

論文 アラミド繊維を巻き付けた RC 柱の耐衝撃挙動に関する基礎的研究

三上 浩^{*1}・岸 徳光^{*2}・佐藤昌志^{*3}・田村富雄^{*4}

要旨：本論文は、既存 RC 柱の耐衝撃性向上対策の一方法として、アラミド繊維製のテープを巻き付けた場合の耐衝撃挙動を実験的に検討したものである。特に本研究では、アラミドテープの巻き付け数とコンクリート強度に着目し、それらが耐衝撃挙動に与える影響を検討した。実験の結果、1)コンクリート強度の高い方が、また巻き付け数の多い方が柱の耐衝撃性は向上する。2)耐衝撃性の向上は、柱軸方向の応力分担が均等化されるためであることなどが分かった。

キーワード：アラミドテープ、巻き付け補強、RC 柱、耐衝撃性、落石覆工

1. はじめに

最近、老朽化した煙突の補修や建物の柱の耐震補強方法として、耐食性に優れ、軽量で高強度かつ施工性に優れる炭素繊維やアラミド繊維製のテープを巻き付ける補強方法が研究され、一部で実用化されている [1],[2]。一方、落石から道路および交通車両を防護する落石覆工は、一般に山岳急峻な景勝地で建設されるため、片側面には開口部を有している。従って、衝撃力が作用した場合には、覆工の頂版に作用した荷重の一部は開口部間の柱部へ伝達されることになる。そのため、柱部には衝撃的な軸方向力やせん断力が作用することも考えられるが、柱部の帯鉄筋量は衝撃荷重を静荷重に置き換えて算定しているのが一般的である。また、覆工が海岸に近い道路に設置されている場合には、塩害等による部材の劣化も考えられる。今後、RC 製覆工をより安全性が高く耐久性に優れた構造物にするためには、特に柱部の補修、補強方法ならびに維持管理方法を確立することが重要である。

本論文では、このような観点から RC 製覆工の柱部の耐衝撃性向上対策の一方法として、RC 柱にアラミド繊維製のテープを巻き付ける方法を提案し、重錘落下衝撃実験によってその補強効果に関する検討を行った。特に本研究では、アラミドテープの巻き付け数およびコンクリート強度をパラメータにとって RC 柱モデルを製作し、それらが耐衝撃挙動に与える影響を検討した。

2. 実験の概要

表-1 に試験体の一覧を示す。試験体名のうち、L と H は使用したコンクリートの圧縮強度の大小を示し(L:低強度、H:高強度)、-以降の数字は衝撃載荷前に巻き付けたアラミドテープの巻き付け数を示している。

なお、-a の 2 体は軽微な損傷を受けた柱の補強を想定して、載荷速度 $v = 3$

表-1 試験体の一覧

試験体名	載荷速度 (m/sec)	コンクリート強度	巻き付け本数	巻き付け繊維体積割合(%)
L	1 ~ 6	低	0	0
H	1 ~ 6.8	高	0	0
L-3	1 ~ 6.8	低	3	0.41
H-3	1 ~ 6.8(2回)	高	3	0.41
L-4	1 ~ 6.8	低	4	0.54
H-4	1 ~ 6.8	高	4	0.54
L-5	1 ~ 6.8	低	5	0.68
H-5	1 ~ 6.8(2回)	高	5	0.68
L-a	1 ~ 6.8	低	3	0.41
H-a	1 ~ 6.8	高	3	0.41

*1 三井建設 (株) 技術研究所 主任研究員、工博 (正会員)
 *2 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科、工博 (正会員)
 *3 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室長、(正会員)
 *4 三井建設 (株) 技術研究所 副所長、工博 (正会員)

m/sec までは無補強で実験を行い、テープを 3 巻きした後載荷速度を増加させて破壊に至らしめている。試験体は合計 10 体である。

衝撃力の載荷は、重錘の載荷速度を $v = 1\text{m/sec}$ から 1m/sec 刻みで破壊するまで行った。最大載荷速度は試験装置の制約から $v = 6.8\text{m/sec}$ である。また、 $v = 6.8\text{m/sec}$ 載荷で破壊しないものは同載荷を 2 回繰り返した。用いた重錘は鋼製で、重量が 200 kgf、直径が 15 cm であり、所定の高さから柱の軸心に自由落下させている。

