

論文

[1182] 鋼繊維補強コンクリートの収縮ひびわれ抵抗性能

正会員 鈴木計夫 (大阪大学建築工学科)

正会員 大野義昭 (大阪大学建築工学科)

正会員 中川隆夫 (大阪大学建築工学科)

正会員○山田 紘 (神戸製鋼所スラグ・建材部)

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリートは、コンクリートの弱点である引張、曲げ、衝撃に弱いという性質を改善できる。この長所を生かして数年前から強度特性の優れた長さ50mm以上の鋼繊維を用い、鉄筋の配筋を省いた土間コンクリートの施工例が増えてきている。その混入量は主として経済性の観点から一般に30kg/m³ (0.4%vol) 程度とされており、従来の長さ30mm程度の短い鋼繊維を用いた研究においては、乾燥収縮の低減効果が現われにくい範囲である¹⁾。一方、長さ50mm以上の鋼繊維を用いた場合の乾燥収縮に関する研究はほとんど見当たらない。

本研究では、長さ50mmの鋼繊維混入量30kg/m³を基準とする鋼繊維コンクリートと、従来の土間鉄筋量と同程度の鉄筋を配筋したコンクリートの乾燥収縮ひびわれに対する抵抗性能を、標準養生条件下とひびわれの発生に対して厳しい暑中コンクリートを想定した夏期の屋外軒下自然放置条件下において、JIS原案の「コンクリートの乾燥収縮ひびわれ試験方法」²⁾である一軸拘束ひびわれ試験によって調べた。なお、拘束ひびわれ試験においては、ひびわれ発生時期だけでなく、そのひびわれ幅の経時変化を測定し、ひびわれ幅に対する鋼繊維の制御効果も調べた。

2. 実験概要

2.1 使用材料と基本調査

鋼繊維は直径(換算)0.7mm、長さ50mmで表面に凹凸があり、引張強度は110kgf/mm²である。細骨材は淀川産の川砂(比重2.55、F.M.2.70、吸水率1.79%)、粗骨材は最大粒径20mmの高槻産の碎石(比重2.71、吸水率0.79%)である。セメントは普通ポルトランドセメントを、混和剤にはA E減水剤を用いた。鉄筋は異形鉄筋D6(実断面積0.31cm²)でその降伏荷重は1.21tである。

表1 コンクリート調合

目 標 スランプ	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				混和剤 (kg/m ³)
			水	セメント	細骨材	粗骨材	
18cm	60	46.8	198	330	785	946	3.30

コンクリートの基本調合は表1に示す

とおりで、このベースコンクリート中に外割りで所定量の鋼繊維を混入した。

2.2 実験方法

コンクリートの種類は鋼繊維混入量0,30および50kg/m³の3種類で、可傾式100 l ミキサーを用いて混練した。コンクリートの練り上り温度は31.0~34.0℃である。養生条件は次のA, B, Cの3種類である。AはJIS原案に準じたものであり、B, Cはひびわれの発生に対して最も厳しいと思われる暑中コンクリートを想定したものである。なお、コンクリート打設日は7月23日で、天候は晴、正午の気温36℃であった。

A: 材令2日まで恒温室(20±1℃)で湿潤養生、脱型後材令7日まで水中養生(20±1℃)、以後

恒温恒湿室 ($20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、 $65 \pm 5\%$) にて保存。

B：屋内 (室温： $29 \sim 32^\circ\text{C}$) にてコンクリート打設後自然放置、材令2日脱型後屋外軒下にて保存。
保存場所の温湿度の経時変化を図1に示す。

C：屋内にて材令3日までコンクリート打設後湿潤養生 (材令2日に脱型)、以後屋外軒下にて保存。

一軸拘束ひびわれ試験体の形状を図2に示す。この装置は従来のこの種の装置を改良したもので、コンクリート試験体が完全に拘束枠に固定されていることが特徴である³⁾。拘束枠に使用し

た鋼材は呼び名1173軽みぞ形鋼 (実断面積： 3.53cm^2) で、鋼材比は7.06%である。

表2に試験体の種類を示す。各試験体の数は3体である。末尾記号Dの試験体は、コンクリート断面中央部に異形鉄筋D6を1本配筋したものである。

自由乾燥収縮試験は $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ の試験体を用いて、各々の拘束試験体と同一養生条件下において行った。なお自由乾燥収縮試験体には鉄筋は配筋していない。

