

論文

[2123] 逆 T 型 SFRC 部材の曲げ挙動に関する研究

正会員 横谷 栄次(関東学院大学)
 同 町田 恭一(関東学院大学)
 同 ○峰 喜昭(松田平田坂本設計事務所)

§ 1. はじめに

鋼繊維補強鉄筋コンクリート(SFRC)梁は、引張側にスラブを有すると、その協同効果及びテンションスティフネスによって、曲げ挙動に於て剛性及び強度が増大することが推測されるが、未だ解明されていない。従って、本研究は逆T型SFRC梁の曲げ実験を行うと共に、鋼繊維補強コンクリートの引張及び圧縮特性に関して実験より求められた結果を用いて、テンションスティフネス及び圧縮応力分布をモデル化し、これを逆T型SFRC部材の非弾性解析に適用した。ここに、逆T型SFRC梁の曲げ挙動に関して実験と理論の双方より得られた結果を報告する。

§ 2. 実験概要

2.1 試験体

試験体形状及び配筋は、図1に示すように幅15cm全成25cmの矩形梁と、これに厚さ5cmのスラブをつけた逆T型梁とした。スラブの協力幅は、日本建築学会・鉄筋コンクリート構造計算規準とACI規準の中間値を採って片側22.5cmとした。

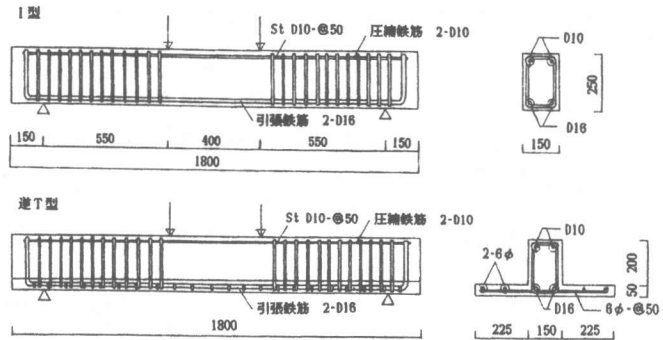


図1 試験体形状図

引張側主筋は2-D16を、圧縮側主筋及びスターラップ筋に各々D10を、スラブ筋に4-6φを使用した。鉄筋の機械的性質を表1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、砂は粒径2.5mmの川砂、砂利は最大粒径15mmの碎石、鋼繊維はストレートタイプ(0.5×0.5×30mm)を用いた。

調合を表2に示す。鋼繊維の均一な分散と適切なワーカビリティを得るため、混和剤はセメント100kgに対して250cc、空気量調整剤は空気量が4~5%になるように混入し、 $F_c = 210$ 、スランプ値15以上を目標とした。このような調合を用いて、

表1 鉄筋の機械的性質

鉄筋の種類	降伏点応力度 (kg/cm ²)	破断強度 (kg/cm ²)	伸び率 (%)	ヤング係数 (kg/cm ²)
6φ	3125.000	4125.000	27.71	2.139
D10	3756.258	5140.845	17.10	2.042
D16	3341.708	4983.250	20.10	2.020

RC、SFRCの混練には可倒式ミキサーを使用し、鋼繊維は練り上がり後にほぐしながら混入した。試験体は、逆T型にて打設し、鋼繊維混入率(V_f)が体積比で0%、1.0%、1.5%の矩形梁、逆T型梁を計9体作成した。

