

炭素繊維およびアラミド繊維により 横方向補強されたコンクリートの圧縮性状

福澤公夫¹・沼尾達弥²・三井雅一³・野崎秀洋⁴

¹正会員 工博 茨城大学教授 工学部 都市システム工学科 (〒316-8511 日立市中成沢町4-12-1)

²正会員 工博 茨城大学助教授 工学部 都市システム工学科 (同上)

³学生会員 工修 茨城大学大学院 理工学研究科 (同上)

⁴新発田市役所 建築住宅課 (〒957-0053 新発田市中央町4-10-4)

柱状のコンクリート構造物の補修・補強方法の一つに炭素繊維あるいはアラミド繊維等の高性能な繊維を横方向に巻立て補強する方法がある。この場合の補強効果を評価するためには、拘束を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係を正確に把握しなければならない。高性能繊維は、破断に至るまでひずみに比例して応力が増加するという独特な引張性状を有している。そのため、鋼材による補強を前提とした既往の研究成果をそのまま用いることはできない。本研究では、高性能繊維の種類、繊維の形態、換算繊維比およびコンクリートの圧縮強度が圧縮性状へ与える影響を実験的に検討するとともに、その実験に基づき高性能繊維により横方向に補強されるコンクリートの応力-ひずみ算定方法を提案する。

Key Words: carbon fiber, aramid fiber, lateral reinforcement, stress-strain relationship, compressive strength, unit strain energy, triaxial compressive loading, failure criterion

1. 序論

兵庫県南部地震により、多くのコンクリート構造物が甚大な被害を受ける結果となった。そのため、劣化・損傷を受けた構造物に対する補修・補強とともに耐震性の劣る既存構造物の補強が急務となっている。柱状コンクリート構造物の場合には、周囲を鋼板で補強する鋼板巻立て工法や鉄筋コンクリートにより補強するRC巻立て工法が採用されることが多い¹⁾。しかし、鋼板巻立て工法には、運搬や取付けのための作業空間を要すること、曲面加工が困難であること、あるいは、鋼板の腐食に対する対策を立てなければならないことなど欠点がある。また、RC巻立て工法では、かぶりが断面を増大させるのに加え、かぶりコンクリートが剥落する際に耐力が一時的に低下するなどの構造上の問題もある。

近年、軽量、高強度、高耐腐食性などの優れた特長を持つ炭素繊維、アラミド繊維等に代表される高性能繊維をコンクリートの補強材として用いること

が注目されている。補修・補強についてもこれら高性能繊維のローピングあるいはシートを柱状コンクリート構造物の最外縁に補強する高性能繊維巻立て工法が注目され、多くの研究が行われるとともに実構造物へも盛んに適用されている^{1), 2), 3)}。

鋼板あるいは高性能繊維により横方向補強されたコンクリート部材に軸力、曲げあるいはそれらが同時に作用するとき、圧縮部のコンクリートは、横方向への変形が拘束され、3軸圧縮状態となる。そのため、鋼板あるいは高性能繊維により横方向の補強を行う場合の効果を正確に評価するためには、拘束を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係を明らかにする必要がある。多軸圧縮応力下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係については多くの研究がなされている^{4), 5), 6)}。しかし、これらの提案式は、鋼材により補強される場合を前提としており、破断するまで直線的な応力-ひずみ関係を有する高性能繊維により補強する場合にそのまま用いるわけにはいかない。

表-1 実験の組合せ

換算繊維比 (%)	ローピング						シート		
	炭素繊維			アラミド繊維			炭素繊維		
	0.19	0.37	0.56	0.18	0.36	0.53	0.58	1.03	1.47
45	●	●	●	●	●	●	●	●	●
52.5	●	●	●	●	●	●	—	—	—
60	●	●	●	●	●	●	—	—	—

高性能繊維により横方向補強したコンクリートに軸力が作用する場合については、睦好らおよび渡部らの研究がある^{7), 8)}。すなわち、睦好らは、炭素繊維シートを用いたFRPで拘束したコンクリートの圧縮試験を行い、その場合の応力-ひずみ関係を境の提案する横拘束剛性の考え方を採用し⁹⁾、六車らの提案する曲線式¹⁰⁾に当てはめて応力-ひずみ関係を提案している⁷⁾。また、渡部らは、炭素繊維およびアラミド繊維のシートを用いた試験を行い、エンドクロニック理論を適用した非線形3次元有限要素法による方法を提案している⁸⁾。この種の補強を行う場合、補強材に塑性変形能がないため、補強材の破壊とともにコンクリートの破壊となる。そのため、破壊に至るまでの関係を正確に推定できるものでなければならない。しかし、睦好らの場合、応力下降域の曲線の形状を直線としているが、実際に測定される応力-ひずみ関係は、曲線となることが多い。また、渡部らの場合、応力-ひずみ関係の途中までを推定しているにすぎない。

本研究は、高性能繊維により横方向に補強されるコンクリートの破壊に至るまでの応力-ひずみ関係に及ぼす高性能繊維の種類、繊維の形態、換算繊維比およびコンクリートの物性の影響を実験的に検討するとともに、これらの要因についての任意の条件に対する応力-ひずみ算定式を提案するものである。

2. 実験方法

(1) 要因と水準

本研究における実験の組合せを表-1に示す。要因として、繊維の種類、繊維の形態、換算繊維比およびコンクリートの水セメント比を取り上げた。

PAN系炭素繊維およびアラミド繊維の2種類について比較を行い、炭素繊維については繊維の形態をローピングおよびシートとした。コンクリートの強度を変化させるため、水セメント比を45～60%

の範囲で変化させた。ローピング本数は、それぞれの繊維につき、12本、24本、36本と変化させた。

表-1における換算繊維比は、らせん鉄筋の場合と同様に繊維の換算断面積を供試体断面積で除して求めた。式(1)に換算繊維比 p' の算定式を示す。

$$p' = \frac{4 A_i}{D h} \quad (1)$$

ここに、 h ：ローピング束巻き付けピッチ、シートでは供試体高さ

D：供試体直径 (=100mm)

A_i ：巻き付けるローピングの断面積、あるいは h あたりのシート断面積

換算繊維比はローピング、シートとも3水準の実験を行った。ただし、ローピングについては繊維の種類、コンクリートの水セメント比の全ての組合せにつき換算繊維比を3水準変化させたがシートについては炭素繊維を用い、水セメント比が45%について3水準変化させた。

