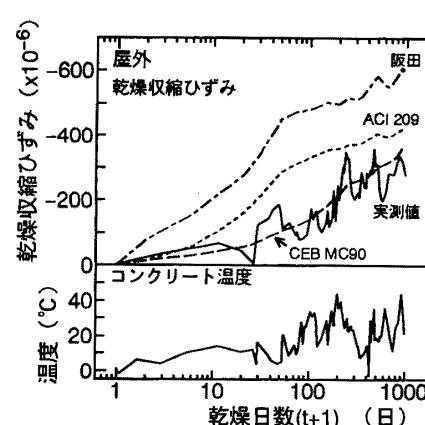


図-6 コンクリートの乾燥収縮

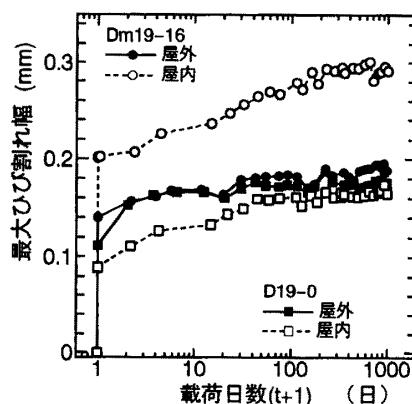


図-7 最大ひび割れ幅の経時変化

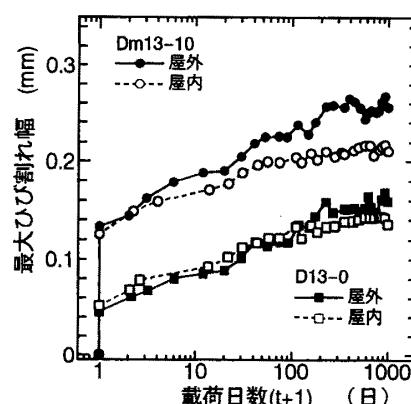


図-8 最大ひび割れ幅の経時変化

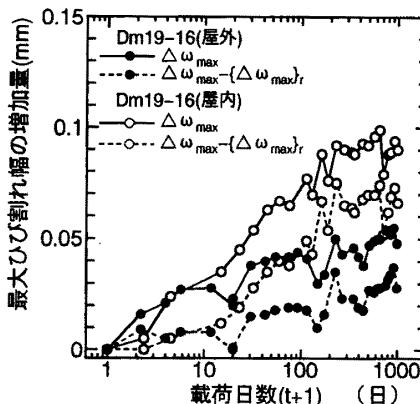


図-9 最大ひび割れ幅の増加量

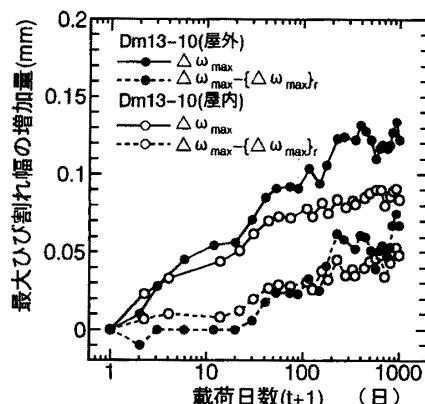


図-10 最大ひび割れ幅の増加量

によれば、Dm19、D19を用いた場合、載荷日数1000日の屋外の増加量は屋内の場合の54%、83%といずれも屋内よりは小さい。一方、Dm13、D13の場合は、屋外の値は屋内の144%、135%と大きい。この結果をみれば、屋外環境の影響は、最大ひび割れ幅に隣接するひび割れ間隔が屋内供試体の場合

より広い（表-3 参照）ことも手伝って、13mm筋を用いた場合に強く現れている。また、屋外の自由乾燥収縮が屋内のそれの1/2程度であることを考えれば、Dm19、D19を用いた場合にも屋外の方がひび割れ幅増加に及ぼす乾燥収縮の影響はより効率的といえよう。

