

鋼繊維補強コンクリートの曲げ実験より クラックに対する拘束効果について

山 本 英 一

On the Reseach of Bond Strength Against Cracks in the Steel Fieber Reinforced Concrete by the Bending Test.

Eichi YAMAMOTO

We put the steel fiber reinforced concrete to the bending test, and investigated the bond strength of steel fiber against cracks in the concrete.

We approachcd the effect of its toughnes for bending in this paper.

1 はじめに

各種の繊維で補強されたセメント系複合体についての研究は各方面で行なわれ、その機械的物理的性状も漸次明らかにされつつあるが、本報告では特に、コンクリートの外的要因によるクラックに対して、拘束性が優れているとみなされている鋼繊維補強コンクリートの曲げ実験から、鋼繊維によるクラックの拘束性を量的に分析し、かつまた、曲げ靱性域での繊維効果についても考察を加え報告するものである。

2 実験目的と条件

鋼繊維で補強されたコンクリートにクラック発生を強制させ、クラック発生までの過程における拘束効果、ならびに曲げ靱性での効果を量的に測定し得ることを目的とした。したがって曲げ破壊が先行し、かつその挙動が明確であることが必要条件となり、次に示す三点を具備するものとした。

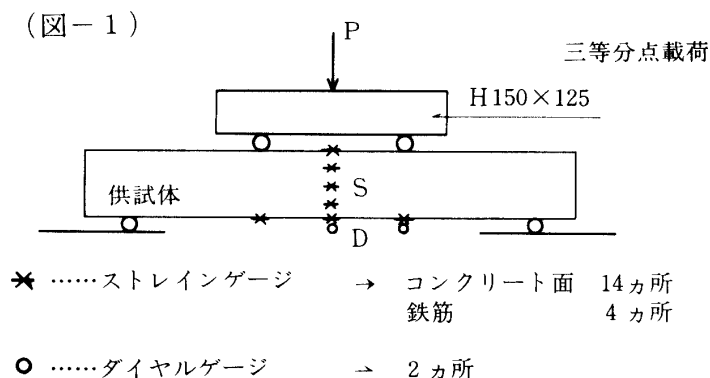
- (1) コンクリートの爆発的破壊を抑える。
(鉄筋コンクリートとする。)
- (2) 曲げ影響が顕著に現われること。
(せん断影響を抑える。)
- (3) 鋼繊維が三次元的配向となること。
(成形方法をプリミックス法とする。)

3 実験方法

2の目的と条件に基づく実験方法は次の通りである。

● 曲げ試験

図-1に示す如く、せん断影響を抑え曲げ影響についてのみ知るために、三等分点载荷とし、ひずみ測定等については、ストレンゲージ、ダイヤルゲージ等を使用した。



● 複合材の調合における各試験

本報告では、とくにワーカビリチの問題から配合に至る過程について報告する。

4 予備実験と供試体

4-1 調合について

前述において、鋼繊維の三次元的配向を狙う意味から、その成形をプリミックスとしたが、その際、繊維の混入率が増加するにしたがって、ワーカビリチが悪化する傾向となる事実から、この問題について次のように対応した。

- (1) 使用する鋼繊維は、長さ30ミリ、アスペクト比60とする。
- (2) 鋼繊維の混入率の上限を2.0%とする。
- (3) 鋼繊維の混入率に応じて、細骨材率を修正する。
- (4) 細骨材率の明確さを期するため、粒度がほぼ一定である碎石（径20ミリ）を粗骨材とする。

以上の諸点より実験を行なった結果、繊維混入率が2.0%迄において、細骨材率を修正することで満足し得るワーカビリチが得られた。また、マトリックスとの分離現象や繊維の二次元的配向も避けられたが、細骨材率の過度の増加は、スランプ値を一定とする点から、有効水量の増加を生じ、強いては強度の低下をもたらすので、細骨材率を60%に抑えた。

