

論文 斜め筋による鉄筋コンクリート開口壁の乾燥収縮ひび割れ 抑止効果に関する基礎的研究

渡部 嘉^{*1}・山田 和夫^{*2}・山本 俊彦^{*3}・小林 健^{*4}

要旨：本研究では、鉄筋コンクリート開口壁の乾燥収縮ひび割れに対する斜め筋の拘束効果を明らかにすることを目的として一連の検討を行った。その結果、斜め筋の設置はコンクリートのひび割れを抑止するのに極めて有効であること、コンクリートの乾燥収縮ひび割れの発生・進展に伴う拘束応力の解放程度は、乾燥収縮ひび割れ開口変位量に依存すること、本FEM解析手法を用いることによってコンクリートの乾燥収縮ひび割れ抑止に対する斜め筋の効果を合理的に説明できること、などが明らかとなった。

キーワード：鉄筋コンクリート、乾燥収縮、ひび割れ幅、斜め筋、有限要素解析

1. はじめに

既報[1-3]では、コンクリートの乾燥収縮に起因するひび割れの発生・進展挙動を解明するための基礎的研究として、二軸拘束下にある実物大のプレーンおよび鋼纖維補強コンクリート開口壁モデル試験体を用いた実験を実施し、コンクリートのひび割れ発生・進展挙動に及ぼす鋼纖維の影響について調査するとともに、破壊力学パラメータを導入した有限要素法を適用して解析的な面からも検討を行い、いくつかの有用な知見を得た。

本研究では、これら一連の研究の延長として、鉄筋コンクリート開口壁の乾燥収縮ひび割れに対する斜め筋の拘束効果を明らかにすることを目的として、実験的および解析的に検討を行った

2. 実験方法

2.1 試験体

本実験では、表-1に示す形状・寸法の試験体を用いて斜め筋無しおよび斜め筋入り鉄筋コンクリートに関する乾燥収縮およびクリープ実験を行った。

(1)乾燥収縮ひび割れ測定用試験体：図-1に示すように、外寸法が2900×2900×300mmで試験体中央部に700×700mmの開口（開口率：17.0%）が設けてあるH型鋼（公称寸法：300×300mm）製拘束フレーム付実大開口壁モデル試験体を2体製作した。いずれの試験体も、コンクリート部（寸法1700×1700×100mm）にはD6異形鉄筋が150mm間隔で複配筋（かぶり厚さ10mm）してあり、開

表-1 試験体寸法一覧

試験体	開口壁試験体	クリープ用試験体	自由収縮用試験体
外寸法(mm)	2900×2900×300	100×100×400	100×100×400, 500×500×100
内寸法(mm)	2000×2000×100	—	—

*1 東急建設(株)東関東支店建築部 (正会員)

*2 愛知工業大学助教授 工学部建築学科、工博 (正会員)

*3 東急建設(株)技術研究所建築研究部建築構造研究室室長、工博 (正会員)

*4 愛知工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻 (正会員)

口部四隅の対角線方向には深さ10mmのひび割れ誘発スリットが両面に設けてある。また、製作した試験体のうち1体には、ひび割れ抑止用の斜め筋（D13異形鉄筋）が開口部四隅に設けてある。なお、H型鋼にはコンクリートとのズレ防止および付着力を増大させるために、 $\phi 16$ のスタッドを120mm間隔で設けるとともに、 $\phi 9$ 筋がフランジ部に120mm間隔で溶接している。

（2）自由収縮およびクリープひずみ測定用試験体

自由収縮ひずみ測定用として500X500X100mmの平板試験体（体積／露出面積比=35.7mm）および

100X100X400mm角柱試験体（体積／露出面積比=22.2mm）、クリープひずみ測定用として100X100X400mm角柱試験体をそれぞれ2体製作した。なお、平板試験体のうちの1体には、D6異形鉄筋が150mm間隔で複配筋（かぶり厚さ10mm）してある。

（3）管理用試験体：強度確認用試験体として、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱試験体（圧縮強度および割裂引張強度確認用）および100X100X400mm角柱試験体（曲げ強度確認用）を各3個一組として必要個数製作した。なお、試験材齢は1、4および13週の3種類（材齢26および52週は継続中）とした。