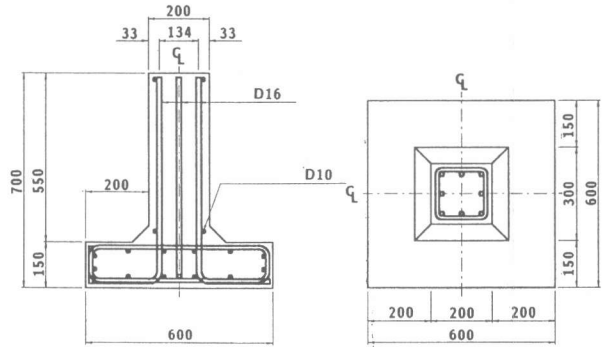
表一 2 に用いたコンクリートの力学的特性を示す。巻き付けに用いたアラミドテープは、幅が 75 mm で、軸方向にアラミド繊維を、軸直角方向にはガラス繊維を用いた織物である。アラミド繊維量は 75 mm 幅の中に 5680 デニール (1 デニールは 9000 m あたりの重量 (gf)) を 50 本配置している。断面積は 0.345cm^2 で、引張耐力は 4.57 tf である。

図一 1 に試験体の形状寸法および配筋とアラミドテープの巻き付け位置ならびに歪ゲージの位置を示す。試験体の軸方向筋は D16 が 8 本で補強筋比は約 4%、帯鉄筋は D10 を柱頭部と柱底部の 2 箇所だけに配置し、アラミド繊維巻き付け補強の影響を検出出来るようにしている。なお、巻き付け方法は、RC 柱に下地材を塗付した後テープを巻き付け、これに樹脂を含浸させて成形している。柱試験体の底部にはテープを設け、応力の集中による破壊を防止した。さらに柱のフーチングは 4 本のアンカーによって剛な鋼板と緊結し、上下、左右の移動を防止した。

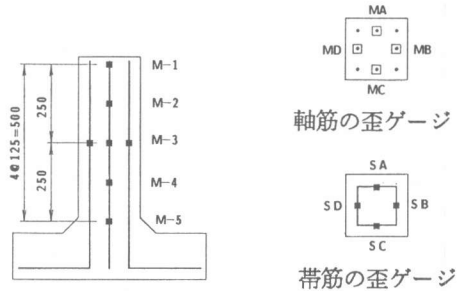
本実験では容量 1000 (G) の歪ゲージ型加速度変換器によって重錘衝撃力応答を、軸筋 (D16) と上部帯鉄筋 (D10) に歪ゲージをはり付けて歪応答を計測した。また、実験終了後に柱試験体の側面および上面のひびわれをスケッチし、ひびわれ性状を検討した。

表一 2 コンクリートの力学的特性

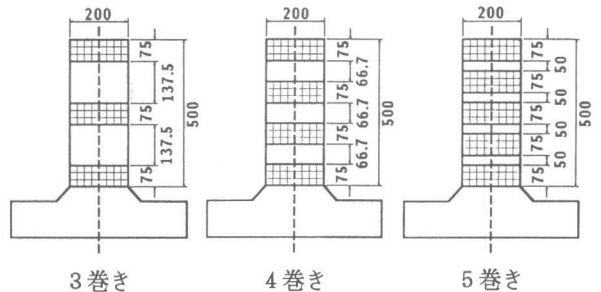
試験体名	実験時 材令(日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 ($\times 10^5\text{kgf/cm}^2$)	ポアソン比
L-3,4,5	21	277	2.37	0.22
H-3,4,5	21	322	2.38	0.20
L,L-a	31	300	2.29	0.18
H,H-a	42	396	2.77	0.22



(a) 試験体形状寸法および配筋



(b) 歪ゲージ取付け位置



(c) アラミドテープ巻き付け位置

図一 1 試験体の形状寸法等

3. 実験結果および考察

3.1 耐衝撃性

表-1に各柱の最大載荷速度を示した。なお、本実験では目視によって次の二つの項目に着目して破壊を定義した。(1)柱上面(載荷面)に重錘が5mm程度貫入し、損傷が激しくなった状態。(2)柱側面に顕著なひびわれが発生し、ひびわれを境に段差が確認された状態。

