

軸衝撃力を受ける RC 柱の各種巻き付け材料による補強効果

STRENGTHENING EFFECT OF VARIOUS TYPES OF WINDING MATERIAL
ON RC COLUMN SUBJECTED TO AXIAL IMPACT FORCE

三上 浩* 岸 徳光** 谷本俊充*** 小山田欣裕****

Hiroshi MIKAMI, Norimitsu KISHI, Toshimitsu TANIMOTO and Yoshihiro OYAMADA

* 工博 三井建設(株)技術研究所 主任研究員(〒270-01 千葉県流山市駒木518-1)

** 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科(〒050 室蘭市水元町27-1)

*** 開発土木研究所研究員 構造研究室(〒062 札幌市豊平区岸岸1-3)

**** 工修 北海道道路管理技術センター 常任参与(〒060 札幌市北区北1条西2丁目)

In this paper, strengthening effect of various types of winding material on RC column subjected to axial impact force is discussed based on experimental results. Winding materials used in this study are steel plate, Aramid and Carbon tapes. Furthermore, the influence of pitch and volume of the winding material on the effect are also discussed. Axial impact force is applied on the top of RC column by free falling of a 200 kgf steel weight with built-in load cell. The results obtained from these experiments are: 1) the case of winding with small volume of Fiber Reinforced Plastic (FRP) tapes acts to increase the anti-impact compressive capacity of RC column, 2) the case of winding with large volume of Aramid tape is most useful in all cases considered here to increase the accumulated kinetic energy due to impact force till RC column failure, 3) the momentum of the weight for each case is almost equal to the impulse generated by the impact force, 4) the anti-impact compressive capacity of the RC column with no winding is almost equal to the static one.

keywords :Aramid tape, Carbon tape, winding, anti-impact compressive capacity, RC column

1. はじめに

落石から道路及び交通車両を防護する落石覆工は、一般に山岳急峻な地域や海岸地域などの景勝地で建設されることが多く、片側面には大きな開口部を有している。従って、落石による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に伝達される。そのため、柱部には衝撃的な曲げモーメントや軸圧縮力及びせん断力が組み合わさって作用することとなる。

一方で、既存の落石覆工の柱部の帯鉄筋量は、一般的に衝撃荷重を静的荷重に置き換えて算定しており、帯鉄筋比は0.1%程度であることが多い。従って、RC覆工をより安全性に優れた構造物にするためには、覆工のRC柱の耐衝撃性や補強工法の検討が極めて重要であると考えられるが、研究例は著者らの例^{1),2)}を除いて少ないのが現状である。

著者らの既往の研究¹⁾から、軸衝撃力を受けるRC柱の耐衝撃性は、コンクリート強度及び帯鉄筋量に大きく影響されることが明らかになっている。また、著者らはアラミド繊維製のテープを巻き付ける工法を提案し、その補強効果を定性的に検討した²⁾。その結果、アラミドテープを密な間隔で巻き付けるほど耐衝撃性は向上し、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でも補強効果が期待できることなどが明らかとなっている。

本研究は、橋脚や建物等の耐震補強工法として実績のあるFRPテープ巻き付け工法ならびに鋼板接着工法を軸衝撃力を受けるRC柱模型に適用した際の補強効果を定量的に検討したものである。

FRPテープには、耐食性に優れ、軽量で高強度な炭素繊維ならびにアラミド繊維製のテープを用い、これと鋼板を用いた実験結果を比較して、補強材料の特質と補強効果の関係を検討した。また、巻き付け補強材の層数や厚さならびに補強間隔を変化させた実験を行い、各々が補強効果に与える影響を検討した。なお、RC柱への衝撃荷重の載荷は重錘の自由落下衝撃によって行った。用いた試験体の形状寸法および配筋量は既存の落石覆工での実績を基にモデル化している。

本研究では、特にひずみゲージ式のロードセルを内蔵した重錘の衝撃力特性を基に、最大重錘衝撃力と破壊するまでの重錘の累積運動エネルギーに着目して補強効果を検討し、材料特性に対応した補強効果の算定式を提案した。また、軸方向筋のひずみの衝撃応答特性を基に、補強材料の特性と補強メカニズムの関係を定性的に検討し、実験終了後のひびわれ性状についてもあわせて検討している。

表-1 試験体の一覧

試験体名	補強材料	巻き付け段数(段)	巻き付け層数または厚さ	載荷速度 (m/sec)	体積補強割合 (%)	
A-3-1	アラミド	3	1層	1~6	0.15	
A-7-1		7				
A-3-2		3	2層	1~6	0.30	
A-7-2		7				
A-3-3		3	3層	1~6.5	0.45	
A-7-3		7				
S-3-1	鋼板	3	1.2 mm	1~6.5	0.62	
S-7-1		7				
S-3-2		3	2.3 mm	1~6.5	1.19	
S-7-2		7				
S-3-3		3	3.2 mm	1~6	1.66	
S-7-3		7				
C-3-1		カーボン	3	1層	1~5	0.09
C-7-1			7			
N		無補強	-	-	1~5	-

2. 実験の概要

実験に用いた試験体は表-1に示す15体である。試験体名のうち、A, S, Cは補強材料を示し、各々アラミドテープ、鋼板、炭素テープを用いたことを示す。第2項の-3および-7は巻き付け段数を示し、末尾の-1, 2, 3は巻き付け層数または厚さを示している。

衝撃荷重の載荷は繰り返し載荷で行い、重錘の載荷速度(重錘がRC柱に衝突する直前の速度)を $v = 1$ m/sec から 1 m/sec 刻みで最大 $v = 6.5$ m/sec まで行った。 $v = 6.5$ m/sec 載荷でも損傷が軽微なものは同載荷速度で繰り返し載荷を行った。重錘は鋼製で、重量が 200 kgf、直径が 15 cm であり、片当たりを防止するため底部は 2 mm のテープを有する球底となっており、所定の高さから柱の頭部軸心のコンクリート面に直接自由落下させている。

コンクリートおよび巻き付け補強材の力学的特性を表-2, -3に示す。アラミドテープは1層の厚さが 0.293 mm、炭素テープは 0.167 mm の製品を用いた。なお、テープの弾性係数および引張強度はFRP化(樹脂を含浸硬化させること)したテープで引張試験を行い、試験結果を繊維のみの断面積で評価した値である。弾性係数および引張強度は引張試験の平均値である。なお、鋼板については規格値を示した。

