

(33) 新素材繊維巻き付け補強された RC 柱の軸衝撃載荷実験

AXIAL IMPACT TEST ON RC COLUMN WRAPPED WITH NEW MATERIAL FIBERS

岸 徳光*, 佐藤昌志**, 三上 浩***, 亀石 暁****

Norimitsu KISHI, Masashi SATO, Hiroshi MIKAMI and Akira KAMEISHI

* 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

** 工博 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室室長 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

*** 工博 三井建設(株)技術研究所 主任研究員 (〒270-0132 千葉県流山市駒木 518-1)

**** 工修 北海道開発コンサルタント(株) (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央 1-5)

キーワード: 新素材繊維、RC 柱、アラミド繊維、炭素繊維、軸衝撃

(new material fibers, RC column, Aramid fiber, Carbon fiber, axial impact)

1. はじめに

落石から道路および交通車両を防護する落石覆工は、一般に山岳急峻な地域や海岸地域などの景勝地で建設され、片側面には大きな開口部を有している。そのため、覆工頂版に作用した落石衝撃力の一部は開口部間の柱部に伝達され、柱部には衝撃的な曲げモーメントや軸圧縮力およびせん断力が作用することとなる。一般に、既存の落石覆工の柱部の帯鉄筋量は 0.1% 程度であり、上述した外力が衝撃的に作用する場合には、この値は十分な補強量とは言いがたいものと考えられる。これより、落石覆工をより安全性に優れた構造物にするためには、RC 柱部の耐衝撃性や補強工法についての、十分な検討が必要であるものと考えられる。

本研究は、橋脚や建物の耐震補強工法として実績のある新素材繊維巻き付け補強に着目し、軸衝撃力を受ける RC 柱模型に適用した場合の補強効果を定量的に検討したものである。新素材繊維には耐食性や施工性に優れ、軽量で高強度なアラミド繊維ならびに炭素繊維製のテープを用い、繊維材料の特性と補強効果の関係を比較検討した。また、繊維の巻き付け間隔や層数を変化させた実験を行い、補強効果に与える影響を検討した。さらに、RC 柱隅角部の面取り長さを変化させた実験を行い、その影響も合わせて検討している。なお、RC 柱への衝撃荷重

載荷は重錘の自由落下によって行った。本研究では、新素材繊維製テープ巻き付けによる RC 柱の耐衝撃性向上効果を示す指標として、RC 柱が破壊に至るまでの重錘の累積運動エネルギー、および最大重錘衝撃力に着目し、繊維材料の特性と補強量に対応した補強効果の評価式を提案している。

2. 実験の概要

表-1 に、本実験に用いた試験体の一覧を示す。試験体名の、A、C は繊維種別を示し、各々アラミド、炭素繊維製テープを用いたことを示す。第2項の -3, 5, 7 は巻き付け段数を示し、第3項の -1, 2, 3 は巻き付け層数を示す。なお、末尾の (30) は図-1 (b) に示すように隅角部の面取り長さが 30 mm であることを示し、その他の試験体の面取り長さはすべて 10 mm である。一般的に RC 柱の隅角部は 50mm 程度の面取り長さで角落しされていることが多い。本研究では、隅角部形状が実施工により近い面取り長さ 30 mm の場合についても実験を行った。

衝撃荷重載荷は、重量 200 kgf、直径 15 cm の鋼製重錘を所定の高さにセットし、柱頭部軸心のコンクリート面に直接自由落下させることにより行なっている。重錘の載荷速度(重錘が RC 柱に衝突する直前の速度)は $v=1$ m/sec から 1 m/sec 刻みで増加させる漸増繰り返し載荷とし、最大 $v=6.5$ m/sec ま