ひび割れ断面での引張部コンクリートも引張応力を負担するので、鉄筋ひずみは、図-11に示すように、載荷後およそ20日まで経時的に増加する。従って、ひびわれ幅の増加は乾燥収縮に加えて鉄筋ひずみの増大によっても増加すると言えなければならない。そこで図-9、10には、 $\triangle\omega_{max} = \{\triangle\omega_{max}\}_{r} + \{\triangle\omega_{max}\}_{av}$ ($\triangle\omega_{max}\}_{r} = \triangle\varepsilon_{s,av}(l_r+l_i)/2$ で、 $\triangle\omega_{max}$ ：最大ひび割れ幅の増加量、 $\triangle\varepsilon_{s,av}$ ：鉄筋の平均ひずみの増加量、 l_r 、 l_i ：最大ひび割れ位置の両側それぞれのひび割れ間隔)によって、鉄筋ひずみによる増加量を実測のひび割れ幅の増加量から引いて求めた乾燥収縮によって増加したひび割れ幅も示している。鉄筋ひずみによる増加量は、上式に示されているように、最大ひび割れの両側のひびわれ間隔の平均値に鉄筋の平均ひずみの増加量を乗することによって求めている。図-11にも示しているように、鉄筋ひずみの最大値と平均値は、Dm13-10の新しいひびわれが生じ平均ひずみが急増する3日までの範囲を除けば、ほぼ平行に増加し、最大値と平均値はほぼ同一の増加量ということになるので、鉄筋ひずみの影響はどちらを用いても同じということになる。図-9、10に示されているように、ひび割れ幅増加に及ぼす鉄筋ひずみ増加と乾燥収縮の影響度は、19mm筋の場合、鉄筋ひずみ増加が25~40%、乾燥収縮が75~60%、13mm筋の場合、鉄筋ひずみ増加が約40%、乾燥収縮が約60%で、鉄筋ひずみ増加の影響度は無視し得ず、さらに鉄筋比の小さい13mm筋の方が19mm筋より大きい傾向にある。ただし、D19-0、D13-0の場合鉄筋ひずみを計測していないのでDm19-16、Dm13-10で実測した値を用いている。

表-3には、全供試体から得られた最大および平均ひび割れ幅の増加量が示されている。この表によれば、鉄筋比が大きい場合(1.14~1.31%)、最大および平均ひび割れ幅の増加量は共に屋内のもののが屋外のものより大きい。これに対し、鉄筋比が小さい場合(0.43~0.57%)は、屋外の方が大きい。これから、ひび割れ間隔にも当然依存するが、屋外では乾燥収縮は小さいがそれに対応してひび割れ幅の増加が小さくなるとは限らないことがわかる。

そこで、自由乾燥収縮がどの程度ひび割れ幅の増加に寄与しているかを調べるために、 $\{\triangle\omega_{max} - \triangle\varepsilon_{s,av}(l_r+l_i)/2\}/\{(l_r+l_i)/2\}$ により、自由乾燥収縮によって生じたひび割れ幅増加から逆

表-3 最大および平均ひび割れ幅の増加量

供試体名	環境条件	ひび割れ間隔(cm)		最大ひび割れ幅(mm)			平均ひび割れ幅(mm)		
		最大*	平均	0日	1000日	増加量	0日	1000日	増加量
Dm19-16	屋外	14.4	14.7	0.140	0.189	0.049	0.126	0.164	0.038
Dm19-16	屋内	16.5	16.4	0.202	0.292	0.090	0.145	0.208	0.063
D19-0	屋外	16.8	13.7	0.112	0.175	0.063	0.087	0.133	0.046
D19-0	屋内	15.4	12.0	0.089	0.165	0.076	0.071	0.120	0.049
Dm13-10	屋外	23.1	23.2	0.134	0.256	0.122	0.055	0.177	0.122
Dm13-10	屋内	15.0	16.3	0.126	0.211	0.085	0.080	0.181	0.121
D13-0	屋外	22.1	23.5	0.046	0.159	0.113	0.020	0.153	0.133
D13-0	屋内	15.9	14.2	0.052	0.136	0.084	0.017	0.108	0.091