最大載荷速度を基に耐衝撃性を比較すると、4巻きの柱と途中から3巻きた柱ではコンクリート強度の影響は顕著ではないが、その他の柱ではコンクリート強度の高い柱で最大載荷速度が大きいかあるいは繰り返し回数が多く、耐衝撃性に優れていることが分かる。一方、巻き付け数で比較すると、強度の低いコンクリートを用いた柱では、巻き付けた柱全てで同様な最大載荷速度であるが、無補強の柱よりは耐衝撃性が向上している。強度の高いコンクリートを用いた柱では、3巻きと5巻きの柱で $v = 6.8$ m/secの繰り返し載荷を行っており、総合的にみると巻き付けた柱の耐衝撃性が向上している。このように、コンクリートの強度およびアラミドテープによる補強の有無はコンクリート柱の耐衝撃性に影響を与えている。

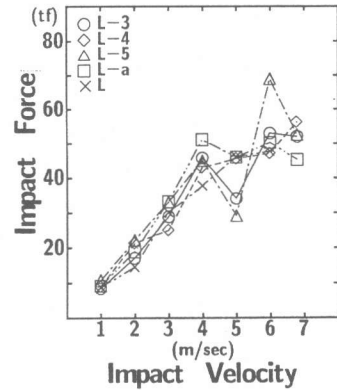
3.2 載荷速度と重錘衝撃力の関係

図-2(a)、(b)に各柱の載荷速度と重錘衝撃力の関係をコンクリート強度ごとに示した。なお、重錘衝撃力は最大加速度に重錘質量を乗じて求めた。

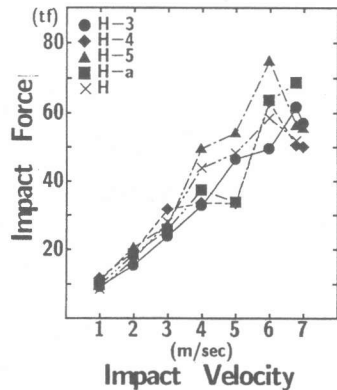
(a)図より、コンクリート強度が低い柱では、 $v = 4$ m/sec 載荷までは、アラミドテープの巻き付け数に関わらず同様に載荷速度の増加に対応して重錘衝撃力が線形的に増加していることが分かる。しかし、 $v = 6$ m/sec 載荷の5巻きの柱を除いて $v = 5$ m/sec 載荷以降の衝撃力はあまり増加していない。なお、途中でテープを巻き付けたL-aは、 $v = 4$ m/sec 載荷以降はほぼ一定の重錘衝撃力を示している。(b)図より、コンクリート強度の高い柱では、-4と-aを除いて $v = 6$ m/sec 載荷までほぼ線形的に衝撃力が増加し、この勾配は特に巻き付け数が5巻きの柱で大きいことが分かる。 $v = 6.8$ m/sec 載荷の1回目と2回目では、-aを除くすべての柱でそれ以前の載荷速度での衝撃力よりも小さくなっている。これに対して-aの柱では、巻き付け直後の $v = 4$ m/sec までは他と同様の傾向であるが、 $v = 5$ m/sec では衝撃力がほとんど増加せず、 $v = 6$ m/sec、6.8 m/sec と載荷速度の増加に対応して衝撃力が大きくなっている。これから、軽微な損傷を受けた後の補強でも、アラミドテープ巻き付けの効果があるものと考えられる。特にこの効果は、コンクリートの強度が高い柱で顕著に出現している。

コンクリート強度で重錘衝撃力を比較すると、線形関係を示す領域での勾配は両者でほぼ同様である。しかし、衝撃力が線形的に増加する限界の載荷速度はコンクリート強度が高い柱ほど大きい。

また、巻き付け数が多く、コンクリート強度も高い柱では重錘衝撃力は顕著に大きくなる。すなわち、コンクリート強度の高い柱ほど柱頭部の損傷が大きくなるに要する衝撃エネルギーが大きく、この傾向には巻き付け数の多さが相乗的な影響を与えているものと考えられる。