表-1 試験体一覧

試験体名	補強材料	巻き付け段数 (段)	巻き付け層数	面取り長 (mm)	載荷速度 (m/sec)	体積補強 割合(%)
A-3-1	アラミド テープ	3	1 層	10	1~6	0.15
A-5-1		5			1~6.5	0.24
A-7-1		7			1~6.5	0.35
A-3-2		3	2 層		1~6	0.30
A-5-2		5			1~6.5	0.49
A-7-2		7			1~6.5×3	0.71
A-3-3		3	3 層		1~6.5	0.45
A-5-3		5			1~6.5×2	0.73
A-7-3		7			1~6.5×10	1.06
C-3-1	炭素 テープ	3	1 層	1~5	0.09	
C-5-1		5		1~6	0.14	
C-7-1		7		1~6	0.20	
A-3-1(30)	アラミド テープ	3	1 層	30	1~6	0.15
A-5-1(30)		5			1~6	0.24
A-7-1(30)		7			1~6.5	0.35
C-3-1(30)	炭素 テープ	3			1~5	0.09
C-5-1(30)		5			1~6	0.14
C-7-1(30)		7			1~6	0.20
N	無補強	-	-	10	1~5	-

表-2 コンクリートの力学的特性

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

表-3 FRP テープの力学的特性

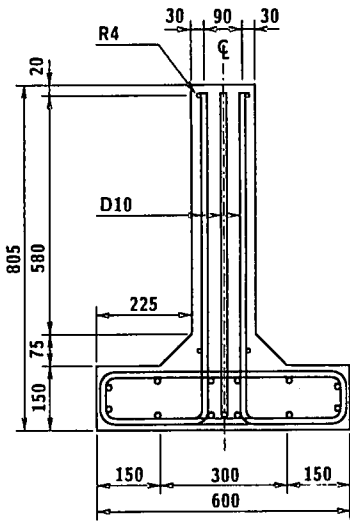
FRP テープ	目付け量 (g/m ²)	幅 (mm)	厚さ (mm)	弾性係数 (kg/cm ²)	引張強度 (kg/cm ²)	引張剛性 E・A (tf)	引張耐力 P _u (tf)
アラミドテープ	425	37.5	0.293	1.29×10 ⁶	25,300	141.7	2.8
炭素テープ	300		0.167	2.35×10 ⁶	41,500	147.2	2.6

で行った。なお、v=6.5 m/sec 載荷時点で破壊しない場合には同載荷速度で繰り返し載荷を行った。

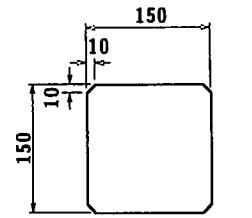
表-2、3にコンクリートおよびFRP テープの力学的特性を示す。なお、テープの弾性係数および引張強度はFRP化(樹脂を含浸硬化させること)したテープ(FRP テープ)で引張試験を行い、試験結果を繊維のみの断面積で評価した値である。弾性係数および引張強度は引張試験の平均値である。なお、37.5 mm 幅テープの断面積に弾性係数を乗じた引張剛性 E・A および引張耐力 P_u はアラミドテープと炭素テープでほぼ同等である。

図-1に本実験に用いた試験体の概要を示す。補強筋は軸方向筋にD10を8本用い、補強筋比は実覆工のRC柱と同程度の約2.5%としている。また、帯鉄筋は柱頭部と下部の2ヶ所のみ配筋し、新素材繊維製テープ巻き付けによる補強効果を検討できるようにしている。FRP テープの巻き付けは、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、これにエポキシ樹脂を含浸硬化させて成形している。

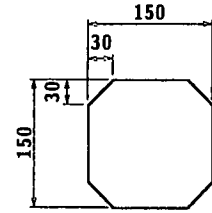
本実験では、重錘に内蔵したひずみゲージ式の衝撃荷重測定用ロードセルによって重錘衝撃力を計測