ローピングを巻立てるピッチは、実験では30mmと設定した。換算繊維比を一定にした場合、ピッチを12～50mmの範囲で変化させても強度等の性状に及ぼす影響はないことを確認している^{10), 11)}。

(2) 使用材料

a) コンクリート

コンクリートの材料として普通ポルトランドセメント、久慈川の旧河川敷より採取する川砂、鬼怒川の旧河川敷から採取される玉石を原料とする碎石（粗骨材最大寸法25mm）およびナフタレン系高強度用減水剤を用いた。配合はスランプ12±2cmとなるよう試し練りを行い決定した。打設の翌日脱型し、材齢28日まで水中養生を行った。1週間の気中養生を経てから繊維を巻き付けた。その後1週間20℃、60%RHの恒温恒湿室にて静置した後、圧縮試験を行った。1つの試験値を得るために供試体の

表-2 繊維の物性

(a) ロービング

繊維の種類	繊維径 (μm)	フィラメント数 (本)	断面積 (mm^2)	引張強さ (N/本)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	伸び (%)
炭素繊維	7	3000	0.116	355	3048	203	1.4
アラミド繊維	11.9	1000	0.111	367	3303	114	3.1

(b) シート

繊維の種類	繊維目付 (g/m ²)	繊維比重 (g/cm ³)	設計厚さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	伸び (%)
炭素繊維	200	1.80	0.11	3824	264	1.5

本数はロービング供試体の場合 2 本、シート供試体の場合 3 本とした。

b) 繊維

ロービングは、連続繊維を所定の本数束ねたものであり、シートは連続する繊維を一方向に配列し、粘着剤を塗布したネットにより軽度に固定したものである。

ロービングに使用する繊維は、PAN系炭素繊維およびアラミド繊維を使用した。繊維に用いる樹脂は、エポキシ樹脂とポリエステル樹脂を比較検討した結果、強度および伸びの点からエポキシ樹脂を採用した。ロービングおよびシートの物性値を表-2に示す。なお、繊維の物性はエポキシ樹脂を含浸させてFRPとするときの値である。引張強度および弾性係数を求めるための断面積は繊維の断面積としている。ロービング 1 本あたりの引張強さは、炭素繊維で 355N、アラミド繊維で 367N と若干差はあるもののほぼ一致し、伸びは炭素繊維で 1.4%、アラミド繊維で 3.1%と繊維の特質が明確となる。一方、シートは炭素繊維のみとし、引張強度が 3824N/mm²、伸びは 1.5 % の繊維を使用した。

(3) 供試体の作製

供試体には、直径 100mm、高さ 200mm の円柱形供試体を用いた。ロービングの巻き付けは、供試体を一定の速度で回転させ樹脂を含浸させたロービングを上から下へ移動させることによって行った。巻付けは、1 回で行い、そのため 1 回に巻付ける本数は換算繊維比に応じて変化させた。なお、繊維端部における供試体部分より破壊が始まらないように、供試体両端部においてラップ長 100mm を設定した。

シートの場合は供試体の接着面にプライマーを塗布し、乾燥後エポキシ樹脂を含浸させたシートを供試体に巻付けた。換算繊維比は、シートの巻付け回

数によって調整を行った。巻数が 1 枚の場合がロービングにおける最大の換算繊維比とほぼ等しくなる。なお、シートの場合もラップ長は 100mm とした。ラップ長を 100mm とすることにより、いずれの供試体においてもラップした部分から供試体の破壊が始まるることはなかった。

巻付ける繊維とコンクリートとの付着の有無が、圧縮性状に及ぼす影響については、炭素繊維では付着有りの方が、アラミド繊維では付着無しの方が圧縮性状を改善できることが確認されている^{1,2)}。ここでは、全ての供試体についてコンクリートと繊維との付着が生じるようにした。

(4) 載荷方法

供試体の載荷方法を図-1に示す。(a) は繊維補強を行わないコンクリート供試体（以下、ブランク供試体という）あるいは補強量が少ない供試体（換算繊維比：0.18, 0.19 %）の載荷方法であり、応力下降域における挙動の計測を行うために荷重枠を使用した。供試体のひずみがブランク供試体の圧縮強度の 85 % 時のひずみに達したときにナットを締め付けて、荷重の一部を 4 本の PC 鋼棒へ負担させ、応力下降域の応力-ひずみ関係を測定した。供試体の上面には 2 枚のテフロンシートの間にシリコングリースをはさんだ減摩パッドを用い、摩擦による端面の拘束をなくした。

また、(b) は補強量が多い供試体における載荷方法である。繊維により補強を行ったコンクリートの変形量が多いことから、この場合は荷重枠を使用せず、かつ変形に伴う供試体の移動を防止するため上面の減摩パッドを省略した。

いずれの場合も荷重はロードセルにより、また軸方向圧縮ひずみは、変位計を用いたひずみ測定装置（コンプレッソメータ、ゲージレンジス 100mm）にて測定した。ロービング供試体のワイヤストレイ

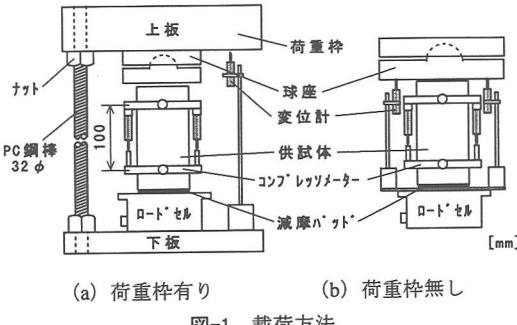


図-1 載荷方法

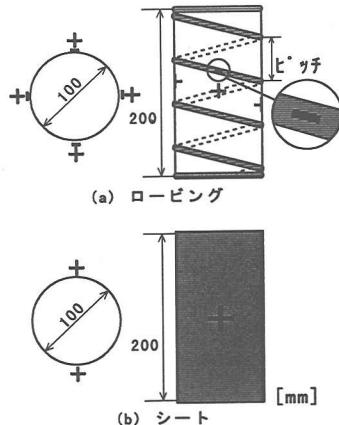


図-2 ワイヤストレインゲージ貼付位置

ゲージの配置位置を図-2 (a) に示す。コンクリート表面に 6mm クロスゲージ、纖維には載荷に伴う纖維のひずみを測定するため 3mm ワイヤストレインゲージを、それぞれ供試体中央付近に 4カ所配置した。なお、纖維のひずみを測定するためのゲージは、纖維の表面は平滑でなく、また樹脂の硬化後平滑になると纖維本来の強度を発揮できない恐れもあることからローピング束の巻付け時に纖維の中心に埋め込んだ。ローピングの供試体では、纖維方向にゲージを貼付することから、斜め方向のひずみの測定となる。そのため拘束応力等は水平方向のひずみに換算して求めた。シート供試体のゲージ配置位置を、図-2 (b) に示す。シート供試体では、ゲージレンジス 30mm のワイヤストレインゲージをシート表面に貼付した。