圧縮および割裂引張試験体も、図2：一軸拘束ひびわれ試験体の形状

標準養生を行ったA-00試験体

を除き各々の拘束試験体と同一養生条件下に保存し、コンクリート材令28日において各試験を行った。ただし割裂引張試験は拘束ひびわれ試験体のひびわれ発生時にも行い、その時の収縮応力と割裂強度との関係を調べた。コンクリートのひずみおよび拘束鋼材のひずみの測定には検長30cmのコンタクトストレインゲージを用いた。拘束試験体のひびわれ幅の測定には検長10cmの同ゲージを用いた。

3. 実験結果と考察

3.1 圧縮強度と割裂引張強度

コンクリート材令28日における強度を表3に示す。鋼繊維 30kg/m^3 の混入によって、圧縮強度、割裂強度ともいずれの養生条件下においても10~20%程度増加している。

3.2 自由乾燥収縮

養生条件A、およびB、Cのコンクリートの自由乾燥収縮をそれぞれ図3a)、図3b)に示す。図3b)の結果は線膨張係数を $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ として外気温の温度補正がなされている。図3a)中の曲

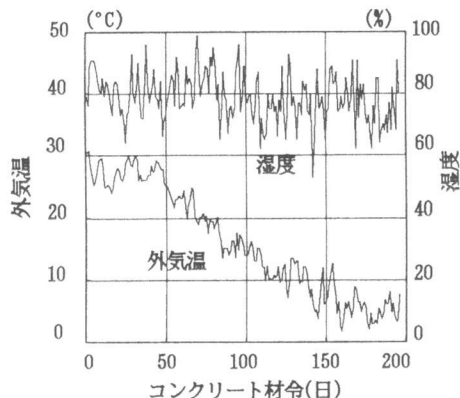


図1：B、C試験体保存場所の温湿度

表2 試験体の種類

試験体 記号	養生条件	繊維混入量 (kg/m^3)	鉄筋の 有無
A-00	A	0	無
A-00-D	A	0	有(D6)
A-30	A	30	無
A-50	A	50	無
B-00-D	B	0	有(D6)
B-30	B	30	無
C-00-D	C	0	有(D6)
C-30	C	30	無

表3 材令28日強度

記号	圧縮強度	ヤング係数	割裂強度 (kgf/cm^2)
A-00	300	2.86×10^5	35.1
A-00-D	330	2.63	37.1
A-30	366	2.57	41.3
A-50	362	2.55	46.6
B-00-D	276	2.22	24.7
B-30	331	2.31	35.1
C-00-D	316	2.48	25.0
C-30	379	2.47	34.1

A-00は標準養生、その他は拘束試験体と同じ養生を行った。

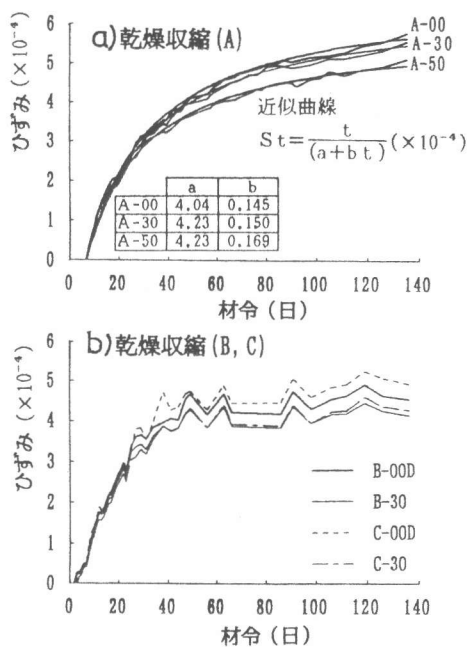
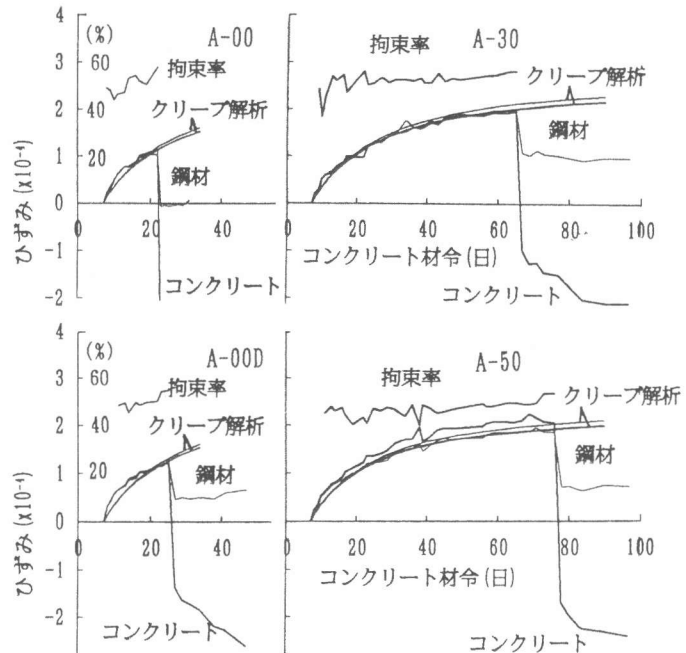


