

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破壊力学的考察

FRACTURE MECHANICS APPROACH ON CONFINEMENT EFFECT BY STEEL FIBER FOR DRYING SHRINKAGE CRACKING OF CONCRETE

山田 和夫
Kazuo YAMADA

ABSTRACT In this study, plain and steel fiber reinforced concrete walls were tested to clarify the cracking behavior due to the drying shrinkage of concrete from the approach based on a fracture mechanics. Following results were obtained:

- 1) The volume fraction of steel fiber in a concrete is controlled exactly by the fabrication method used in this experiment.
- 2) A steel fiber is effective in order to improve the ductility of concrete after the crack opening. The stress release by the shrinkage cracking is very affected by the kind of concrete.
- 3) The effect of kind of concrete on the cracking behavior due to the drying shrinkage of concrete can be explained rationally as a result of the difference of fracture energy.

1. はじめに

コンクリート構造物において、コンクリートの乾燥収縮が原因で発生するひび割れは、構造物の耐久性を低下させるばかりでなく、意匠的にもその価値を大きく低下させるため、乾燥収縮ひび割れの発生機構を解明することは、その制御方法を確立するうえでも極めて重要である。しかし、その発生機構および影響因子は極めて複雑であることが知られており[1]-[3]、構造物におけるひび割れ対策も経験的なものが多く、根本的な解決策とはなっていない。

そのため、本研究では、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、最近注目を集めている破壊力学的[4]な立場から解明することを目的とした基礎的研究として、まず二軸拘束下にある実物大のブレンおよび鋼繊維補強コンクリ

ート開口壁モデル試験体を用いて、コンクリートのひび割れ発生・進展挙動に及ぼす鋼繊維の影響について実験的に検討を行うとともに、破壊力学パラメータを導入した有限要素法（以下、FEMと略記する）を適用して、解析的な面からも検討を加えた。

2. 実験方法

2.1 試験体

本実験では、表-1に示す試験体を用いてブレンおよび鋼繊維補強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に示すような外寸法が $2900 \times 2900 \times 300$ mmのH型鋼(公称寸法: 300×300 mm)製拘束フレーム付実大開口壁モデル試験体を用いた。コンクリート部の寸法は、 $1700 \times 1700 \times 100$ mmで、試験体中央部に 700×700 mmの開口(開口率: 17.0%)が設けてある。ま

表-1 試験体寸法一覧

試験体	外寸法(mm)	内寸法(mm)
開口壁試験体	2900x2900x300	2000x2000x100
自由収縮試験体	500x500x100	—
クリープ用試験体	100x100x400	—

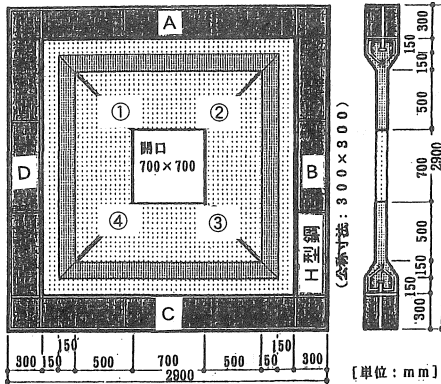


図-1 実大開口壁モデル試験体

た、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。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、φ16のスタッドを120mm間隔で設けるとともに、φ9筋がフランジ部に120mm間隔で溶接してある。試験体は、プレーンおよび鋼繊維補強コンクリートに対して各1体製作した。

(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500×500×10mm平板、クリープひずみ測定用として 100×100×400mm角柱試験体を用いた。試験体個数は、いずれもコンクリート種類ごとに各2個の計4個とした。

(3) 管理用試験体

強度および破壊エネルギー確認用試験体として、φ100×200mm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(曲げ強度および破壊エネルギー確認用)を各3個一組

表-2 コンクリートの調合表
(a) プレーンコンクリート

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	185	308	888	845	1.3	18.0	4.0

(b) 鋼繊維補強コンクリート

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(%)			鋼繊維
60	184	306	883	840	1.3	78.5	18.0	4.0