2.2 試験体の製作および養生方法

試験体の製作に際しては、普通ポルトランドセメント、猿投産の山砂（最大寸法=5mm、比重=2.56）、猿投産の山砂利（最大寸法=25mm、比重=2.61）およびAE減水剤を使用した。コンクリートの調合は、呼び強度を 210kgf/cm^2 （水セメント比（W/C）=60%）、設計スランプを18cmに設定して試し練りによって決定した。本実験で用いたコンクリートの調合表を表-2に示す。

試験体は、コンクリート

W/C (%)	標準調合(kg/m ³)					設計スランプ(cm)	設計空気量(%)
	水	セメント	砂	砂利	混和剤		
60	169	282	845	955	0.564	18.0	3.0

打設後試験体脱型までの1週間は日に2回の散水による湿布養生、試験体脱型後は実験室内での空中養生とした。

2.3 計測方法

開口壁試験体では、前掲の図-1に示すように、H型鋼の各辺の両面中央部（図中のA、B、CおよびD部）に検長100mmのモールドゲージを取り付けてH型鋼によるコンクリート壁の拘束力を調べるとともに、開口部四隅の両面（図中の①、②、③および④部）にパイゲージを取り付けてひび割れ開口幅の測定を行った。また、ひび割れ抑止用の斜め筋を入れた試験体では、斜め筋のひずみの測定も行った。自由収縮ひずみ測定用およびクリープひずみ測定用試験体では、試験体中央部に検長100mmのモールドゲージを1個設置して、ひずみ量の経時変化を調べた。ただし、クリープ試験は、載荷材齢を1週、載荷応力レベルを材齢1週での圧縮強度の1/3に設定して実施した。これらのデータは、いずれもデータロガーおよび自記記録装置を用いて自動計測した。な

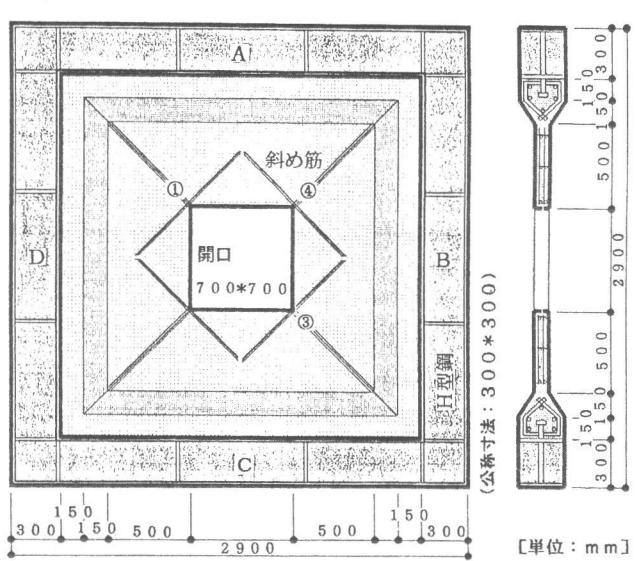


図-1 実大開口壁モデル試験体

[単位: mm]

お、圧縮、割裂引張および曲げ強度試験は、原則としてそれぞれJIS A1108、JIS A1113およびJIS A1106の規定に準じて行った。

3. 解析方法

本研究では、前報[3]と同様に破壊力学パラメータを導入したFEM解析方法を適用して乾燥収縮ひび割れの発生・進展挙動の追跡を行った。本研究で用いた解析モデルの要素分割およびひび割れ要素に用いた引張軟化モデルを、それぞれ図-2および図-3に示す。本解析では、ひび割れ要素以外の要素は何れも弾性状態にあるものと仮定し、斜め筋は線材としてモデル化して鉄筋とコンクリートとの滑りは無視した。解析は、増分材齢を5日に設定した増分解析とし、本実験によって得られた各材齢ごとのコンクリートの自由収縮ひずみ増分値を各コンクリート要素に初期ひずみとして与え、材齢100日まで解析を行った。ただし、RC部分については、鉄筋量によりコンクリートの自由収縮ひずみ量を低減させた[4]。なお、本解析ではクリープの影響は考慮していない。

