

論文

[2135] アラミド繊維で補強されたコンクリート角柱の一軸圧縮試験

正会員○渡辺一弘（千葉工業大学建築学科）

正会員 石橋一彦（千葉工業大学建築学科）

正会員 園部泰寿（筑波大学構造工学系）

正会員 岡本 直（三井建設技術開発推進部）

1. はじめに

最近アラミド繊維やカーボン繊維をコンクリート系構造物の補強材に適用するための開発研究が盛んに行われている[1][2][3]。本研究は組紐状に成形したアラミド繊維及びカーボン繊維のFRPロッドをコンクリート角柱の軸筋及び拘束筋に使用した場合の最大圧縮強度及びその後の靱性能を実験的に把握しようとするもので、拘束筋間隔、拘束筋比、軸筋量および鉄筋との混用などのパラメータを設定し一軸圧縮載荷実験を行った。

2. 試験体

試験体は180mm×180mm×360mmおよび被りコンクリートを排除した150mm×150mm×360mmの角柱であり、第一シリーズ10種30体[4]、第二シリーズ10種30体、第三シリーズ10種30体の計30種類90体である。拘束筋はスパイラル状でアラミド繊維、カーボン繊維、高弾性アラミド繊維、D8鉄筋及び高強度鉄筋を用い、軸筋にはアラミド繊維ロッド、D13鉄筋を用いた。図-1に配筋概要、表-1に試験体名と実験変数の組み合わせ、表-2、表-3にコンクリート及び拘束筋の力学的性質を示す。試験体名称の第1パラメータ、第2パラメータ、第3パラメータはそれぞれ拘束筋種類及びその間隔、軸筋種類、被りコンクリートの有無を示しており、表-1下段にそれぞれ説明を付記する。第一シリーズでは拘束筋種類、拘束筋間隔及びアラミド軸筋量の違いを比較し、第二シリーズでは鉄筋軸筋との混用及び高強度鉄筋との比較、第三シリーズでは拘束筋比及び拘束筋径の違いによる拘束効果をそれぞれ把握するために試験体を計画した。軸筋は上下耐圧板にボルトで固定し、拘束筋端部の定着はコア長さ（軸筋によって囲まれるコンクリート断面の辺の長さ）の2辺以上を余長とした。

表-1 試験体名と実験変数

試験体名	拘束筋種	拘束筋間隔 (mm)	拘束筋比 (%) *	pv・σu (kg/cm ²)	軸筋種類及び本数	かぶりの有無
第一シリーズ	K6.4	3.0	2.04	314	4-K19.2	有
K3.0						
K4.5						
K6.0						
C6.4						
H6.4						
第二シリーズ	K6.4	3.0	2.04	314	4-K19.2	無
K3.0-K-N						
K3.0-S-N						
C6.4						
C3.0-S-N						
H6.4						
第三シリーズ	K6.4	3.0	2.04	314	4-K19.2	有
U7.4						
U6.0						
U7.4						
U3.0						
N-N-N						

拘束筋比はコアコンクリート(150mm×150mm)に対する比とした。
 *は繊維に付いては破断強度、鉄筋に付いては降伏強度とした。
 N...アラミド繊維 (K6.4) 6...6-192
 C...カーボン繊維 (C6.4) L...4-128
 H...高弾性アラミド繊維 (KH6.4) M...4-256
 U...ウルランアラミド繊維 (U7.4) S...4-192
 L...アラミド繊維 (K9.6) S...4-D13
 K...アラミド繊維 (K12.8)
 第3パラメータ無し
 N...かぶり無し
 C...かぶり有り

表-3 軸筋及び拘束筋の力学的性質

名称	直径 (mm)	断面積 (mm ²)	弾性係数 (tf/cm ²)	破断強度 (tf/cm ²)
K6.4	7.65	46.0	68.2	15.4
C6.4	7.54	44.6	112.1	10.2
KH6.4	7.65	46.0	84.2	11.4
K9.6	9.80	75.0	62.0	10.7
K12.8	13.30	100.0	66.0	13.6
K19.2	19.80	150.0	61.0	19.8
K25.6	16.00	200.0	64.0	24.8
D8	8.00	50.0	210.0	3.3
D13	12.70	127.0	184.0	3.4
U7.4	7.4	40.0	203.0	14.5