として必要個数製作した。なお、100×100×400mm角柱試験体については、幅が2mmで深さをはりせいの1/2に設定したノッチ入り試験体も同時に製作した。

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=2.57)、猿投産の山砂利(最大寸法=10mm、比重=2.60)、A E減水剤、消泡剤および両端せん断型フック付きスチールファイバー(断面:0.5mm角、長さ:30mm)を使用した。コンクリートの調合は、水セメント比(W/C)を60%、鋼繊維体積混入率(Vf)を0または1%、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。本実験で用いたプレーンおよび鋼繊維補強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 測定方法

(1) ひび割れ開口変位および収縮・クリープひずみの測定

開口壁モデル試験体では、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。データは、データロガーおよび自記録装置を用いて自動計測した。なお、クリープ試験は、載荷材令を1週および載荷応力レベルを材令1週での圧縮強度の1/3に設定して実施した。

(2) 強度および破壊エネルギーの測定

圧縮、割裂引張および曲げ載荷は、原則としてJIS A1108、JIS A1113およびJIS A1106の規定に準じて行ったが、鋼繊維補強コンクリートの曲げ載荷における最大耐力以降の載荷速度については、たわみ速度が曲げスパンに対して1/1500/min.となるように載荷した[5]。ただし、曲げ強度確認用試験体では、破壊エネルギーを求めるために、ノッチ無し

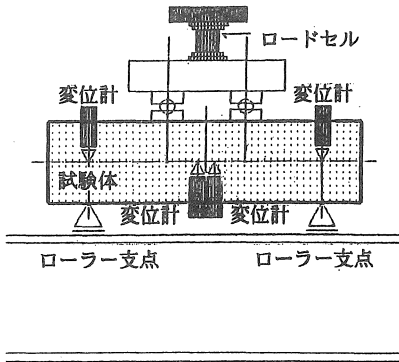


図-2 荷重方法

試験体が荷重および中央たわみ、ノッチ入り試験体が荷重、中央たわみおよびノッチ先端における開口変位も測定した。なお、荷重および各変位データは、動ひずみ計およびデジタル・データレコーダ（サンプリング速度=2000点/秒）を使用して取り込むとともに、X-Yレコーダで同時記録させた。図-2に、一例としてノッチ無し試験体の曲げ荷重方法、並びに荷重および変位の計測位置を示す。