4. 結果とその考察

図-4は、コンクリート打設時から材齢100日までの期間における試験体養生室内の温度および湿度の経時変化を示したもので、この間の温度および湿度の範囲は、それぞれ約8~33°Cおよび約37~88%であった。表-3に本実験に用いたコンクリートの材料試験結果を一覧表にして示す。

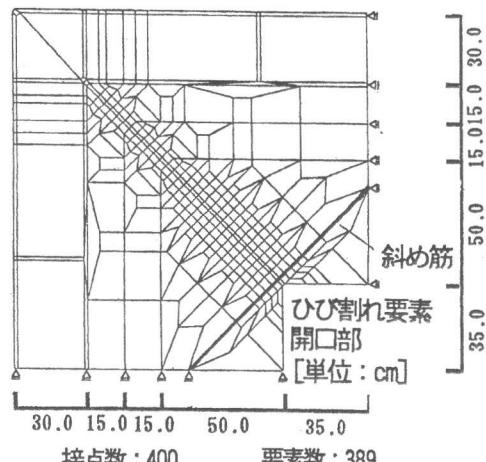


図-2 試験体のモデル化

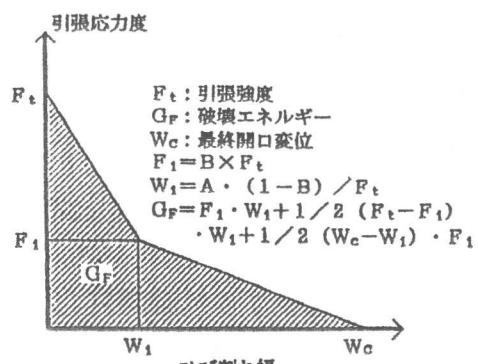


図-3 2直線引張軟化モデル

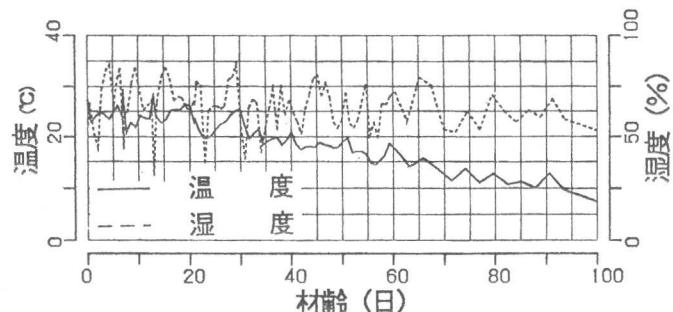


図-4 温度および湿度の経時変化

表-3 材料特性

材齢 (週)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	比重	破壊エネルギー (kgf/cm)	ヤング率 (kgf/cm ²)	ポアソン比
1	169	22.6	31.9	2.27	0.230	2.24×10^5	0.18
4	263	28.4	35.6	2.21	0.235	2.85×10^5	0.18
13	277	26.3	43.5	2.17	0.222	2.58×10^5	0.17

4.1 自由収縮およびクリープひずみの経時変化

図-5は、500X500X100mm平板試験体によって得られた無筋および鉄筋コンクリートの自由収縮ひずみ(ϵ_c)と材齢(Age)との関係を示したものである。この図によれば、無筋コンクリートよりも鉄筋コンクリートの方が自由収縮ひずみ量が小さく、かつ材齢が大きくなるに従ってそ

の差が大きくなっている。材齢100日の時点では約17%の差がある。なお、 $100 \times 100 \times 400$ mm角柱試験体によって得られた無筋コンクリートの自由収縮ひずみは、図-6に示すように、材齢100日で約 1050μ と図-5に示した結果と比較すると約 500μ の相違があり、自由収縮ひずみ量は、試験体の形状・寸法の違いによってかなり相違することがわかる。

図-7は、 $100 \times 100 \times 400$ mm角柱試験体によって得られた無筋コンクリートのクリープ試験結果（加力時の瞬間弾性ひずみ+クリープひずみ+自由収縮ひずみ）を示したものである。材齢4週の時点におけるクリープ係数は0.71（クリープひずみ= 154μ 、瞬間弾性ひずみ= 217μ ）となり、昨年度[3]行った結果（1.07）と比較して若干小さい値となっている。