図3：コンクリートの乾燥収縮



線は最小自乗法で求めた近似曲線である。コンクリート材令140日において、養生条件Aの場合、鋼繊維30kg/m³の混入でベース(プレーン)コンクリートの96%に、50kg/m³の混入で同じく88%に減少し、養生条件B, Cではそれぞれ30kg/m³の混入でプレーンコンクリートの94および84%に減少している。

3.3 収縮拘束試験

1) 拘束試験体のひずみ変化

養生条件Aの試験体におけるひずみの経時変化の1例を図4に示す。コンクリート試験体と拘束棒のひずみがほぼ等しく、本試験の要であるコンクリート試験体の拘束棒への固定条件が満足されていることが分かる。ひびわれ発生後、A-00では拘束力がすべて解放され拘束棒のひずみが零に戻るのに対して、A-00-DやA-30, A-50では拘束棒にひずみ残り、圧縮状態にある。これはA-00-Dでは鉄筋が、A-30, 50ではひびわれ破断位置の鋼繊維が引張力を受け持っていることを示しており、同種3体の試験体の引張力の平均値はそれぞれ865、1260および1492kgfである。長さ30mmの鋼繊維コンクリートではこのような引張力が数日後に解放される4のに対して、本試験の場合はその引張力が長期にわたって維持されている。

同図中の曲線はクリープ解析値である。解析法は逐次解析^{3), 5)}で、解析に用いた諸数値は次のとおりである。乾燥収縮は前述のそれぞれのコンクリートの実験式、クリープ係数はベースコンクリート(A-00)とほぼ同じ調合のコンクリート(W/C=59%、単位水量198kg/m³)の実験式⁶⁾

$$\phi(t, \tau) = k(\tau) \cdot (t - \tau)^{0.6} / \{4.84 + 0.475(t - \tau)^{0.6}\} \quad (1)$$

t : コンクリート材令(日)、 τ : 載荷材令(日)

$k(\tau)$: 載荷時材令の影響、 $k(\tau) = 8.75 / (5 + \sqrt{\tau})$ 、 $k(14) = 1$

である。鋼繊維混入量30~50kg/m³がクリープ係数に及ぼす影響は小さいと考えられる⁷⁾のでA-30, A-50についても実験式(1)を用いた。クリープ解析値はほぼ実測値と一致している。

2) ひびわれ発生日

全試験体のひびわれ発生日(乾燥日数)を図5に示す。ひびわれは試験体24体のうち18体が1日以内に全断面に貫通し、残り6体は初めコンクリート打設面に生じ(初ひびわれの発生)、数日後に貫通した。各試験体ともひびわれ本数は1本でその後の新たなひびわれの発生はない。

養生条件Aの試験体において比較すると、初ひびわれの発生はA-00よりA-00-Dの方が早い。これは埋設鉄筋がコンクリートの収縮拘束材として作用するため、前述のクリープ解析では材令22日における収縮応力はA-00が17.5、A-00-Dが18.4kgf/cm²で、A-00-Dの方がA-00より5.2%大きい。鋼繊維を30kg/m³混入したA-30はA-00、A-00-Dより著しくひびわれ発生日が遅くなり、鋼繊維の効果が現われている。A-30とA-50ではそれぞれ3体の平均値で比較すると、A-50の方がひびわれ発生日は遅くなっているが、その差は顕著ではない。

養生条件B, Cにおいても、鉄筋を配筋したものと鋼繊維を30kg/m³混入したものを比較すると、後者の方がいずれの場合もわずかながらひびわれ発生日が遅くなっている。これは、表3に示すように引張強度の増大効果によるものと考えられる。

