



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



## 軸衝撃荷重下におけるFRPテープ補強RC柱の横拘束効果

メタデータ	言語: jpn 出版者: 日本コンクリート工学会 公開日: 2012-07-18 キーワード (Ja): 軸衝撃, FRPテープ, 横拘束効果, アラミド繊維, 炭素繊維 キーワード (En): 作成者: 三上, 浩, 岸, 徳光, 小山田, 欣裕, 谷本, 俊充 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/1456">http://hdl.handle.net/10258/1456</a>

## 論文 軸衝撃荷重下における FRP テープ補強 RC 柱の横拘束効果

三上 浩<sup>\*1</sup>・岸 徳光<sup>\*2</sup>・小山田 欣裕<sup>\*3</sup>・谷本 俊充<sup>\*4</sup>

要旨：落石覆道の RC 柱を簡便に耐衝撃補強する方法として FRP テープ巻き付け工法に着目し、軸衝撃荷重下における FRP テープの横拘束効果を実験的に検討した。実験には、アラミド及び炭素繊維製テープを用い、補強材料及び間隔、層数ならびに RC 柱隅角部の面取り長さが横拘束効果に与える影響を比較検討した。最後に、実験結果を基に、FRP テープの軸衝撃荷重下における横拘束効果評価式を提案した。

キーワード：軸衝撃、FRP テープ、横拘束効果、アラミド繊維、炭素繊維

## 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道は、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、覆道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及びせん断力が組合わさって作用することとなる。一方で、既存の落石覆道の柱部の帯鉄筋量は一般的に 0.1 % 程度であり、上述した外力が衝撃的に作用することを考えると、必ずしも十分とは言いがたいものと考えられる。これより、落石覆道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の検討が重要であると考えられる。

本研究は、橋脚や建物の耐震補強工法として実績のある FRP テープ巻き付け工法を軸衝撃力を受ける RC 柱模型に適用した際の横拘束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、繊維材料の特性と横拘束効果の関係を比較検討した。また、FRP テープの巻き付け層数と間隔を変化させた実験を行い、各々が横拘束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 柱への衝撃荷重の載荷は重錘の自由落下によって行った。本研究では、RC 柱の耐衝撃性向上効果（横拘束効果）を示す指標として最大重錘衝撃力と RC 柱が破壊に至るまでの重錘の累積運動エネルギーに着目し、繊維材料の特性と補強量に対応した横拘束効果の評価式を提案している。

## 2. 実験の概要

実験に用いた試験体は表—1 に示す 19 体である。試験体名のうち、A, C, は繊維種別を示し、各々アラミド、炭素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 50 mm 程度の面取り長さで角落しされていること

\*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 北海道道路管理技術センター 常任参与，工修

\*4 北海道開発局開発土木研究所研究員 構造研究室（正会員）

が多い。本研究では、実施工により近づけるため面取り長さ 30 mm の場合についても実験を行った。

衝撃荷重の載荷は試験体を確実に破壊させるために漸増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  $v = 1 \text{ m/sec}$  から  $1 \text{ m/sec}$  刻みで最大  $v = 6.5 \text{ m/sec}$  まで行った。なお、 $v = 6.5 \text{ m/sec}$  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。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。

コンクリート及び FRP テープの力学的特性を表-2, 3 に示す。なお、テープの弾性係数及び引張強度は 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。弾性係数及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  $E \cdot A$  及び引張耐力  $P_u$  はアラミドテープと炭素テープではほぼ同等である。

図-1 に試験体の概要を示す。補強筋は軸方向筋が D10（8 本）で補強筋比は実覆道の RC 柱と同程度の約 2.5%，帯鉄筋は柱頭部と下部の 2 ヶ所だけに配筋し、FRP テープの横拘束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に開発したロードセルによって重錘衝撃力を計測した。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。

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層	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 <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比 $\nu$
46~102日	254 ~ 343 (平均 296)	$1.87 \times 10^5 \sim 2.31 \times 10^5$ (平均 $2.15 \times 10^5$ )	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 <sup>2</sup> )	幅 (mm)	厚さ (mm)	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張剛性 $E \cdot A$ (tf)	引張耐力 $P_u$ (tf)
アラミドテープ	425	37.5	0.293	$1.29 \times 10^6$	25,300	141.7	2.8
炭素テープ	300		0.167	$2.35 \times 10^6$	41,500	147.2	2.6

### 3. 実験結果及び考察

#### 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 FRP テープの破断として定義したが、A-7-3 は最大載荷速度で 10 回の繰り返しを行ったものの破壊しなかったため実験を終了している。

図-2 (a) は、各段 1 層補強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、その後エネルギーが 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している。一方、A-3 及び 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、FRP テープ補強することで衝

撃力が最大となるエネルギーが大きくなっている。また、そのときの最大衝撃力値も大きいことがわかる。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 タイプの方が大きい。5 段補強の場合もエネルギーが 5.7 tf·cm もしくは 9.5 tf·cm で衝撃力は最大値を示している。7 段補強の場合には 9.5 tf·cm でいずれの試験体も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い。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。