4.2 拘束ひずみの経時変化

図-8は、開口壁試験体のH型鋼製拘束枠で測定した拘束ひずみ（ ϵ_f ）と材齢（Age）との関係を示したもので、図(a)が斜め筋無し、図(b)が斜め筋入りの鉄筋コンクリートに対する結果である。これらの図によれば、拘束ひずみ（ ϵ_f ）の変化傾向は、コンクリート打設時から材齢1週程度までの間では斜め筋の有無にかかわらずほぼ同様であるが、その後の挙動は斜め筋の有無によって著しく相違しているのがわかる。すなわち、斜め筋無しの場合（図(a)参照）には、材齢13日で急激な拘束ひずみの解放が生じているが、斜め筋入りの場合（図(b)参照）には、斜め筋無しの場合のような明確な拘束ひずみの解放は認められず、拘束ひずみは徐々に増大しており、材齢100日の時点では、斜め筋の有無によって拘束ひずみに最大で約60%の差が生じている。このことは、

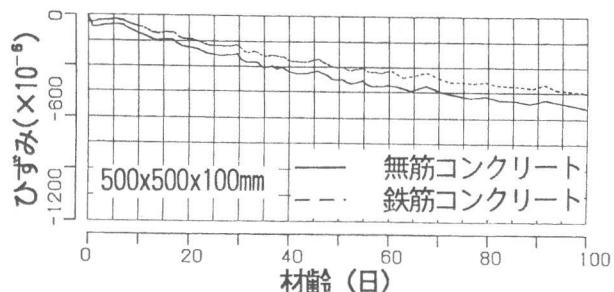


図-5 自由収縮ひずみの経時変化

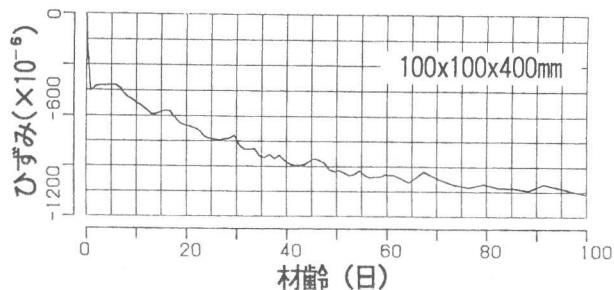


図-6 自由収縮ひずみの経時変化

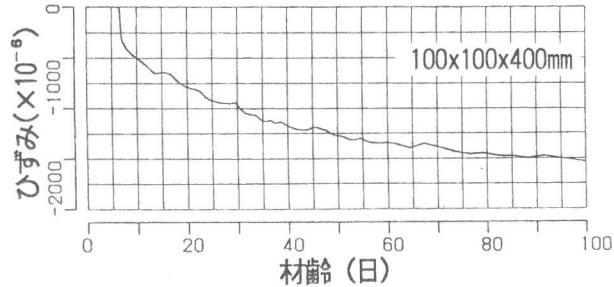
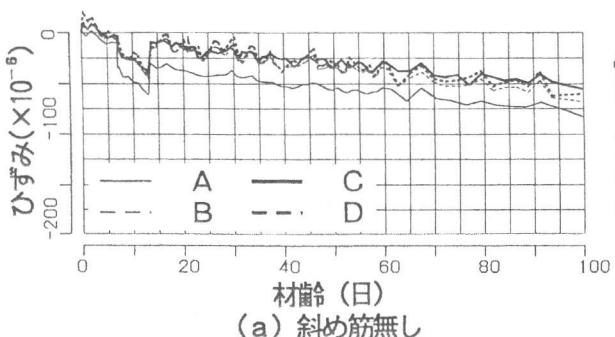
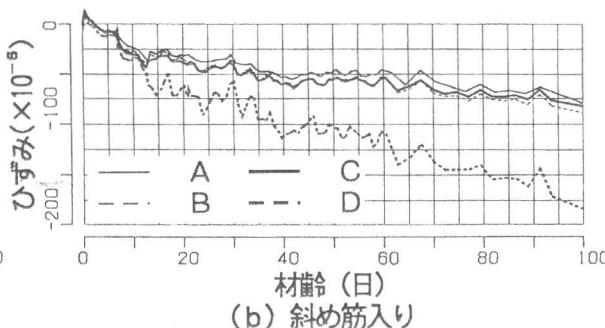