ただし養生条件Aの場合のような顕著な効果が認められないのは、温湿度の変化による拘束応力の大きな変動を直接受けているためと考えられる。

3) 拘束ひずみとひびわれ発生時の

コンクリート応力

拘束ひずみ(自由収縮ひずみ-拘束試験体コンクリートひずみ)の経時変化を図6に示す。コンクリートの引張ひずみ能力を示すひびわれ発生直前での拘束ひずみは、鋼繊維無混入コンクリートでは養生条件A, B, Cにおいては差がなく、 $1.1 \sim 2.1 \times 10^{-4}$ である。

鋼繊維を30kg混入したコンクリートでは、プレーンコンクリートに比べ、A-30が $1.7 \sim 3.3 \times 10^{-4}$ とかなり大きい値となるのに対して、B-30, C-30は $1.3 \sim 2.7 \times 10^{-4}$ とわずかに大きい程度である。A-50は $2.0 \sim 2.3 \times 10^{-4}$ でA-30と同程度である。

拘束鋼材のひずみから求めたひびわれ発生直前におけるコンクリート応力の割裂引張強度に対する割合は、B-30, C-30が40~50%でその他は60~70%であった。

4) ひびわれ幅

i) 拘束試験体におけるひびわれ幅の意味

本拘束試験におけるひびわれ幅のメカニズムは図7のようになる。

(a) 図は試験開始時 $t=0$ で、収縮変形は零、
(b) 図はひびわれ発生までの状態でコンクリートと拘束棒の収縮変形は等しい。(c) 図はプレー

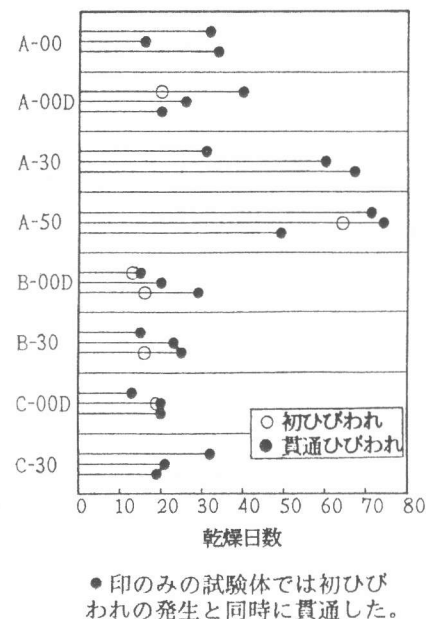


図5: ひびわれ発生日

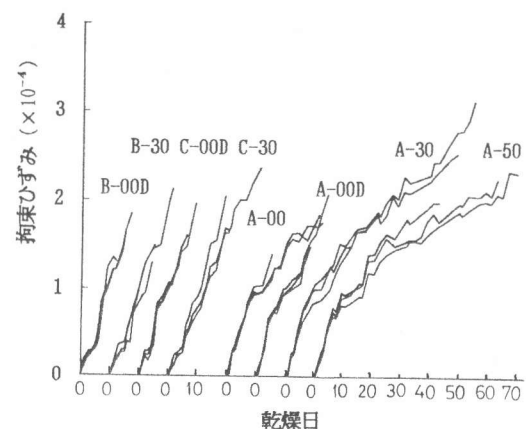


図6: 拘束ひずみ

トと拘束枠の収縮変形は等しい。(c)図はプレーンコンクリートのひびわれ発生時の状態で、コンクリートは引張応力が解放されて収縮し(ただし、引張クリープ変形が残るので自由収縮試験体の収縮までは戻らない)、拘束枠は $t=0$ の元の状態に戻る。鋼繊維が混入されている場合や鉄筋が配筋されている場合は、(c)図のように引張応力は完全には解放されないで拘束枠は $t=0$ の時より収縮しており、コンクリートも引張応力による伸び変形が残っている。いずれの場合も初期ひびわれ幅は、コンクリートと拘束枠の変形の差として表われる。(d)図はプレーンコンクリートのひびわれ発生後の状態で、乾燥収縮ならびに引張クリープ回復によってコンクリートは収縮し、ひびわれ幅は増加する。鉄筋がある場合、鉄筋が降伏していなければコンクリートの収縮変形によって引張応力は増加するが、降伏していれば引張応力の増加はない。鋼繊維の場合も時間の経過に伴う抜け出しがなければ鉄筋の場合と同様な傾向を示す。抜け出しがあれば引張応力は徐々に解放される。