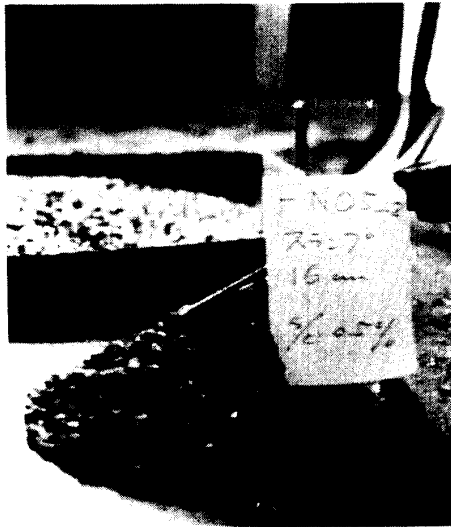
尚、粗骨材を20ミリとした点については、コンクリートマトリックスのクラックを支配するに足りる繊維間隔が、粗骨材の径によって決定されるとの事由、およびコンクリートマトリックスの比重と強度との関係において、粗骨材の粒度を小さくすることは、この場合得策でないと考えられるので、一応20ミリ以下の碎石を粗骨材としたわけである。

一方細骨材は5ミリ以下のものを使用した。この点に関しては、粒度がほぼ一定な碎石を粗骨材とした為に生ずる、マトリックスのアンバランスを是正するのに、粒度の大きい細骨材の使用が適当とするからである。

このような点を考慮した上で、配合設計を行ない、試験を繰り返しながら修正を加え、最終的

には表－１における調合となった次第である。

写真１，２は繊維混入でのスランプテストである。また調合に関するレポートは、別の機会に報告するものである。



４－２ 供 試 体

供試体は前述までの事項にしたがって作製した。表－１は各供試体の仕様を示したものである。

表－１

	繊維 混入率 (%)	水セメ ント比 (%)	ス ラ ン プ (cm)	細骨材 率 (%)	単位水量 (kg/m³)	セメント (kg/m³)	砂 (kg/m³)	砕 石 (kg/m³)	圧縮強度 (kg/m²)	ヤ ン グ 係 数 E=×10⁵
No. 1	0	65	17.0	50	192	295	916	916	190	1.90
F No. 1	0.5	65	16.5	52	210	332	990	842	210	2.30
F No. 2	1.0	65	16.7	55	248	382	1010	820	215	2.36
F No. 3	2.0	65	18.0	60	286	440	1100	730	283	2.50

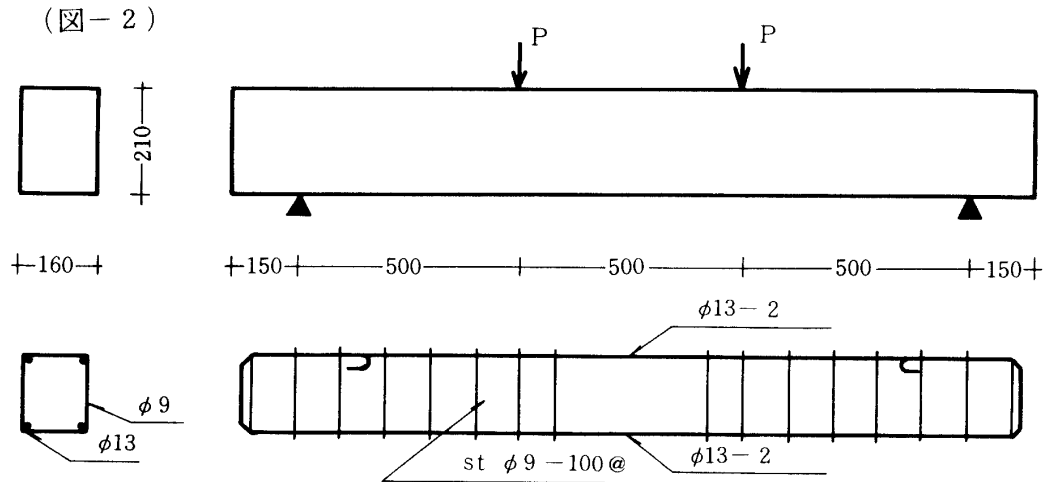
鋼繊維

d 径 0.5mm
ℓ 長さ 30 mm
アスペクト比 ℓ/d = 60

丸鋼

SR. 24

図-2は供試体の形状および配筋を示したものである。



5 実 験

5-1 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験の結果報告は、すべて降伏の時点におけるものであることを予め付しておく。

