

論文 高強度鉄筋コンクリート開口壁の収縮ひび割れに関する基礎的研究

小林 健*¹・山田 和夫*²・山本 俊彦*³・今本 啓一*⁴

要旨：本研究では、高強度コンクリートの収縮ひび割れの発生・進展状況の調査を目的として一連の検討を行った。その結果、 $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$ のコンクリートは、 600kgf/cm^2 のコンクリートに比べて収縮ひずみは大きい、収縮ひび割れの発生は遅れること、高強度コンクリートは、常用コンクリートに比べて収縮ひび割れが特定箇所に集中する傾向を示すこと、本FEM解析手法を用いることによって高強度鉄筋コンクリートの収縮ひび割れ発生・進展過程を合理的に追跡できること、などが明らかとなった。

キーワード：高強度コンクリート、収縮、ひび割れ幅、破壊力学、有限要素解析

1. はじめに

筆者らは、これまでに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繊維補強コンクリート開口壁、並びに斜め筋によって補強された鉄筋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繊維および斜め筋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た解析を行い、解析的な面からも検討を行った^{1)・2)}。また、コンクリートの乾燥収縮機構をコンクリート内部の水分移動のレベルから検討することを目的として、4面乾燥状態にあるコンクリート内部の水分移動と乾燥収縮の追跡および内部強度の発現状況と含水率との関係について調査した³⁾。

本報では、これら一連の研究の延長として、乾燥状態に置かれた高強度コンクリートの収縮ひび割れの発生・進展状況の解明を目的として、実験的および解析的に検討を行った。

表-1 試験体寸法一覧

2. 実験方法

2.1 試験体

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		

本実験では、

表-1に示す形状・寸法の試験体を用いて目標強度 (F_c) を600および 1000kgf/cm^2 の2種類に設定した高強度コンクリートに関する収縮およびクリープ実験を行った。

(1) 収縮ひび割れ測定用試験体：図-1に示すように、外寸法が $2900\times 2900\times 300\text{mm}$ で試験体中央部に $700\times 700\text{mm}$ の開口（開口率：17.0%）が設けてあるH型鋼（公称寸法： $300\times 300\text{mm}$ ）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 $1700\times 1700\times 100\text{mm}$ ）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。

*1 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）

*2 愛知工業大学助教授 工学部建築学科、工博（正会員）

*3 大同工業大学教授 工学部建設工学科、工博（正会員）

*4 東急建設（株）技術研究所建築研究部建築材料研究室（正会員）

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間隔で溶接してある。

(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500×500×100mmの平板試験体をコンクリート強度に応じて各2体、100×100×400mm角柱試験体を各1体、クリープひずみ測定用として100×100×400mm角柱試験体を各2体製作した。なお、平板試験体のうちの各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。

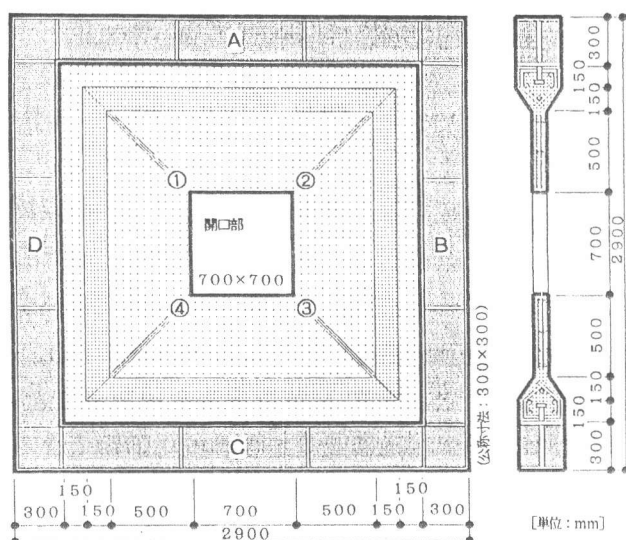


図-1 実大開口壁モデル試験体

(3) 管理用試験体：強度確認用試験体として、 $\phi 100 \times 200$ 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100×100×400mm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、豊田産の山砂（最大寸法=2.5mm、

表-2 コンクリートの調合表
(a) $F_c = 600 \text{ kgf/cm}^2$ の場合

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	シリカフューム	混和剤 (%)		
33.0	165	500	670	1025	—	1.3	21.0	2.0

(b) $F_c = 1000 \text{ kgf/cm}^2$ の場合

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	シリカフューム	混和剤 (%)		
27.5	165	500	556	1025	100	1.5	23.0	2.0