3. 解析方法

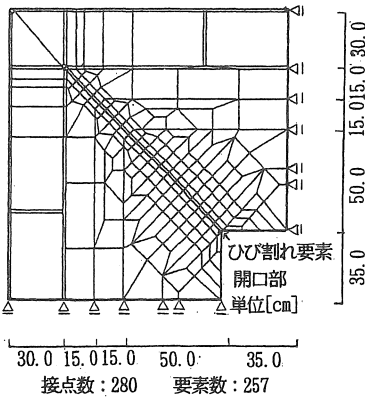


図-3 試験体のモデル化

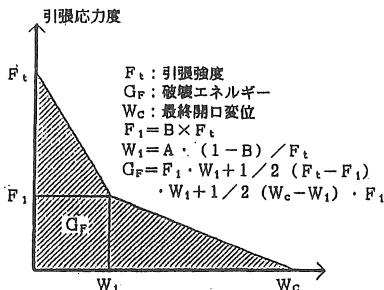


図-4 2直線引張軟化モデル

$$F_t: \text{引張強度}$$

$$G_f: \text{破壊エネルギー}$$

$$W_c: \text{最終開口変位}$$

$$F_1 = B \times F_t$$

$$W_1 = A \cdot (1 - B) / F_t$$

$$G_f = F_1 \cdot W_1 + 1/2 (F_t - F_1) \cdot W_1 + 1/2 (W_c - W_1) \cdot F_1$$

本研究では、乾燥収縮ひび割れの発生・進展挙動を解析的に追跡するために、破壊力学パラメータを導入したFEM解析を行った。解析モデルは、開口壁モデル試験体の対称性を考慮して1/4モデルとし、図-3に示すような要素分割とした。コンクリートおよびH型鋼は4節点アイソパラメトリック要素、ひび割れ発生・進展部分はポンド要素によってモデル化した。なお、構成素材の構成則として、コンクリートおよびH型鋼は等方弾性モデル、ひび割れ要素は図-4に示すような2直線引張軟化特性を有する直交異方性分布ひび割れモデルを用いた。また、引張軟化モデルの導入は、仮想ひび割れモデルにおける破壊エネルギーと分布ひび割れモデルにおける破壊エネルギーとが等価となるように考慮して行った。解析は、増分材令を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令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、材令150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[6]。

4. 結果とその考察

4.1 試験体の養生環境

図-5は、コンクリート打設時から材令156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ある。この図から明らかなように、養生室内の日平均温度および湿度は、材令156日までの範囲ではあまり急激な変化は認められないが、温度および湿度の日変化はかなり激しいことがわかる。

4.2 材料特性

表-3は、本実験に用いたコンクリートの材料試

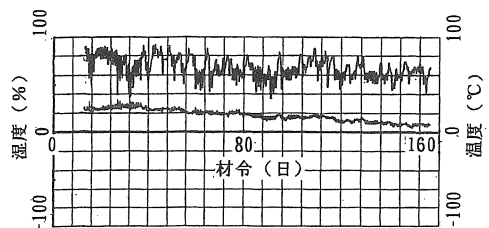


図-5 温度および湿度の経時変化

表-3 材料特性
(a) プレーンコンクリート

材令(週)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	破壊エネルギー Gr (kgf/cm)	比重	ヤング率 (kgf/cm ²)
1	256	26.6	34.2	0.122	2.27	2.32×10 ⁵
4	349	31.2	39.4	0.156	2.24	2.69×10 ⁵
13	383	31.7	51.7	0.172	2.20	2.83×10 ⁵

(b) 鋼繊維補強コンクリート

材令(週)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	破壊エネルギー Gr (kgf/cm)	比重	ヤング率 (kgf/cm ²)
1	244	25.6	35.6	7.067	2.29	2.48×10 ⁵
4	330	30.8	54.2	8.980	2.27	2.56×10 ⁵
13	371	33.6	57.2	11.402	2.25	2.67×10 ⁵

験結果を一覧表にして示したものである。この表によれば、圧縮強度および割裂引張強度は、コンクリートの種類にかかわらずほぼ同じ値を示し、かつ材令の経過とともに増大していく傾向を示している。また、RILEMの方法に準じて算定した破壊エネルギー値 (Gr) も試験材令が大きくなるにつれて増大する傾向を示している。なお、鋼繊維補強コンクリートの破壊エネルギー値は、プレーンコンクリートの約58~66倍となっており、破壊じん性が著しく優れていることがわかる。

4.3 自由収縮およびクリープひずみの経時変化

図-6は、500×500×100mm試験体によって得られたプレーンおよび鋼繊維補強コンクリートの自由収縮ひずみ (ε_c) と材令 (Age) との関係を示したものである。この図によれば、乾燥材令が4週間後までの自由収縮ひずみ量は、プレーンコンクリートよ

りも鋼繊維補強コンクリートの方が小さくなっているが、それ以後の自由収縮ひずみ量は、逆にプレーンコンクリートよりも鋼繊維補強コンクリートの方が大きくなっており、材令156日の時点で約5%の相違が認められる。

図-7は、100×100×400mm試験体によって得られたプレーンおよび鋼繊維補強コンクリートのクリープ試験の結果を示したものである。この図によれば、材令4週までの間ではクリープ試験結果に及ぼすコンクリート種類の影響はほとんど認められないが、材令4週以降になると、鋼繊維補強コンクリートのクリープひずみは、プレーンコンクリートのそれと比較して相対的に大きくなっている。