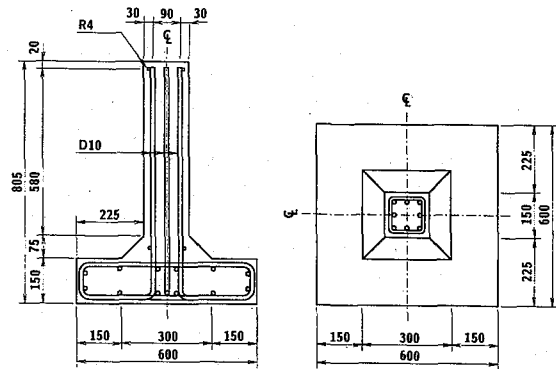
図-1に試験体の形状寸法および配筋と軸方向筋に貼り付けたひずみゲージの位置および補強の概要を示す。試験体の底部にはテープを設け、応力の集中による破壊を防止した。また、柱のフーチングは4本のアンカーによって剛な鋼板と緊結し、上下、左右の移動を防止した。補強筋は軸方向筋が D10 (8本) で補強筋比は約 2.5%、帯鉄筋は柱頭部と下部の2ヶ所だけに配筋し、巻き付け材料の補強効果を検討できるようにしている。

表-2 コンクリートの力学的特性

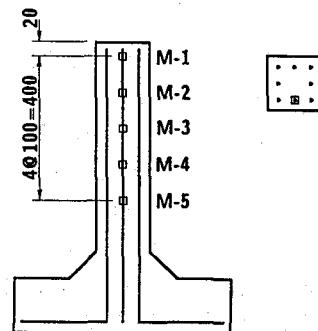
実験時の材令	ポアソン比 ν	弾性係数 (kgf/cm ²)	圧縮強度 (kgf/cm ²)
46~102日	0.161~0.238 (平均 0.19)	$1.87 \times 10^5 \sim 2.31 \times 10^5$ (平均 2.15×10^5)	254~343 (平均 296)

表-3 巻き付け補強材の力学的特性

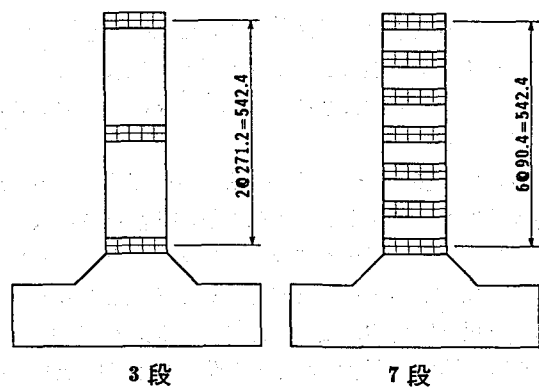
補強材	目付け量 (g/m ²)	幅 (mm)	厚さ (mm)	弾性係数 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
アラミドテープ	425	37.5	0.293	1.29×10^6	25,300
カーボンテープ	300		0.167	2.35×10^6	41,500
鋼板 (SS400)	-		1.2 2.3 3.2	2.10×10^6	4,080 ~ 5,200



a) 試験体の形状寸法と配筋 (mm)



b) ひずみゲージ貼り付け位置 (mm)



c) 補強の概要 (mm)

図-1 試験体の概要

FRP テープの巻き付け補強は、RC 柱にプライマーを塗布した後テープを隙間なく巻き付け、これに樹脂を合浸硬化させて成形している。一方、鋼板接着工法では、コンクリート面と鋼板の隙間にエポキシ樹脂を充填し、硬化させて両者を一体化させている。なお、鋼板は隅角部で全断面溶け込み溶接してロの字型に成形したが、溶接部の引張強度が母材強度以上であることを実験で確認している。

本実験での計測項目は、重錘に内蔵したひずみゲージ式の衝撃荷重測定用に開発したロードセル（以下、重錘ロードセル）による重錘衝撃力と容量 1000 G のひずみゲージ式の加速度変換器による重錘衝撃力および軸方向筋の圧縮ひずみの 3 項目である。

重錘衝撃力は加速度計によって計測するのが一般的であるが、重錘とコンクリート部材が直接衝突する際には、加速度波形に高周波成分が多く含まれる。実衝撃力としての成分を評価するためには、これをフィルターによって処理する必要がある。しかしながら、フィルター処理の仕方次第で計測値は大きく変化するため、必ずしも信頼性は高くない。そこで本研究では、重錘加速度のほか、起歪柱型のロードセルを重錘に内蔵して計測を行った。なお、全ての応答波形は高帯域用のデータレコーダを用いて一括収録している。さらに、軸方向筋ひずみ波形は、衝撃荷重初期から長期的な応答性状を調べるために、50 μsec 間隔に 100 msec 間隔について A/D 変換している。また、加速度および重錘ロードセル波形は衝撃荷重

をより精度良く評価するために 10 μsec 間隔に 20msec 間隔について A/D 変換した。これらの各デジタル波形はいずれも 20 データずつの矩形移動平均を行うこととした。これは、それぞれ 1 kHz, 5 kHz のローパスフィルター処理に対応している。また、実験終了後に試験体のひびわれをスケッチし、ひびわれ性状および破壊性状を検討した。

3. 実験結果および考察

3.1 重錘衝撃力特性

図-2 に無補強の試験体および 3 種類の補強材を各々 3 段、1 層または 1.2 mm で補強した試験体の最終載荷速度における加速度計および重錘ロードセルによる重錘衝撃力波形を示す。

この図から、同様な波形処理を行っても加速度計の計測値には高周波成分が多く含まれ、重錘ロードセル波形の概観と大きく異なることが分かる。また、衝撃力は両者で大きく異なり、加速度計の最大加速度に重錘質量を乗じて求めた最大衝撃力は、重錘ロードセルによる最大衝撃力の 1.65 ~ 1.82 倍と大きくなっている。さらに、波形の継続時間を定めるにあたり、加速度計の波形には高周波成分が残っているため精度良くこれを定めることは不可能である。従って、以後の考察はすべて重錘ロードセルによる衝撃力波形を用いて行うこととする。