(a) 試験体の形状寸法と配筋

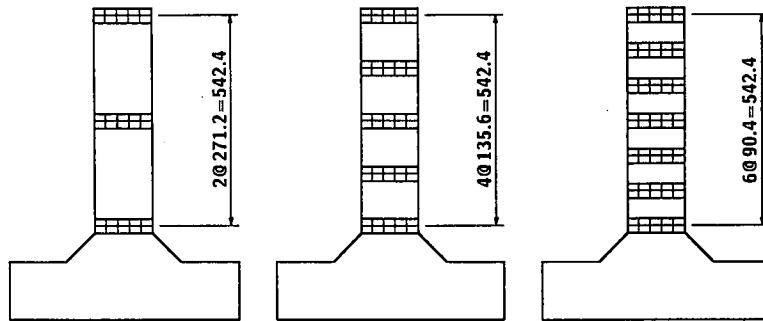


面取り 10 mm



面取り 30 mm

(b) 面取り状況



3段

5段

7段

(mm)

(c) 補強の概要

図-1 試験体の概要

した。なお、重錘衝撃力は衝撃現象が相互作用であるため軸衝撃荷重下における圧縮耐力を示す指標と考えられる。また、破壊に至るまでの重錘の累積運動エネルギー ($\Sigma 1/2 \cdot mv^2$, m : 重錘質量, v : 載荷速度) は試験体の破壊しにくさを示し、いわば軸衝撃荷重下の圧縮靱性を示す指標と考えられる。

3. 実験結果および考察

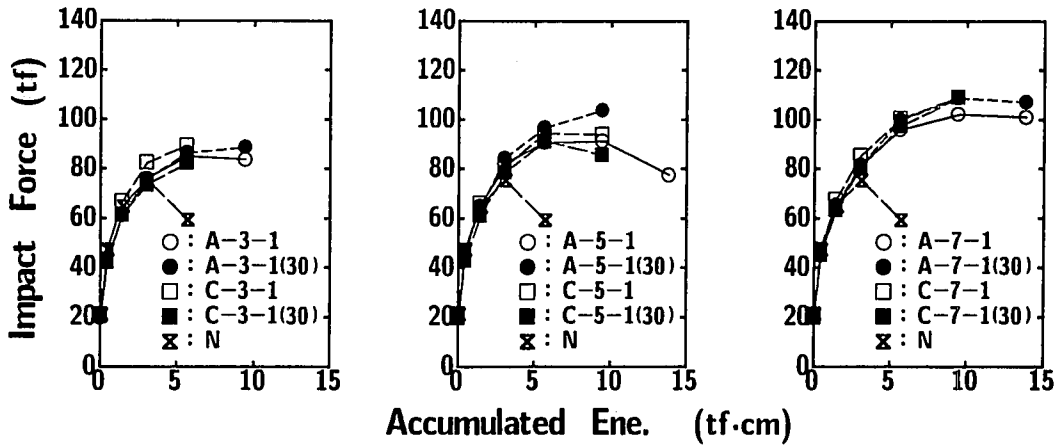
3.1 重錘衝撃力と累積運動エネルギー

図-2に重錘衝撃力(以後、衝撃力)と累積運動エネルギー(以後、エネルギー)の関係を示す。なお、本実験では試験体の破壊を繊維の破断として定義したが、A-7-3は最大載荷速度で10回の繰り返し載荷を行ったものの繊維の破断が生じなかったため、その時点で実験を終了している。