軸方向ひずみは、コンプレッソメータによる測定値を基本とし、大変形となりコンプレッソメータとの接点のコンクリートが破壊する場合に、供試体の外側に配置した変位計の測定値を用いた。

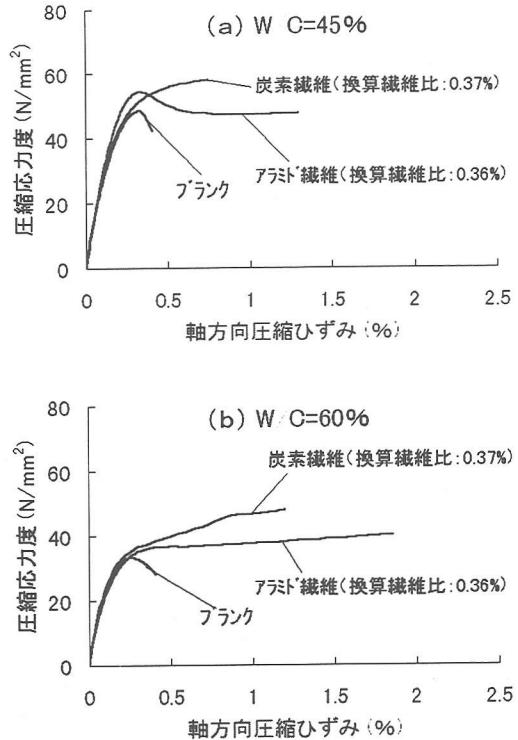


図-3 繊維の種類が圧縮性状に及ぼす影響

3. 実験結果

横拘束したコンクリートの圧縮性状に関する実験の結果を、纖維の種類の影響、補強を行うコンクリートの強度の影響、纖維の形態および換算纖維比の影響について以下に示す。

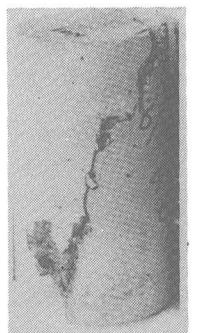
(1) 繊維の種類の影響

a) 圧縮性状

図-3に水セメント比 45 %および 60 %のローピング供試体について纖維の種類を変化させるとときの応力-ひずみ曲線の例を示す。また参考のため、ブランク供試体の応力-ひずみ曲線も示してある。

図-3より、纖維の横方向補強により供試体の圧縮性状が改善されること、および纖維の性質によりコンクリートの応力-ひずみ関係が変化することが分かる。すなわち 0.5 %を超えるような時点の応力は、炭素纖維を用いる場合の方が大きく終局点のひずみはアラミド纖維の方が大きい。

ここで、応力-ひずみ関係について本文で用いる用語について述べたい。図-4の破線に示すように、軸方向ひずみの増加とともに応力が増加し、変化点



(a) ブランク供試体



(b) 炭素繊維供試体



(c) アラミド繊維供試体

写真-1 繊維の種類を変化させるとときの破壊状況

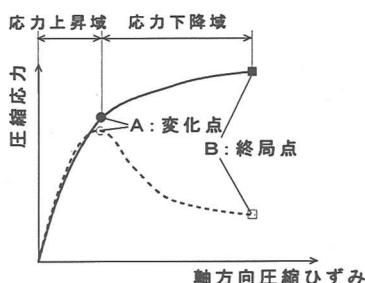


図-4 応力ーひずみ曲線形状の定義

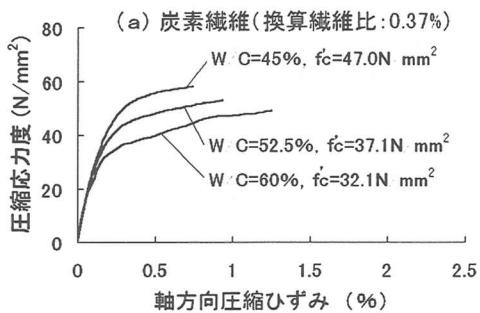
(A) を経て応力が低下し終局点 (B) で破壊する場合と、図の実線で示すように終局点まで応力が増加する場合がある。変化点までを応力上昇域といい、その後を応力下降域という。第4章で応力ーひずみ関係をの定量化を提案するが、変化点を境に算定式が異なる。なお、図-4における実線の場合、実測の曲線から変化点を求ることはできない。この場合の変化点は、定量化により求めた曲線における算定式を変えた点ということになる。なお、圧縮強度は試験で得られる最大応力とした。

b) 破壊状況

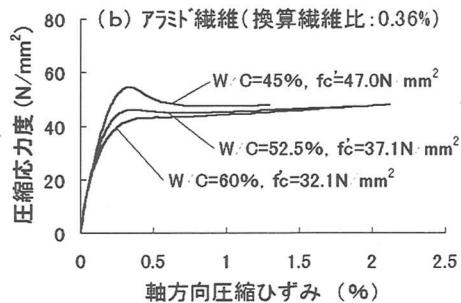
炭素繊維およびアラミド繊維のロービングで補強する場合およびブランク供試体について、試験後の供試体の破壊状況を写真-1に示す(水セメント比45%)。ブランク供試体においては、供試体上面から下面にかけて数本のひび割れが卓越しているが、連続繊維によって拘束された供試体は、内部のコンクリートの中央部が完全に破壊している。特にアラミド繊維の場合、破壊部分が広範囲となっている。

(2) コンクリート強度の影響

図-5に、換算繊維比を一定とし、コンクリートの圧縮強度を変化させる場合の応力ーひずみ曲線の例



(a) 炭素繊維(換算繊維比:0.37%)



(b) アラミド繊維(換算繊維比:0.36%)

図-5 コンクリート強度の影響

を示す。表-1に示すように、水セメント比を45, 52.5および60%の3水準に変化させた。(a)は炭素繊維を用いた場合で換算繊維比は0.37%である。また、(b)はアラミド繊維を用いた場合で換算繊維比は0.36%である。ブランク供試体の圧縮強度は、45%で 47.0 N/mm^2 , 52.5%で 37.1 N/mm^2 , 60%で 32.1 N/mm^2 となった。