4.4 ひび割れ進展状況

図-8は、実大開口壁モデル試験体のH型鋼製拘束枠で測定した拘束ひずみ (ε_r) と材令 (Age) との関係を示したもので、図(a)がプレーンコンク

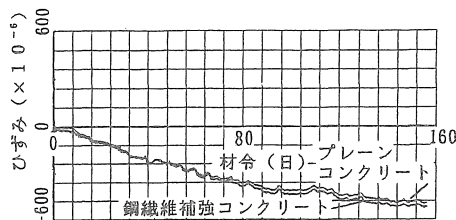


図-6 コンクリートの自由収縮ひずみの経時変化

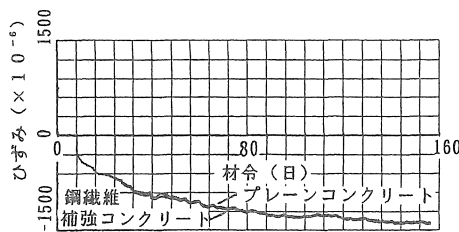
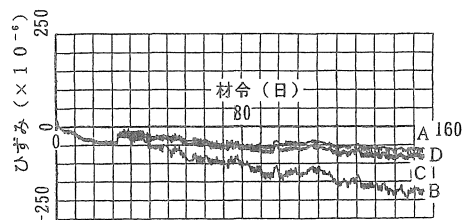
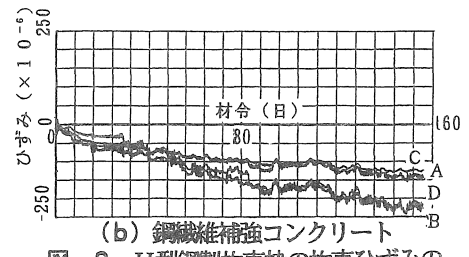


図-7 コンクリートのクリープひずみの経時変化



(a) プレーンコンクリート



(b) 鋼繊維補強コンクリート

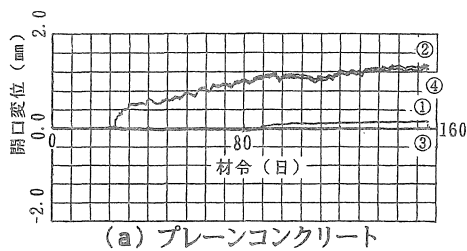
図-8 H型鋼製拘束枠の拘束ひずみの経時変化

リート、図 (b) が鋼繊維補強コンクリートの結果である。これらの図によれば、拘束ひずみ (ϵ_f) は、計測位置およびコンクリート種類にかかわらずコンクリート打設時から材令 4 週程度までの間は、圧縮方向 (負側) に増大していくが、それ以降の範囲になると拘束ひずみの変化の傾向はコンクリートの種類によってかなり相違している。すなわち、プレーンコンクリート (図 (a)) の場合には、材令 30 日で急激な拘束ひずみの解放が生じているが、鋼繊維補強コンクリート (図 (b)) の場合には、プレーンコンクリート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いる。このことは、鋼繊維補強コンクリートはプレーンコンクリートと比較してひび割れの発生に伴う応力解放が小さいことを意味している。なお、プレーンコンクリートで観察された拘束ひずみが急激に解放された材令は、前掲の図-5 によれば、温度がかなり高く、湿度が著しく低下した日と対応している。JIS原案[7]では、乾燥収縮ひび割れ発生時を拘束収縮ひずみが50%まで戻った時点と定義しているが、この定義に従えば、この時点がプレーンコンクリートのひび割れ発生時となる。ただし、測微鏡によって観察された初期ひび割れは、材令24日であった。

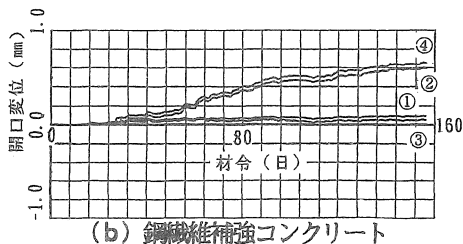
図-9 (a) および (b) は、それぞれプレーンおよび鋼繊維補強コンクリート製実大開口壁モデル試験体の開口部四隅から 1.5cm の位置に設置したパイゲージによって計測されたひび割れ開口変位 (COD) と材令 (Age) との関係を示したものである。図によれば、コンクリートの種類にかかわらずコンク