3.2 耐衝撃性

図-3 に全試験体の最大重錘衝撃力と重錘の累積運動

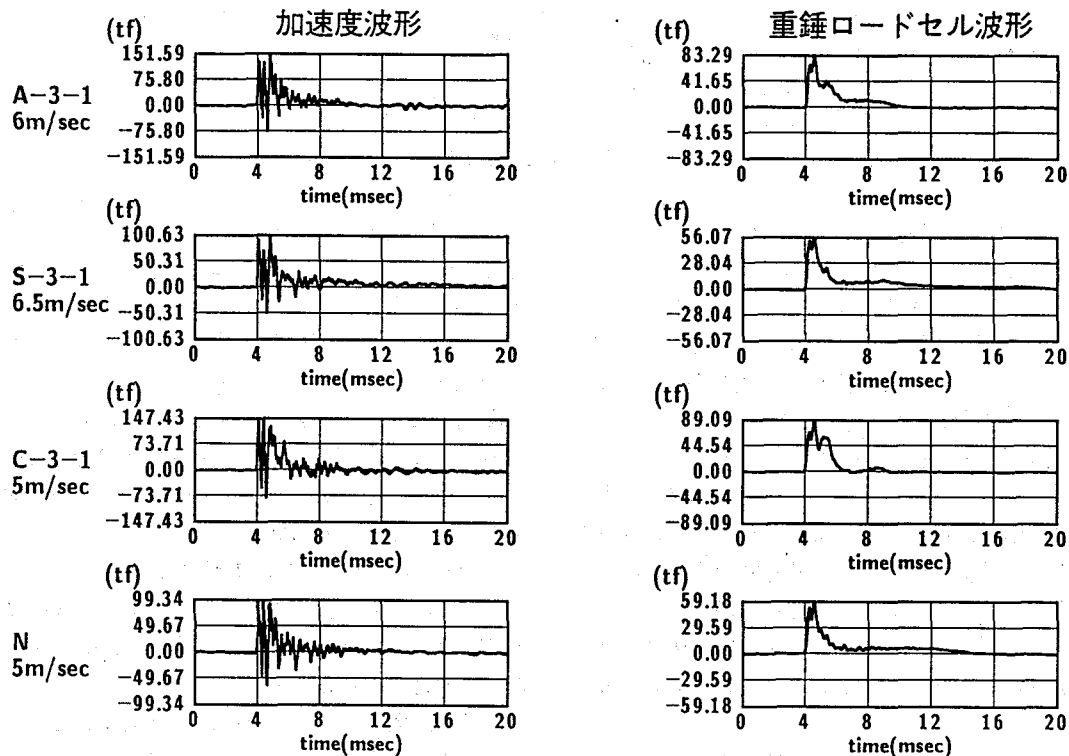


図-2 加速度および重錘ロードセル波形

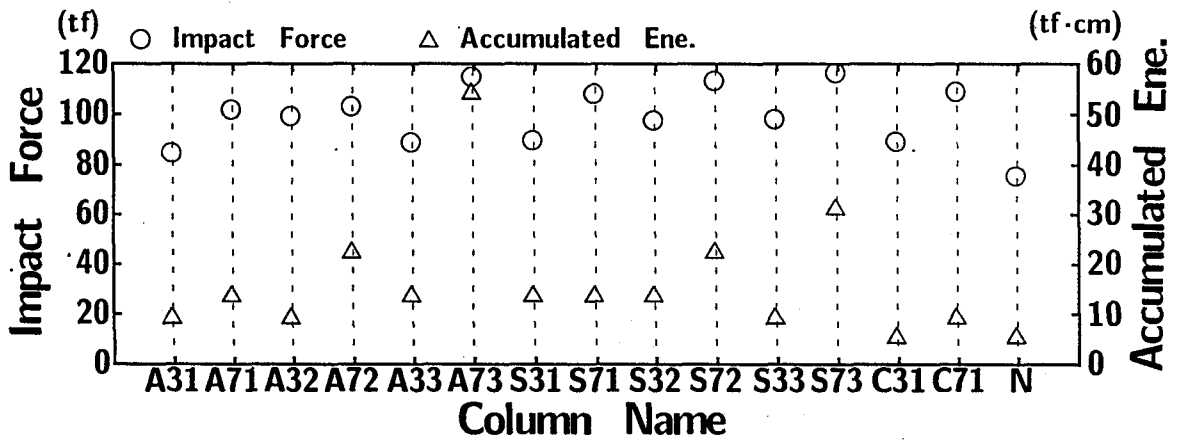


図-3 最大重錘衝撃力と重錘の累積運動エネルギー

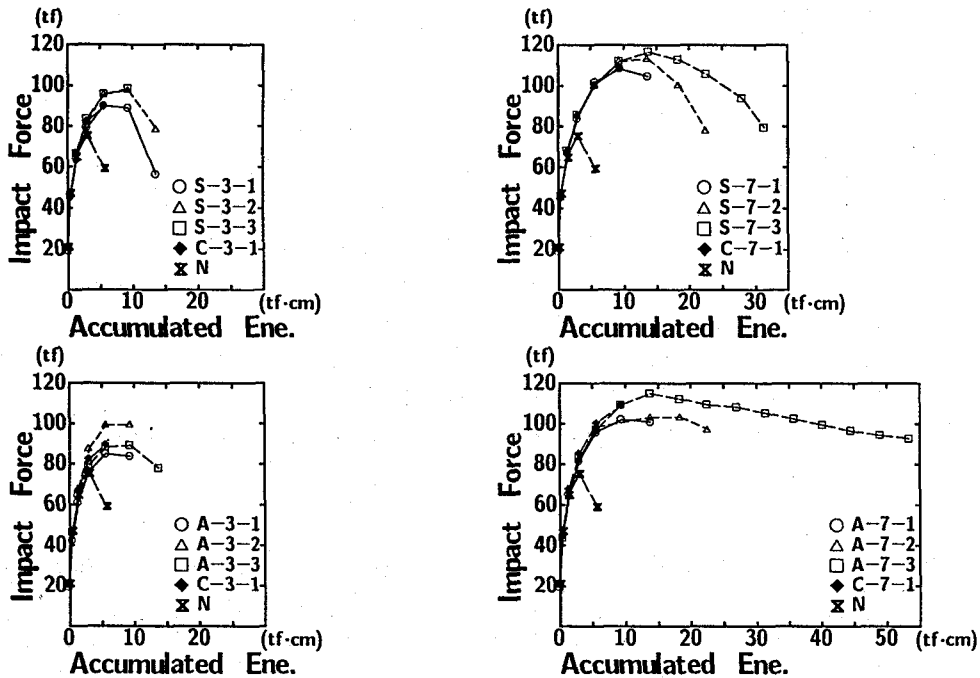


図-4 累積運動エネルギーと重錘衝撃力の関係 (材料比較)

エネルギーを示す。一般的に重錘衝撃力が大きいほど、また、破壊に至るまでの重錘の累積運動エネルギーが大きいほど RC柱の耐衝撃性は優れていると考えられる。なお、本実験では目視によって以下の項目に着目して破壊を定義した。すなわち、① 巻き付け補強材料が破断した状態；② 補強材は破断しないものの、柱上面（載荷面）に重錘が貫没し、損傷が激しくなった状態。

この図から、A-7-3 および S-7 シリーズと C-7-1 の最大重錘衝撃力が他と比べて相対的に大きいことがわかる。すなわち、巻き付け材料の中でも弾性係数の大きい材料を用いた方が最大重錘衝撃力は大きくなる傾向にある。また、弾性係数の低いアラミドテープを用いた場合には、7 段 3 層のように体積補強割合が高くなければ最大重錘衝撃力は大きくなる。

一方、A-7-2、7-3 と S-7-2、7-3 の累積エネルギーは他と比べて相対的に大きい。これに対して、最大重錘衝撃

力が比較的大きい C-7-1 の累積エネルギーはさして大きくない。これは、C-7-1 が低載荷速度でテープが破断して破壊したためである。

以上から、重錘衝撃力と累積エネルギーをバランス良く向上させるためには、鋼板またはアラミドテープを密な間隔でより多量に配置することが有効であると考えられる。なお、炭素テープは、少量の補強で重錘衝撃力が大きくなる一方で累積エネルギーが増加しない可能性があることに留意する必要がある。