表乾比重=2.55)、瀬戸産の山砂利（最大寸法=25mm、表乾比重=2.60）、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤、エジプト産シリカフューム（平均粒径=0.2 μm 、真比重=2.23）を使用した。コンクリートの調合は、目標強度を600および1000 kgf/cm^2 （水結合材比=33.0および27.5%）、設計スランプをそれぞれ21および23cm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、コンクリート打設後試験体脱型までの1週間は1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、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。なお、上記の計測のうち、自由収縮およびH型鋼のひずみはコンクリート打設直後、開口変位およびクリープひずみは材齢1週から計測を開始した。

3. 解析方法

本研究では、既報^{1), 2)}と同様の破壊力学パラメータを導入したFEM解析方法を適用して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。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（乾燥収縮+自己収縮）ひずみ増分値を各コンクリート要素に初期ひび割れとして与え、材齢125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⁾。

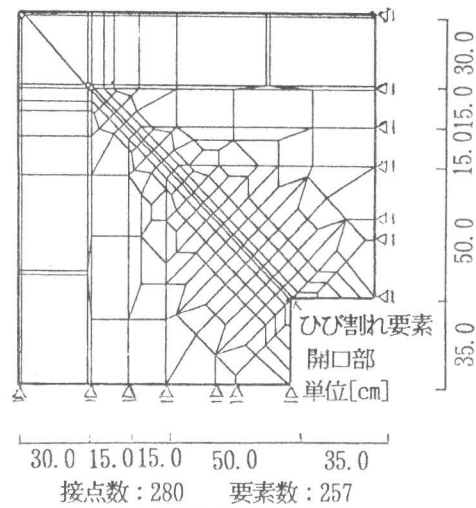


図-2 試験体のモデル化

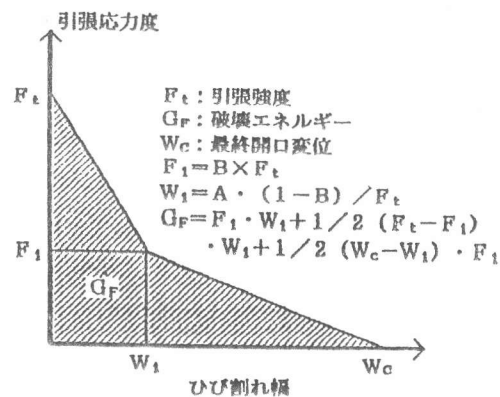


図-3 2直線引張軟化モデル

4. 結果とその考察

図-4は、現在までの時点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5~37°Cおよび約30~89%であった。表-3に、本実験で用いたコンクリートの材料試験結果を示す。

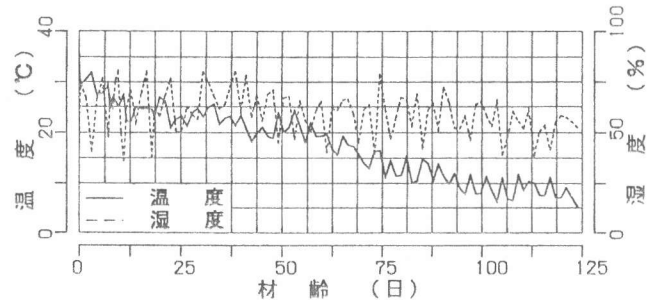


図-4 温度および湿度の経時変化

表-3 材料試験結果
(a) $F_c = 600 \text{ kgf/cm}^2$ の場合

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	545	39.7	40.2	2.40	0.328	3.33×10^5	0.16
4	607	49.5	51.5	2.38	0.373	3.14×10^5	0.16
13	631	51.8	71.1	2.41	0.598	3.56×10^5	0.16

