

[143] RC ばりのじん性に及ぼす横補強筋の効果と引張鉄筋比の影響

正会員 矢代 秀雄 (日本大学生産工学部)

正会員 ○ 清水 庸介 (日本大学生産工学部)

中野 初子 (日本大学大学院)

莊 恵文 (日本大学大学院)

1. まえがき

鉄筋コンクリートばりの純曲げ区間における曲げ実験では、コンクリートの圧縮破壊により最大耐力 M_u (図-1) に達し、その後、被りコンクリートの剥落と圧縮鉄筋の座屈が起こると顕著な耐力低下が生じ、図-1のIの状態となる。しかし、圧縮鉄筋の座屈長さを短くするために、横補強筋を密に入れていくと、一定の耐力 M_{uc} を保ちながら、II, III, IVのような状態となり、じん性が確保される。なお、複筋比 ρ が0.4になる場合は、 M_u より M_{uc} は低く、II, III, IVのようになるが、 ρ が0.6になる場合は、 M_u と M_{uc} の差がみられず、また横補強筋を余り密に入れなくても、じん性が確保されることが既往の研究で解っている。

本研究は、複筋比 ρ をおよそ0.4と0.6として、引張鉄筋比 ρ_t をそれぞれ3種類変化させ、それらが M_u , M_{uc} 及びじん性に及ぼす影響を比較し、 M_u , M_{uc} の計算方法を検討したものである。

2. 実験計画

試験体は18体計画し、試験体の形状および寸法は、 $b \times D = 30 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$, $d_c = d_t = 6 \text{ cm}$ とし、純曲げスパンを140 cm, セン断スパンを120 cm, 全長を460 cmとした。