最大*：最大ひび割れ幅に隣接する二つのひび割れ間隔の平均値

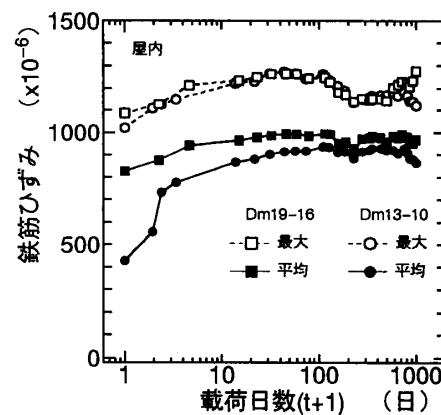


図-11 鉄筋ひずみの経時変化

算して部材のひび割れ間のひずみを求めた。これによって得られた代表的な結果を図-12、13に示す。これによれば、 300×10^{-6} までは、少々勾配の差はみられるが、屋内外とも自由乾燥収縮と共に比例的に増加することがわかる。屋内の場合、 600×10^{-6} まで収縮が増加しているが、 $300 \sim 600 \times 10^{-6}$ までの範囲では、 300×10^{-6} までの範囲より小さな勾配で増加し、鉄筋からの拘束の程度が高くなっていることが認められる。これに基づき、図中に $0 \sim 300 \times 10^{-6}$ と $300 \sim 600 \times 10^{-6}$

の範囲に分けて最小2乗法で求めた線を引いている。 $0 \sim 300 \times 10^{-6}$ の範囲では線は原点を通るとしている。ちなみに、自由乾燥収縮は、屋内の場合 300×10^{-6} における100日で達し、250日あたりでおよそ 600×10^{-6} に達した後、変動をしながら一定値に収束している。屋外の場合には200日で 300×10^{-6} に達し、その後は平均的には一定値を示している。

図-14、15は図-12、13に示した供試体について、自由乾燥収縮に対するひび割れ間のひずみの比（乾燥収縮比）の経時変化を示したものである。乾燥収縮比の大きな値はひび割れ増加における乾燥収縮の影響の程度が強く現れていることを意味している。図中には図-12、13の最小2乗法で得られた値も示している。

$\varepsilon_{(cs, max) s}$:最大ひび割れ幅の増加量より得られたひずみ

$\varepsilon_{(cs, ave) s}$:平均ひび割れ幅の増加量より得られたひずみ

$$\gamma_{max} = \varepsilon_{(cs, max) s} / \varepsilon_{cs}, \quad \gamma_{ave} = \varepsilon_{(cs, ave) s} / \varepsilon_{cs}$$