表2 SFRCの配合表

試験体の記号において、最初の数字は、鋼繊維の混入率を、IまたはTは試験体の形状を、最後の数字は試験体番号を表す。

2.2 荷重方法及び測定方法

荷重方法は図1に示す様にスパン150cmの単純支承として荷重スパン40cmの中央2点集中荷重をオイルジャッキ

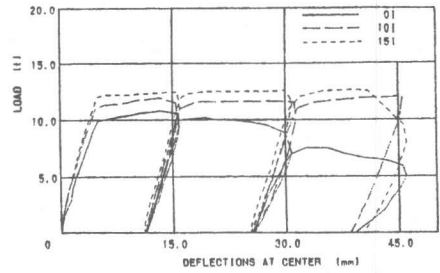
試験体名	V_f (%)	W/C (%)	S/a (%)	重 量 割合 (kg/m ³)				
				W	C	S	G	SF
0 I 0 T1 0 T2	0	64	46	192	300	805	945	0
1.0 I 1.0 T1 1.0 T2	1.0	65	55	208	325	909.3	743.9	78.5
1.5 I 1.5 T1 1.5 T2	1.5	65	63	227.5	350	983.8	583.7	117.8

W:水 C:セメント S:細骨材 G:粗骨材 a:金骨材 SF:スチールファイバー

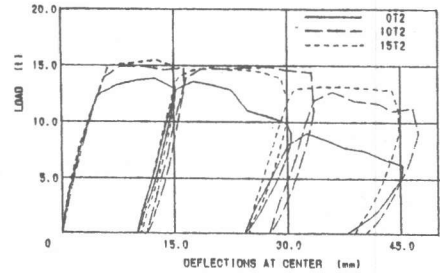
により、1 tピッチで載荷し中央点変位が15mmに達する荷重で除荷した。これを1サイクルとし、2サイクル目は中央点変位が30mm、3サイクル目は45mmで除荷する変位制御による静的載荷を行った。測定方法は、ロードセルにより荷重をX-YレコーダーのY軸で、ピストン型変位計により中央点のたわみをX軸で読み取り、パイゲージ、鉄筋ゲージ、コンクリートゲージ、ピストン型変位計により伸び、ひずみ、たわみを測定し、亀裂は、1/100mmまで測れるマイクروسコープを使用し目視で各荷重毎に観察した。

2.3 実験結果及び考察

矩形及び逆T型試験体に対する曲げ実験から得られた初亀裂時、降伏点荷重時及び最大荷重を表3に示す。図2は、中央点変位をX軸に、荷重をY軸にプロットし、図3は、各部の鉄筋のひずみを各荷重毎にプロットしたものである。これらの図及び表より、以下に考察を行う。