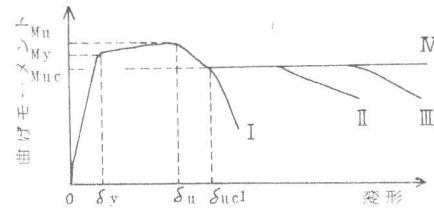


図-1 荷重-変形曲線

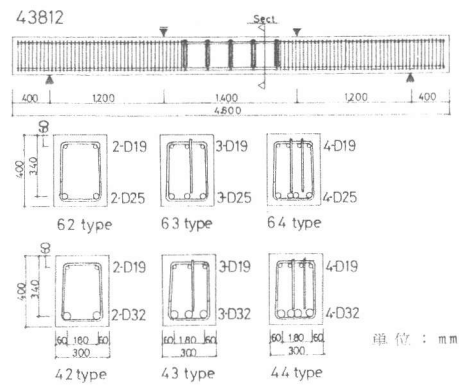


図-2 試験体形状

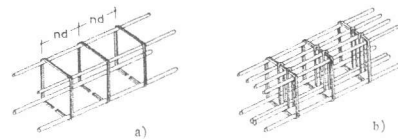


図-3 横補強筋

表-1 試験体詳細一覧

| 試験体名 | 主筋 | | | | | | | | 有効複筋比 | | | 本試験範囲内 | | |
|-------|-------|--------------------|-------------------|----------|-------|--------------------|-------------------|----------|----------|----------|-------------|--------|------|--------------------|
| | 配筋 | 上端 | | | 配筋 | 下端 | | | ρ_t | ρ_c | ρ_{tr} | 配筋 | 間隔 | 降伏応力度 |
| | | δ_y | $\Sigma \sigma_c$ | ρ_c | | δ_y | $\Sigma \sigma_c$ | ρ_c | | | | | S | δ_y |
| | | kg/cm ² | cm ² | % | | kg/cm ² | cm ² | % | | | | | cm | kg/cm ² |
| 62510 | 2-D19 | 3990 | 5.74 | 0.56 | 2-D25 | 3370 | 10.14 | 0.99 | 0.67 | | | 4-D10 | 20.0 | 4030 |
| 62512 | 2-D19 | 3990 | 5.74 | 0.56 | 2-D25 | 3350 | 10.14 | 0.99 | 0.68 | | | 4-D10 | 24.0 | 4030 |
| 62514 | 2-D19 | 3990 | 5.74 | 0.56 | 2-D25 | 3350 | 10.14 | 0.99 | 0.68 | | | 4-D10 | 27.5 | 4030 |
| 63508 | 3-D19 | 3937 | 8.61 | 0.84 | 3-D25 | 3311 | 15.21 | 1.49 | 0.68 | | | 4-D10 | 16.0 | 4030 |
| 63510 | 3-D19 | 3932 | 8.61 | 0.84 | 3-D25 | 3311 | 15.21 | 1.49 | 0.68 | | | 4-D10 | 20.0 | 4030 |
| 63512 | 3-D19 | 3899 | 8.61 | 0.84 | 3-D25 | 3301 | 15.21 | 1.49 | 0.67 | | | 4-D10 | 24.0 | 4030 |
| 64508 | 4-D19 | 3911 | 11.48 | 1.13 | 4-D25 | 3274 | 20.28 | 1.98 | 0.68 | | | 4-D10 | 16.0 | 4030 |
| 64510 | 4-D19 | 3911 | 11.48 | 1.13 | 4-D25 | 3279 | 20.28 | 1.98 | 0.68 | | | 4-D10 | 20.0 | 4030 |
| 64512 | 4-D19 | 3911 | 11.48 | 1.13 | 4-D25 | 3285 | 20.28 | 1.98 | 0.68 | | | 4-D10 | 24.0 | 4030 |
| 42808 | 2-D19 | 3820 | 5.74 | 0.56 | 2-D32 | 3281 | 15.88 | 1.56 | 0.42 | | | 4-D10 | 16.0 | 4030 |
| 42810 | 2-D19 | 3820 | 5.74 | 0.56 | 2-D32 | 3275 | 15.88 | 1.56 | 0.42 | | | 4-D10 | 20.0 | 4030 |
| 42812 | 2-D19 | 3820 | 5.74 | 0.56 | 2-D32 | 3274 | 15.88 | 1.56 | 0.42 | | | 4-D10 | 24.0 | 4030 |
| 43808 | 3-D19 | 3820 | 8.61 | 0.84 | 3-D32 | 3285 | 23.82 | 2.34 | 0.42 | | | 4-D10 | 16.0 | 4030 |
| 43810 | 3-D19 | 3820 | 8.61 | 0.84 | 3-D32 | 3281 | 23.82 | 2.34 | 0.42 | | | 4-D10 | 20.0 | 4030 |
| 43812 | 3-D19 | 3820 | 8.61 | 0.84 | 3-D32 | 3281 | 23.82 | 2.34 | 0.42 | | | 4-D10 | 24.0 | 4030 |
| 44808 | 4-D19 | 3830 | 11.48 | 1.13 | 4-D32 | 3306 | 31.76 | 3.11 | 0.42 | | | 4-D10 | 16.0 | 4030 |
| 44810 | 4-D19 | 3825 | 11.48 | 1.13 | 4-D32 | 3299 | 31.76 | 3.11 | 0.42 | | | 4-D10 | 20.0 | 4030 |
| 44812 | 4-D19 | 3825 | 11.48 | 1.13 | 4-D32 | 3293 | 31.76 | 3.11 | 0.42 | | | 4-D10 | 24.0 | 4030 |

圧縮鉄筋にD19 (SD30) を用いることとし、複筋比 r ($=a_c/a_t$) が0.6 になるように、引張鉄筋にD25 (SD30) を使用し、鉄筋の降伏応力度を考慮に入れた複筋比を有効複筋比 r_e ($=a_c \cdot \sigma_y / a_t \cdot \sigma_y$) として求めると0.68 となる試験体の引張鉄筋比 p_t ($=a_t/bd$) については、主筋の本数を変化させることにより、2-D25 で $p_t = 0.99\%$ 、3-D25 で $p_t = 1.49\%$ 、4-D25 で $p_t = 1.98\%$ の3種類とした。また横補強筋の間隔は、圧縮鉄筋の公称直径 (d) の倍数として、8 d 、10 d 、12 d 、14 d とした。

複筋比 r が0.4 となるように、引張鉄筋にD32 (SD30) を使用し、有効複筋比 r_e を求めると0.42 となる試験体の引張鉄筋比 p_t については、主筋の本数により、2-D32 で $p_t = 1.56\%$ 、3-D32 で $p_t = 2.34\%$ 、4-D32 で $p_t = 3.11\%$ の3種類とした。また、横補強筋の間隔は、8 d 、10 d 、12 d とした。