3.3 累積エネルギーと重錘衝撃力の関係

図-4 に、鋼板接着とアラミドテープ補強における累積エネルギーと重錘衝撃力の関係を、炭素テープ補強および無補強と比較して示した。

3 段の鋼板接着では、厚いほど重錘衝撃力は大きくなる傾向にあるが 2.3mm と 3.2mm で大差はない。また、炭素テープ 1 層はほぼ鋼板 1.2mm と対応していること

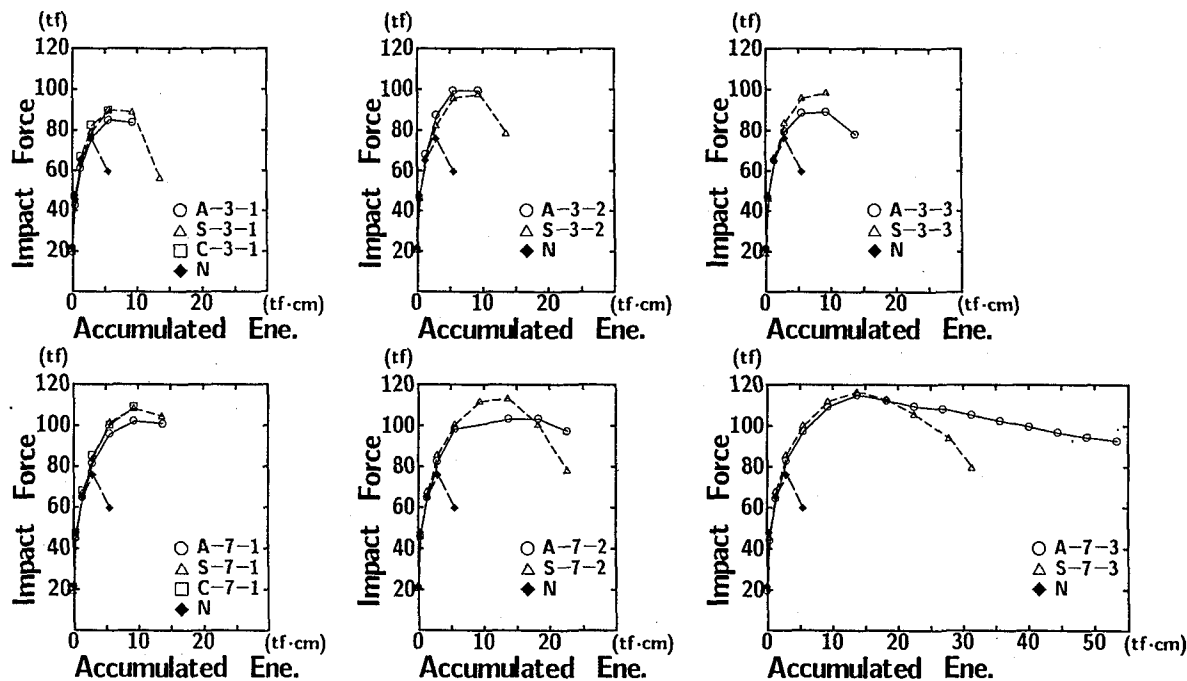


図-5 累積運動エネルギーと重錘衝撃力の関係 (段数および層数比較)

が分かる。3 段のアラミドテープ補強では、1 層の衝撃力が最も小さいものの 2 層が最も大きくなっている。また、炭素テープ 1 層の最大衝撃力はアラミドテープ 3 層にほぼ対応している。しかし、累積エネルギーは半分程度と小さい。一方、7 段の鋼板補強では、厚いほど最大重錘衝撃力は大きくなっているがその差はそれほど顕著ではない。しかしながら、累積エネルギーは厚いほど顕著に大きくなっている。なお、炭素テープ 1 層の場合は、鋼板 1.2mm と最大重錘衝撃力は同程度であるが、累積エネルギーは幾分小さくなっている。7 段のアラミドテープ補強では、1 層と 2 層の衝撃力に大差がなく、3 層では 1 層、2 層よりも 10% 程度衝撃力が大きくなっている。また、破壊時の累積エネルギーは層数が多くなるほど大きくなるが、特に 3 層での増加が著しい。また、炭素テープ 1 層の最大衝撃力は 3 段の場合と同様にアラミドテープ 3 層に対応しているが、累積エネルギーは 1/5 以下と小さい。

このように、累積エネルギーが 10 tf·cm 程度までの領域における炭素テープ 1 層の重錘衝撃力からみた補強効果は、アラミドテープ 3 層分、鋼板 1.2 mm 分相当と極めて高い。しかし、累積エネルギーが増加することでテープが破断して、鋼板やアラミドテープと比較して相対的に低い累積エネルギーで破壊している。これは、炭素テープはアラミドテープに比べて弾性係数が倍程度大きいものの、せん断力や圧縮力などの副次的荷重作用に対してもろいためと推察される。

図-5 に、同一の段数および層数 (厚さ) を有する試験体の累積エネルギーと重錘衝撃力の関係を示す。

全般に 5 tf·cm 程度以下の累積エネルギーでは、補強

材料や補強量の違いに関わらず、ほぼ同等な重錘衝撃力を示している。これは、5 tf·cm 程度までは試験体に損傷が生じていないことを示すものと考えられる。一方、累積エネルギーが 5 tf·cm 程度以上になると補強材料による差が生じ始める。3 段 1 層 (1.2 mm) の関係から、炭素テープと鋼板接着はほぼ同等な重錘衝撃力を示していることが分かる。これは両者が同等な弾性係数を有するためと推察される。一方、アラミドテープは炭素テープと鋼板に比べて重錘衝撃力が同程度もしくは小さく示されている。無補強では 5 tf·cm 程度で重錘衝撃力が大きく低下し、A-3-3 では 15 tf·cm 程度、S-3-1、S-3-2 もともに 15 tf·cm 程度で大きく衝撃力が低下している。

以上から、3 段の場合は補強材料および補強材の厚さに関わらずほぼ 15 tf·cm 程度が限界の累積エネルギーと考えられる。

7 段 1 層 (1.2 mm) の関係から、3 段 1 層 (1.2 mm) と同様、鋼板と炭素テープはほぼ同様な衝撃力を示し、累積エネルギーは鋼板の方が大きいことが分かる。一方、7 段 2 層 (2.3 mm) の関係から、鋼板補強の方がアラミドテープ補強よりも最大衝撃力が大きくなるが、累積エネルギーが大きくなると重錘衝撃力が大幅に低下する傾向が顕著であることが分かる。また、7 段 3 層 (3.2 mm) の関係からは、鋼板とアラミドテープ補強は累積エネルギーがほぼ 20 tf·cm 程度までは同様な関係を示しているが、鋼板補強は累積エネルギーの増加とともに衝撃力が大きく低下するのに対して、アラミドテープ補強では衝撃力の減少が僅かであることが分かる。

これは、鋼板は弾性係数が大きいために重錘衝撃力が大きくなるものの、鋼板が降伏して伸びることによって

ひびわれが顕著となり、重錘衝撃力が急減しやすいためと考えられる。また、3段と7段の比較から、7段の場合には最大重錘衝撃力は大きくなり、かつ破壊に至るまでの累積エネルギーが大きく、耐衝撃性に優れていることが分かる。