図-7 クリープ試験結果の経時変化



(a) 斜め筋無し



(b) 斜め筋入り

図-8 H型鋼製拘束枠の拘束ひずみの経時変化

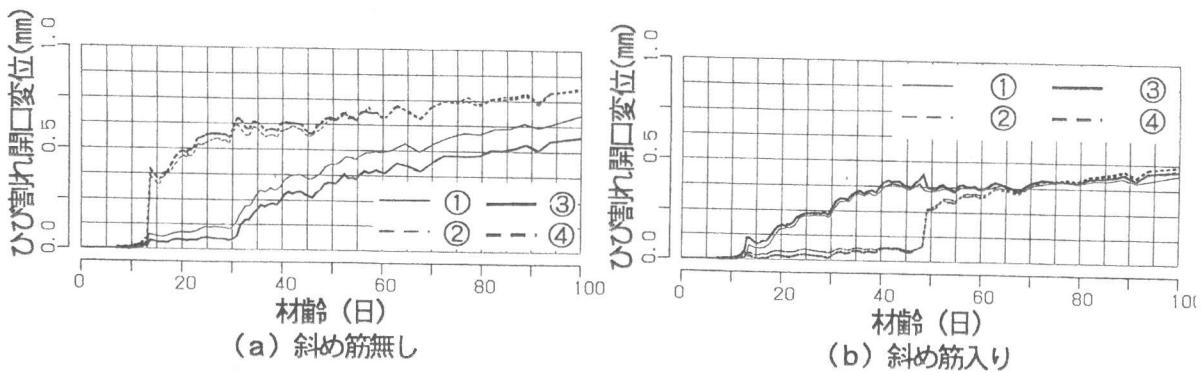


図-9 ひび割れ開口変位の経時変化

斜め筋を入れることによってひび割れの発生に伴う応力解放が小さくなっていることを意味している。

4.3 ひび割れ開口変位の経時変化

図-9(a)および(b)は、それぞれ斜め筋無しおよび斜め筋入りの試験体の開口部四隅から15mmの位置に設置したパイゲージによって計測されたひび割れ開口変位(COD)と材齢(Age)との関係を示したものである。図によれば、斜め筋の有無にかかわらずコンクリート打設後13日で1回目の急激な開口変位の増大が認められ、この時点を境にして対角線方向ごとに開口変位の変化傾向が異なったものとなっている。ただし、この時点における斜め筋入り試験体の開口変位の増大量は、斜め筋が無い場合の約30%程度である。また、斜め筋無しの場合には、その20日後の材齢32日で、斜め筋入りの場合には、それよりも17日遅い材齢48日でかなり急激な2回目の開口変位の増大が観察されるが、これ以後の範囲では開口変位の急激が増大は認められず、緩やかに増大している。材齢100日の時点における開口変位の最大値は、斜め筋無しの場合が0.8mmであるのに対して斜め筋入りの場合が0.5mmであり、斜め筋の有無によって1.6倍程度の差が認められるこのことから、斜め筋がコンクリートの乾燥収縮ひび割れの開口を抑止するのに有效であるといえる。

4.4 斜め筋ひずみの経時変化

図-10は、斜め筋入り試験体によって得られた斜め筋のひずみ(ϵ)と材齢(Age)との関係を示したものである。この図によれば、材齢13日で一組の対角線方向の斜め筋のひずみが急激に増大しており、最初の乾燥収縮ひび割れの発生がこの時点であったことを示している。また、その日から35

日後の材齢48日にもう一方の対角線方向の斜め筋のひずみが極めて急激に増大し、その方向のひび割れがかなり急激に発生・進展したことを示唆している。一方、この急激なひび割れの発生・進展の結果、最初にひび割れが発生していた側の斜め筋のひずみは、全方向の斜め筋のひずみが同程度となるまで急激に減少しており、この方向のひび割れ幅が小さくなっていることを示している。なお、これ以後の範囲における斜め筋のひずみは、前掲の図-9の傾向と同様に、緩やかに増大している。