Ⅱ) 初期ひびわれ幅

初期ひびわれ幅のコンクリート打込面とその反対面における測定値の平均値を表4に示す。A-00-Dの貫通ひびわれ発生時期はA-00と大きな差異はないが、初期ひびわれ幅がかなり小さい。これは前述のように鉄筋に引張力が生じているためである。A-30, A-50試験体はひびわれ発生日が大幅に遅くなり、その時点の自由乾燥収縮量は大きくなるが、初期ひびわれ幅はA-00に比較して小さい。B, C試験体においては、鉄筋コンクリートと鋼繊維補強コンクリートとの貫通ひびわれ発生時期に大きな差はなく、初期ひびわれ幅は同程度である。

Ⅲ) 長期ひびわれ

長期付加ひびわれおよび初期ひびわれとの和である全ひびわれ幅も前掲の表4に示されている。図8にA試験体についてひびわれ幅の経時変化を示す。A試験体では早くひびわれが生じたA-00およびA-00-D試験体では、A-30, A-50に比べてひびわれ発生後の乾燥収縮量が大きいため付加ひびわれ幅も大きい。A-30, A-50試験体はその逆の傾向にあり、全ひびわれ幅は、A-00, A

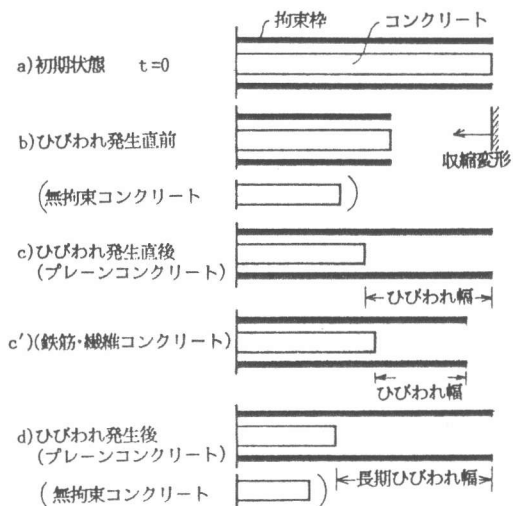


図7: 拘束試験におけるコンクリートと拘束枠の収縮変形

表4 平均ひびわれ幅

試験体 記号	初期ひびわれ幅	長期付加 ひびわれ幅	単位(mm)	
			全ひびわれ幅	平均値
A-00-1	0.154(32)	0.226	0.380	0.402
A-00-2	0.144(16)	0.295	0.439	
A-00-3	0.158(34)	0.228	0.386	
A-00-D-1	0.080(40)	0.233	0.313	0.331
A-00-D-2	0.105(26)	0.245	0.350	
A-00-D-3	0.109(20)	0.221	0.330	
A-30-1	0.108(31)	0.213	0.321	0.273
A-30-2	0.104(60)	0.133	0.237	
A-30-3	0.137(67)	0.124	0.261	
A-50-1	0.137(71)	0.127	0.264	0.268
A-50-2	—(64)	0.087	—	
A-50-3	0.121(49)	0.151	0.272	
B-00-D-1	0.114(15)	0.118	0.232	0.247
B-00-D-2	0.117(20)	—	—	
B-00-D-3	0.137(29)	0.125	0.262	
B-30-1	0.131(15)	0.141	0.272	0.249
B-30-2	0.125(23)	0.100	0.225	
B-30-3	0.100(25)	0.149	0.249	
C-00-D-1	0.100(13)	0.162	0.262	0.239
C-00-D-2	0.116(20)	0.095	0.211	
C-00-D-3	0.129(20)	0.115	0.244	
C-30-1	0.110(32)	0.095	0.205	0.239
C-30-2	0.128(21)	0.125	0.253	
C-30-3	0.115(19)	0.144	0.259	

()内の数字は貫通ひびわれ発生日(乾燥日数)
 初期ひびわれ幅:貫通ひびわれ発生時の表裏面におけるひびわれ幅の平均値
 長期付加ひびわれ幅:コンクリート材令157日までの付加ひびわれ幅