表-2 コンクリートの力学的性質

シリーズ	材名	強度時密度 (%)	弾性係数 (tf/cm ²)	圧縮強度 (kgf/cm ²)
1	27	0.20	287	273
2	28	0.21	190	239
3	23	0.20	194	250

繊維材のスパイラルコーナ一部は直径20mmのパイプに巻き付けて加工するため図-2に示すように直線部分より偏平になっている。

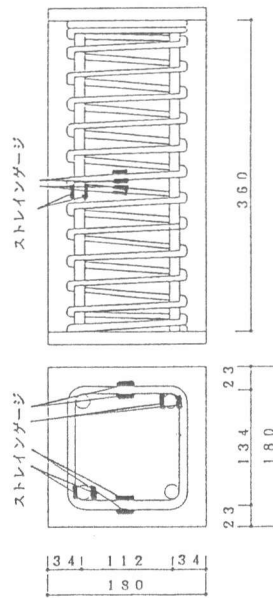


図-1 配筋概要

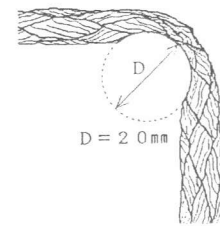


図-2 スパイラルコーナ一部

3. 実験方法

加力は試験体の上下面の回転移動を固定した単純一軸圧縮とした。試験体上下耐圧板の2辺にダイヤルゲージ(ストローク25mm、感度1/500mm)を取り付けて変形を測定し、その平均値を軸歪度(ϵ)とし、 $\epsilon = 6\%$ まで加力した。ただし、

$\epsilon = 6\%$ 以前で拘束筋が破断して強度が激減した場合にはその時点で加力を終了とした。第二シリーズ及び第三シリーズでは上記 ϵ のほか、コンクリートの横歪を測定するため、コンクリートの側面にネジ棒を埋め込み、これらにPI型ゲージを取り付けた。

また軸筋及び拘束筋には試験体軸方向の中央部に位置する箇所に歪ゲージを貼付した。図-3に測定概要を示す。

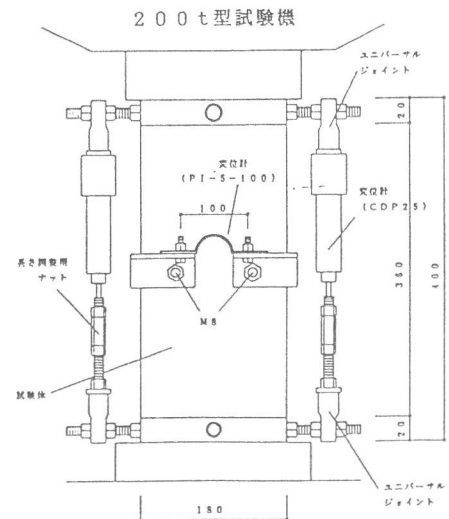


図-3 測定概要

4. 実験結果

4.1 破壊状況

各試験体とも最大荷重時直前にコンクリート表面にひび割れが発生し、被りコンクリートのある試験体では最大荷重時後コーナー部の斜め方向ひび割れが顕著に開き、 $\epsilon = 1\%$ を越えると試験体中

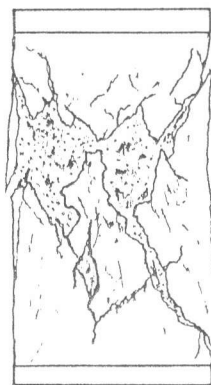


図-4 ひび割れ状況

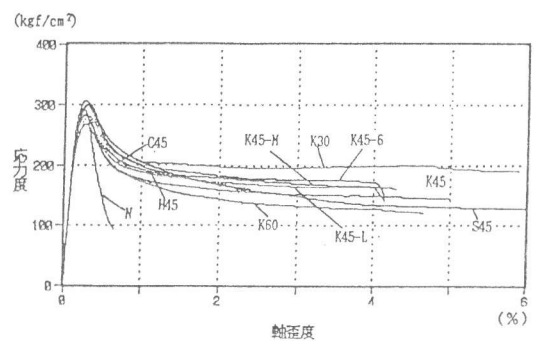


図-5 応力度-歪度曲線(第1シリーズ)