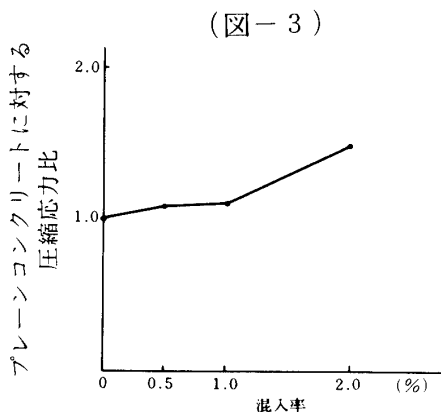
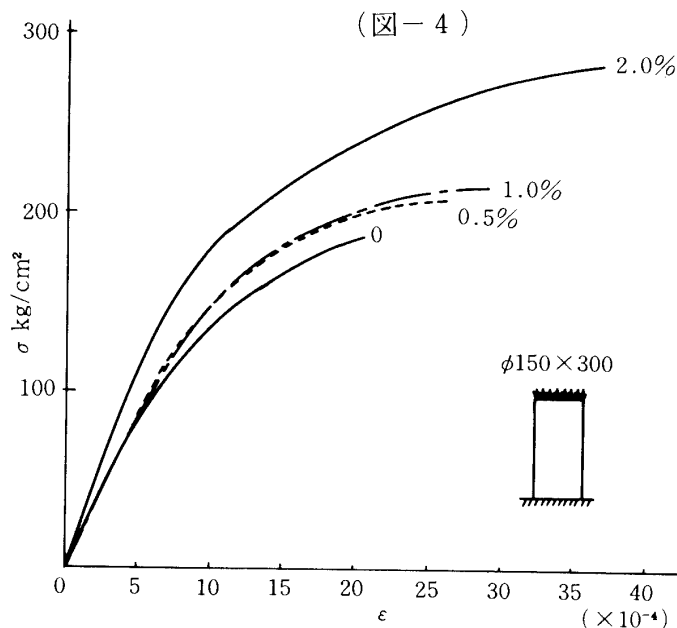


図-3は繊維の混入がない供試体との圧縮応力での対比であるが、極端な繊維の補強効果は見られない。逆に、繊維混入率の過度の増加は終局時の強度を低下させる要因とも考えられる。

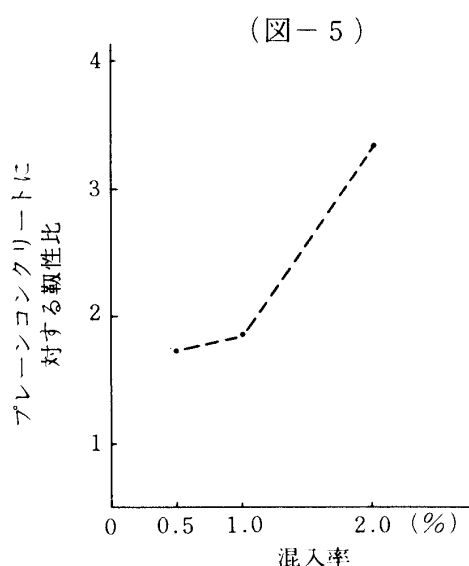
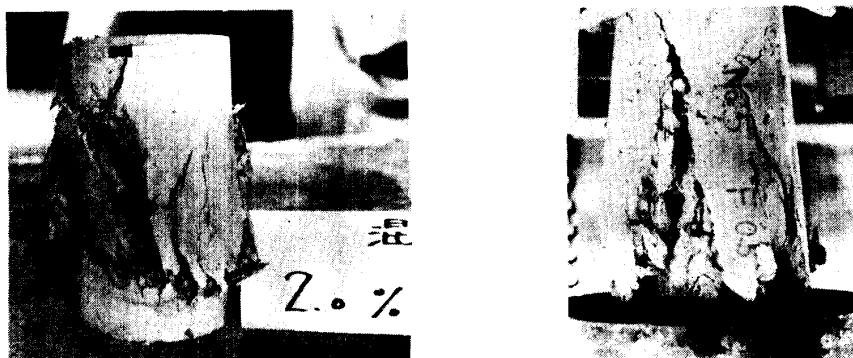
低下の因子には、内的要因もあるが、この場合、終局時の繊維が座屈状態となり、マトリックスの割裂を引き起こす直接的因子と考えられる。この点からも圧縮応力に対する繊維の効果を期待することは無理といえる。しかし図-



4の圧縮応力とひずみとの関係では、鋼繊維混入率の増加にともなって、終局強度附近からのひずみの伸び率が増加し、マトリックスの爆発的破壊を抑えているが、この点での効果としては期待出来るものである。