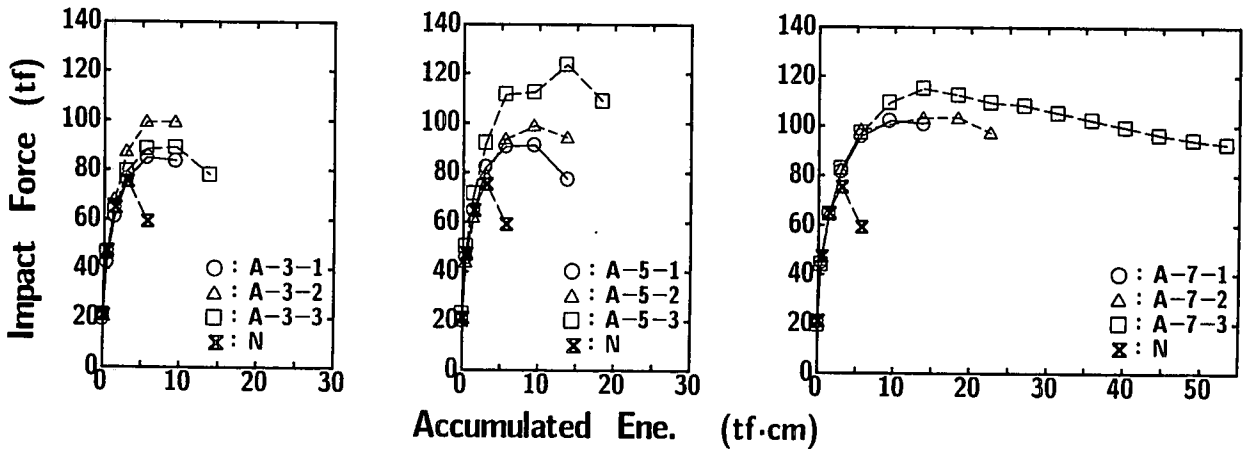
図-2(a)は、各段1層における衝撃力とエネルギーの関係を、繊維種別と面取り長さに着目して整理したものである。無補強の試験体はエネルギーが3.1 tf·cmで最大衝撃力75.3 tfを示し、その後エネ

ギーが5.7 tf·cmに増加したときに衝撃力が60 tf程度に低下して破壊に至っている。一方、3段補強を行ったA-3およびC-3試験体は5.7 tf·cmもしくは9.5 tf·cmのエネルギーで最大衝撃力を示している。すなわち、新素材繊維巻き付け補強を行うことで、最大衝撃力に対応するエネルギーが大きくなり、また、その時の最大衝撃力値も向上していることがわかる。なお、繊維種別や面取り長さに関わらず衝撃力とエネルギーのなす傾向には大差がないが、最大エネルギーはAタイプの方が大きくなっている。5段補強の場合も、最大衝撃力値に対応するエネルギーは5.7 tf·cmもしくは9.5 tf·cmである。7段補強の場合には、いずれの試験体も9.5 tf·cm時に最大衝撃力を示している。7段補強の最大衝撃力は3段、5段補強に比べて全般的に大きな値となっている。また、7段補強において最大衝撃力を示した後のエネルギー増加による衝撃力の低下は少なく、ほぼ一定値を示している。

以上、1層補強の結果を要約すると、補強段数(



(a) 1層補強



(b) 段数および層数比較

図-2 重錘衝撃力と累積運動エネルギーの関係

体積補強割合)の増加にともなって最大衝撃力発生時のエネルギーが大きくなり、かつ、最大衝撃力値および最大エネルギーも全般的に大きくなっている。繊維種別が衝撃力とエネルギーの関係に与える影響は顕著ではないが、破壊に至るまでのエネルギーは全般的にAタイプがCタイプよりも大きい。また、繊維種別に関わらず面取り長さの上記関係に与える影響は顕著ではない。

図-2 (b)に、Aタイプの重錘衝撃力と累積運動エネルギーの関係を補強段数および層数に着目して整理した。3段補強の場合、衝撃力は2層で最も大きく、エネルギーは3層で最も大きい。一方、5段補強の場合、層数の増加にともない衝撃力は大きくなり、エネルギーも3層補強で最大となっている。7段補強の場合、衝撃力は、1層、2層で同程度であるが、3層ではこれらより10%程度大きな値となっている。また、エネルギーは層数が多くなるほど大きくなっており、特に3層補強でのエネルギー

増加は極めて顕著である。なお、3層補強における衝撃力はエネルギーが13.9 tf-cm時に最大となり、その後エネルギーの増加とともに緩やかに減少している。これは、柱頭部のコンクリートが徐々に損傷していることを示すものである。3段、5段の3層補強では、衝撃力が最大値を示した後に急激に低下しているのに対して、7段の場合には極めて緩やかであることから、密な間隔で層数を多くすることで安定した高い圧縮靱性が得られることがわかる。なお、3段補強における衝撃力は、層数(体積補強割合)が大きな試験体で必ずしも大きく示されていない。これは、3段補強の場合には、5、7段補強と比較して巻き付け間隔が広いことため補強効果にばらつきが生じやすくなったためと考えられる。