央部で被りコンクリートが大きく剥落した。被りコンクリートのない試験体では細かなひび割れが多数発生し、コンクリートの小片が剥落した。コンクリートの剥落により軸筋が目視できる状態になった時には、軸筋は繊維がばらけるようにつぶれているのが観察された。図-4に被りコンクリートのある試験体軸歪度3%時のひび割れ状況を示す。

図-5、図-6、図-7に第一シリーズ、第二シリーズ、第三シリーズの試験体各3体の平均応力度-軸歪度曲線を示す。曲線が途中で切れているものはその時点で拘束筋が破断したことを

示している。被りコンクリートのある試験体では最大応力度以降ひび割れの進展及び被りコンクリートの剥落をともない $\epsilon = 1\%$ 程度まで急激に強度が低下したが、それ以降ほぼ一定の応力度を保持し、最終に至った。被りコンクリートを排除した試験体では最大応力度後の強度低下は緩やかであった。破壊形式は拘束筋の配していない試験体では水平軸とほぼ 45° の斜面に沿ってすべるように破壊し、他はコーン状の破壊を示した。

4.2 拘束筋間隔と応力度保持率の関係

最大応力度に対する最大応力度以降の応力度の割合を応力度保持率と定義し、拘束筋間隔の違いによる応力度保持率を拘束筋にアラミド繊維及び高強度鉄筋を用いたもの比較を図-8に示す。 $\epsilon = 5\%$ ですでに拘束筋間隔が広い試験体ほど応力度保持率は低くなった。

K30は $\epsilon = 1\%$ 辺りから最終状態までほぼ70%の応力度を維持したが、K45、K60は $\epsilon = 1\%$ 以降も強度は低下し続け、 $\epsilon = 5\%$ でK45が、 $\epsilon = 4.5\%$ でK60がそれぞれ拘束筋コーナー部の破断により最終状態となった。その時の応力度保持率はK45で55%、K60で43%であった。高強度鉄筋を拘束筋に用いたU30-K-Cは最大応力度以降若干の強度低下はみせたが、最終状態でも応力度保持率は90%であった。

4.3 拘束筋種と応力度保持率の関係

図-9に拘束筋の違い(アラミド繊維、カーボン繊維、高弾性アラミド繊維、普通鉄筋、高強度鉄筋)による応力度保持率の比較を示す。拘束筋が繊維であるK45、C45、H45を比較すると、 $\epsilon = 2\%$ までは3試験体とも同程度の応力度保持率を維持したが、弾性係数の高いC45及びH45は $\epsilon = 2\%$ を越えたところで拘束筋がコーナー部で破断した。拘束筋間隔を増したC30-K-N及びH30-K-Nでは、被りコンクリートを排除しているため最大応力度直後の強度低下は少ないが、C45、H45と同様に $\epsilon = 2 \sim 2.5\%$ で拘束筋が破断した。拘束筋に普通鉄筋を用いたS45は $\epsilon = 1\%$ までは拘束筋に繊維を用いた試験体とほぼ同程度の応力度保持率を維持したが、最終的にはK45より応力度保持は小さくなった。

4.4 拘束筋比と応力度保持率の関係

図-10に拘束筋比の違いによる応力度保持率を比較した。 p_w が約2%の試験体では $\epsilon = 1\%$ 時に応力度保持率は約70%まで低下するが、 p_w が3.33%及び4.44%の試験体では85%の応力度保持が