図-5より、水セメント比が大きいほど、終局ひずみが大きくなる傾向が、炭素繊維およびアラミド繊維の双方について言える。アラミド繊維を使用した供試体を例に取ると、水セメント比45%で終局ひずみは約1.3%であり、52.5%では約1.9%，60%では約2.1%となっている。

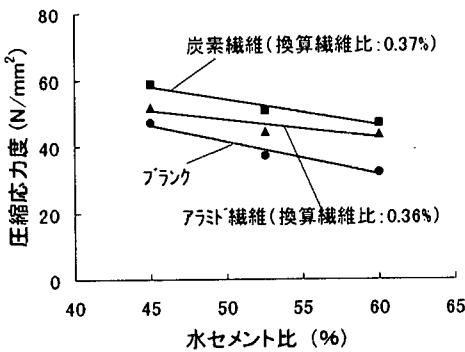


図-6 コンクリートの水セメント比と圧縮強度の関係

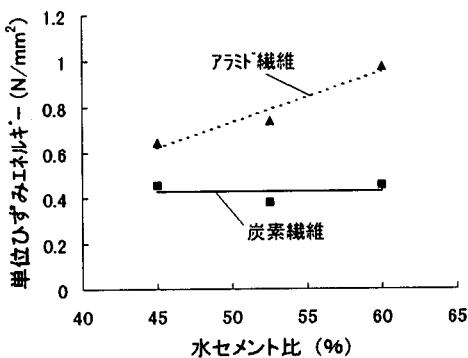


図-7 コンクリートの水セメント比と単位ひずみエネルギーの関係

得られた応力-ひずみ関係における圧縮強度と水セメント比との関係を図-6に示す。図-6から分かるように、炭素繊維、アラミド繊維とともに水セメント比が小さくなるほど、つまりコンクリート強度が高いほど圧縮強度が大きくなる。ただし、繊維補強による圧縮強度増加率は低強度のコンクリートほど大きい。

図-7には、図-5に示される応力-ひずみ曲線の積分で表される単位体積あたりのひずみエネルギー（以下、単位ひずみエネルギーという）と水セメント比との関係を示す。単位ひずみエネルギーは、連続繊維により横方向補強を行う場合の圧縮韌性を総合的に表す指標と考えられる。この図から炭素繊維の場合は、単位ひずみエネルギーがコンクリートの水セメント比の影響を受けないこと、一方、アラミド繊維の場合は、コンクリートの水セメント比が大きくなる、すなわち圧縮強度が低くなるにつれて単位ひずみエネルギーが顕著に増加することが分かる。

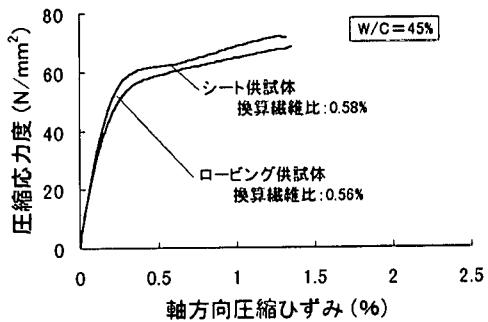


図-8 補強繊維の形態が圧縮性状に及ぼす影響

(3) 繊維の形態の影響

a) 圧縮性状

繊維の形態の違いが圧縮性状に及ぼす影響を図-8に示す。ここでは、ロービング供試体とシート供試体の換算繊維比をそれぞれ、0.56 %、0.58 %と近い値の結果での比較を行った。また、用いたコンクリートの水セメント比は 45 %であり、前述のように圧縮強度は 47.0 N/mm^2 である。

この図から分かるように、繊維の種類が同一（炭素繊維）で換算繊維比が近似するロービング供試体とシート供試体の圧縮性状には、大きな差異は認められない。図より同一の軸方向ひずみに対する応力はシート供試体がロービングよりも若干上回っている。表-2に示すようにシートに使用している炭素繊維の弾性係数は 264 kN/mm^2 であるのに対しロービングに使用した炭素繊維では 203 kN/mm^2 と低い値をとることから、シートを用いる場合の方が補強繊維の軸方向剛性が大きくなるためと考えられる。したがって、巻立て間隔が 30mm の場合という条件の下でロービングおよびシートの補強繊維形態は横拘束を受けるコンクリートの圧縮性状にほとんど影響しないといえよう。

b) 壊壊性状

写真-2にシートで補強した供試体の圧縮試験後の外観および縦断面を示す。ロービング供試体では、ある時点で供試体端部に軸方向のひび割れが生じ、そのひび割れが全域に広がり始める。その後、中央部のロービングが破断し破壊に至る（写真-1 (b), (c)）。ロービング破断時には、コンクリートは中央部を中心に完全に破壊し、いくつかの塊となっている。それに対し、シート供試体では、全面を繊維で覆っているため内部のコンクリートの損傷は把握できないが、最終的には写真-2 (a) に示すように、供試体の中央部 1/3 の区間のシートが破断して供試体の破壊に至る。試験後、シート供試体を軸方向に

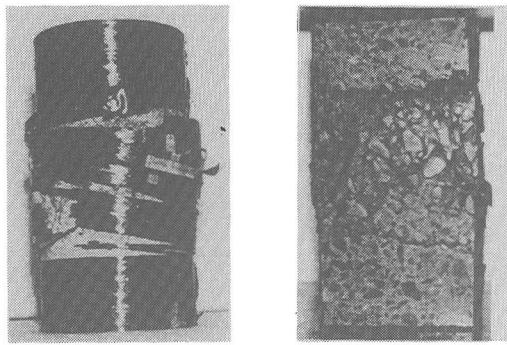


写真-2 シートで補強する場合の破壊状況

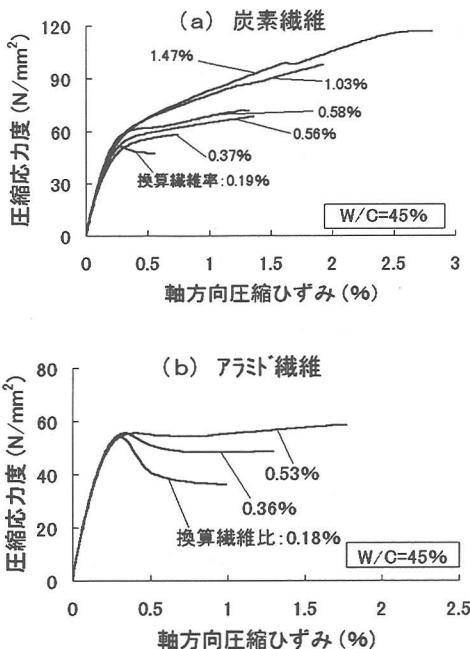


図-9 换算繊維比が圧縮性状に及ぼす影響

切断し内部を観察すると、両端部付近のコンクリートは若干の損傷にとどまり、中央部 1/3 の区間のコンクリートが圧壊している。

(4)換算繊維比の影響

換算繊維比を変化させる場合の応力ひずみ曲線の例を図-9に示す。(a)は炭素繊維を補強材として用いた実験結果であり、ロービング供試体(換算繊維比: 0.19, 0.37, 0.56 %)とシート供試体(換算繊維比: 0.58, 1.03, 1.47 %)の結果を併せて図に示している。(b)はアラミド繊維のロービングにて補強した供試体(換算繊維比: 0.18, 0.36, 0.53 %)の圧縮性状である。なお、供試体の水セメント比は 45