1 層補強の結果を要約すると、補強段数（体積補強割合）が大きくなるにしたがい衝撃力が

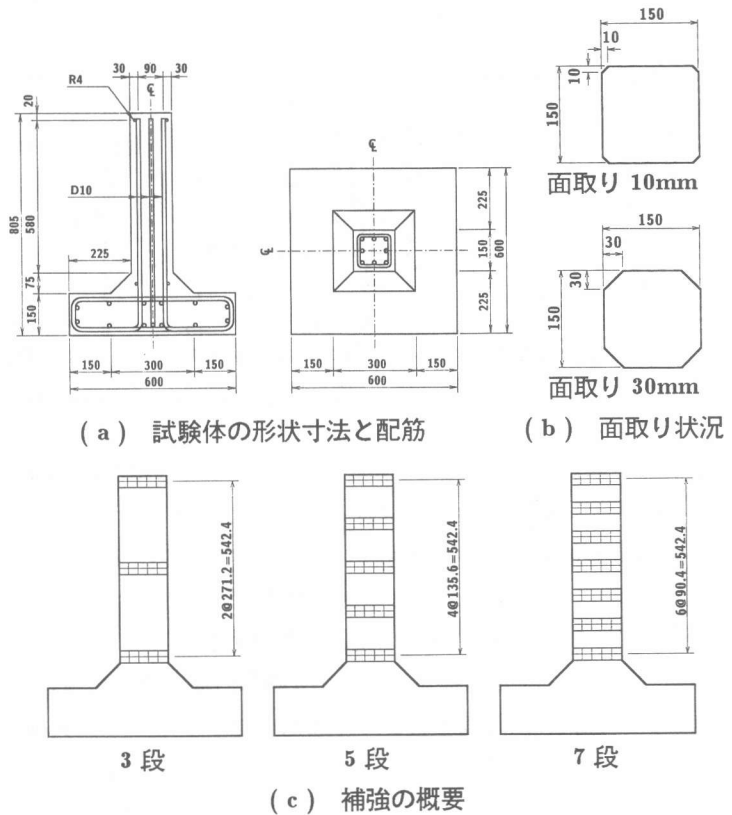


図-1 試験体の概要 (mm)

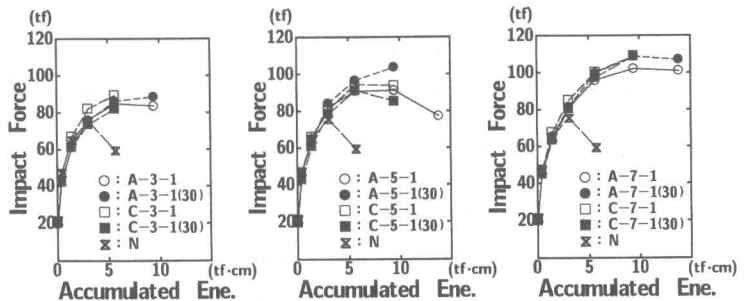


図-2 (a) 重錘衝撃力と累積運動エネルギーの関係

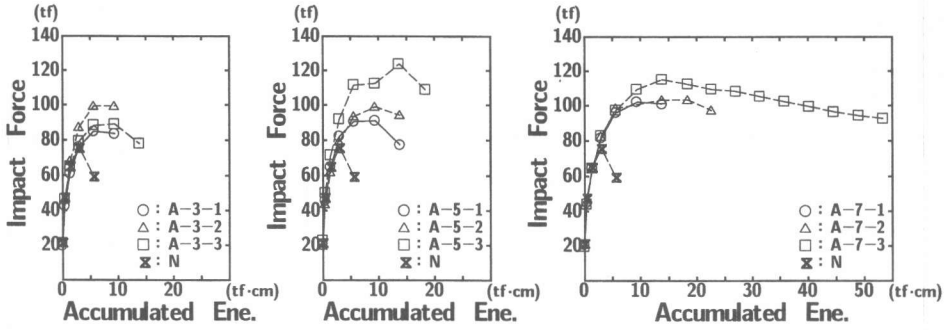


図-2 (b) 重錘衝撃力と累積運動エネルギーの関係

最大となるエネルギーが大きくなり、かつ、最大衝撃力値及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及び層数に着目して整理した。3 段補強の場合は、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 段補強の場合は、層数が多くなるほど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 段補強の場合は、1 層、2 層で衝撃力は同程度であるが、3 層ではこれらより 10 % 程度大きい。また、エネルギーは層数が多くなる程大きくなっており、特に 3 層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 で最大となり、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 段で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 段補強において層数（体積補強割合）が大きな試験体で衝撃力が必ずしも大きくないのは、3 段では巻き付け間隔が広すぎるため横拘束効果にばらつきが生じやすいためと考えられる。