矩形梁



逆T形梁

図2 荷重-たわみ曲線

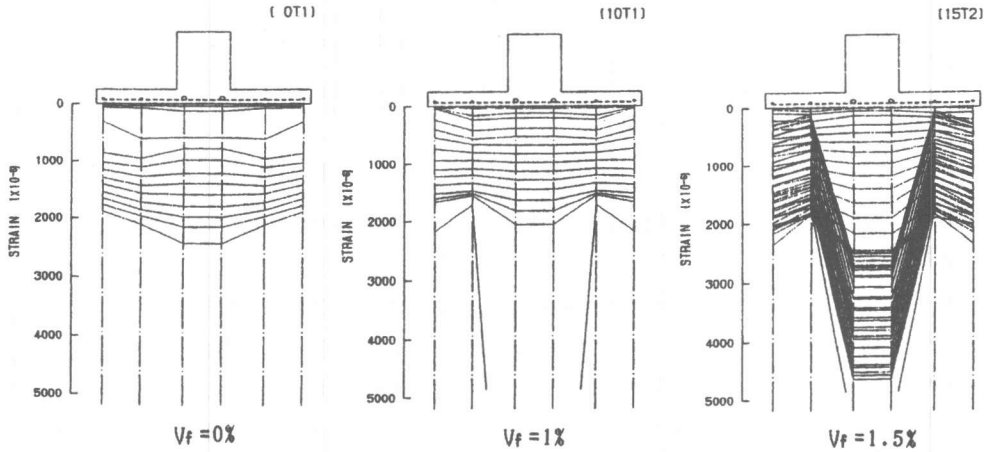


図3 逆T形梁の鉄筋ひずみ分布図

表3 実験及び解析結果一覧

試験体 番号	初亀裂時荷重				降伏点時荷重				最大荷重							
	実験値		非弾性理論値		実験値		非弾性理論値		実験値		非弾性理論値		略算式(1)		略算式(2)	
	荷重 $P_E(t)$	たわみ (cm)	荷重 $P_I(t)$	たわみ (cm)	荷重 $P_E(t)$	たわみ (cm)	荷重 $P_I(t)$	たわみ (cm)	荷重 $P_E(t)$	たわみ (cm)	荷重 $P_I(t)$	たわみ (cm)	荷重 $P_{Ca}(t)$	P_e P_{Ca}	荷重 $P_0(t)$	P_e P_0
0I	2.0	0.72	1.283	1.559	9.90	5.05	9.845	1.006	10.80	13.38	10.818	26.513	10.59	1.02	9.33	1.16
	3.0	0.81	1.382	2.171	11.30	5.79	11.19	1.010	11.90	13.27	12.685	35.670	11.64	1.02	10.37	1.15
	4.0	1.20	1.522	2.628	12.20	5.87	11.91	1.050	12.50	15.63	13.082	37.202	12.29	1.02	11.02	1.13
0T	2.0	0.62	1.354	1.477	12.00	5.56	12.66	0.971	12.90	10.62	13.253	21.350	13.38	0.96	11.68	1.10
	2.0	0.51			12.60	5.31			13.90	12.34			13.38	1.04	11.68	1.19
10T	3.0	0.57	1.459	2.056	15.50	6.35	14.54	1.045	15.50	12.67	15.355	28.128	15.84	0.98	14.14	1.10
	3.0	0.97			14.90	7.79			14.90	10.83			15.84	0.94	14.14	1.05
15T	3.0	0.63	1.576	2.221	15.10	6.12	15.66	0.961	15.16	9.90	16.339	24.372	17.17	0.88	15.47	0.98
	4.0	1.01			15.00	6.34			15.50	12.25			17.17	0.90	15.47	1.00

初亀裂時荷重は、鋼繊維混入率の増加と共に、矩形、逆T型梁共に増加し、この時のたわみも増加している。これは、鋼繊維の亀裂拘束効果によるものである。スラブ付加による効果については、荷重の平均値は矩形、逆T型梁共に約3tであり、たわみは、逆T型梁の方が小さくなっている。よって、初亀裂時ではスラブによる応力負担は認められるが、効果は小さいと思われる。

降伏点荷重(荷重-たわみ曲線において、塑性開始点及び最大荷重)は、鋼繊維混入率の増加に伴い矩形梁は増加しているが、逆T型梁は、1%から1.5%の間で増加せず、鋼繊維による亀裂拘束効果は1.5%の場合1%ほど顕著な効果を示していない。これは、逆T型梁の場合スラブ部分に含まれた鋼繊維の配向・分散が均一に施工されなかったため、最も不利な箇所に亀裂が発生し、亀裂の分散が余り行われず1箇所の亀裂にエネルギーが集中したためと考えられる。また、逆T型梁の方が、平均で矩形梁よりも1.25倍荷重が大きくなっていて、スラブ付加による効果が顕著に現れている。更に、最大荷重時以降RC梁は耐力の低下が著しいが、SFRC梁の場合は耐力の低下が極めて小さいことから靱性の向上が認められる。

ひずみ分布図において、逆T型梁について比較すると鋼繊維の混入率が高いほど、引張側の主筋のひずみが減少している。これは、コンクリート中の鋼繊維が応力負担をしているものと考えられる。降伏点付近でのひずみ分布は、主筋がスラブ端部鉄筋よりも多く応力を負担している。さらに15T1, 15T2については、塑性域に入ってから主筋の応力負担は、スラブ端部鉄筋の2倍ぐらいになる。これらの事からスラブの有効幅には限界があることが示唆される。