なお、純曲げスパン内の横補強筋は、図-3 a) に示すようにD10 (SD30) を2本ずつ配筋し、圧縮鉄筋・引張鉄筋が3、4本の試験体については、図-3 b) に示すようにU字形の補強筋を付け加えた。

3. 加力方法および測定方法

加力は2点集中正側繰返し加力とし、繰返しは加力点における変位により制御し、1/100 rad を基準に、2/100 rad より7/100 rad まで、1/100 rad 増加する毎に3回繰返し、最終的に耐力の低下が認められるまで1/100 rad 毎に繰返し行なった。たわみの測定は、両支点と測定位置 (中央および両加力点) 間の相対変位を電気式変位計により測定した。また、たわみの他に主筋・横補強筋・コンクリートのひずみ、ひび割れを測定した。

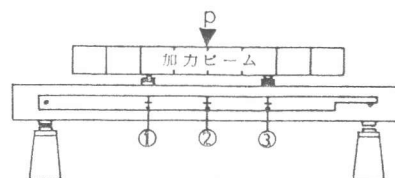


図-4 加力・測定方法

4. 実験結果

実験結果一覧を表-2 に、荷重変形曲線 (包絡線) を図-5、6、7、8 に示す。

図-5 に示す有効複筋比 r_e が0.68の試験体についてみると、横補強筋の間隔が14 d の62514 では中央のたわみが、約12 mm で部材の降伏がみられ、その後降伏たわみ (δ_y) の14倍まで耐力の低下はみられず、徐々に上昇している。

また、引張鉄筋比 p_t についてみると、 $p_t = 0.99\%$ 、1.49%、1.98% 共に、耐力の低下はみられない。これは、有効複筋比 r_e が比較的大きいため、部材降伏時において圧縮鉄筋のひずみが小さく、コンクリートの圧縮破壊とその拡大を圧縮鉄筋が補っているために、耐力の著しい低下や座屈がみられなかったものと思われる。

次に、図-6 に示すように有効複筋比 r_e が0.42で、引張鉄筋比 p_t が1.56%の試験体についてみると、各試験体共に、中央のたわみが約15 mm で部材が降伏し、その後およそ3 δ_y まで耐力は徐々に上昇し、コンクリートの圧縮破壊後、9%程度の低下がみられた。これは、コンクリートの圧縮破壊の発生により、圧縮鉄筋のひずみが降伏ひずみに達したためと思われる。その後、横補強筋

表-2 実験結果一覧

| 試験体名 | 圧縮強度 | 降伏時耐力 | 最大耐力 | | 低下時耐力 |
|-----------|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| | c/f_b kg/cm ² | M_y t·m | P_u ton | M_u t·m | M_{uc} t·m |
| 4 2 8 0 8 | 263 | 15.78 | 26.4 | 15.84 | 14.49 |
| 4 2 8 1 0 | 280 | 15.54 | 26.3 | 15.78 | 14.58 |
| 4 2 8 1 2 | 279 | 15.60 | 26.9 | 16.14 | 14.46 |
| 4 3 8 0 8 | 296 | 22.80 | 38.7 | 23.22 | 21.72 |
| 4 3 8 1 0 | 290 | 23.22 | 39.0 | 23.40 | 21.36 |
| 4 3 8 1 2 | 302 | — | — | — | 20.52 |
| 4 4 8 0 8 | 296 | 31.14 | 52.4 | 31.44 | 27.60 |
| 4 4 8 1 0 | 305 | 31.20 | 52.3 | 31.38 | 27.90 |
| 4 4 8 1 2 | 285 | 30.40 | 51.1 | 30.66 | 26.70 |

※ M_u : 最大耐力
 M_{uc} : 図-1 における M_{uc}
 — : 測定不能

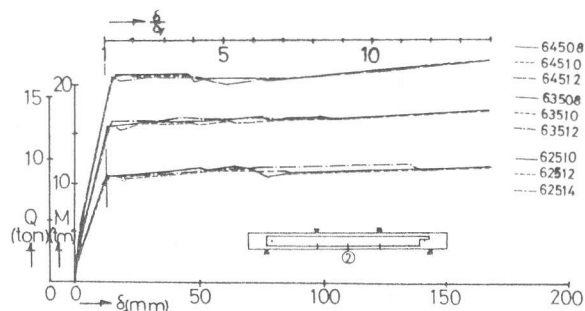


図-5 荷重-変形曲線

間隔が 8 d の 42808 は 10 δy まで、10 d の 42810 は 7 δy まで、12 d の 42812 は 5 δy まで耐力を保持し、圧縮破壊の拡大・圧縮鉄筋の座屈により中立軸は下り、急激な耐力の低下がみられた。