%である。

この図より、炭素繊維により補強した供試体の圧縮性状は、その換算繊維比が増加するにしたがい、圧縮強度、終局点応力および終局点ひずみとともに増加している。アラミド繊維の場合は、換算繊維比の増加に伴い、終局点応力および終局点ひずみは顕著に増加するが、圧縮強度は若干の増加に留まる。どちらかの場合も換算繊維比の増加とともに圧縮性状が改善される。

図-10に、圧縮強度と繊維が引張強度に達したとして求める拘束圧(以下、繊維拘束圧という)との関係を示す。この繊維拘束圧 $\sigma_{\text{リ}}^*$ は式(2)により算定される。

$$\sigma_{\text{リ}}^* = \frac{1}{2} p' f_t \quad (2)$$

ここに、 p' : 換算繊維比

f_t : 繊維の引張強度

図-10に示すように、圧縮強度は繊維拘束圧の増加に伴い、繊維の種類ごとおよび水セメント比ごと直線的に増加する。また、図中の繊維拘束圧が低い域の拡大図より、アラミド繊維による補強に比べ炭素繊維を用いる方がコンクリートの水セメント比に関わらず圧縮強度増加量が大きいことが分かる。

単位ひずみエネルギーと繊維拘束圧との関係を図-11に示す。図から分かるように、両者には図-10と同様に線形の関係が確認できる。炭素繊維を用いる場合は、水セメント比に関わらず 1 つの直線となるのに対し、アラミド繊維を用いる場合は水セメント比により異なる直線となる。同一の繊維拘束圧に対する単位ひずみエネルギーは、炭素繊維の場合よりもアラミド繊維の場合の方が大きい。また、アラミド繊維では水セメント比の大きい方が直線の勾配が大きい。

4. 高性能繊維により横補強を行う場合のコンクリートの応力-ひずみ関係の定量化

(1) 定量化の概念

畠中らは、独自の低側圧三軸圧縮試験装置により、コンクリートに一定の低側圧が作用するときの応力-ひずみ曲線を得ている。また、その結果より低側圧下の圧縮性状の定量化を行っている⁴⁾。この定量化では、破壊条件として Ottosen の提案式¹³⁾を用い、応力-ひずみの関係は Popovics の式¹⁴⁾を改良して独自の算定式を用いている。本研究では、この

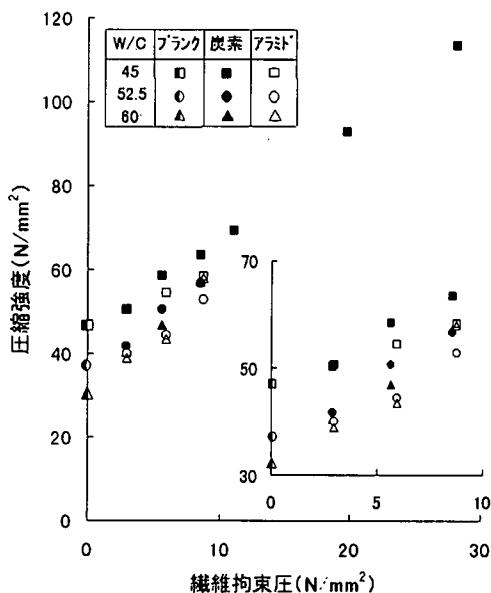


図-10 繊維拘束圧と圧縮強度との関係

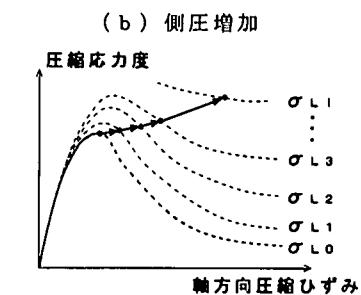
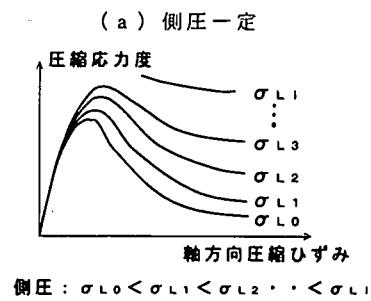


図-12 定量化概念

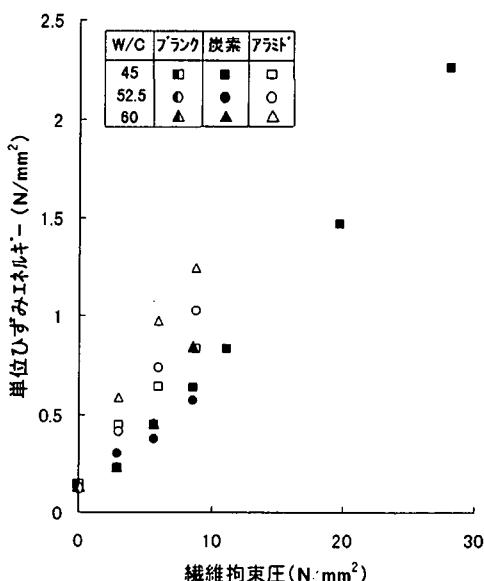


図-11 繊維拘束圧と単位ひずみε_{fiber}との関係

畠中らの提案式の利用を試みた。

図-12 (a) に示すように畠中らは側圧を一定とする場合について定量化を行っている。炭素繊維およびアラミド繊維は降伏点を持たないため、軸方向圧縮ひずみに伴う横方向ひずみの増加により、繊維による拘束力（側圧）は、繊維が破断するまで増加する。図-13に、供試体の軸方向圧縮ひずみと繊維ひずみの測定結果の一例を示す。これより、軸方向ひずみが 0.25 ~ 0.35 % を境に急激にほぼ直線的に繊