§3. 非弾性理論

鋼繊維コンクリートの引張及び圧縮特性は、各々直接引張試験及び圧縮試験から得られた結果を用いてモデル化し、これを非弾性理論⁽³⁾による増分解析に適用した。曲げを受けたSFRC矩形断面の応力とひずみ分布を図4に示す。コンクリートの直接引張試験は、破断面が一定せず、偏心による曲げが加わったりするため、その試験は大変難しいとされてきた。ここでは、軸アンカー鋼棒を介して引張力を加え亀裂発生箇所を設定した新しい直接引張試験法⁽²⁾により、引張挙動を求めた。

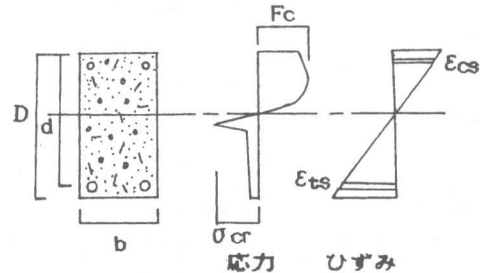


図4 矩形断面の応力とひずみ分布図

3. 1 コンクリートの引張特性

鋼繊維補強コンクリートの直接引張応力度とひずみ度の関係は、図5のようにひび割れ以前とひび割れ以後の状態では、大きな違いが現れ、最初のひび割れが発生すると大きな変化を示す。

ひび割れ以前では、鋼繊維補強コンクリートは、弾性材料だが、ひび割れ以後では、繊維がひび割れ表面をブリッジし、引抜き力、または引張力によって応力を伝達する。そこで、鋼繊維補強コンクリートの引張応力(σ_t)とひずみ(ϵ_t)の関係をこの様に3つの領域に分けてモデル化した。

(I)弾性範囲： $(0 \leq \epsilon_t \leq \epsilon_{t0})$

$$\sigma_t = E_t \epsilon_t$$

(II)コンクリート・マトリックスから繊維への
応力伝達領域： $(\epsilon_{t0} < \epsilon_t \leq \epsilon_{td})$

$$\sigma_t = \sigma_{cr} - E_{t2} (\epsilon_t - \epsilon_{t0})$$

(III)繊維の引抜き領域： $(\epsilon_{td} < \epsilon_t \leq \epsilon_{tu})$

$$\sigma_t = \sigma_{cu} - E_{t3} (\epsilon_t - \epsilon_{td})$$

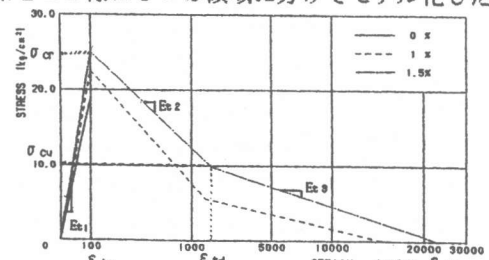


図5 引張応力-ひずみ曲線のモデル化

3.2 コンクリートの圧縮特性

曲げ部材の圧縮コンクリートに対する応力(σ_c)-ひずみ(ϵ_c)関係は、一般にHognestadによって提案された実験式の修正式が用いられている。これは、圧縮強度(F_c)に対応するひずみレベル(ϵ_0)までを2次式で、終局ひずみレベル(ϵ_u)まで1次式で表したものである。今回は、この考え方に従い、繊維の効果を考慮にいたした次の式を導いた。

(I) $0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_0$

$$\sigma_c = F_c \left(2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \frac{\epsilon_c^2}{\epsilon_0^2} \right)$$

(II) $\epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_u$

$$\sigma_c = F_c \left(1 - \rho \frac{\epsilon_c - \epsilon_0}{\epsilon_u - \epsilon_0} \right)$$