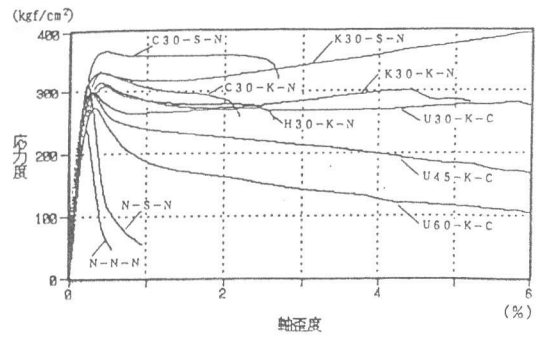


図-6 応力度-歪度曲線(第2シリーズ)

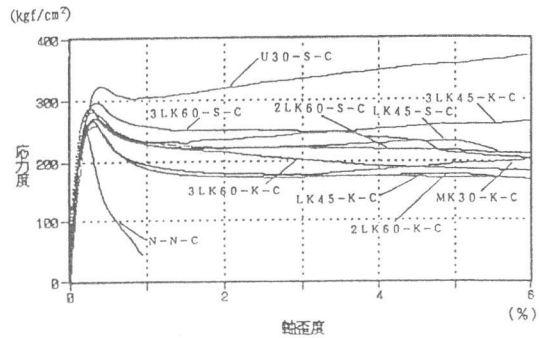


図-7 応力度-歪度曲線(第3シリーズ)

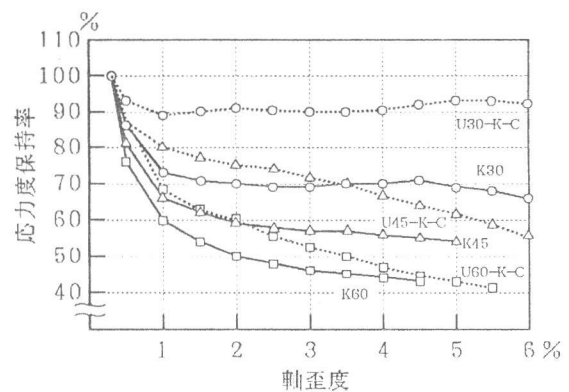


図-8 拘束筋間隔と応力度保持率の関係

あった。 p_w が約2%の試験体の $\epsilon = 3\%$ までの応力度保持率は拘束筋径及び拘束筋間隔の違いに関わらずほぼ等しくなったが、 $\epsilon = 3\%$ 付近から拘束筋間隔30mmのMK30-K-Cの強度が上昇した。 $p_w = 3.33\%$ で拘束筋間隔が60mmの3LK60-K-Cは $\epsilon = 1\%$ 以降も強度低下は緩やかであるが、 $\epsilon = 5\%$ 程度で p_w が約2%の試験体とほぼ等しい応力度保持率となった。 $p_w = 4.44\%$ で拘束筋間隔45mmの3LK45-K-Cは $\epsilon = 1 \sim 1.5\%$ までは強度低下したが、それ以降強度が上昇し最終時応力度保持率は97%となった。

4.5 軸筋の影響

図-11に軸筋の異なる6体の応力度保持率-軸歪度関係を示す。K45-L、K45-M、K45-6は拘束筋種及び間隔は一定で軸筋にアラミド繊維ロッドを使用し軸筋比を変化させた試験体であり、軸筋量の比率は1:1.4:1.8となっている。他3体の軸筋は全て4-D13である。K45-L、K45-M、K45-6は終始同程度の応力度保持率となり、 $\epsilon = 4\%$ で拘束筋が破断し最終状態となった。また図-5の応力度-軸歪度関係からもわかるように、最大応力どもほぼ等しく、アラミド繊維ロッドを軸筋に用いた場合には、軸筋量の大小は最大応力度及びその後の応力度保持に対しては影響を与えていない。軸筋に鉄筋を用いた試験体は最大応力後の強度低下が少なく $\epsilon = 1\%$ 付近から再び強度が上昇するが拘束筋にカーボン繊維を用いて間隔を30mmとしたC30-S-Nは $\epsilon = 2\%$ で拘束筋コーナー部が破断した。