このように、7段の場合は3段よりも補強材の層数(厚さ)が増加することで重錘衝撃力が増加する傾向が顕著である。また、層数(厚さ)が増加することで3段よりも破壊に至るまでの累積エネルギーが顕著に増加している。

3段よりも7段の場合が層数(厚さ)の補強効果に与える影響が著しいのは、3段では補強間隔が広すぎて補強量に対応する補強効率が低くなるためと考えられる。

本実験の範囲内では、RC柱の幅15cmに対して9cm程度の間隔で37.5mm幅の補強材を配置することが効果的であることが明らかになった。

3.4 運動量と力積の関係

図-6に7段1層(1.2mm)の補強を行った試験体の重錘衝撃力の力積および継続時間の関係を示す。図中の実線は、各載荷速度に対応する重錘の運動量変化を示している。本実験における重錘の運動量変化は、重錘がリバウンドしないものとし、重錘の衝突直前の速度(載荷速度)が v から0になると仮定している。力積は重錘衝撃力波形を継続時間について積分して求めた。この図から、力積はいずれの試験体も載荷速度に対応して直線的に増加し、運動量変化と力積がほぼ対応していることが分かる。理論的には力積は重錘のリバウンド速度

の大小に対応して mv (最小)から $2mv$ (最大)の範囲で与えられる。本実験では重錘のリバウンドに関する計測は行っていないが、 mv と力積がほぼ対応していることから、リバウンドはほとんど無視できる程度であったと推察される。一方、重錘衝撃力波形の継続時間は試験体の種類によらず2msec程度である。なお、S-7-1とN試験体の最終載荷速度で継続時間が大幅に長くなっているのは、柱頭部の損傷が極めて顕著になったためと考えられる。

3.5 軸方向筋のひずみ分布性状

図-7に、3段1層(1.2mm)および7段1層(1.2mm)と無補強の試験体の軸方向筋の圧縮ひずみ分布を載荷速度ごとに示す。図中の点線は、最大重錘衝撃力の実測値を基にコンクリートの弾性係数および鉄筋をコンクリートに換算して考慮したコンクリートの断面積を用いて算出した圧縮ひずみの計算値である。

無補強の試験体では、載荷速度が $v = 3$ m/secまでは全般的にひずみが小さく、ひずみは柱底部の方が頭部よりも大きい。 $v = 4$ m/secでひずみレベルが急増し、むしろ柱頭部の方が底部よりも大きくなっている。3段1層(1.2mm)の場合には、載荷速度が低い場合には無補強と同様なひずみ分布性状を示し、載荷速度が大きくなるにつれてひずみレベルが増加している。A-試験体では計算圧縮ひずみと実測ひずみレベルは良く一致し、M1~M5まで同様なひずみレベルとなっている。

一方、S-試験体では全般的に載荷速度の増加に対応するひずみの増加が大きく、最終載荷速度のひずみは計算圧縮ひずみの2倍程度と大きい。C-試験体では載荷速度の増加によってM1のひずみが極めて大きくなり、計算ひずみを大幅に上回っているが、他の測点では鋼板ほどは計算値を上回っていない。

以上の結果から、3段1層(1.2mm)において、コンクリートと軸方向主鉄筋が一体となって軸衝撃力に抵抗する度合いは、A-試験体が最も大きく、次がC-試験体で、S-試験体は最も一体化されていないことが分かる。

7段1層(1.2mm)のA-試験体では、C-3-1と同様に載荷速度が大きくなるにつれて測点M1において大きなひずみが励起されている。一方、C-試験体でも $v = 5$ m/sec載荷で柱頭部に大きなひずみが発生しているが、その値は $v = 4$ m/sec載荷のA-試験体ほどは大きくない。一方、S-試験体では低載荷速度から載荷速度が大きくなるにつれてひずみレベルが大きく増加し、特に測点M1~M3の増加が顕著である。

計算ひずみと実測ひずみを比較すると、A、C-試験体の最終載荷速度において、柱頭部付近のみが計算ひずみを超えているのに対して、S-試験体では全測点が計算ひずみ以上である。また、測点M1は $v = 2$ m/sec載荷から計算ひずみを超えている。計算ひずみは、軸方向筋とコンクリートが一体となって挙動することを前提