図-5は繊維の混入がないプレーンコンクリートに対する靱性比を混入率にしたがって示したものであるが、降伏時点までの過程では、図のような結果となった。

しかし、その後の圧潰までの過程にお



いては、0.5%混入の供試体でさえも爆発的破壊がなく、2.0%混入の供試体に至っては、ひずみ測定が不可能状態となっても圧潰せず、塑性域における繊維の橋渡しの効果を見せられた。(写真2, 3, はシリンダーの破壊状態)

静弾性係数については、圧縮強度の30%を弾性限界とした場合、各供試体間の差は比較的小さく、表-1に掲げた通りであるが、弾性限界時における係数と繊維混入率との関係から、繊維混入の有意義性を求めることは無理であり、むしろ混入率の増加は、複合体の密度の低下をもたらす逆効果となる。したがって弾性係数の低下をよぶものである。(混入率2.0%を上限とした理由もこの辺にある。)

以上一軸圧縮試験について述べたが、爆発的圧潰を防ぐ効果。また、降伏点以後、破壊までの一定荷重での持続性等に関して、繊維混入がないプレーンコンクリートとは比較にならない事実は、鋼繊維混入の複合体としての、基本的な特性であり、優れた点といえる。

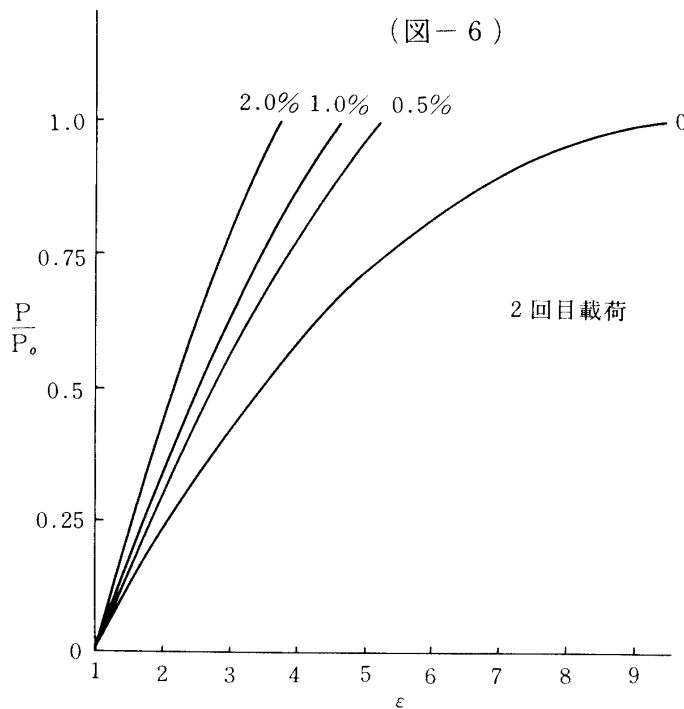
5-2 曲げ試験

三等分点荷重による曲げ試験を行ない、曲げ領域での拘束効果に関するデーターを求めた。その試験結果については、クラック発生までとクラック発生以後の二段階に分けて述べるものとする。その理由としては、クラック発生の時期と繊維混入率との関係から、クラック発生以後の、曲げ靱性域の拡大性と大いに関係をもつからである。この意味において、せん断影響を極力抑える必要があった。また低応力時の早期クラックを避けるために鉄筋コンクリートとしてみた。

5-2-1 クラック発生までについて

低荷重時での繰り返し荷重を行ない、撓み及び歪と繊維混入率との関係から、クラックの拘束性を推意した。なお、この場合の繰り返し荷重を、繊維の混入がない供試体における初期クラック発生荷重理論より求め、その約80%の範囲内にて行なった。

一回目の繰り返し荷重の場合、繊維混入の有無にかかわらず、ひずみ及び、たわみ共大きな差

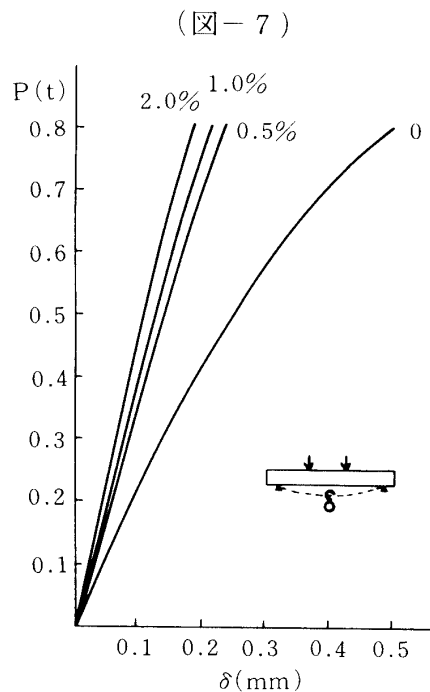


はなく、二回目の载荷において始めて変化が生じた。(ただし载荷量は一回目と同様、残留ひずみは10%程度)