(a) 低コンクリート強度



(b) 高コンクリート強度

図-2 載荷速度と重錘衝撃力の関係

3.3 荷速度と軸筋歪分布性状の関係

図-3 (a)、(b) に 3 巻きの柱 (L-3、H-3) の軸筋の歪分布性状をコンクリート強度ごとに分けて示した。(a) は低強度、(b) は高強度の柱である。両者を比較すると、強度の低い柱の方が測点 M-3 周辺の歪が荷速度が大きくなるにつれて増大する傾向が顕著であることが分かる。すなわち、コンクリート強度の低い柱に比べて、コンクリート強度の高い柱では M-2、3、4 の歪が最終荷まで比較的一様である。また、同一荷速度で比較すると、歪レベルはコンクリート強度の高い柱の方が低い傾向にある。このように、コンクリート強度が高い柱では、軸方向力が柱の軸方向に均等に作用する傾向が強くなり、歪も小さくなるため、高い強度のコンクリートを用いる方が耐衝撃性の観点からは有効と考えられる。

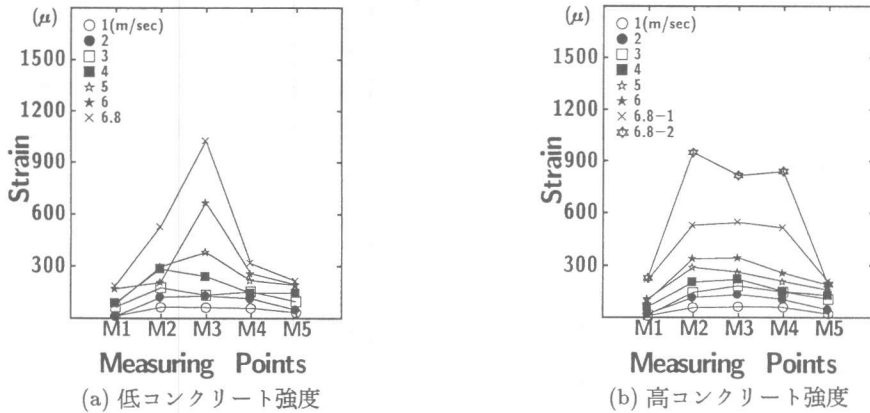


図-3 荷速度と軸筋歪分布性状の関係 (3 巻き)

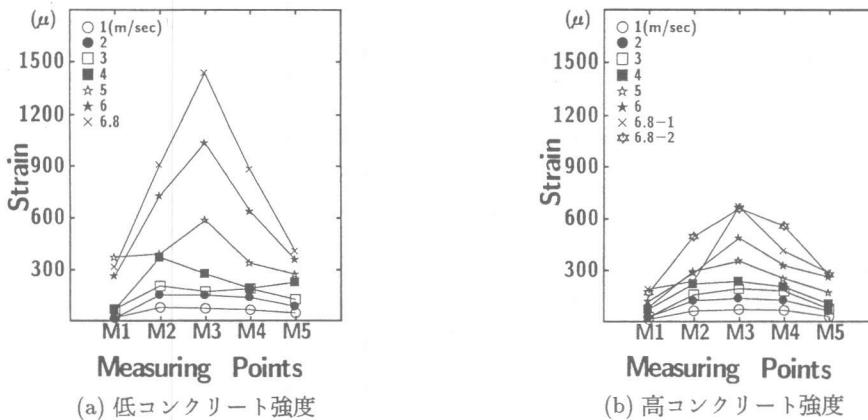


図-4 荷速度と軸筋歪分布性状の関係 (5 巻き)

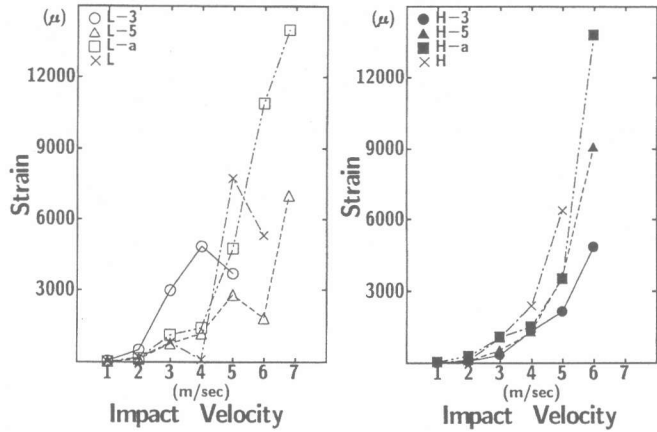
図-4 (a)、(b) に 5 巻きの柱 (L-5、H-5) の軸筋の歪分布性状をコンクリート強度ごとに分けて示した。(a) は低強度、(b) は高強度である。両者を比較すると、3 巻きの場合と同様にコンクリート強度の高い柱の方が歪が軸方向に均一化されている度合いが高いことが分かる。また、歪レベルは荷速度が大きくなるとコンクリート強度の高い柱では低い柱の半分以下と小さくなっている。