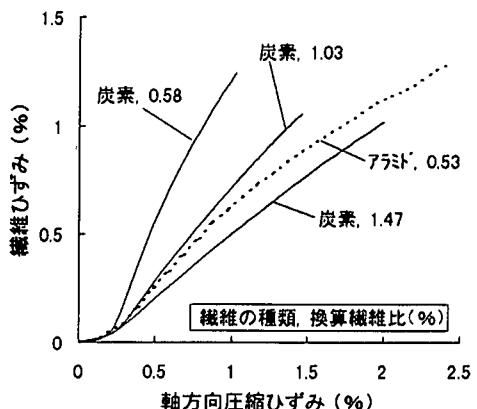


図-13 軸方向ひずみと繊維ひずみとの関係

維のひずみが増大していることが示される。そこで、本研究では図-12 (b) に示すように一定側圧の応力-ひずみ曲線（図-12 (a)）上を側圧の上昇に応じて移動するものと仮定して、側圧が直線的に増加するものとして定量化を試みた。

(2) 定量化の方法

a) 側圧の求め方

繊維のひずみが増大し、側圧が急激に増加するひずみはプランク供試体の変化点ひずみとほぼ一致している。このことより、側圧と軸方向ひずみとの関係（側圧増加モデル）を図-14に示すように 2 区間からなる直線モデルとした。第一の区間は、繊維の

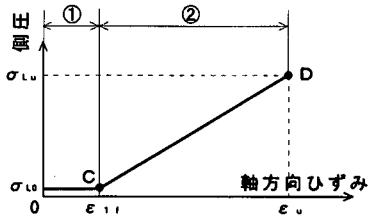


図-14 側圧増加モデル

ひずみが、拘束を受けないコンクリートの変化点時の横方向ひずみになるときの側圧（以後、初期側圧 σ_{L0} という。）が作用する区間（図中、①区間）である。初期側圧の算定式を式(3)に示す。

$$\sigma_{L0} = \frac{1}{2} p' E_i \varepsilon_c \nu \quad (3)$$

ここに、 p' ：換算繊維比

E_i ：繊維の弾性係数

ε_c ：コンクリートの変化点ひずみ

ν ：コンクリートのポアソン比 (=0.167)

第二の区間は終局点までの区間である（図-14、②区間）。D点（終局点側圧 σ_{Lu} 、終局点ひずみ ε_u ）は実験結果に基づき決定した。すなわち、終局点側圧および終局点ひずみの算定式は表-3に示すように実験要因に基づき、コンクリートの物性、連続繊維の物性および換算繊維比を説明変数とし、終局点側圧 σ_{Lu} あるいは終局点ひずみを目的変数としてF値を2.0とする変数増減法による重回帰分析を行つて求めた。なお、繊維の弾性係数は引張強度と伸びから求まることより、重回帰分析において多重共線性が生じるので説明変数とはしなかった。重回帰分析の結果、終局時側圧の算定式は式(4)で与えられる。この算定式の寄与率は0.972であり、危険率1%で有意である。また、終局時ひずみの算定式を式(5)に示す。この算定式の寄与率は0.813であり、危険率1%の水準で有意である。

$$\sigma_{Lu} = 0.00403 f_t - 0.378 Ex + 10.1 p' - 12.5 \quad (4)$$

$$\varepsilon_u = -0.000761 f_t + 0.496 Ex + 1.71 p' - 0.0310 \sigma_c + 2.87 \quad (5)$$

b) 応力-ひずみ算定方法

応力-ひずみ関係は前にも述べたように畠中らの方法を基本として以下のように求めた。

表-3 説明変数

	説明変数	記号
コンクリートの物性	圧縮強度 (N/mm ²)	σ_c
	変化点ひずみ (%)	ε_c
連続繊維の物性	換算繊維比 (%)	p'
	伸び (%)	Ex
	引張強度 (N/mm ²)	f_t

側圧が、初期側圧 σ_{L0} のときの、コンクリートの軸方向圧縮強度 σ_{L0} およびこのときの軸方向ひずみ ε_{11} の算定方法を式(6)および式(7)に示す Ottosen の多軸応力下における破壊基準式¹³⁾により求める。式(6)および式(7)における定数は全て畠中らの提案する値である⁴⁾。

$$f(I_1, J_2, \cos 3\theta) =$$

$$A \frac{J_2}{\sigma_c} + \lambda \frac{\sqrt{J_2}}{\sigma_c} + B \frac{I_1'}{\sigma_c} - 1 = 0 \quad (6)$$

$$\varepsilon_{11} = -\varepsilon_c | I_{11} / \sigma_c | \quad (7)$$

$$\text{ここに}, \quad I_{11} = \sigma_{11} + \sigma_L + \sigma_L = \sigma_{11} + 2\sigma_L$$

$$J_2 = (\sigma_{11} - \sigma_L)^2 / 3$$

$$\lambda = \left(k_1 \cos \frac{\pi}{3} - \frac{1}{3} \arccos(-k_2 \cos 3\theta) \right)$$

θ ：偏差平面において静水圧軸との交点である原点を中心として σ_L 軸と応力点までなす角

$$\cos 3\theta = \frac{3\sqrt{3} J_3}{2 J_2^{3/2}}$$

$$J_3 = \frac{2}{27} (\sigma_{11} - \sigma_L)^3$$

$$A=1.256, B=4.030, k_1=14.63, k_2=0.987$$

σ_c ：コンクリートの変化点応力（圧縮強度）

σ_L ：側圧

σ_{11} ：側圧 σ_L のときの圧縮強度（未知数）

ε_{11} ： σ_{11} に対応する軸方向ひずみ（未知数）

$$I_{11} = I_1 = \sigma_{11} + 2\sigma_L$$

$$a=2.2$$

ε_c ：コンクリートの変化点ひずみ

応力上昇域における応力-ひずみの関係は式(8)に示す Popovics の式より求める。初期側圧 σ_{L0} を側圧 σ_L に代入して得られる点 $(\varepsilon_{11}, \sigma_{11})$ は、先にも述べたように変化点と定義している。この点までは側圧を一定とし、式(8)より応力 σ_{11} およびひずみ ε_{11} の関係を求める。

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_{i+1}} = \frac{n_a \epsilon_i / \epsilon_{i+1}}{n_a - 1 + (\epsilon_i / \epsilon_{i+1})^{m_a}} \quad (8)$$