図-6, 図-7は二回目载荷時での変化の状態を示したものである。

図-7において明らかであるように、二回目において繊維混入のある供試体の全ひずみが、繊維の混入がない供試体の全ひずみの50%程度にすぎず、クラック発生の気配すら見られない。逆に繊維の混入がない供試体のひずみは荷重の80%より急に進展し始め、コンクリートの引張強度が限界に達しつつあることが予想される。

一方、同载荷状態における撓みについ



ては、図-8が示すように繊維の混入がある供試体の変化が直線的で、しかも三種類の供試体間の変化にはさほど差が見られず、繊維の混入がない供試体の変位量の40%程度に収まっている。これらの事実から、曲げによって生ずるコンクリートの引張応力が、その応力面に交叉する繊維に伝達され、ひずみおよび撓み量の進展を抑えているといえる。またこの程度の载荷段階における繊維混入率による効果の差は顕著に現われていない。(繊維混入率0.5%~2.0%の範囲において)

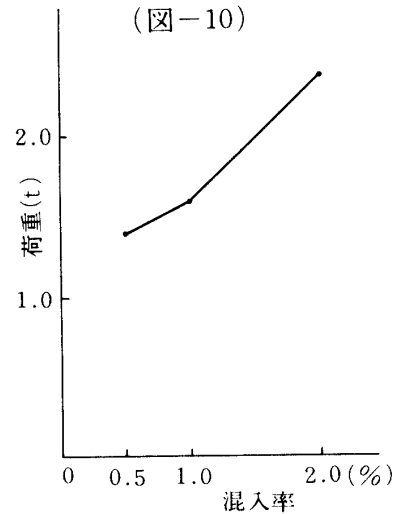
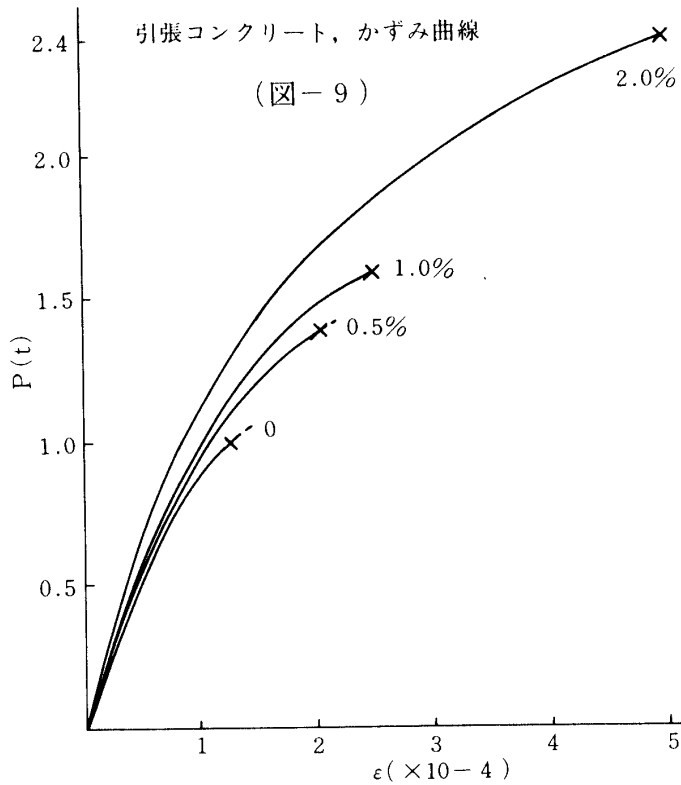
しかし、繊維の混入がないプレーンコンクリートとの比較において、この载荷段階の終局では約2倍の拘束性を生み出し、この点では明らかに繊維混入の効果を示している。