4.5 ひび割れ開口変位に関する実験結果と解析結果との比較

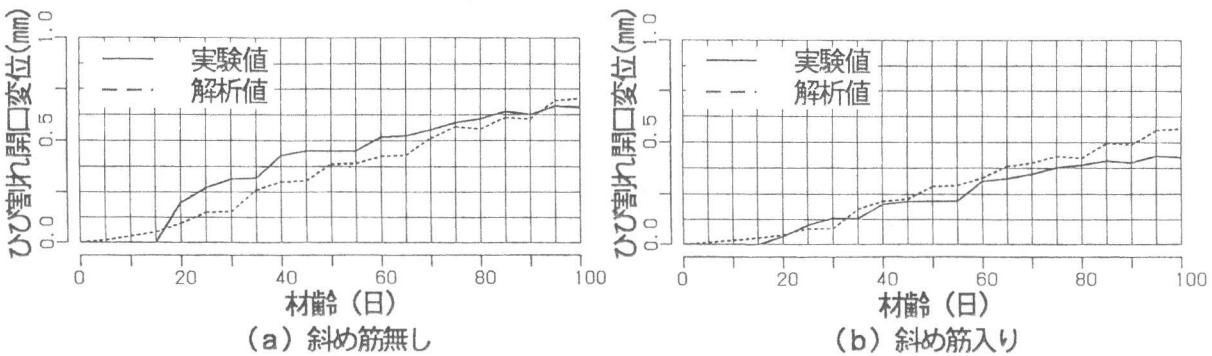


図-11 ひび割れ開口変位に関する実験値と解析値との比較

図-11(a)および(b)は、それぞれ斜め筋無しおよび斜め筋入りの実大開口壁モデル試験体によって得られたひび割れ開口変位(COD)と材齢(Age)との関係に関する実験結果とFEM解析の結果とを比較したものである。ただし、図中の実験値は、前掲の図-9で示した①～④の測定値の平均値がプロットしてある。これらの図によれば、前報[3]で示した結果の場合と同様に、ひび割れ開口変位に関する実験値と解析値は、斜め筋の有無にかかわらず全体的によく一致しており、本解析で用いた斜め筋の取扱い方法が妥当であったことを示している。従って、本解析手法を用いることによってコンクリートの乾燥収縮ひび割れ抑止に対する斜め筋の効果を合理的に説明できることを示している。

5. 結 論

本研究では、斜め筋によるコンクリートの乾燥収縮ひび割れ抑止効果を実験的および解析的に検討した。本研究によって得られた結果を要約すると、およそ次のようにまとめられる。

- 1) 斜め筋の設置は、コンクリートのひび割れ幅を抑止するのに極めて有効であり、その効果は斜め筋が無い場合の約1.6倍である。
- 2) コンクリートの乾燥収縮ひび割れの発生・進展に伴う拘束応力の解放は、斜め筋無しの場合にはある特定の時点で急激に生じるが、斜め筋入りの場合には徐々に解放される。
- 3) 乾燥収縮ひび割れの発生・進展部分に破壊力学的概念を導入した有限要素法による解析の結果は、斜め筋を有する試験体によって得られた実験結果ともよく一致する。

謝 辞

実験および実験結果のデータ整理に際して御助力を得た愛知工業大学学部学生の森 光紀君、猪飼雅彦君および熊切早苗嬢に謝意を表します。

引用文献

- 1) 山田和夫・山本俊彦・渡部 憲・小林 健：鋼纖維によるコンクリートの乾燥収縮ひび割れ抑止効果に関する実験的研究（その1：実験概要および使用コンクリートの材料特性）、日本建築学会東海支部研究報告集、第32号、pp.49-52、1994.2
- 2) 山田和夫・山本俊彦・渡部 憲・小林 健：鋼纖維によるコンクリートの乾燥収縮ひび割れ抑止効果に関する実験的研究（その2：実験結果）、日本建築学会東海支部研究報告集、第32号、pp.53-56、1994.2
- 3) 渡部 憲・山田和夫・山本俊彦・小林 健：鋼纖維によるコンクリートの乾燥収縮ひび割れ抑止効果に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp.597-602、1994.6
- 4) 大島久次・池永博威：鉄筋により拘束される場合のコンクリートの乾燥収縮、セメント・コンクリート、Vol.314、pp.17-23、1973.4