ここに、 $\epsilon_0 = 0.00263(1 + 0.355V_f)$

$$\epsilon_u = 0.00455(1 + 0.290V_f)$$

$$\rho = 0.1889 - 0.088\sqrt{V_f}$$

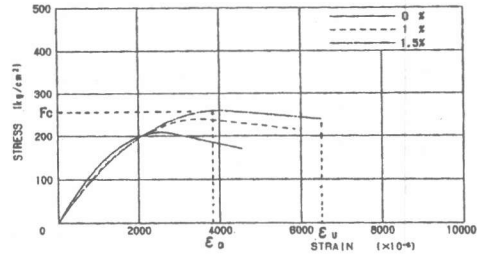


図6 圧縮応力-ひずみ曲線のモデル化

以上の仮定に基づいて解析した過程を図7に示す。

3.3 解析結果及び考察

図7の過程に従った増分解析によって得られた矩形及び逆T型梁の荷重-たわみ曲線を図8に示す。これらの図より、初亀裂荷重、降伏点荷重、終局荷重、引張鉄筋のひずみについて考察する。

初亀裂荷重に対する理論値と実験値を比較すると、実験値が理論値を上回っている。これは目視による亀裂確認と、載荷を1tピッチに行ったために亀裂確認が遅れたと考えられる。理論解析において、初亀裂時荷重は、引張縁のひずみがひび割れ時ひずみを越えた時とし、RC梁に関しても完全弾性範囲内は、テンションスティフネスを考慮したが、逆T型RC梁に関しては、スラブ端の拘束が全くないことから、スラブコンクリートのテンションスティフネスを無視して、解析を行った。これによると、テンションスティフネスを考慮することによって、引張鉄筋の応力負担が減少する。初期剛性は、1~2%の向上に過ぎない。これは、プレーンコンクリートのテンションスティフネスの評価が大きすぎたためと考えられる。スラブ付加による効果は、スラブのテンションスティフネスを無視した為スラブ筋による影響しか現れていない。

降伏点荷重時において理論値と実験値を比較すると、荷重においてはほとんどが±5%以内に含まれている。剛性に関しては、矩形梁は実験値が理論値を上回っており、逆T形梁では下回る傾向がある。RC矩形梁にのみ関してみると、荷重、たわみ共によく一致している。これよりプレーンコンクリートにおいては、テンションスティフネスは影響がないことが確かめられた。

終局荷重は、圧縮縁のコンクリートひずみが終局ひずみに達したときと定義したため、単純に実験値との比較はできないが、実験値との誤差は±6%にとどまっている。また、本解析において荷重が、降伏点以降最大荷重に達し、その後減少しないのは、圧縮コンクリートが終局ひずみ

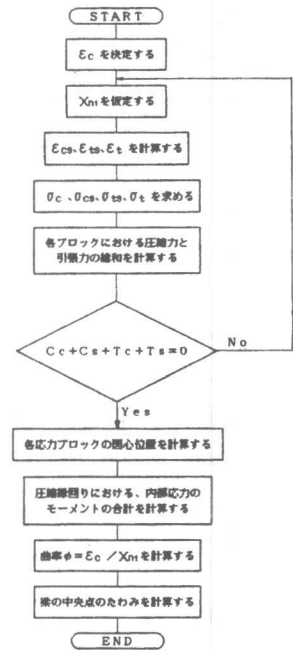


図7 解析過程のフローチャート

に達した後の挙動と、圧縮鉄筋の拘束が解除されて座屈するまでの過程が不明確なため評価されていないからだと思われる。

図9は、計算によって求められた梁の荷重と引張鉄筋のひずみの関係をプロットしたものである。この図によると、矩形梁、逆T形梁共に鋼繊維の混入によって、引張鉄筋のひずみ度が減少している。これは、鋼繊維の混入によって曲げ剛性が増大し、変形量が小さくなるので、鉄筋のひずみを減少させたことを意味している。特にRC梁においては、初亀裂荷重後テンションスティフネスを無視したため、急激にひずみ度が大きくなっている。その結果、RC梁の降伏点荷重時では、 $V_f=1.0\%$ 、 1.5% の鋼繊維混入によって矩形梁が各々最大で25.6%、28.7%、逆T形梁が各々最大で38.2%、43.1%もひずみ度が減少している。