リート打設後15日で1回目の急激な開口変位の増大が認められる。なお、この材令15日は、前掲の図-5によれば、高温・低湿な日と対応している。また、プレーンコンクリートの場合には、その5日後の材令20日で2回目の急激な開口変位の増大が観察されるが、鋼繊維補強コンクリートでは開口変位の急増は認められない。さらに、プレーンコンクリートでは、H型鋼製拘束枠の拘束ひずみが急激に解放された材令30日で3回目の急激な開口変位の増大が観察され、それまでほぼ同じ値を示していた開口部四隅の開口変位は、この時点を超え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。すなわち、前掲の図-1で示した計測位置2および4では、開口変位が急増しているのに対して、計測位置1および3の開口変位は逆に急減している。しかし、鋼繊維補強コンクリートの場合には、上記の材令よりも数日遅れの材令32日で2回目の急激な開口変位の増大が認められる。なお、鋼繊維補強コンクリートにおいても、対角線方向ごとで開口変位の変化傾向が相違する現象は観察されるが、その差はプレーンコンクリートほど著しくはない。材令156日の時点における開口変位の最大値は、プレーンコンクリートが1.33mm、鋼繊維補強コンクリートが0.65mmであり、コンクリートの種類によって2倍以上の差が認められる。このことから、鋼繊維は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非常に有効であるといえる。

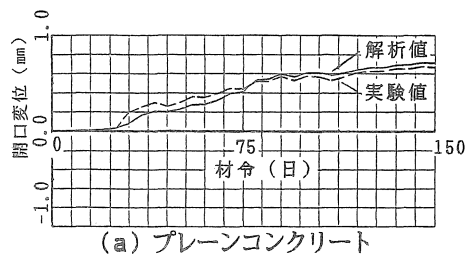
図-10 (a) および (b) は、それぞれプレーン



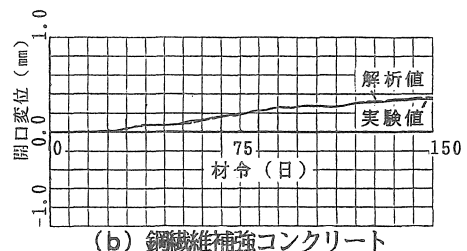
(a) プレーンコンクリート



(b) 鋼繊維補強コンクリート
図-9 ひび割れ開口変位の経時変化



(a) プレーンコンクリート



(b) 鋼繊維補強コンクリート
図-10 ひび割れ開口変位の経時変化

ンおよび鋼繊維補強コンクリート製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 (CO D) と材令 (Age) との関係に関する実験結果と F E M 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の測定値の平均値であり、また本 F E M 解析では、構成素材の物性値として材令 4 週の時点で得られた値を用いている。これらの図によれば、ひびわれ開口変位に関する実験値と解析値は、コンクリートの種類にかかわらず全体的によく一致しており、コンクリートの乾燥収縮ひび割れ抑止に対する鋼繊維の効果、破壊エネルギーの相違という観点から合理的に説明できることを示唆している。ただし、解析結果と実験結果とを詳細に比較してみると、①プレーンコンクリートに関する実験結果では 4 週以下の若材令下で開口変位の急激な増大現象が観察されるが、解析結果では実験結果ほどの急激な変化を示していない、②13 週程度の材令になると開口変位に関する解析値は、コンクリートの種類にかかわらず実験値よりも大きくなる、ことなど一部において若干の相違も認められる。この原因としては、本解析では構成素材の物性値として材令 4 週の時点で得られた値を用いており、これらの値の経時変化を無視したことが挙げられる。なお、鋼繊維補強コンクリートに関する解析結果は、プレーンコンクリートの場合と比較して全体的に実験結果とよく一致しているが、これは、おそらく材令 150 日までの範囲における鋼繊維補強