(b) $F_c = 1000 \text{ kgf/cm}^2$ の場合

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	677	56.4	49.4	2.33	0.390	3.20×10^5	0.16
4	707	62.3	52.9	2.33	0.416	3.60×10^5	0.16
13	742	60.5	56.1	2.32	0.636	3.51×10^5	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、500×500×100mm平板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と材齢との関係を示したものである。この図によれば、材齢125日の時点における自由収縮ひずみは、 $F_c=600\text{kgf/cm}^2$ の場合が 590μ 、 $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$ の場合が 740μ であり、コンクリート強度が大きいほど自由収縮ひずみ量が大きく、その差は約 150μ となっている。また、図-6は、鉄筋コンクリートの自由収縮ひずみと材齢との関係を示したものであるが、この場合には自由収縮ひずみに及ぼすコンクリート強度の影響が無筋コンクリートの場合に比べて小さくなっており、材齢125日の時点で約 20μ の差（ $F_c=600\text{kgf/cm}^2$ の場合が 530μ 、 $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$ の場合が 550μ ）となっている。ところで、昨年行ったコンクリート強度が 240kgf/cm^2 の場合には、材齢125日の時点での自由収縮ひずみは、無筋コンクリートが約 570μ 、鉄筋コンクリートが約 470μ であった。したがって、コンクリート強度が大きくなるほど自己収縮ひずみが増大し、自由収縮ひずみ量も大きくなる傾向にあるといえる。なお、 $100\times 100\times 400\text{mm}$ 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-7に示すように、材齢125日の時点で $F_c=600\text{kgf/cm}^2$ の場合が約 660μ 、 $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$ の場合が約 1100μ と、前掲の図-5に示した結果と比較してそれぞれ約 70μ および 360μ の相違があり、自由収縮ひずみ量は試験体の形状・寸法によって相違している。特に、コンクリート強度が大きくなるほど試験体の形状・寸法の影響が著しくなっているのがわかる。

図-8は、 $100\times 100\times 400\text{mm}$ 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実験結果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、 $F_c=600\text{kgf/cm}^2$ の場合が1.64、 $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$ の場合が1.36であった。

4.2 拘束ひずみの経時変化

図-9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と材齢との関係を示したもの

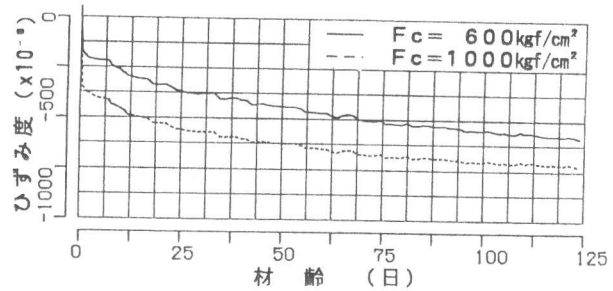


図-5 無筋コンクリートの自由収縮ひずみの経時変化 (500×500×100mm試験体)

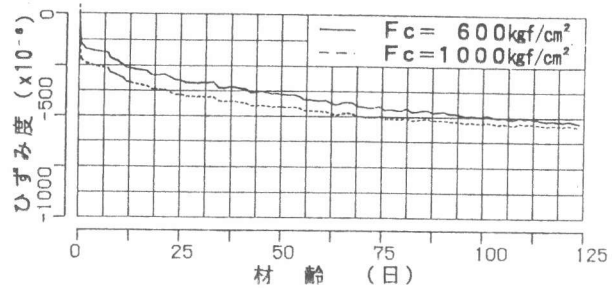


図-6 鉄筋コンクリートの自由収縮ひずみの経時変化 (500×500×100mm試験体)

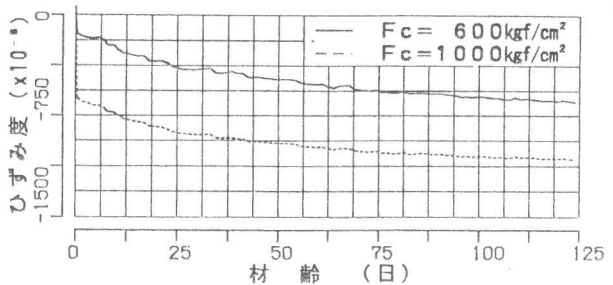


図-7 無筋コンクリートの自由収縮ひずみの経時変化 (100×100×400mm試験体)