ここに、 ϵ_i : 応力 σ_i における軸方向ひずみ

$$n_a = E_i / (E_i - (\sigma_{i+1} / \sigma_i))$$

E_i : コンクリートの初期弾性係数

軸方向ひずみが ϵ_{i+1} より大きい部分は、応力下降域であると考える。側圧は、図-14に示すように C 点、D 点を結ぶ直線上を増加をするとして任意の軸方向ひずみ ϵ_i に対して求める側圧 σ_{L_i} に対して、式(6)および式(7)より、その側圧を受けるときの圧縮強度 σ_{i+1} およびその時のひずみ ϵ_{i+1} を求める。その両値を用い、式(9)に示す畠中らによる Popovics の式の改良式を用いて軸方向ひずみ ϵ_i に対する応力 σ_i を計算する。以上の繰り返しを軸方向圧縮ひずみが終局ひずみ ϵ_c になるまで行い算定された点を結ぶことにより応力下降域の応力-ひずみ曲線を求めた。式(9)の各係数は畠中らの提案に従った。

$$\frac{\sigma_i}{\sigma_{i+1}} = \frac{1}{n_a} + \frac{(n_a - 1) X}{n_a - 1 + X^{n_a}} \quad (9)$$

ここに、 $n_a = \alpha (1 + a (\sigma_c / 100))^b$

$$X = (\epsilon_i / \epsilon_{i+1})^m$$

$$\alpha = 0.8, m = 0.5, a = 2.3, b = 1.0$$

(3) 実験値と計算値との比較

前項の計算方法によって得られた応力-ひずみ曲線の計算値と実験値との比較を図-15に示す。(a) は炭素繊維を用いたシート供試体で、換算繊維比は 1.03 % であり、(b) および (c) はアラミド繊維を用いたローピング供試体である。換算繊維比は (b) は 0.37 %、(c) は 0.18 % である。水セメント比は (a) は 45 %、(b) (c) は 52.5 % である。

炭素繊維シートを用いる場合のように繊維による拘束力が大きい場合、(a) のように変化点以降も応力-ひずみ曲線が上昇する挙動を示すが、先述の方法によりそのような挙動についても十分表現することが可能であることがわかる。なお、この図には側圧を一定として、初期側圧 σ_{L_0} および終局側圧 σ_{L_c} のそれぞれが作用している場合の応力-ひずみ関係も示してある。図より実測の応力-ひずみ関係はこれらの応力-ひずみ関係とは全く異なっていることが分かる。

また (b) に示すようにアラミド繊維のような弹性係数が小さく、伸びが大きい繊維による補強の特徴とされる応力下降域におけるひずみの増加の傾向

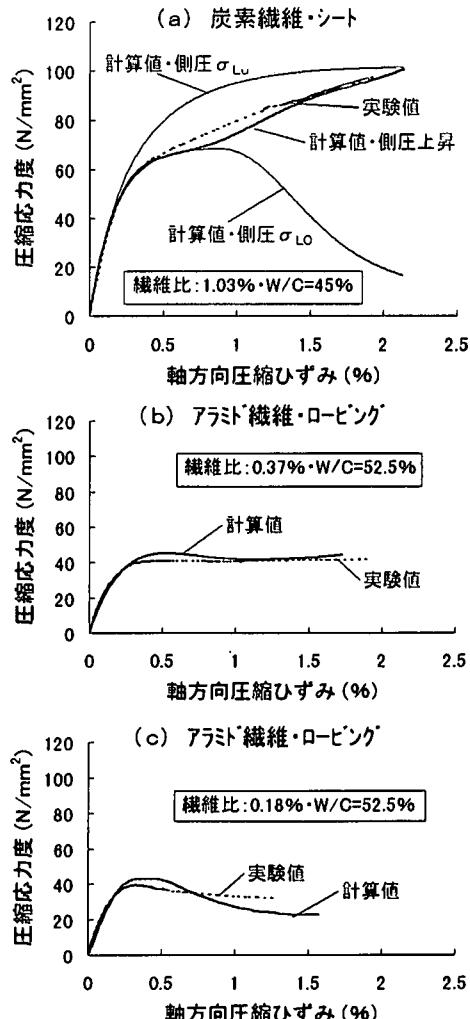


図-15 応力-ひずみ曲線の計算値との比較

についても、応力-ひずみの計算値は実験値とよく整合している。(c) は、繊維量が少ない場合に生じる挙動として示した。この場合、応力下降域において実験値と計算値とで差異は見られるものの応力-ひずみ曲線の傾向は一致しており、本方法の有用性を確認できる。

図-16には、圧縮強度の実験値と定量化により得られた計算値との比較を示す。炭素繊維およびアラミド繊維ともにある程度のバラツキはあるものの、この定量化の有用性を確認できる結果となった。また、図-17には、繊維による補強効果を総合的に示す指標の単位ひずみエネルギーによる実験値と計算値の比較を示す。図-16と同様に本研究の定量化の有用性を確認できるといえよう。

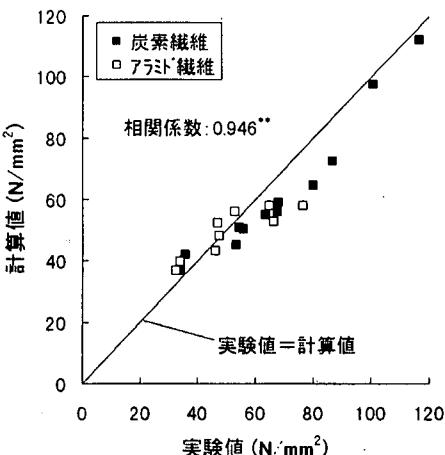


図-16 圧縮強度の実験値と計算値との比較

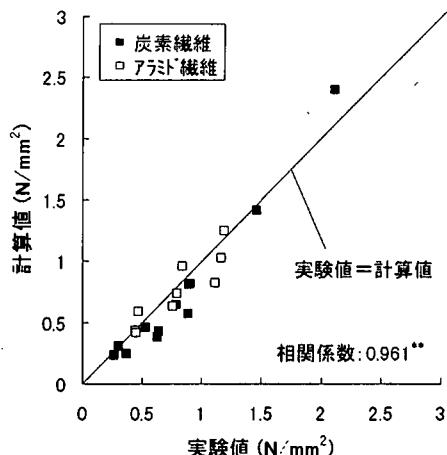


図-17 単位ひずみエネルギーの実験値と計算値との比較

5. 結論

水セメント比が45～60%のコンクリートを、炭素繊維およびアラミド繊維のロービングあるいはシートにより横方向補強を行ったコンクリートの圧縮性状に関する研究を行った。なお、コンクリートの供試体には、直径10cm、高さ20cmの供試体を用い、炭素繊維およびアラミド繊維のロービングを用いる場合の換算繊維比を0.18～0.56%とし、炭素繊維シートを用いる場合0.58～1.47%とした。またロービングの巻き付けピッチは30mmとした。本研究の範囲からつぎのことがいえよう。