図-7 の引張鉄筋比 p_t が 2.34% の試験体では、各試験体共に中央のたわみが約 17 mm で部材が降伏し、およそ 2.7 δy まで耐力は上昇し、圧縮破壊により 10% 程度の低下がみられ、その後、横補強筋の間隔が 8 d の 43808 は 9.5 δy まで、10 d の 43810 は 5.5 δy まで、12 d の 43812 は 4.7 δy まで耐力を保持し、急激な耐力の低下がみられた。

また図-8 の引張鉄筋比 p_t が 3.11% の試験体では、各試験体共に、中央のたわみが約 20 mm で部材は降伏し、その後、1.7 δy まで耐力を保持し、圧縮破壊により 12% 程度の低下がみられ、その後、横補強筋の間隔が 8 d の 44808 は 6.9 δy まで、10 d の 44810 は 4.2 δy まで、12 d の 44812 は 3.6 δy まで耐力を保持し、急激な耐力の低下がみられた。

耐力の低下の状態を比較すると、引張鉄筋比 p_t が大きい試験体程、圧縮破壊による耐力の低下が大きくなる傾向がみられた。

これら、じん性に対する引張鉄筋比 p_t の影響、横補強筋間隔の影響を比較するために、 x 軸に横補強筋の間隔 d 、 y 軸に引張鉄筋比 p_t 、 z 軸に耐力の低下時の変位量を降伏時の変位量で除した値をとると、図-9 に示すようになる。横補強筋間隔が広い程、また引張鉄筋比が大きい程じん性は低くなるようである。このように、複筋比、横補強筋間隔に加えて、引張鉄筋比による影響への考慮も必要と思われる。

次に、耐力の維持とはり内の応力状態について、横補強筋間隔が 8 d の 3 試験体において考える。

コンクリートの応力-ひずみ曲線を図-10 に示すように、ひずみが 0.19% でシリンダー強度 $c\sigma_B$ とし、その後 0.38% で $0.8 c\sigma_B$ 、0.76% で $0.4 c\sigma_B$ と仮定する。また、鉄筋の応力-ひずみ曲線を図-11 に示すように、降伏後、ひずみが 1.5% からひずみ硬化が始まり、4% において 1.3 σ_y になるものと仮定する。

以上の仮定に基づいて、圧縮側の被りコンクリートが有効に働くものとして、緑ひずみが 0.38% のときにおいて、圧縮合力 C と引張合力 T の和が零となるようなひずみ分布・応力分布の仮定し、その時の曲げモーメントを