5. 測定歪度の検討

5.1 軸筋の歪度

図-12、図-13はそれぞれ試験体軸歪度1%までの軸鉄筋歪度 (ϵ_d)、アラミド軸筋歪度 (ϵ_a) の変化を示したものである。図中の破線は $\epsilon = \epsilon_d$ 、 $\epsilon = \epsilon_a$ を表しており、黒丸は各試験体がそれぞれの最大応力度となった点である。図-12において軸鉄筋の歪度 ϵ_d は ϵ が0.2%まではほぼ $\epsilon = \epsilon_d$ となっているが、初期ひびわれの発生する $\epsilon = 0.3\%$ 付近から ϵ_d が急激に大きくなっていく。これは軸筋の放射状の広がり変形によるものと思われる。 $\epsilon = 0.4\%$ 程度になると再び $\epsilon = \epsilon_d$ と平行に歪が増加していく傾向にある。拘束筋間隔を45、60mmとし拘束筋断面を大きくし

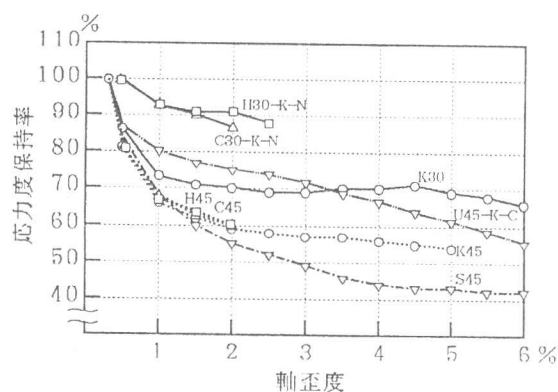


図-9 拘束筋種類と応力度保持率の関係

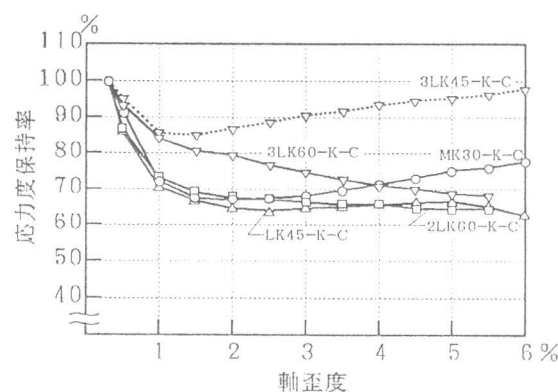


図-10 拘束筋比と応力度保持率の関係

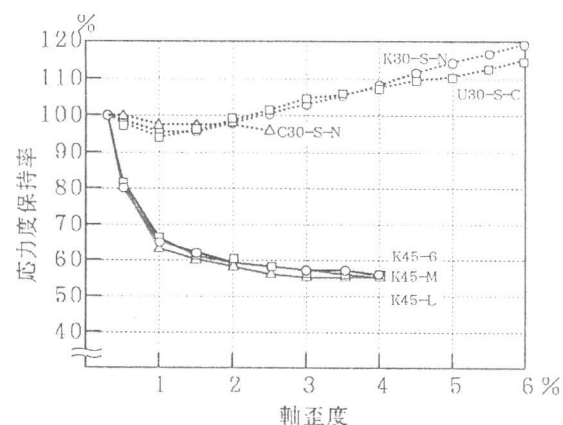


図-11 軸筋種類と応力度保持率の関係

た試験体LK45-S-C、2LK45-S-C、3LK60-S-Cが最大応力度となったのは、 ϵ より ϵ_d が大きくなり始めた直後で3体とも $\epsilon_d=0.5\%$ 程度であった。これはN-S-Nと