次に、同じコンクリート強度で巻き付け数の影響を検討する。コンクリート強度の低い柱では、ともに測点 M-3 に歪が集中し分布性状も同様であるが歪レベルは 5 巻きの方が大きく示されている。一方、コンクリート強度の高い柱では、巻き付け数が 3、5 巻きともに歪は比較的軸方向に均等化されている。しかし、歪レベルは相対的に 5 巻きの方が小さい。このように、コンクリートの強度は軸方向の応力分担

性状に影響を与え、柱全体で衝撃力に抵抗するためにはコンクリート強度が高い方が良いと考えられる。また、この傾向は巻き付け数が多い柱にも表われ、柱軸方向で広域的に応力を分担するという観点からは、巻き付け数を多くすることはコンクリート強度を高めることと同様の効果があるものと考えられる。

3.4 載荷速度と上部帯筋歪の関係

図-5(a)、(b)に載荷速度と上部帯筋歪の関係を示した。(a) 図はコンクリート強度が低い柱、(b) 図は強度が高い柱である。(a) 図から、強度が低い柱では、載荷速度が $v = 2$ m/sec で歪が増加し始め、3 巻きでは $v = 3$ m/sec 載荷で帯筋が降伏していることが分かる。一方、5 巻きでは降伏するのが $v = 5$ m/sec 以上の載荷速度であり、巻き付け数が多いと帯筋が降伏する載荷速度が大きくなる事が分かる。途中から補強した L-a の $v = 4$ m/sec 載荷における歪は 5 巻きの柱と同程度であったが、載荷速度の増加とともに歪は大きく増加している。なお帯筋が降伏する載荷速度は $v = 5$ m/sec である。



(a) 低コンクリート強度 (b) 高コンクリート強度

図-5 載荷速度と上部帯筋歪の関係

(b) 図から、強度が高い柱では、載荷速度が $v = 3$ m/sec で歪が増加し始め、無補強の柱でより大きな歪が発生していることが分かる。ただし、 $v = 4$ m/sec 載荷までは 3 巻きと 5 巻きには大差がなく帯筋が降伏するのは $v = 5 \sim 6$ m/sec 載荷である。途中から補強した H-a は、5 巻きの柱と $v = 5$ m/sec 載荷まではほぼ同様な関係を示している。帯筋が降伏するのは $v = 5$ m/sec であり、無補強の $v = 4$ m/sec よりも載荷速度は大きくなっている。このように、柱頭部を横拘束する効果は、巻き付け数が多いほど、またコンクリート強度が高いほど大きく、それに伴って柱頭部の損傷もより軽微になっている。

3.5 ひびわれ性状

図-6 に衝撃実験終了後の各柱の上面および側面のひびわれ性状を示した。無補強の柱の側面のひびわれは、柱の軸心に沿って上下方向に直線的に発生するひびわれと、柱頭部に集中して発生している縦、横、斜めのひびわれから成っている。無補強で強度の高いコンクリートを用いた柱の方が強度の低い柱に比べて損傷が激しく、一部コンクリートが剥落しているのは載荷速度が大きいためと考えられる。アラミドテープを巻き付けた柱の側面ひびわれは、コンクリートの強度が高い柱では $v = 6.8$ m/sec 載荷を 2 回繰り返しても、また強度が低い柱では載荷速度が大きくなっても、無補強の柱に比べて軽微である。なお、コンクリート強度に関わらず、巻き付け数が多いほどひびわれが密に発生しかつその幅も小さくなっていることより、巻き付け数の多い柱ほど損傷の程度は軽微になっている。また、途中から巻き付けた柱の損傷は無補強の柱に比べて軽微であり、載荷前にテープを 3 巻きした柱とほぼ同様のひびわれ性状を示している。すなわち、軽微な損傷を受けた後に巻き付け補強しても、最終のひびわれ性状は最初から巻き付けた柱と同様であり、損傷に対するテープの巻き付け補強効果が明瞭に示されている。なお、最大衝撃荷重載荷後においてもテープはコンクリートからはがれておらず、付着特性が良好であることを確認した。