### 3.2 最大重錘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, 30 mm 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 は補強によって最大衝撃力が 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い。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段数が大きくなるほど大きい。また、最大エネルギーも段数が大きくなるほど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、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 タイプよりも小さいのは、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 FRP 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、FRP テープを密な間隔で多層数巻き付けることによってテープが破断しにくくなることに対応するものと考えられる。

### 3.3 体積補強割合と最大重錘衝撃力及び最大累積運動エネルギー

FRP テープによる横拘束効果は、体積補強割合と密接に関連すると考えられる。図-4 に FRP テープの体積補強割合と最大重錘衝撃力及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、衝撃及び静的圧縮耐力には 13% 程度の差があることが分かる。図-4(a) より、体積補強割合  $\rho_a$  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。

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

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

ここで、上限値は C タイプの試験結果に対応し、C タイプでは小さな  $\rho_a$  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 3 段補強、及び 7 段補強の 2 層, 3 層巻き付けのように比較的  $\rho_a$  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。

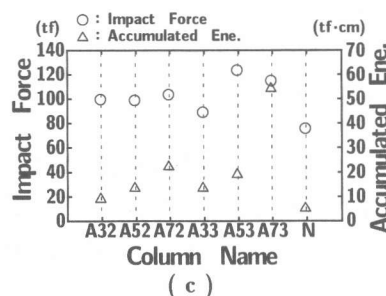
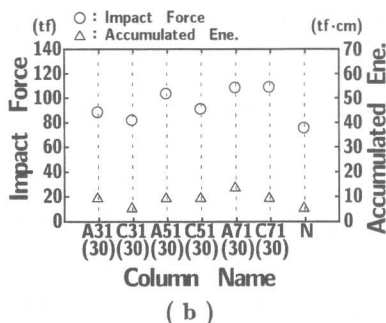
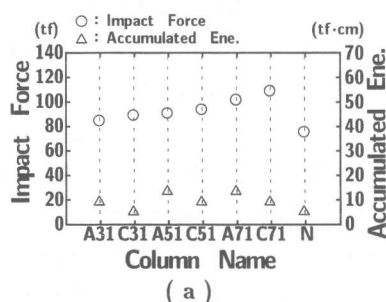


図-3 最大重錘衝撃力と最大累積運動エネルギー

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  $\rho_a$  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、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  $\rho_b$  を用いて結果を再整理した。図-4 (b) に示すように、最大重錘衝撃力  $P_D$  と  $\rho_b$  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。

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

一方、図-4 (c) に体積補強割合  $\rho_a$  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。

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

なお、 $\rho_a$  がある程度以上大きくなるとテープ破断で破壊しにくくなるため、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

軸衝撃荷重下における FRP テープの横拘束効果を繊維種別と補強間隔及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) FRP テープを密な間隔で多層数巻き付けることで、より安定した高い横拘束効果が期待でき、これは面取り長さに顕著には影響されない。
- (2) FRP テープの巻き付けによる最大重錘衝撃力 ( 衝撃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 ( 衝撃荷重下における圧縮靱性を示す指標 ) は、FRP テープの体積補強割合に比例して線形的に向上する。

謝辞：本実験を行うにあたり、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支援を頂きました。また、試験体の製作ではショーボンド建設 (株) 北海道支店の皆様に多大なる御支援を頂きました。ここに記して謝意を表すものであります。

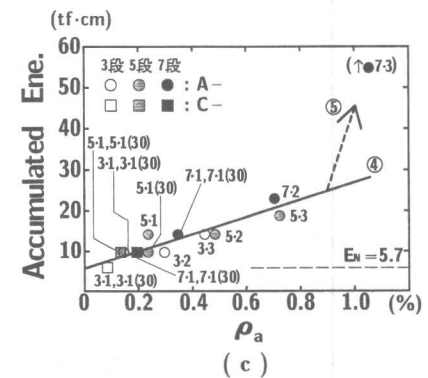
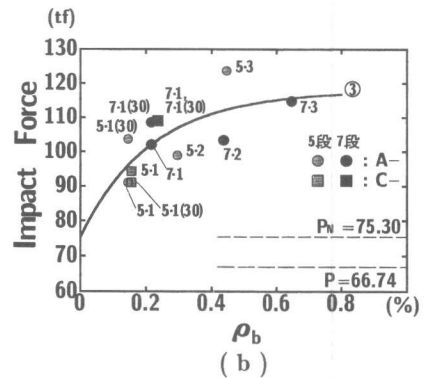
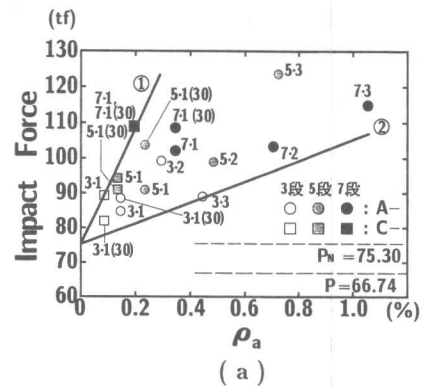


図-4 体積補強割合と最大重錘衝撃力及び最大累積運動エネルギー