5-2-2 クラック発生とそれ以後について

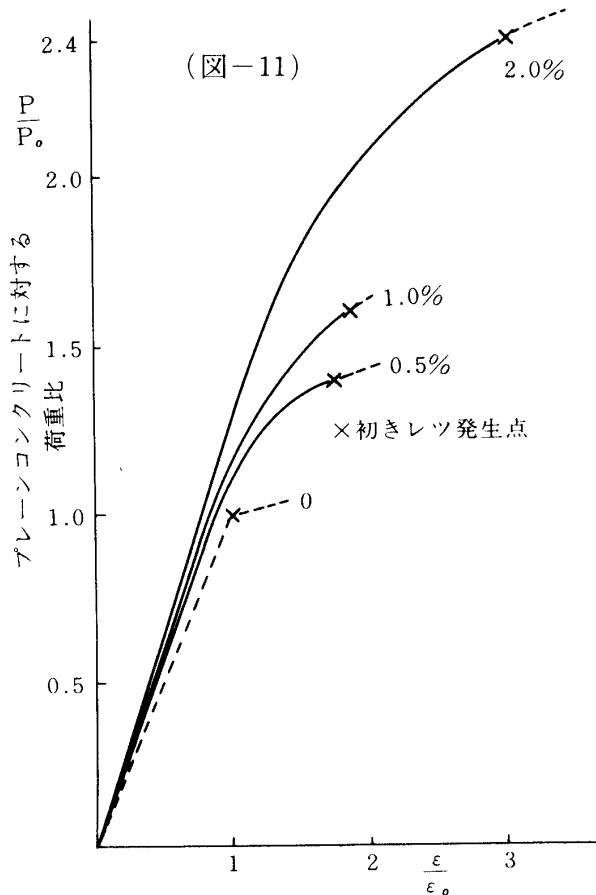
前記の図-7において、繊維の混入がない供試体の引張強度が限界附近に達しつつあると述べたが、図-9が示すようにクラック発生は、理論値より40%強の荷重で発生した。(理論値より高めの载荷で発生した点については、载荷速度に関係があると推測されるが、一応全供試体について20kg/secの速度で载荷したことを付しておく。)

図-10は、初期クラック発生の時期を繊維混入率に応じて示したもので、繊維の混入がない供試体のクラック発生荷重を1.0とした時の比で示したものである。

初期クラックの発見を視覚で確認することは、困難であるため、引張鉄筋におけるひずみの動きをチェックしながら確認する方法を採った。その意味で図-11において引張鉄筋の荷重とひず



みの関係を示したが、各供試体とも荷重比 1.0 (繊維の混入がない供試体の初期クラック発生荷重、ひずみを 1.0 とした) 前後では、ほとんど差はなく一直線上にあり、クラック発生は見られない。しかもこの時点での繊維混入



のマトリックに対する影響も見られない。しかし、荷重比 1.2 を分岐点として、各供試間に差が出はじめ、荷重比 1.4 では明らかに繊維混入率による変化の差が生じる。事実初期クラック発生は、混入率 0.5% の供試体で 1.3、混入率 1.0% の供試体がやや遅れて 1.6 の点で目で確認したが、実際のクラック発生は、両供試体とも図が示す如く、目で確認された以前に生じていた訳で、前者が、1.28 後者が 1.35 の点である。すなわち、くの字に折れ曲がった点がクラック発生を意味している。

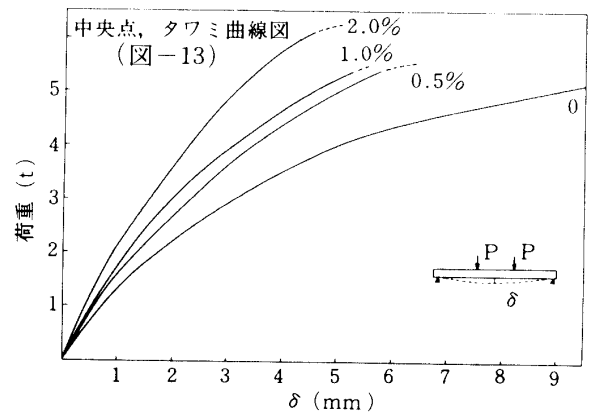
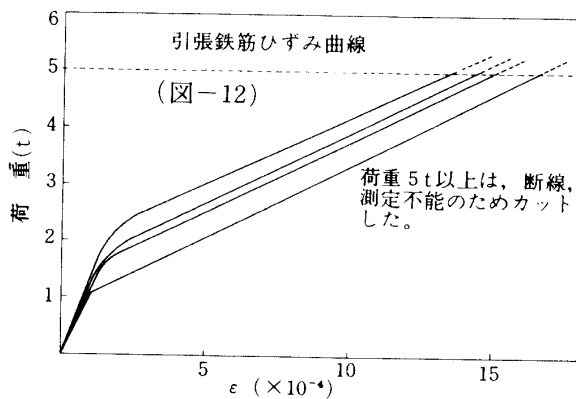
一方、混入率 2.0% の供試体については、荷重比 2.4 にて初期クラック発生を目で確認したが、それ以前にクラック発生があった否かについて、この図から判断することは困難である。図において、荷重比 1.5 より 2.4 の間の曲線変化は、他の供試体に見られなかった性状を示すもので、明らかに繊維混入の効果を裏書きする具体的な現われで