このとき引張ブロックに含まれる鋼繊維の量を鉄筋の等価断面積に置き換えると、 $V_f=1.0\%$ 、 1.5% の矩形梁が各々29.0%、41.4%、逆T形梁が各々56.3%、81.3%だけ引張鉄筋が増加したことになる。本来は、等価断面積を引張ブロックの図心に置くべきであるが、ここでは、引張鉄筋の重心に仮定してひずみの減少を算定すると、 $V_f=1.0\%$ 、 1.5% の矩形梁が22.5%、29.3%、逆T形梁では36.0%、44.8%減少することになる。これより、鋼繊維の混入によって引張鉄筋の応力負担が減少することが確かめられた。

§4 曲げ終局耐力の略算式

鋼繊維補強コンクリートの部材特性を生かして、引張側のコンクリート強度と圧縮縁の終局ひずみの増加を考慮にいたれた終局曲げ耐力に対する解析も試みた。

内部応力の釣り合いから、SFRC部材の終局曲げ耐力式は、鉄筋による曲げ耐力とSFRCによる曲げ耐力の累加式として、次の略算式が与えられる。

$$M_u = (1 - \gamma d c_1) a t \sigma_y d + a t s \sigma_{ys} d + k_1 k_2 k_3 \sigma_t b D^2 + k_1 k_3 \sigma_t t (B - b) (D - 0.5 t) \quad (1)$$

ここに、 $a t$ 、 $a t s$ は梁及びスラブ筋の断面積、 b 、 d 、 D は梁の幅、有効成、全成、 t 、 B はスラブの厚さ、有効幅、 σ_t は鋼繊維コンクリート引張強度、 σ_y 、 σ_{ys} は梁及びスラブ筋の降伏点強度、 k_1 、 k_2 、 k_3 は引張ブロック係数を示す。

また、(1)式の梁主筋の項に $\gamma=1$ 、 $d c_1=0.1$ を代入すると、通常用いられているRC梁の曲げ終局耐力式にSFRC、スラブ筋の効果を付加した次の設計用略算式が得ら

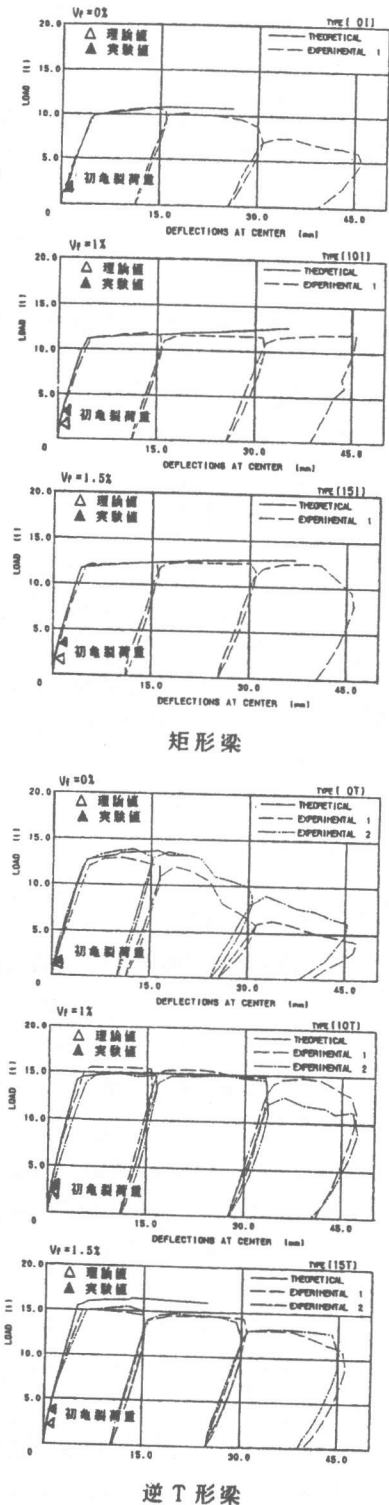


図8 荷重-たわみ曲線

れる。

$$M_u = 0.9a_t \sigma_y d + a_{ts} \sigma_{ys} d + k_1 k_2 k_3 \sigma_t b D^2 + k_1 k_3 \sigma_t t (B - b)(D - 0.5t) \quad (2)$$