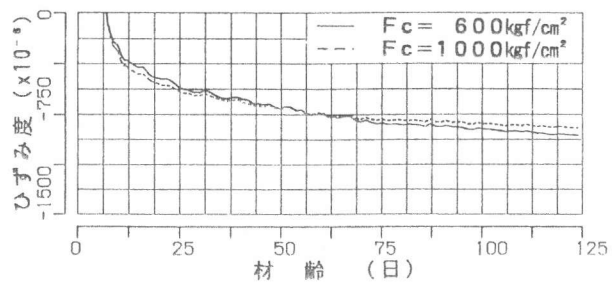
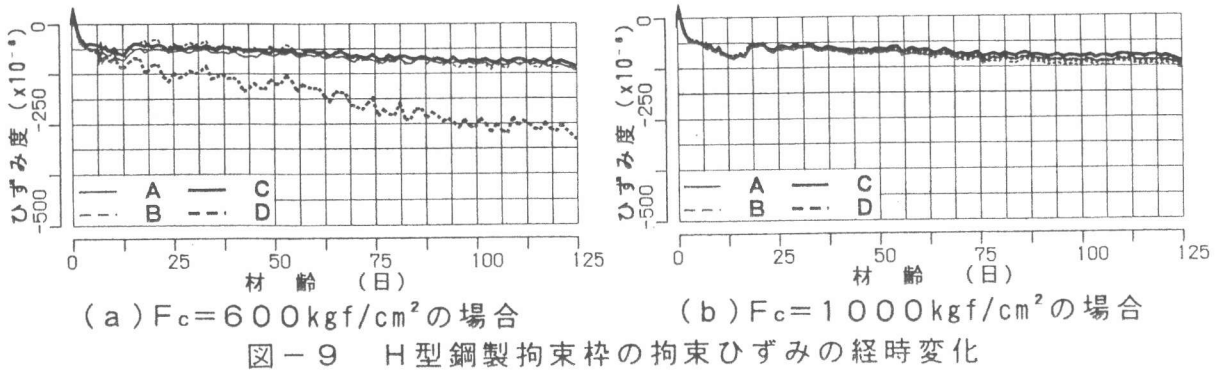
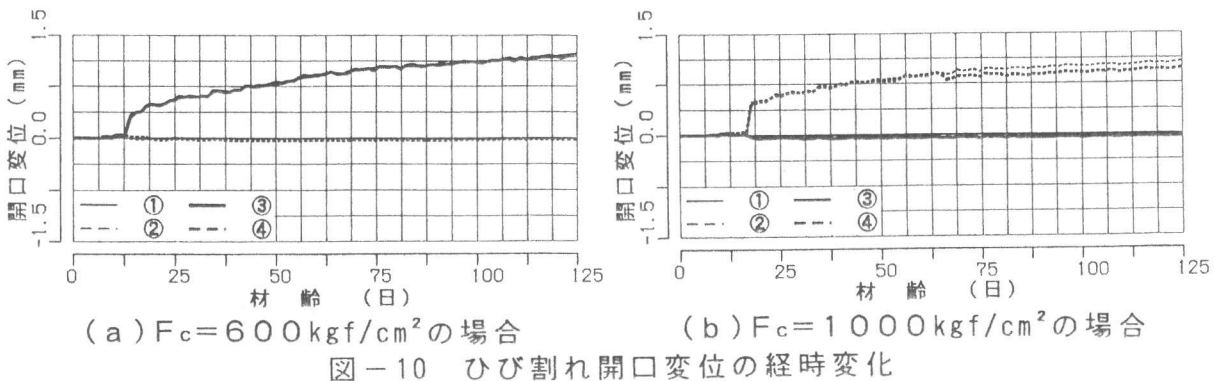


図-8 無筋コンクリートのクリープひずみの経時変化 (100×100×400mm試験体)



で、図(a)が $F_c = 600 \text{ kgf/cm}^2$ 、図(b)が $F_c = 1000 \text{ kgf/cm}^2$ の場合に対する結果である。これらの図によれば、拘束ひずみの変化傾向は、コンクリート打設時から材齢1週程度までの間は、コンクリート強度にかかわらずほぼ同様であるが、その後の挙動はコンクリート強度によって相違しているのがわかる。すなわち、 $F_c = 600 \text{ kgf/cm}^2$ の場合には材齢13日で急激な拘束ひずみの解放が生じているが、 $F_c = 1000 \text{ kgf/cm}^2$ の場合にはそれよりも4日後の材齢17日で拘束ひずみの解放が生じている。このことは、コンクリート強度が大きくなることによって収縮ひずみは増大するが、ひび割れの発生は遅れることを意味している。