3.2 最大衝撃力と最大累積運動エネルギー

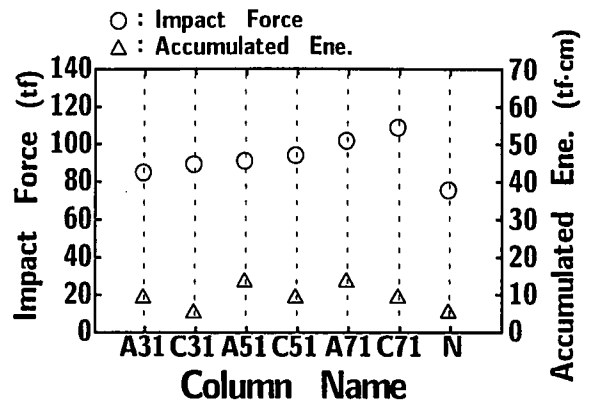
図-3に各試験体の最大重錘衝撃力と最大累積運動エネルギー(以後、最大エネルギー)を示す。(a)、(b)は各々面取り長さが10、30mmで1層補強の場

合について、繊維材料の種別に着目して整理したものである。面取り長さが 10 mm の場合、最大衝撃力は各段数ともに C タイプの方が A タイプよりも若干大きい、その差は最大で 7% 程度と小さい。一方、最大エネルギーは各段数ともに A タイプの方が C タイプよりも 50% 程度大きい。なお、C-3-1 は無補強と比較して最大衝撃力が 20% 程度大きくなったものの、最大エネルギーは無補強と同程度であった。

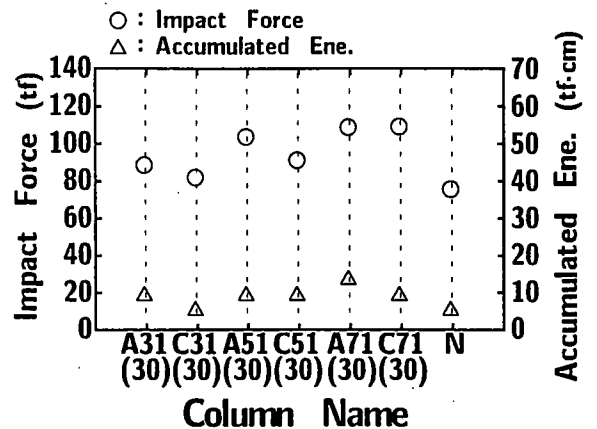
面取り長さが 30 mm の場合、A タイプの 3 段、5 段補強における最大衝撃力は C タイプよりも若干大きく示されている。しかしながら、その差は最大で 13% 程度であり、この場合も A、C タイプで顕著な差は生じていない。最大エネルギーは面取り長さが 10 mm の場合と同様に、A タイプが C タイプと同程度もしくは A タイプの方が 50% 程度大きくなっている。なお、最大衝撃力は繊維種別と面取り長さに関わらず全般的に補強段数の大きな試験体で大きな値を示している。また、最大エネルギーも段数の増加にともない大きくなる傾向にあるが、その差は、衝撃力ほど顕著ではない。

このように A、C タイプの最大衝撃力がほぼ同程度であるという結果は、FRP テープの引張剛性が同程度であることに関連しているものと考えられる。一方、面取り長さに関わらず C タイプの最大エネルギーが A タイプよりも小さく示されているのは、C タイプが隅角部でテープ破断して破壊しやすいためである。本実験の範囲では、繊維種別に関わらず面取り長さは最大衝撃力や最大エネルギーに顕著な影響を与えていない。これは、折角が新素材繊維製テープの隅角部破断に影響を与えることを示唆するものであり、本研究のように試験体の折角 (135°) が等しい場合には面取り長さの影響が小さくなるものと判断される。