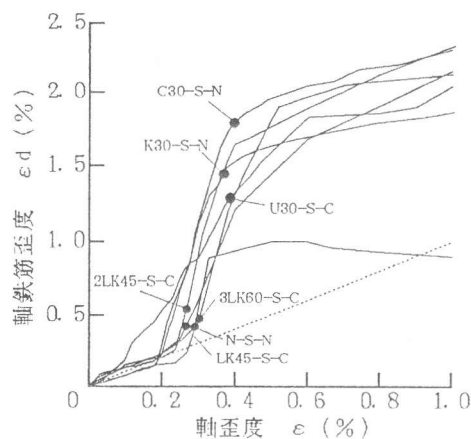


図-12 軸鉄筋歪度
—試験体軸歪度関係

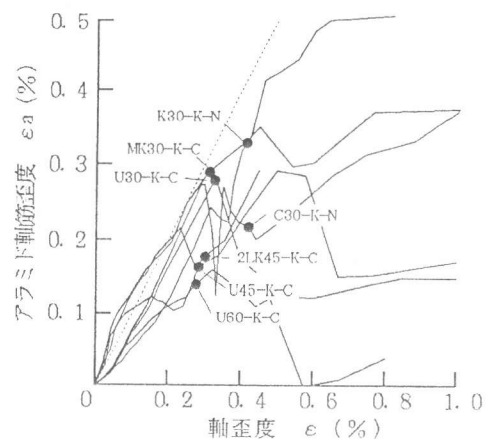


図-13 アラミド軸筋歪度
—試験体軸歪度関係

類似した傾向にあった。拘束筋間隔が30mmの試験体K30-S-N、C30-S-N、U30-S-Cが最大応力度となったのは ϵ_d の急激な増加がある程度止まった $\epsilon=0.4\%$ 付近であった。拘束筋を30mmで配筋した場合、初期ひびわれ後の軸鉄筋の放射状の広がり変形をある程度拘束することができるものと思われる。

図-13のアラミド軸筋の歪度 ϵ_a でも初期には $\epsilon=\epsilon_a$ となるが、最大応力度直前あるいは最大応力度時に ϵ_a が急激に小さくなる傾向がみられる。このことから最大応力度以前にアラミド軸筋はすでにつぶれているものと思われる。拘束筋間隔を変化させたU30-K-C、U45-K-C、U60-K-Cでは拘束筋間隔が狭くなるほど最大応力度時の ϵ_a は大きくなった。

5.2 拘束筋の歪度

図-14に拘束筋の平均歪度 ϵ_s の変化を拘束筋間隔30mmの試験体について示した。各試験体ともその最大応力度に至るまでの ϵ_s はばらつきはあるものの傾向は類似していた。最大応力度時の ϵ_s は0.1~0.18%の範囲内であり、最大応力度後も ϵ_s は増加した。拘束筋が繊維材であるC30-K-N、H30-K-N、K30-K-Nを比較すると、拘束筋の弾性係数が大きい試験体の方が最大応力度時の ϵ_s は若干小さくなっているようである。拘束筋に高強度鉄筋を用いたU30-K-Cの ϵ_s はほぼ直線的に増加し、拘束筋比の大きい3LK45K-Cは最大応力度を過ぎてからは ϵ_s の増加率は減少した。拘束筋に普通鉄筋を用いた試験体のデータはないが、最大応力度時の ϵ_s が概ね0.2%であるとすると、S45の拘束筋は最大応力度後に降伏したことが予想され、繊維材を拘束筋に用いた試験体より応力度保持率が低下したものと思われる。

5.3 コンクリートの横歪度

図-15にコンクリートコアの横歪 ϵ_c と試験体軸歪 ϵ の関係を示す。各試験体とも ϵ_c と ϵ の関係は $\epsilon=0.1\%$ 程度まではコンクリートのポアソン比 $\epsilon_c/\epsilon=1/6$ となっているが、その後 ϵ_c が増加し、 $\epsilon_c/\epsilon=1/1$ に近くなったところで最大応力度となっている。最大応力度以降も ϵ_c はそのまま増加し $\epsilon=1\%$ では拘束筋にアラミド繊維、カーボン繊維を用い