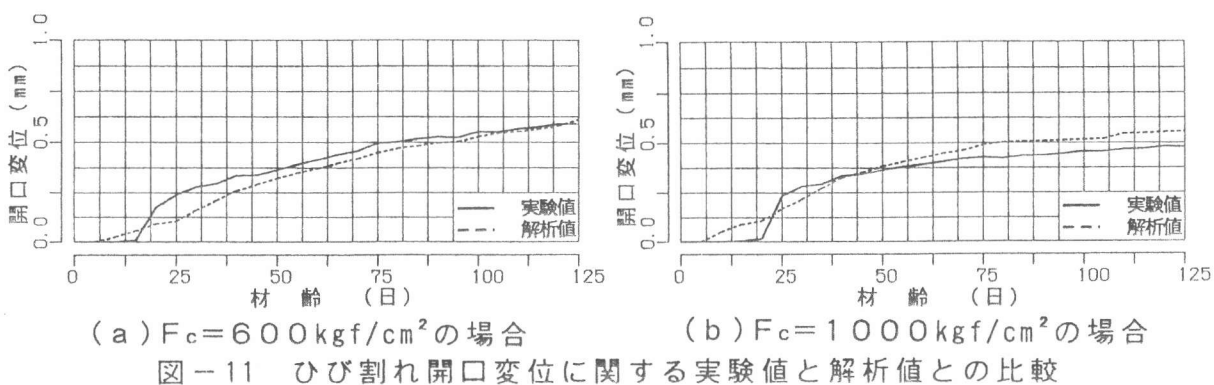
4.3 ひび割れ開口変位の経時変化

図-10(a)および(b)は、開口壁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と材齢との関係を示したもので、図(a)が $F_c = 600 \text{ kgf/cm}^2$ 、図(b)が $F_c = 1000 \text{ kgf/cm}^2$ の結果である。これらの図によれば、 $F_c = 600 \text{ kgf/cm}^2$ の場合には、コンクリート打設後13日で急激に開口変位が増大しているが、 $F_c = 1000 \text{ kgf/cm}^2$ の場合には、その日から4日後の材齢17日に急激な開口変位の増大が認められ、それぞれこの時点を経境にして開口変位はコンクリート強度にかかわらず一方の対角線方向にのみ増大していき、もう一方の対角線方向については開口変位の増大が全く認められない傾向を示している。なお、この開口変位の増大が観察される材齢は、図-9に示したH型鋼製拘束ひずみが急激に解放された材齢とも対応している。また、材齢125日における一方の対角線方向の開口変位は、 $F_c = 600 \text{ kgf/cm}^2$ の場合が約1.2mm、 $F_c = 1000 \text{ kgf/cm}^2$ の場合が約1.1mmであり、 $F_c = 1000 \text{ kgf/cm}^2$ のコンクリートの方がひび割れの発生が遅れた分だけ開口変位も若干小さくなっているが、その差は無視できる程度である。ところで、昨年行ったコンクリート強度が 240 kgf/cm^2 の場合には、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生じ、その後の材齢32日にひび割れの入っていない側に2回目の開口変位の増大が認められ、材齢125日の開口変位は約0.9mmであった。このことから、コンクリート強度

が大きいほど収縮ひび割れが特定箇所に集中する傾向を示し、応力再分配によるひび割れの分散化傾向が期待できないといえる。

4.4 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は、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と材齢との関係に関する実験結果とFEM解析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-10で示した①～④の測定値の平均値（ひび割れが発生している方向の開口変位は、もう一方の対角線方向にひび割れが発生していないことによって、①～④の開口変位が同値である場合と比較して大きくなっている。本研究では、若干の問題はあるが、この影響を取り除いて実験結果と試験体の対称性を考慮して解析した結果とを比較できるようにするために実測値を平均化した）がプロットしてある。図によれば、既報^{1)・2)}で示した結果の場合と同様に、高強度コンクリートの収縮ひび割れ開口変位に関する実験値(平均)と解析値とは全体的によく一致しているといえる。



(a) $F_c = 600 \text{ kgf/cm}^2$ の場合

(b) $F_c = 1000 \text{ kgf/cm}^2$ の場合

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

5. むすび

本研究では、高強度コンクリートの収縮ひび割れ発生・進展状況を実験的および解析的に調査した。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) $F_c = 1000 \text{ kgf/cm}^2$ のコンクリートは、 $F_c = 600 \text{ kgf/cm}^2$ のコンクリートに比べて収縮ひずみは大きい、収縮ひび割れの発生は遅れる。
- 2) 高強度コンクリートは、常用コンクリートと比較して収縮ひび割れが特定箇所に集中する傾向を示し、応力再分配によるひび割れの分散化傾向が乏しい。
- 3) 収縮ひび割れの発生・進展部分に破壊力学概念を導入した本有限要素解析法は、高強度コンクリートの収縮ひび割れの追跡に対しても適用可能である。

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千北達也君、藤江恭治君および小野木和康君に謝意を表します。

引用文献

- 1) 渡部 憲・山田和夫・山本俊彦・小林 健：鋼繊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
- 2) 渡部 憲・山田和夫・山本俊彦・小林 健：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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.17、No.1、pp.609-614、1995.6
- 3) 小林 健・山田和夫・山本俊彦：コンクリート内部の水分移動に起因した乾燥収縮および強度発現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.17、No.1、pp.633-638、1995.6
- 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