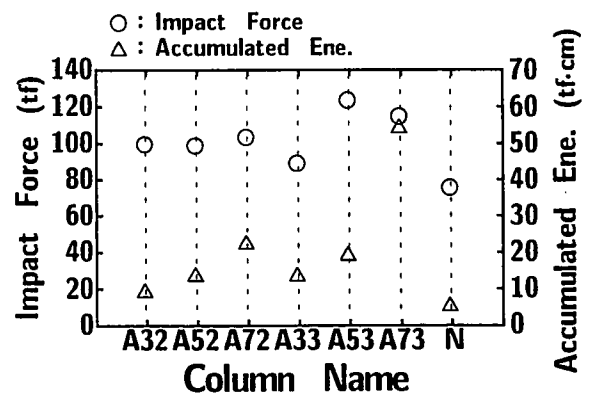
図-3 (c) に A タイプの 2 層、3 層補強における最大衝撃力と最大累積運動エネルギーを示す。A-3-3 が A-3-2 よりも最大衝撃力が小さく、A-5-3 が A-7-3 よりも大きいなど、必ずしも体積補強割合と最大衝撃力が対応していない。一方、最大エネルギーは補強段数が多くなるほど、また同じ段数では層数が多くなるほど、明瞭に大きくなっている。これは、テープを密な間隔で多層数巻き付けることによって繊維が破断しにくくなることに対応するものと考えられる。



(a)



(b)

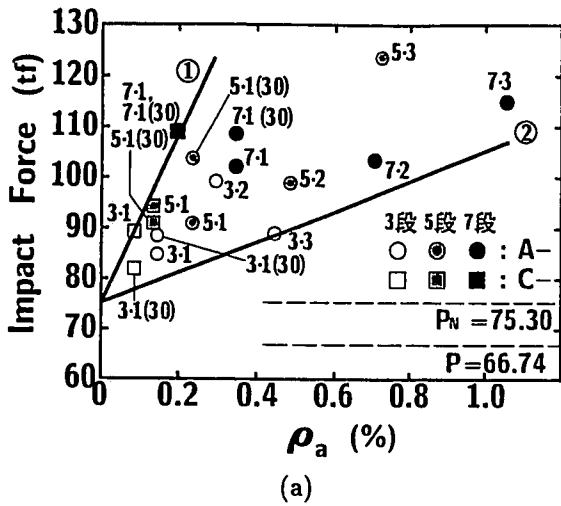


(c)