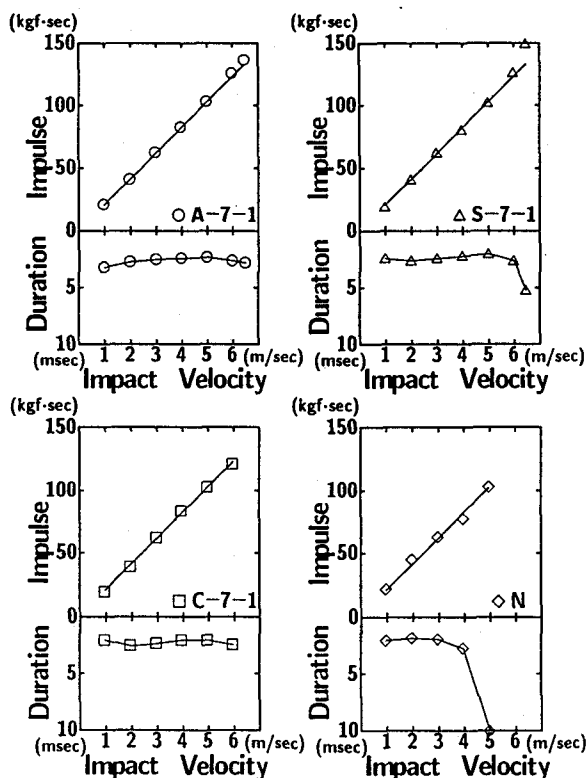


図-6 重錘衝撃力の力積と継続時間の関係

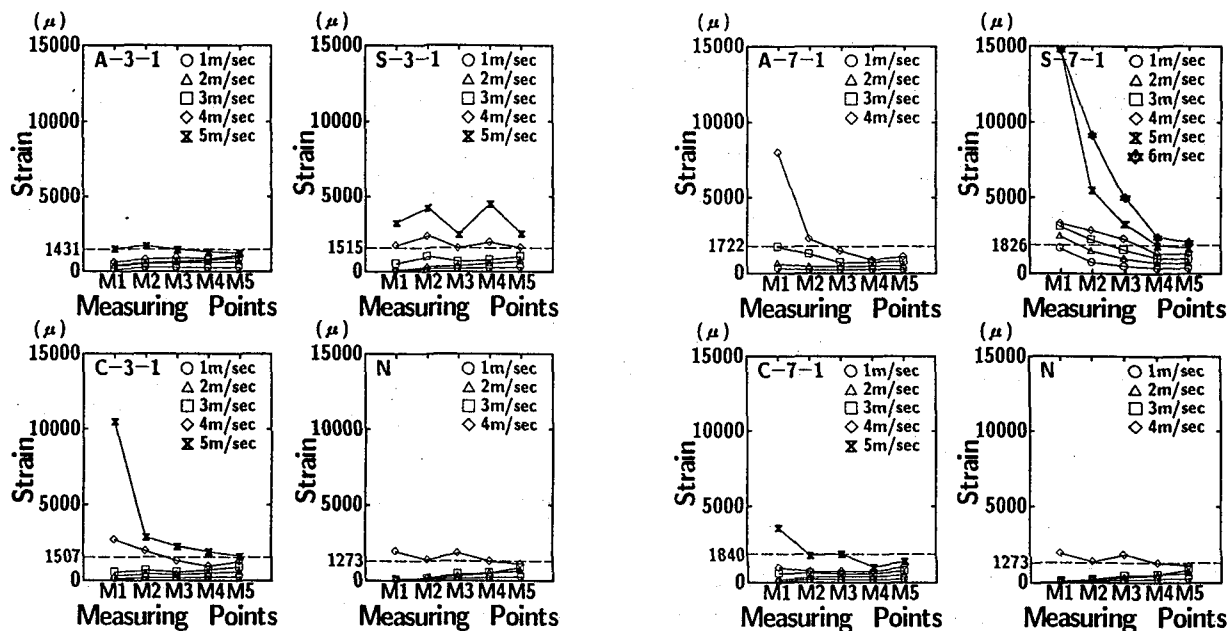


図-7 軸方向筋の圧縮ひずみ分布

として算定された値であり、この値を実測ひずみが大きく超えることは、軸方向筋とコンクリートが一体化していないことを示すものと考えられる。すなわち、鋼板補強はFRPテープ補強に比べてコンクリートと軸方向筋が一体化していないことを意味している。これは、鋼板補強とFRPテープ補強のメカニズムが異なることを暗示している。すなわち、鋼板は載荷速度が大きくなると降伏して伸び量が大きくなり、残留する塑性伸びも大きくなって柱を拘束する効果は徐々に低下すると考えられる。そのため、累積エネルギーがあるレベルを超えると最大重錘衝撃力が低下する。しかし、破断するまでの伸び量はFRPテープよりも大きいために破断しにくく、破壊に至るまでの累積エネルギーは大きくなる。

一方、FRPテープ補強ではFRPテープに降伏現象がないため、破断に至るまで弾性的にRC柱を拘束するためコンクリートと軸方向筋の一体化の度合いが高くなる。また、累積エネルギーはテープの破断しにくさに影響され、副次的な荷重が作用する状態でも破断しにくいアラミドテープを用いた方が炭素テープを用いるよりも大きくなるものと考えられる。

3.6 体積補強割合と耐衝撃性

最大重錘衝撃力と破断に至るまでの重錘の累積運動エネルギーを耐衝撃性を示す因子と考え、これらと補強材の体積補強割合の関係を検討した。

図-8に巻き付け補強材の体積補強割合と最大重錘衝撃力の関係を示す。ここでは、以下の2つの体積補強割合を用いて検討を行った。

- ① 補強材の量に基づく実体積補強割合 ρ_a 、
- ② 実体積補強割合に鋼板との弾性係数比を乗じた体積補強割合 ρ_b 、すなわち、

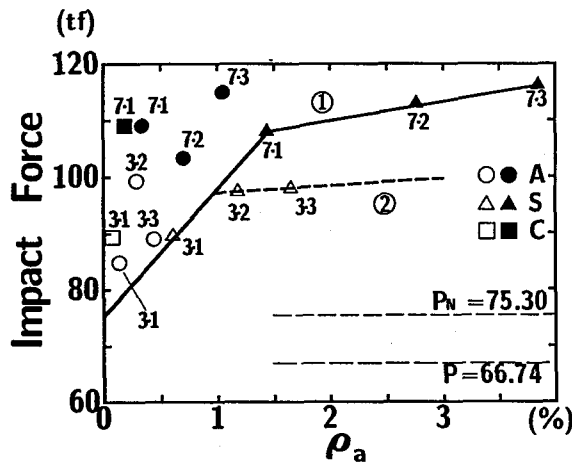
$$\rho_b = \text{実体積補強割合 } \rho_a \times \frac{\text{補強材の弾性係数}}{\text{鋼板の弾性係数}}$$

図-8a)より、FRPテープ補強の場合には少ない体積補強割合で鋼板と同等以上の最大重錘衝撃力が励起され、巻き付け補強材の特性が最大重錘衝撃力からみた補強効果に大きく影響していることが分かる。鋼板補強の場合には、3段と7段で衝撃力のレベルが大きく異なるが、いずれの段数でも体積補強割合の増加による最大重錘衝撃力の増加はさほど顕著ではなく、7段では $P = 115 \text{ tf}$ 程度、3段では $P = 100 \text{ tf}$ 程度に収束するようである(図中、①、②参照)。7段配置のように適切な間隔で鋼板が配置された場合の最大重錘衝撃力の増加(軸圧縮耐力の増加)と補強割合の関係は図中①で表わされ、これを定式化すると

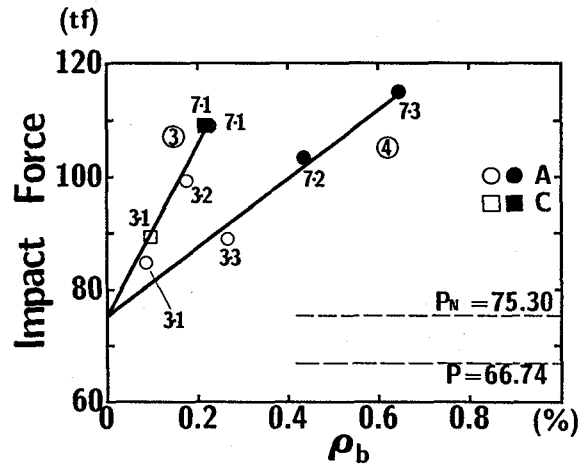
$$\left. \begin{aligned} \frac{f_{cc}}{f_{co}} &= 0.3 \times \rho_a + 1 \\ &(0 < \rho_a \leq 1.45 \%) \\ \frac{f_{cc}}{f_{co}} &= 0.045 \times \rho_a + 1.37 \\ &(1.45 \leq \rho_a < 3.86 \%) \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

ここに、 f_{cc} : 鋼板接着後の軸圧縮耐力
 f_{co} : 鋼板接着前の軸圧縮耐力
 ρ_a : 鋼板の実体積補強割合 (%)

図中、A-およびS-試験体において体積補強割合が増加しているにもかかわらず衝撃力が減少しているのは、体積補強割合の他に段数が衝撃力に大きな影響を与えることを示している。少ない段数で層数(厚さ)を多くして補強割合を大きくしてもその効果はA、S-試験体ともに顕著には出現しない。すなわち、段数を多くする(



(a)



(b)