コンクリートの物性値の経時変化がプレーンコンクリートと比較して小さかったためであろう。

図-11 は、プレーンおよび鋼繊維補強コンクリート製実大開口壁モデル試験体の H 型鋼製拘束枠で測定した拘束ひずみ (ϵ_f) と材令 (Age) との関係を前掲の図-10 と同様の方法で整理した結果である。図によれば、 ϵ_f -Age 関係に関する解析結果は、ひび割れ開口変位の場合と同様に実験結果とよく一致していることがわかる。なお、材令 150 日での H 型鋼によるプレーンコンクリートの拘束力は、鋼繊維補強コンクリートの場合の約 1/2 であるのに対して、上記のひび割れ開口変位量におけるこの比は約 2 倍となっており、両者により相関のあることがわかる。このことは、乾燥収縮ひび割れの発生に伴う拘束力の開放が、コンクリートの種類によらず開口変位量に依存することを意味しており、このような事象を本 F E M 解析においても確認することができた。

5. 結論

本研究では、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) 鋼繊維の混入は、ひび割れ発生後のコンクリートのじん性改善およびひび割れ幅の抑制に極めて有効であり、その効果はプレーンコンクリートの場合の 2 倍以上である。
- 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とともに、コンクリートの種類によってもかなり相違する。
- 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、本乾燥収縮実験の結果とよく一致し、コンクリートの乾燥収縮ひび割れ抑止に対する鋼繊維の効果を破壊エネルギーの相違という観点から合理的に説明できる。

【謝辞】

実験および解析に際して御助力を得た、愛知工業大学大学院生の渡部 憲君、愛知工業大学学部学生の荒木和己君、小林 健君および成瀬博之君に謝意

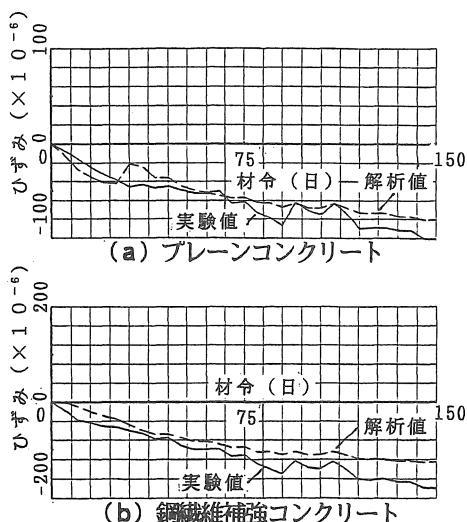


図-11 H型鋼製拘束枠の拘束ひずみの経時変化

を表します。なお、本研究は、東急建設(株)との共同研究として行ったものであり、研究の実施に際してご助言を賜りました東急建設(株)技術研究所・建築研究部建築構造研究室室長の山本俊彦氏、並びに解析に際して有益なるご助言を賜りました(株)トータルインフォメーション・サービスの金刀督純氏に謝意を表します。また、本研究費の一部は、東急建設(株)の奨学寄附金によったことを付記し、謝意を表する。

【引用文献】

- 1) 馬場明生：建築材料の乾燥収縮機構とその応用に関する研究、東京大学学位論文、1975.6
- 2) 牧角龍憲：拘束を受けるコンクリートの乾燥収縮性状に関する基礎的研究、九州大学学位論文、1984.2
- 3) 佐藤嘉昭：コンクリートの硬化乾燥による収縮応力ならびにひびわれ予測に関する研究、九州大学学位論文、1984.6
- 4) コンクリートの破壊力学研究委員会：コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム、第1部・委員会報告、日本コンクリート工学協会、JCI-C19、176pp.、1990.3
- 5) 繊維補強コンクリート研究小委員会：繊維補強コンクリートに関する試験方法のJCI規準案、コンクリート工学、Vol.20、No.10、pp.4-7、1982.10
- 6) 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
- 7) 仕入豊和・青柳征夫・川瀬清孝：コンクリートのひび割れ試験方法(案)－乾燥収縮ひびわれ・温度ひびわれ－、コンクリート工学、Vol.23、No.3、pp.75-87、1985.3

(受理 平成6年3月20日)