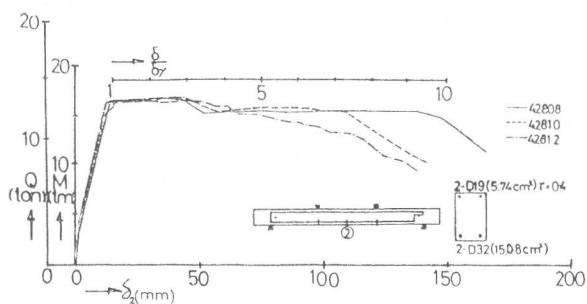


図-6 荷重-変形曲線

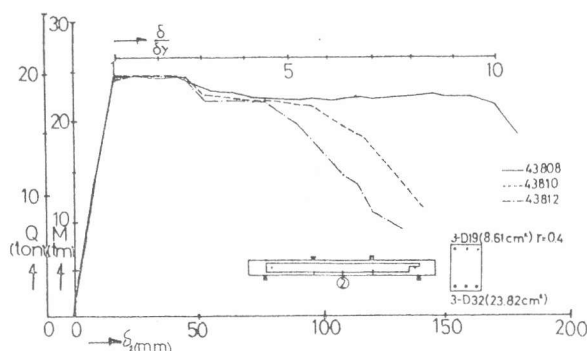


図-7 荷重-変形曲線

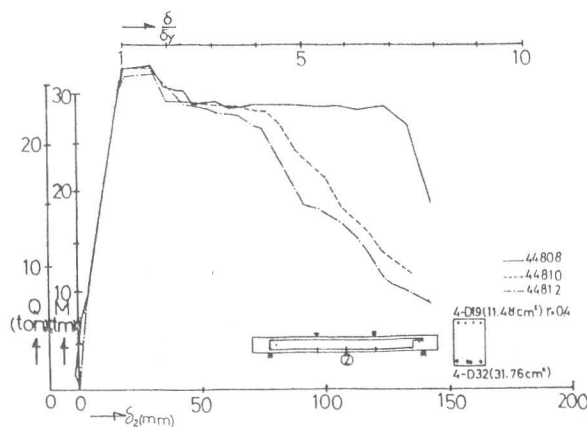


図-8 荷重-変形曲線

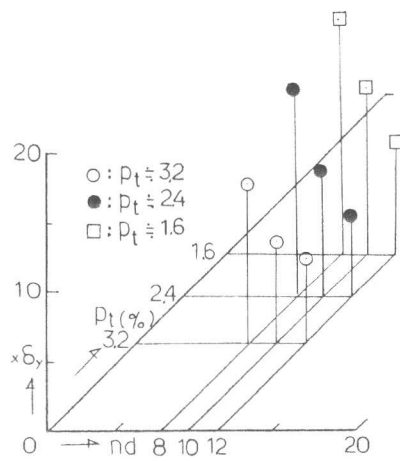


図-9 引張鉄筋比 横補強筋間隔-じん性関係

求める。同様に、被りコンクリートを除き圧縮鉄筋位置のひずみを縁ひずみと考え、縁ひずみを0.38%、0.57%、0.76%として、曲げモーメントを求めると、表-3に示すようになる。全断面有効の縁ひずみ0.38%の計算値は、実験値の最大曲げモーメントとほぼ等しい値となり、また、被りコンクリートを除いた計算値は、縁ひずみが増加しても余り変化せずに、耐力を維持しているときの曲げモーメントとほぼ等しい値となった。なお、引張鉄筋比 p_t が大きい場合、 p_t が小さいものに比較して、中立軸位置が低く、小さな変形で縁のひずみが等しくなる。被りコンクリートを除いた場合にも、 p_t が小さいものは、引張鉄筋がひずみ硬化に入るために、計算値は徐々に増加しているが、 p_t が大きいものは中立軸位置が低く、引張鉄筋がひずみ硬化に入らないために計算値は徐々に低下している。

5. まとめ

鉄筋コンクリートばりの純曲げ区間において、横補強筋を密に配筋すると、じん性の向上が得られるが、そのレベルは、有効複筋比 γ_e 、引張鉄筋比 p_t によって異なるものと思われる。

引張鉄筋比 p_t について、有効複筋比 γ_e が0.68では、引張鉄筋比 p_t を約1%から2%に増しても、じん性の低下はみられないが、有効複筋比 γ_e が0.42では、引張鉄筋比 p_t を約1.5%から3.1%まで増すにつれ、じん性が低くなる傾向がみられた。

また圧縮破壊後の荷重が低下した後の耐力は、圧縮側の被りコンクリートがないものと仮定し、コンクリートの応力ひずみ曲線のモデル、鉄筋の応力ひずみ曲線のモデルを与え、圧縮合力、引張合力のつり合いにより、曲げモーメント M_{uc} を算出できると思われる。

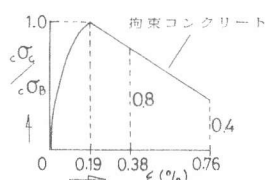


図-10 コンクリート
応力-ひずみ曲線
(モデル)

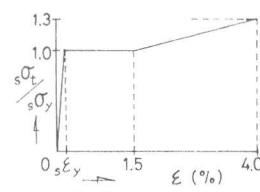


図-11 鉄筋
応力-ひずみ曲線
(モデル)