図-8 体積補強割合と最大重錘衝撃力の関係

補強材を密な間隔で配置する)方が最大重錘衝撃力を効率的に大きくし、耐衝撃性を向上させることを意味している。なお、アラミドテープ補強が 115 tf 程度を示す補強割合は約 1% であり、鋼板が 4% 程度であることから、FRP の必要補強割合は鋼板の約 1/4 であることが分かる。また、アラミドテープ補強の場合も 7 段の 1~3 層で重錘衝撃力の増加は顕著ではなく、最大重錘衝撃力 $P = 115$ tf 程度は、本実験における最大重錘衝撃力の上限値と思われる。

図中の $P = 66.74$ tf はコンクリートの平均圧縮強度に断面積を乗じて求めた計算耐力であり、 $P_N = 75.30$ tf は無補強の柱の最大重錘衝撃力の実測値である。これから、無補強における計算耐力と実測耐力の比は 1.13 倍程度であり、軸衝撃力を受ける柱の耐力は静的軸圧縮耐力とほぼ同程度と考えることは安全側であることが分かる。一方、補強後の柱の最大重錘衝撃力の上限値は 115 tf 程度であり、最大で $115 / 75.3 = 1.5$ 倍程度耐力が増加するものと考えられる。

図-8b) で鋼板との弾性係数比を各 FRP テープの実体積補強割合に乗じて FRP テープの補強効果を検討した。

その結果、炭素テープ補強の軸圧縮耐力向上効果は、アラミドテープの効果の上限値に相当することが分かった。図中の③、④の線は各々補強効果の上限値および下限値を示し、以下のように定式化できる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{f_{cc}}{f_{co}} &= 2.0 \times \rho_b + 1.0 \quad (\text{上限値}) \\ &(0 < \rho_b < 0.23 \%) \\ \frac{f_{cc}}{f_{co}} &= 0.8 \times \rho_b + 1.0 \quad (\text{下限値}) \\ &(0 < \rho_b < 0.65 \%) \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

ここに、 f_{cc} : FRP テープ補強後の軸圧縮耐力
 f_{co} : FRP テープ補強前の軸圧縮耐力

ρ_b : FRP テープの補正体積補強割合 (%)

なお、FRP テープ補強の場合には実験値にばらつきが多く、鋼板補強でみられた段数の影響や耐力向上効果が収束する傾向が明瞭でないため、補強効果を上・下限値で評価することとした。今後、データ数を増やして詳細に検討する必要がある。

図-9 に体積補強割合と重錘の累積運動エネルギーの関係を示す。図-9a) より、鋼板で補強した場合の累積エネルギーは、S-3-3 を除きほぼ体積補強割合の増加に対応して直線的に増加することが分かる。図中 E_N は無補強の試験体の累積エネルギーであり、これを基準に⑤の関係を定式化すると、

$$\frac{E_S}{E_N} = 1.09 \rho_a + 1.0 \quad \dots (3)$$

$$(0 < \rho_a < 3.86 \%)$$

ここに、 E_S : 鋼板接着後の累積エネルギー

E_N : 鋼板接着前の累積エネルギー

ρ_a : 鋼板の実体積補強割合 (%)

一方、FRP テープ補強の場合は鋼板との弾性係数比を乗じて検討すると、図-9b) から、炭素補強はアラミド補強のほぼ下限値に相当することが分かる。図-9b) における⑥の関係を定式化すると、

$$\frac{E_F}{E_N} = 19.48 \rho_b^2 + 1.0 \quad \dots (4)$$

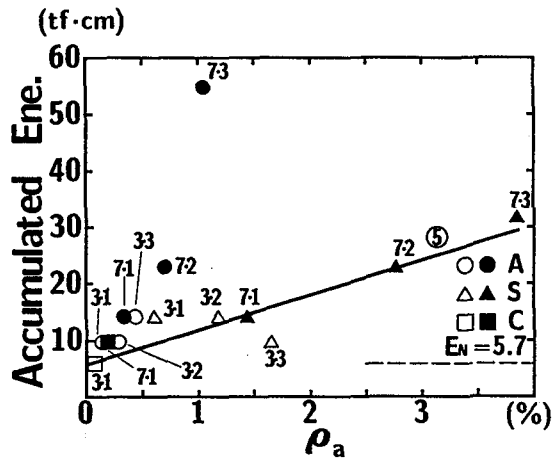
$$(0 < \rho_b < 0.65 \%)$$

ここに、 E_F : FRP テープ補強後の累積エネルギー

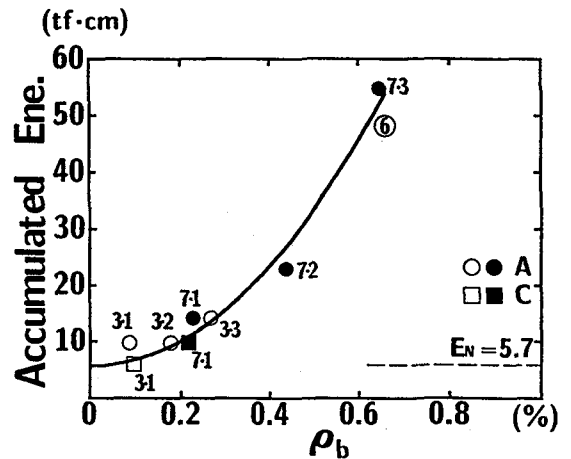
E_N : FRP テープ補強前の累積エネルギー

ρ_b : FRP テープの補正体積補強割合 (%)

なお、(4) 式を定めるにあたり、炭素テープ補強の場合は体積補強割合が少ないこともあり、10 tf/cm を大きく上回る累積エネルギーの実測値が得られていないことから、今後は体積補強割合の大きな試験体を用いて (4) 式の炭素テープ補強の場合の適用性を検討する必要がある。



(a)



(b)

図-9 体積補強割合と累積運動エネルギーの関係

3.7 補強材の破断状況とひびわれ図

表-4 に巻き付け補強した試験体の補強材の破断状況を示す。アラミドテープ補強の場合、柱の破壊は最終載荷までテープが破断しない A-7-3 を除き、1 段目のみもしくは1, 2 段目のテープの破断によって生じている。テープの破断位置は隅角部のほか断面中心部の場合もあり、破断の方向も縦方向のみならず縦・横方向の場合もみられる。

一方、鋼板補強した柱の破壊は、S-3-2 のみが柱頭部のコンクリートの破壊によって生じたが、他は全て隅角部において鋼板が縦方向に破断して生じている。S-7-1 および -2 は1 段目の鋼板は破断せず、2 段目のみが破断している。炭素テープで補強した柱の破壊は、アラミドテープ補強と同様に1 段目のみもしくは1, 2 段目の

テープの破断によって生じている。テープの破断位置は隅角部および断面中心部の場合があるが、破断の方向は全て縦方向であり、アラミドテープでみられた横方向の破断はみられない。

本実験では、鋼板補強の破断はすべて隅角部の鋼板の縦われによって生じており、特に隅角部での鋼板の処理が重要であると考えられる。一方、炭素テープ補強の場合には、極めて低い載荷速度でテープが破断しており、体積補強割合を大きくする必要性が考えられる。