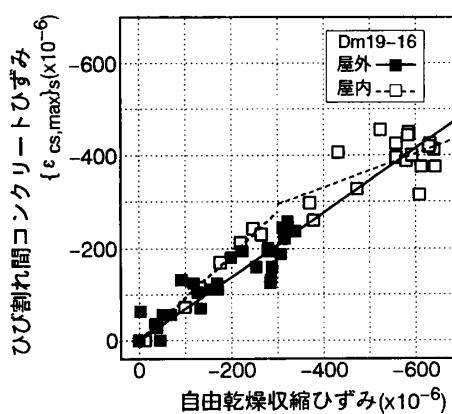


図-12 ひび割れ間コンクリートひずみと自由乾燥収縮ひずみとの関係

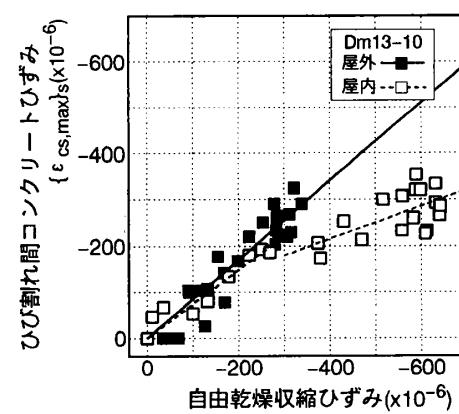


図-13 ひび割れ間コンクリートひずみと自由乾燥収縮ひずみとの関係

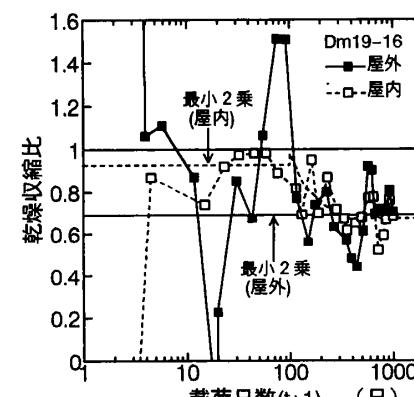


図-14 乾燥収縮比の経時変化

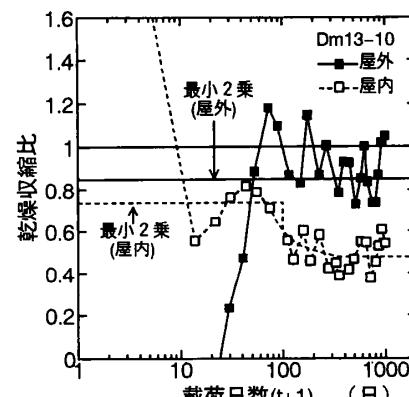


図-15 乾燥収縮比の経時変化

表-4 ひび割れ間コンクリートひずみと乾燥収縮ひずみの比

供試体名	環境条件	ε_{cs} ($\times 10^{-6}$)	$\varepsilon_{(cs, max) s}$ ($\times 10^{-6}$)	γ_{max}	$\varepsilon_{(cs, ave) s}$ ($\times 10^{-6}$)	γ_{ave}
Dm19-16	屋外	300	207	0.69	175	0.58
Dm19-16	屋内	300	278	0.93	178	0.59
Dm19-16	屋内	600	403	0.67	265	0.44
D19-0	屋外	300	240	0.80	195	0.65
D19-0	屋内	300	375	1.25	324	1.08
D19-0	屋内	600	347	0.58	274	0.46
Dm13-10	屋外	300	255	0.85	245	0.82
Dm13-10	屋内	300	222	0.74	118	0.39
Dm13-10	屋内	600	286	0.48	233	0.39
D13-0	屋外	300	177	0.59	189	0.63
D13-0	屋内	300	166	0.55	128	0.43
D13-0	屋内	600	275	0.43	258	0.43

$\varepsilon_{(cs, max) s}$:最大ひび割れ幅の増加量より得られたひずみ

$\varepsilon_{(cs, ave) s}$:平均ひび割れ幅の増加量より得られたひずみ

$$\gamma_{max} = \varepsilon_{(cs, max) s} / \varepsilon_{cs}, \quad \gamma_{ave} = \varepsilon_{(cs, ave) s} / \varepsilon_{cs}$$

（乾燥収縮比）の経時変化を示したものである。乾燥収縮比の大きな値はひび割れ増加における乾燥収縮の影響の程度が強く現れていることを意味している。図中には図-12、13の最小2乗法で得られた値も示している。30日あたりまではひび割れ幅増加が少なく、そのために大きなばらつきがみられるが、100日を越せば、屋内のDm19およびDm13はいずれも経過日数と共に放物線的に低下しその後一定値に収束する。一方、屋外の100日以降では、増減を繰り返しながらも平均的