一方、コンクリート強度で比較すると、強度による損傷の程度には大差がなく、強度の高い柱の方が最

大載荷速度が大きくなったり、繰り返し回数が大きくなる傾向にあることから、コンクリートの強度が高いものほど損傷は軽微であると言える。

この様に、コンクリート強度および巻き付け数は損傷の程度に大きな影響を与える。なお、上面は載荷速度が大きくなるに従って、重錘の断面形状に対応する部分で陥没が顕著となっている。また、上面の損傷の程度は側面の損傷の程度と良く対応している。

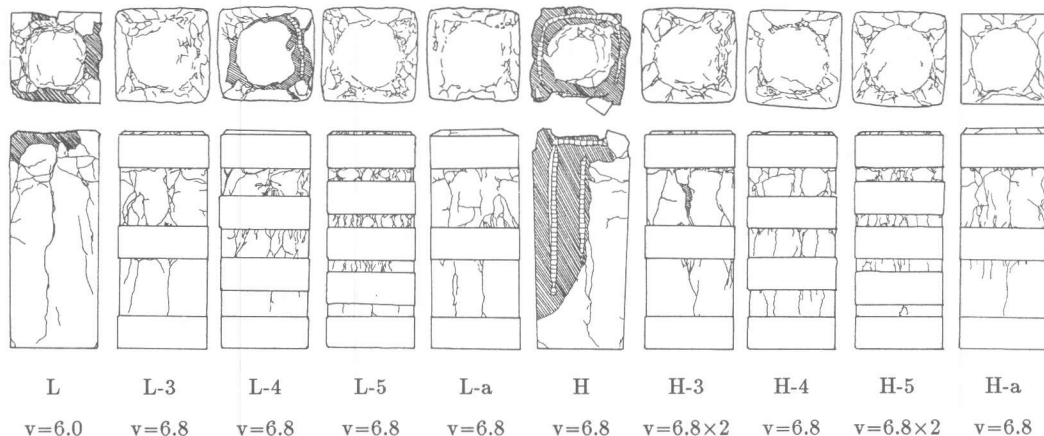


図-6 ひびわれ性状

4. まとめ

既存 RC 柱の耐衝撃性を向上させる補強方法の一つとして、アラミド繊維製のテープを巻き付ける方法を提案し、その効果を重錘落下衝撃実験を行って検討した。また、衝撃挙動に与えるコンクリート強度の影響もあわせて検討した。本研究の範囲内で得られた結論を要約すると、

- (1) コンクリート強度が高い方が、また巻き付け数が多い方が最大載荷速度が大きく、柱の耐衝撃性は向上する。
- (2) 重錘衝撃力が線形的に増加する限界の載荷速度は、コンクリート強度が高いものほど大きい。また、巻き付け数が多い柱では重錘衝撃力が大きくなる傾向にある。
- (3) 柱軸方向の応力分担を均等化させるにはコンクリートの強度は高い方が良い。また、巻き付け数が多い方が少ない柱よりも応力の分担が均等化されている。
- (4) 柱頭部を横拘束する効果は、巻き付け数が多いほど、またコンクリート強度が高いほど大きい。
- (5) ひびわれ性状(損傷の程度)は、コンクリートの強度とアラミドテープの巻き付け数によって異なり、強度が高いほど、巻き付け数の多い柱ほど損傷は軽微になっている。
- (6) 軽微な損傷を受けた後にアラミドテープを巻き付けた場合も、巻き付け補強効果が十分に期待できることが分かった。

本研究を行うに当たり、室蘭工業大学建設システム工学科の大学院生大山高輝君を始めとする構造力学研究室の諸君に多大なる御支援を頂いたことを付記し、深く感謝する次第であります。なお、テープの巻き付けに用いた樹脂はショーボンド建設(株)より提供して頂きました。

参考文献

- 1) 小島克朗・勝俣英雄ほか：炭素繊維の巻き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.2、PP.861 - 866、1989。
- 2) 小田稔・岡本直ほか：高強度繊維巻き付けによる既存 RC 柱のせん断補強、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2、PP.755 - 760、1993。