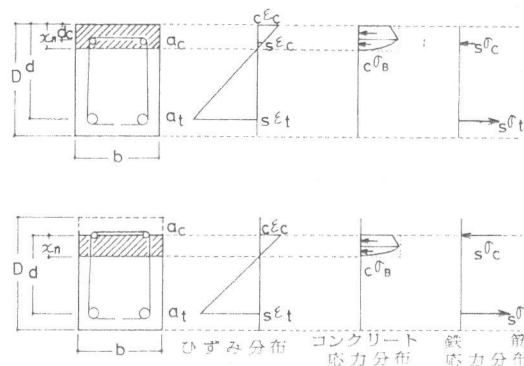


図-12 はり断面の応力とひずみの分布

表-3 実験値と計算値との比較

| 試 験 体 名 | | 4 2 8 0 8 | 4 3 8 0 8 | 4 4 8 0 8 |
|-----------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 実 験 値 | ex. M_u (tm) | 15.84 | 23.22 | 31.44 |
| | ex. δ_u (mm) | 7.83 | 8.26 | 5.25 |
| | ex. M_{uc} (tm) | 14.49 | 21.72 | 27.60 |
| | ex. δ_{uc} (mm) | 12.94 | 11.68 | 8.60 |
| 全断面 0.38 (%) | M_u (tm) | 15.83 | 23.24 | 30.52 |
| | δ_u (mm) | 12.78 | 10.93 | 9.28 |
| | $s \epsilon_t$ (%) | 1.39 | 1.14 | 0.91 |
| | ex. M_u / M_u | 1.001 | 0.999 | 1.030 |
| | | | | |
| 圧縮側被り 0.38 (%) | M_{uc1} (tm) | 14.19 | 20.59 | 27.02 |
| | δ_{uc1} (mm) | 17.99 | 13.95 | 10.37 |
| | $s \epsilon_t$ (%) | 1.67 | 1.21 | 0.80 |
| | ex. M_{uc} / M_{uc1} | 1.021 | 1.055 | 1.021 |
| | | | | |
| コンクリート 0.57 (%) | M_{uc2} (tm) | 14.78 | 20.75 | 26.68 |
| | δ_{uc2} (mm) | 23.91 | 19.64 | 15.11 |
| | $s \epsilon_t$ (%) | 2.16 | 1.67 | 1.16 |
| | ex. M_{uc} / M_{uc2} | 0.980 | 1.047 | 1.034 |
| | | | | |
| 鉄筋無し 0.76 (%) | M_{uc3} (tm) | 14.95 | 20.83 | 26.18 |
| | δ_{uc3} (mm) | 27.92 | 23.10 | 18.50 |
| | $s \epsilon_t$ (%) | 2.43 | 1.88 | 1.35 |
| | ex. M_{uc} / M_{uc3} | 0.969 | 1.043 | 1.054 |
| | | | | |

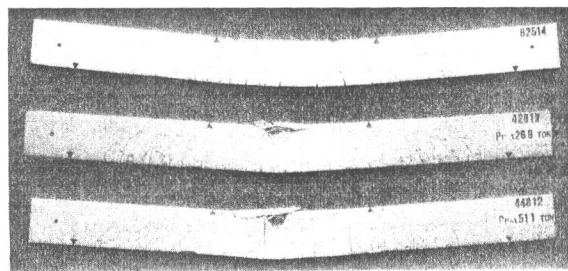
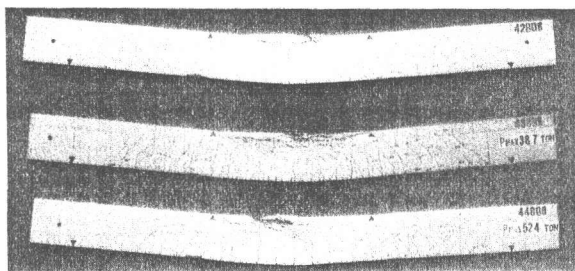


写真-1 破壊状態

参考文献 1) 矢代、清水：曲げを受けるはりの圧縮鉄筋の補強効果に関する実験的研究、第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1982年6月、pp349～352。

2) 矢代、清水：鉄筋コンクリートばりのじん性に及ぼす圧縮鉄筋と横補強筋の効果、第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1983年6月、pp337～340。

3) 矢代、清水、中野：鉄筋コンクリートばりの強度とじん性に対する横補強筋の効果に関する実験的研究、日本大学生産工学部第16回学術講演会、1983年11月、pp1～4。