には一定値に収束し、Dm13の場合は屋内より乾燥収縮の影響度が高いことがわかる。

表-4にはすべての供試体について、乾燥収縮が 300×10^{-6} と 600×10^{-6} のときの最大および平均ひび割れ幅から得られた乾燥収縮比が示されている。これをみれば、同一の収縮ひずみ 300×10^{-6} の時点では、19mm筋の場合、最大および平均ひび割れ幅から得られたどちらの乾燥収縮比とも、屋外は屋内より小さい傾向を示し、乾湿繰り返しの影響はみられない。しかし、 600×10^{-6} の時点では乾燥収縮比は 300×10^{-6} の時点より小さくなり、乾燥収縮ひずみに比例してひび割れ幅が増加しないことが認められる。これは、乾燥収縮ひずみが大きくなることによって、鉄筋の拘束が強く発揮されたためと思われる。一方、13mm筋の場合、 300×10^{-6} の時点においても乾燥収縮比は、特に平均ひび割れ幅の場合、屋外の方が屋内より大きい。 600×10^{-6} の時点では最大ひび割れ幅による屋内の乾燥収縮比は明らかに小さくなり、平均ひび割れ幅によれば 300×10^{-6} の時点と同じ値を示した。これから、乾湿繰り返しを受ける屋外環境は、13mm筋のように細径であれば、鉄筋の拘束を低下させ、ひび割れ幅の増大を引き起こしたと考えられる。また、鉄筋比あるいは鉄筋径の影響については、載荷日数1000日において、屋外の場合、最大ひび割れ幅による乾燥収縮比は、19mm筋で0.75、13mm筋で0.72、平均ひび割れ幅によるものは0.62、0.73、屋内の場合も同様にそれぞれ0.63、0.46、0.45、0.41となって、巨視的にみれば大きな影響は無いと考えられる。

4. 結論

およそ3年にわたり長期ひび割れ幅に及ぼす環境の相違を実験的に検討した。限られた実験の範囲ではあるが以下の結論が得られた。

- 1) 屋外の平均湿度は69%で屋内よりわずか4%大きいだけであったが、乾燥収縮ひずみは屋内の約1/2と小さく、乾燥収縮に及ぼす降雨の影響の大きいことが明かとなった。
- 2) ひび割れ幅の経時的な増大は、鉄筋ひずみの増大と乾燥収縮によってもたらされる。鉄筋ひずみの増大は、載荷後およそ20日までのひび割れ断面のコンクリートの引張応力の喪失が主な原因である。
- 3) 屋外の場合、ひび割れ間コンクリートのひずみの増加は乾燥収縮ひずみにほぼ比例した。一方、屋内の場合には、乾燥収縮ひずみの増加に伴うひび割れ間コンクリートのひずみの増加割合は乾燥収縮ひずみが 300×10^{-6} 以上で小さくなり、ひび割れ幅増加は乾燥収縮ひずみに比例しないことが認められた。この理由として鉄筋の拘束が 300×10^{-6} 以降強く発揮されたことが考えられる。
- 4) 3)の結果、巨視的にみれば、載荷後1000日におけるひび割れ幅増加に及ぼす乾燥収縮の影響度の平均値は、屋外で0.71、屋内で0.49と屋内に対し屋外の方が45%高かった。
- 5) ひび割れ幅増加に及ぼす乾湿繰り返しの影響は、乾燥収縮ひずみが 300×10^{-6} で13mm筋を用いた部材の特に平均ひび割れ幅の場合に認められた。しかし、D19mm筋を用いた部材の場合は認められなかった。

<参考文献>

- [1]CEB-FIP : Model Code 1990, CEB, 1990.
- [2]BS : Structural use of concrete, Part1, 1985
- [3]ACI Committee 209 : Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects on Concrete Structure, ACI-SP-76, 1982.
- [4]阪田憲次他 : コンクリートのクリープひずみの予測式の提案、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 10、No. 2、pp. 271-276、1988.
- [5]阪田憲次他 : コンクリートの乾燥収縮ひずみ予測式の提案、セメント・コンクリート論文集、No. 43、pp. 244 -249、1989.