図-10 に最終載荷後のひびわれ性状を示す。無補強の N 試験体では、柱頭部から底部にかけて断面中心部に縦ひびわれが発生し、柱頭部ではコンクリートが剥落して軸方向筋が座屈していることが分かる。

C-3-1 では、無補強と同じ載荷速度で、全体的な損傷は極めて軽微であったにもかかわらず上段の炭素テープが破断して破壊している。なお、N 試験体でみられた断面中心部の縦ひびわれは2 段目のテープで止まっている。

S-3 試験体では、S-3-2 を除いて上段の鋼板が破断し、2 段目の鋼板までの広い範囲でコンクリートが大きく剥落している。なお、S-3-1, -2 では上記範囲で鉄筋が座屈しているが、-3 では座屈は生じていないようである。A-3 試験体では、全て上段のアラミドテープが破断し、2 段目までの範囲でコンクリートの一部が剥落しているが、剥落の状況はA-3-1の方が3-2よりも激しい。なお、3-3 の損傷も顕著であるが、これは他よりも大きな載荷速度で載荷しているためである。

次に、7 段補強の試験体のひびわれ性状を検討する。アラミドテープ補強では、重錘の累積エネルギーが各試験体で大きく異なるため同一の尺度では比較できないが、7-1, -2 の損傷は上から3 段目のテープまでの範囲で顕著である。一方、7-3 のように累積エネルギーが極めて大きい試験体では、損傷範囲が上から4 段目までに広がり、かつ柱底部にもコンクリートが剥落するなど損傷

表-4 補強材の破断状況

試験体名	破断位置		載荷速度 (m/sec)
	段目	場所, 方向	
A-3-1	1	中心部, 縦	6
A-7-1	1	隅角部, 縦横	6.5
	2	中心部, 縦	
A-3-2	1	隅角部, 縦横	6
A-7-2	1	隅角部, 縦	6.5 × 3
	2	隅角部, 縦	
A-3-3	1	隅角部, 縦横	6.5
A-7-3	破断せず	—	(6.5 × 10)
S-3-1	1	隅角部, 縦	6.5
S-7-1	2	隅角部, 縦	6.5
S-3-2	破断せず	コンクリートの破壊	6.5
S-7-2	2	隅角部, 縦	6.5 × 3
S-3-3	1	隅角部, 縦	6
S-7-3	1	隅角部, 縦	6.5 × 5
	2	隅角部, 縦	
C-3-1	1	隅角部, 縦	5
C-7-1	1	中心部, 縦	6
	2	隅角部, 縦	

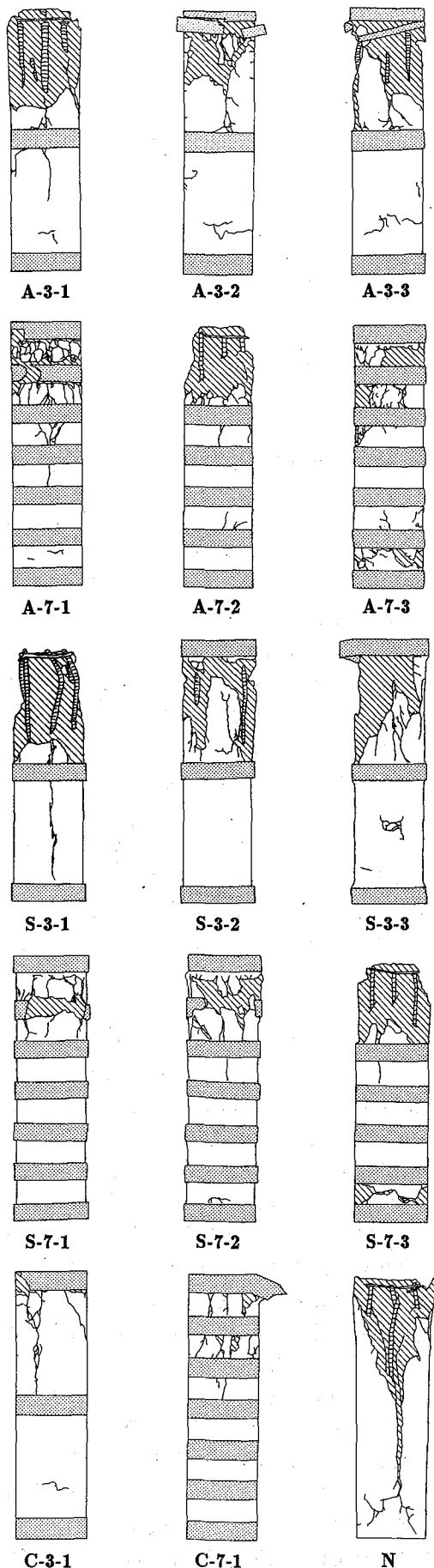


図-10 ひびわれ性状

が見受けられる。

鋼板補強の場合の損傷範囲は、上段から3段目までであるが、累積エネルギーの大きなS-7-3では、A-7-3と同様に柱底部に損傷が見受けられる。

炭素テープ補強の場合は、3段と同様に小さな累積エネルギーでテープ破断で破壊したため、柱頭部の損傷はさして顕著とはなっていない。

4. まとめ

各種巻き付け材料による軸衝撃力を受けるRC柱の補強効果を主として重錘衝撃力を基に検討した。用いた材料は鋼板とアラミドおよび炭素テープの3種類で、補強間隔や補強材厚などを変化させてこれらの影響もあわせて検討した。用いたRC柱の断面は 15×15 cmで、200 kgfの重錘の自由落下によって軸衝撃力を作用させた。本実験の範囲内で得られた結論を要約すると、

- (1) 重錘衝撃力と累積運動エネルギーをバランス良く向上させるためには、鋼板またはアラミドテープを密な間隔で厚く配置することが有効である。
- (2) 炭素テープ補強は少量で軸圧縮耐力を増加させるものの低累積エネルギー状態で破壊することがある。
- (3) 重錘がリバウンドしないものと仮定して求めた運動量変化と実験結果より得られた力積は良い精度で一致した。
- (4) 鋼板補強とFRP補強のメカニズムは異なる。これは補強材料の伸び特性の違いによると考えられる。
- (5) 鋼板接着とFRPテープ補強の効果（軸圧縮耐力の向上および累積運動エネルギーの増大）を概略推定できる実験式を提案した。

最後に本研究を行うにあたり、試験体の製作で御支援を頂いたショーポンド建設（株）北海道支店の関係各位に厚く御礼を申し上げます。また、論文作成にあたり、室蘭工業大学建設システム工学科大学院生の亀石暁君と吉川卓君に多大なる御協力を頂いた。ここに記して謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 佐藤昌志, 岸徳光, 三上浩, 西弘明: RC柱の耐衝撃性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.17, No.2, pp.369-374, 1995.
- 2) 三上浩, 岸徳光, 佐藤昌志, 田村富雄: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.935-940, 1995.

(1996年9月6日受付)