-00-D, A-30の順に小さくなる。A-50はA-30と同程度である。B, C試験体では、前述のように鉄筋コンクリートと鋼繊維補強コンクリートの貫通ひびわれ発生日に大きな差はなく、ひびわれ発生後の付加ひびわれ幅も鉄筋コンクリートとしての自由収縮量が鋼繊維補強コンクリートのそれと同程度であることから差異はなく、全ひびわれ幅の大きさも同程度である。

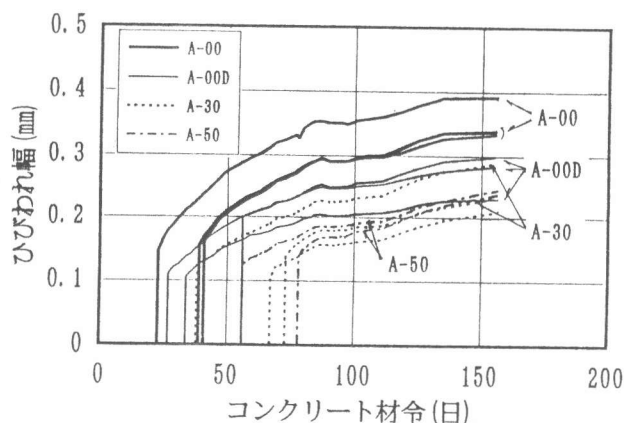


図8：A試験体におけるひびわれ幅の経時変化

4. まとめ

一軸拘束ひびわれ試験によって乾燥収縮ひびわれに対する鋼繊維の制御効果を、鉄筋による制御効果と比較した5ヵ月間の本実験結果をまとめると次のようになる。

- 1) 1週間の水中養生後恒温恒湿室において保存した鋼繊維を 30kg/m^3 および 50kg/m^3 混入したコンクリートの自由乾燥収縮は、無混入のプレーンコンクリートに比べてそれぞれ96%および88%に低減された。ひびわれの発生に対して最も厳しいと思われる暑中コンクリートを想定した屋外養生条件下では、鋼繊維 30kg/m^3 を混入したコンクリートの自由乾燥収縮はプレーンコンクリートの94~84%に低減された。
- 2) ひびわれ発生時期は、(Ⅰ)恒温恒湿室における試験では、鉄筋D6(鉄筋比0.3%)を配筋した試験体とプレーンコンクリート試験体には差はなく、鋼繊維補強コンクリートのひびわれ発生日は引張強度の増加によって著しく遅くなった。(Ⅱ)屋外実験では、外気温の変動の影響によって全般にひびわれ発生が早くなり、鋼繊維補強コンクリートのひびわれ発生日は鉄筋コンクリートに比べ恒温恒湿室における実験のような顕著な差は認められず同等であった。
- 3) ひびわれ幅について、(Ⅰ)恒温恒湿室における試験では、鋼繊維補強コンクリートはひびわれ発生時およびその後も鋼繊維の引張力を保持した。その結果、ひびわれ幅はプレーンコンクリート、鉄筋コンクリート、鋼繊維補強コンクリートの順に減少した。(Ⅱ)屋外実験では、鋼繊維補強コンクリートのひびわれ幅は鉄筋コンクリートと同程度であった。

「謝辞」本実験は本学卒論生 古島正博君の協力を得て行ったものであり記して謝意を表す。

参考文献

- 1) たとえば、小林一輔・魚本健人・峰松敏和：鋼繊維補強コンクリートの乾燥収縮に関する研究(Ⅰ)，生産研究，Vol.30，No.7，pp.274~277，1978
- 2) 仕入豊和・青柳征夫・川瀬清孝：コンクリートのひびわれ試験法(案)，コンクリート工学，Vol.23，No.3，pp.40~44，1985
- 3) 鈴木計夫・大野義照・中川隆夫・太田寛：コンクリートの収縮拘束ひびわれ試験，第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.25~28，1981
- 4) 小林一輔・魚本健人・峰松敏和：鋼繊維補強コンクリートの乾燥収縮に関する研究，第2回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.209~212，1980
- 5) A.M.Neville：Creep of Concrete Plain, Reinforced and Prestressed, North-Holland, 1970
- 6) 鈴木計夫・大野義照・太田寛：コンクリートの乾燥収縮ひびわれと拘束の程度との関係について，セメント技術年報 36，pp.283~286，1982
- 7) 井山義信他4名：フック付き鋼繊維補強コンクリート合成スラブに関する研究(その6)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.713~714，1989