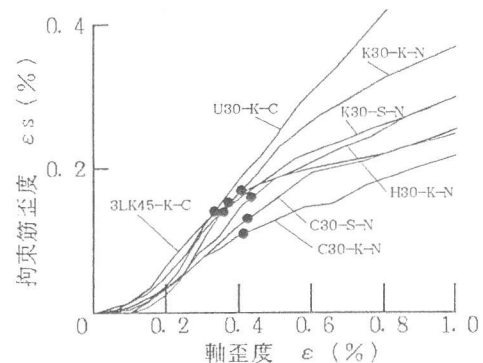


図-14 拘束筋歪度
—試験体軸歪度関係

拘束筋間隔を30mmとした試験体の横歪は軸筋の種類に関係せず約1.2%~1.5%であり、拘束筋に高強度鉄筋を用いた試験体でも同様であった。拘束筋間隔を変化させた試験体を比較すると拘束筋間隔が狭い試験体ほど ϵ_c は小さく抑えられていた。

6. まとめ

本実験で得られた結果を以下に要約する。

1) 拘束筋断面積及び拘束筋間隔を変化させ拘束筋比をほぼ等しくした試験体を比較すると、拘束筋間隔を小さくした試験体ほど最大応力度以降の応力度保持には有効であった。

2) アラミド繊維ロッドを軸筋に用いた場合、軸筋量の大小は最大応力度及び最大応力度以降の応力度保持にはほとんど影響を与えない。

3) 最大応力度時の拘束筋歪度は概ね0.2%であり、拘束筋に普通鉄筋を用いた試験体では降伏したことが予想されるが、拘束筋に繊維材を用いた場合には降伏現象が現れないので普通鉄筋より繊維材を拘束筋に用いた方が最大応力度以降の強度保持には有効である。

4) 最大応力度時の拘束筋中央部の歪度は全試験体ともほぼ等しくなっているが、弾性係数の高い繊維材では最大応力度以降の靱性能に乏しくコーナー部で破断した。このことは繊維材コーナー部加工の影響が顕著に現れており、コーナー部に歪が集中していることを表していると思われる、コーナー部の強度評価を検討する必要がある。

5) 被りのない試験体は被りのある試験体に対し最大応力度以降の強度低下が少ないことを除いては、拘束筋種、拘束筋比の違いを含め最大応力度及びそれ以降の強度保持、拘束筋及び軸筋の歪度について顕著なる違いはみられない。

[謝辞]

本実験を行うにあたり高周波熱錬株式会社より高強度スパイラル筋の提供を受けた。

実験実施に際し平成元年度千葉工業大学卒論生 勝倉修一君(現川田工業)、平成二年度同卒論生 高野直人君(現三井建設)、佐藤一博君(現三井建設)に御尽力をいただき深く感謝します。

[参考文献]

[1] 岡本直ほか「アラミド繊維による組紐状棒材の基本的性質」コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 10 No. 2、pp. 659-664

[2] 谷垣正治ほか「アラミド繊維による組紐状棒材を用いたP R Cはりの曲げ性状」コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 10 No. 2、pp. 671-676

[3] 遠藤克彦ほか「組紐状FRPロッドによるスパイラル筋を用いたコンクリート梁のせん断性状」、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 11 No. 1、pp. 807-812

[4] 岡本直ほか「アラミド繊維による組紐状棒材の研究(その13)」日本建築学会学術講演梗概集(中国)、構造II、1990、pp. 993-994

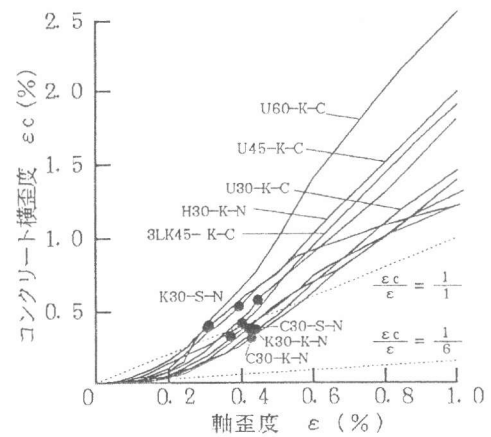


図-15 コンクリート横歪度
— 試験体軸歪度関係