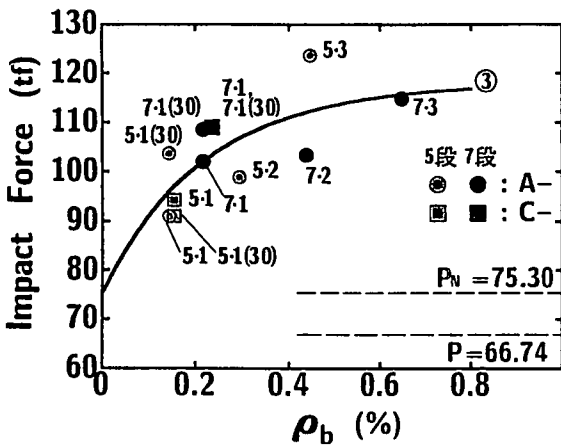
図-3 最大重錘衝撃力と最大累積運動エネルギー

3.3 体積補強割合と最大重錘衝撃力および最大累積運動エネルギー

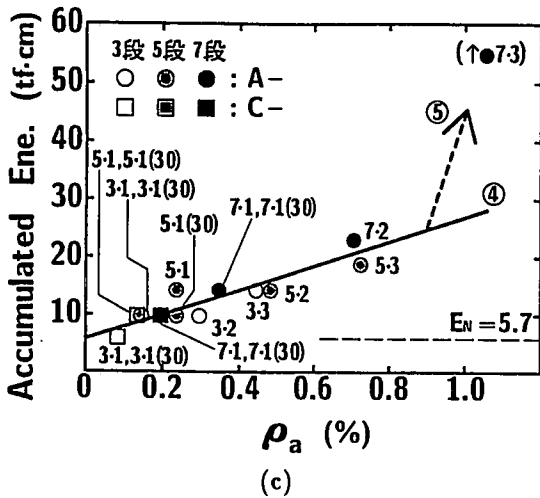
新素材繊維巻き付けによる補強効果は、体積補強割合と密接に関連すると考えられる。図-4 に補強繊維の体積補強割合と最大衝撃力および最大累積運動エネルギーの関係を整理した。なお、図中の P_N は無補強試験体の実験値を示し、 P はコンクリートの圧縮強度を基に計算した静的耐力を示す。両者の関係から、衝撃および静的圧縮耐力には 13% 程度の差があることがわかる。図-4 (a) より、体積補



(a)



(b)



(c)

図-4 体積補強割合と最大重錘衝撃力
および最大累積運動エネルギー

強割合 ρ_a と最大衝撃力 P_D の関係にはばらつきが大きいものの、上限値 $P_{D,ub}$ 、下限値 $P_{D,lb}$ を示す関係として (1)、(2) 式が得られる。

$$P_{D,ub} = 167.50 \rho_a + 75.3 \text{ (tf)} \quad \dots (1)$$

$$P_{D,lb} = 30.00 \rho_a + 75.3 \text{ (tf)} \quad \dots (2)$$

ここで、上限値は C タイプの実験結果に対応しており、C タイプでは小さな ρ_a で重錘衝撃力が大きくなることを反映している。一方、下限値は A タイプの 3 段 3 層、および 7 段補強の 2 層、3 層巻き付けのように比較的 ρ_a が大きい試験体において衝撃力が顕著に増加していないことを反映している。これは、3 段補強では衝撃力にばらつきが生じやすいことや、 ρ_a が大きくなっても衝突面のコンクリートが損傷するため衝撃力が増加しにくくなることに対応すると考えられる。そこで、図-4 (b) にばらつきが大きい 3 段補強の結果を除き、アラミドと炭素繊維の弾性係数の違いを鋼材との弾性係数比を用いて考慮した換算体積補強割合 ρ_b を用いて結果を整理した。図より、最大重錘衝撃力 P_D と ρ_b の関係は未だばらつきが大きいものの概ね (3) 式で与えられる。

$$P_D = 42.688 \times (1 - e^{-4.5603 \times \rho_b}) + 75.3 \text{ (tf)} \quad \dots (3)$$

図-4 (c) に体積補強割合 ρ_a と最大累積運動エネルギー E_{max} の関係を示す。テープが破断しない A-7-3 を除き、概ね (4) 式で上記の関係を近似できる。

$$E_{max} = 21.33 \rho_a + 5.7 \text{ (tf·cm)} \quad \dots (4)$$

なお、 ρ_a がある程度以上大きくなると繊維の破断による破壊が生じにくくなるため、図中の⑤のようにエネルギーが大幅に増加するものと考えられる。

4. まとめ

重錘落下衝撃荷重を受ける RC 柱の新素材繊維巻き付けによる補強効果を繊維種別と補強間隔および層数ならびに面取り長さに着目して検討した。本実験で得られた結論を要約すると、

- (1) 新素材繊維を密な間隔で多層数巻き付けることで、より安定した高い補強効果が期待でき、これは面取り長さには影響されない。
- (2) 新素材繊維巻き付けによる最大重錘衝撃力 (重錘荷重下における圧縮耐力を示す指標) の向上効果は、ばらつきが大きいものの (3) 式で概ね評価できる。
- (3) 重錘の累積運動エネルギー (重錘荷重下における圧縮靱性を示す指標) は、繊維の体積補強割合に比例して線形的に向上する。