あり、初期クラックの発生時期のずれは、この場合重要な問題点ではなく、荷重比1.5~2.4の間の曲線変化こそキーポイントである。この点において曲線的变化の過程を次の如く推測すれば納得し得るものである。すなわち、コンクリートマトリックスの付着力によって確保された繊維が、荷重比1.5~2.4間の曲げ応力を支配し、応力増加に伴って引張の縁側から徐々に破断すれば、図のような曲線的变化が生ずる。したがってこの間におけるコンクリートマトリックスの曲げ強度は限界に達していると見なしてよい訳である。これらの点から、初期クラックの発生が荷重比1.5~2.0の附近で確認されるはずであるが、実際には荷重比2.4の点で一ヶ所しか確認されなかった。しかし、目で確認されない微細なクラックの発生はあったはずで、もしないとすれば曲線变化的性状もないはずである。この性状は明らかに繊維の破断もしくは引き抜けによるものであると見てよい。

以上の結果から、混入率2.0%の供試体とそれ以外の供試体との性状の差は明白な事実であり、繊維混入の効果は、2.0%に至って始めて現われたといえる。

クラック発生後の挙動については、図-12、図-13にて示すものであるが、二つで注目すべきは、クラック発生後の曲げによる引張応力を鉄筋が負担し、この間で繊維がなす効果は見られないにもかかわらず、撓みにおいて繊維混入効果が歴然と現われている点である。すなわち、終局荷重時での撓みが、繊維混入のない供試体のほぼ50%にとどまり、しかも荷重比において、混入率2.0%では1.24倍、1.0%および0.5%では1.1倍となり繊維混入の効果が顕著に現われている点である。

これらの事実から次のようなことがいえる。すなわち、複合体の爆発的破壊を防ぐ為に鉄筋を使用した。その結果複合体の塑性域における引張鉄筋の優位性が大きくなり、当然引張鉄筋への応力集中化が生じた。したがって図-12の性状を示すこととなり、繊維混入率2.0%の供試体の塑性域での余剰力は、撓みにおけるクラック境界面の橋渡しの効果として対応していると見なせば説明がつく。





9 " 0.5% "



6 ま と め

今回の実験ではアスペクト比 60 の鋼繊維を使用し、混入率の変化とその効果について考察を行ったのであるが、端的に言って、補強効果を期待するとき、混入率 2.0 % 程度は必要で 1.0 % 程度では期待出来ないといえる。

●鋼繊維混入率 2.0 % での効果として。

1. 圧縮応力時での爆発的破壊を防ぐ。
2. 曲げ応力時における急速なる撓みの進行を抑え、かつ撓み量を減少させた。
3. コンクリートマトリックスの曲げ強度を増進させる。
4. クラック発生後のクラック境界面での橋渡しの役割を果し、クラックの伝達を困難なものとした。
5. クラック発生数を抑える。(繊維混入がない供試体の約 30 %。)

以上が主たる効果であったが、一面問題点も介在するので列記する。

1. 混入率を三種類としたが、2.0 % 以上のものも入れて五種類程度は必要と考える。
2. 精骨材の粒度と鋼繊維長さ、およびアスペクト比との関係から、複合体の強度に関して。
3. 打設時における繊維の配向性について。(二次元的配向となる傾向がある。)
4. 鉄筋コンクリートとした為に、塑性域での曲げに対する効果を見い出せなかった。

参 考 文 献

- ・ Romualdi, J.P., Ramey, M. and. Sandy, S.C. Prevention and control of cracking by use of short random fibers. ACI 1968 Publication SP-20
- ・ 小林一輔, 伊藤利治, 星野富夫, 鋼繊維補強コンクリートの諸性状と繊維の形状特性 1974。