(1) 横方向補強されたコンクリートの圧縮性状は、繊維の引張特性の影響を受ける。すなわち、同一強度のコンクリートを用い、繊維の引張強さに基づく拘束圧（繊維拘束圧）が一致する場合であっても、軸方向圧縮ひずみが0.5%を超えるような時点における圧縮ひずみに対する応力は、弾性係数の大きい炭素繊維を用いた場合の方が大きく、終局時ひずみは、伸びの大きいアラミド繊維を用いた場合の方が大きい。

(2) 横方向補強されたコンクリートの圧縮性状は、繊維の種類が同一で、かつ繊維拘束圧が同一の場合ロービングおよびシートという補強繊維の形態の影響を受けない。

(3) 繊維の種類およびコンクリートの水セメント比を変化させるとときの圧縮強度は、繊維拘束圧の増加とともに直線的に増加する。同一の繊維を用いる場合の繊維拘束圧に対する圧縮強度は、水セメント比の小さい方が、すなわち用いるコンクリートの圧縮強度の高い方が大きい。同一のコンクリートを用い

る場合の繊維拘束圧に対する圧縮強度は、炭素繊維を用いる場合の方がアラミド繊維を用いる場合よりも大きい。

(4) 単位ひずみエネルギーは繊維拘束圧の増加とともに直線的に増加する。炭素繊維の場合は、コンクリートの水セメント比に関係なく1つの直線となる。すなわち、コンクリートの圧縮強度の影響を受けないと言える。アラミド繊維の場合は、水セメント比により異なった直線関係となる。繊維拘束圧に対する単位ひずみエネルギーは、炭素繊維を用いる場合よりもアラミド繊維を用いる場合の方が大きい。また、アラミド繊維については、水セメント比の大きい方がすなわちコンクリートの圧縮強度が小さい方が繊維拘束圧に対する単位ひずみエネルギーが大きい。

(5) 軸方向ひずみおよびその時の側圧を与えて、畠中らの提案する一定の低側圧を与えるときの応力－ひずみ算定方法により応力を求めて得られる点の連続とする応力－ひずみ関係は、実験値をよく再現できる。なお、適用にあたって、初期側圧は供試体に用いたコンクリートの圧縮強度時（変化点）の横方向ひずみから求まる側圧とし、終局時側圧および終局時ひずみは、実測値に基づくものとし、その間は直線的に変化する。

謝辞：本研究は、清俊彦氏、稻田直行氏および加藤貴大氏が卒業研究として取り組まれた。また、実験に用いた材料は東レ㈱、日本コンクリート工業㈱、ショーボンド建設㈱および東燃㈱より提供していた。付記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 町田篤彦：鉄筋コンクリート構造物の耐震補強－現状と課題・RC橋脚の補強を中心に－，セメント・コンクリート，No.606, pp.16-21, 1997.8.
- 2) 小畠克朗, 勝俣英雄, 田中常雄 : 炭素繊維の巻付けによる既存鉄筋コンクリート部材の耐震補強, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.861-866, 1989.
- 3) 宇治公隆, 横田和直, 池田尚治 : シート状炭素繊維による既存構造物の耐荷性能向上機構, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.695-700, 1992.
- 4) 畑中重光, 小坂義夫, 谷川恭雄 : 低側圧三軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動(梗概)－第1報－, 日本建築学会構造系論文報告集, 第377号, 38-40, 1988.7.
- 5) 肖岩, 富井政英, 崎野健治 : コンファインドコンクリートの3軸圧縮挙動に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, 第2巻, 第1号, 1991.1.
- 6) 六車熙, 渡辺史夫, 勝田庄二, 田中仁史 : 橫拘束コンクリートの応力ひずみ曲線のモデル化, セメント技術年報, No.34, pp.429-432, 1980.
- 7) 瞳好宏史, 谷口裕史, 喜多達夫, 町田篤彦 : 連続繊維補強材を用いたPC部材の曲げ韌性改善に関する研究, 土木学会論文集, No.460, V-18, pp.103-111
- 1993.2.
- 8) 渡部憲, 本田義博, 白井伸明, 金刀督純 : FRPシートにより補強されたコンクリート柱の横補強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.19, No.1, pp.1189-1194, 1997.
- 9) 境有紀 : 橫拘束された高強度コンクリートの構成則, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.2, pp.43-48, 1991.
- 10) 福澤公夫, 沼尾達弥, 野崎秀洋, 窪田洋史 : 連続繊維により横補強されたコンクリートの圧縮性状, セメント技術年報, No.42, 315-318, 1988.
- 11) 福澤公夫, 野崎秀洋, 沼尾達弥, 飯塚哲夫 : 橫補強材として用いる連続繊維の種類がコンクリートの圧縮性状に及ぼす影響, セメント技術大会講演集, No.43, pp.736-741, 1989.
- 12) 福澤公夫, 野崎秀洋, 沼尾達弥, 星広一郎 : 橫補強用連続繊維とコンクリートの付着の有無が圧縮性状に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.44, pp.564-569, 1990.
- 13) Ottosen,N.S.: A Failure Criterion for Concrete, J. Eng. Mechanics Division, No. EM4, pp.527-533, 1977.
- 14) Popovics, S.: A Numerical Approach to The Complete Stress-Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.3, pp.583-599, 1973.

(1997.9.18 受付)

COMPRESSIVE BEHAVIOR OF CONCRETE LATERALLY-REINFORCED WITH CARBON OR ARAMID FIBER

Kimio FUKUZAWA, Tatsuya NUMAO, Masakazu MITSUI and Hidehiro NOZAKI

Recently, reinforcing the outside of concrete columns with high-performance fibers such as carbon or aramid have gained increasing interest. In order to clearly understand the structural effects of these reinforcements, the stress-strain relationship of the concrete must be determined. High-performance fibers demonstrates an increase in stress that is proportional to the strain until the material fails. For this reason, results on the compressive behavior of concrete confined with steel could not apply to the concrete confined with the fibers. The present study describes the effects of fiber type, shape, fiber ratio and compressive strength of the concrete on the compressive behavior. Based on the experiments, we propose an estimation method to determine the stress-strain relationship of the concrete.