ここで(1)式には、本実験から得られた鉄筋の降伏点応力度、鉄筋比、梁の有効成をそのまま用い、(2)式では、鉄筋の降伏点応力度は規格強度の1.1倍を用いて計算した結果を実験値一覧に示した。

曲げ終局耐力における理論値と実験値の差は、(1)式の場合、平均すると逆T型梁の1.5%を除けば、大変良い一致がみられるが、(2)式では、やや小さく評価されている。

§5 まとめ

本論文では、両端を単純支持されたSFRC逆T型梁の曲げ実験及び引張領域における鋼繊維補強コンクリートのテンションスティフネス及び圧縮縁における終局ひずみの増加等の鋼繊維による補強効果を考慮にいたした鋼繊維補強コンクリート

矩形及び逆T型梁の曲げ挙動の解析について述べた。これら一連の実験及び理論解析により、以下のことが示唆される。

1. 鋼繊維の亀裂拘束効果及び引き抜き抵抗によって、曲げ剛性及び強度の向上に効果があることが確認された。

2. スラブ付加による影響については、スラブに含まれた鋼繊維によって、RC矩形梁に比して降伏点及び最大強度が増加することが確かめられた。

3. 鋼繊維の補強効果は、鋼繊維補強コンクリートのテンションスティフネスに大きな影響を受ける。直接引張実験より得られた結果を基にしてモデル化されたテンションスティフネスは、非弾性解析から、実際の応力状態に近いものであると考えられる。

4. 曲げ終局耐力の略算式による結果は実験値とよく一致している。設計用略算式は、ほぼ安全側に評価することが出来ると思われる。

今後の課題としては、繊維の形状及び長さを考慮に入れ、より一般的な形でテンションスティフネスを評価すると共に、鋼繊維補強コンクリートの強度が、繊維の配向・分散に大きく影響されることから、繊維を有効な方向に配向させるような施工法の確立が望まれる。

《参考文献》

1. 横谷 栄次・町田 恭一・郡嶋 宏治・佐原 幹久：“SFRC部材の曲げ終局強度の解析” 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、昭和60年
2. 横谷栄次、町田恭一：“鋼繊維補強コンクリートのひび割れ後の引張挙動に関する研究” コンクリート工学年次論文報告集、第9巻、昭和62年
3. Robert Jhon Craig, Jack Decker, Lawrence Dombrowski, Robert Laurencelle, and Jhon Federvich: "INELASTIC BEHAVIOR REINFORCED FIBROUS CONCRETE" JOURNAL of STRUCTURAL ENGINEERING Vol.113, No.4 April, 1987

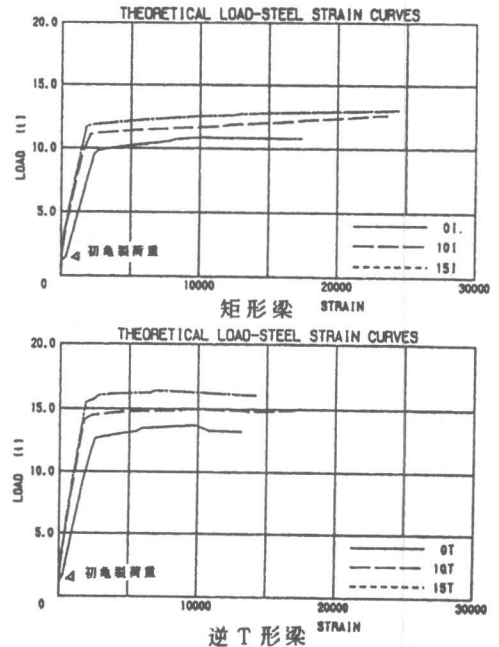


図9 荷重-引張鉄筋のひずみ図