

断面形状の違いがせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性に及ぼす影響

Effects of aspect ratio on impact resistant capacity of shear failure type rectangular RC beams

室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光	(Norimitsu Kishi)
防衛庁第4研究所	正員	安藤 智啓	(Tomohiro Ando)
三井住友建設(株)	フェロー	三上 浩	(Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学	フェロー	松岡 健一	(Ken-ichi Matsuoka)
室蘭工業大学	○学生員	安藤 宏	(Hiroshi Ando)

1. はじめに

著者らは、RC 梁の衝撃せん断耐力に対する合理的な設計手法を確立することを目的として、静載荷時にせん断破壊が卓越する(以後、せん断破壊型) RC 梁の耐衝撃性状に関する実験的・解析的研究を継続して行っている。その結果、主鉄筋比、せん断スパン比、コンクリート強度および載荷方法(単一載荷と繰り返し載荷)の耐衝撃性状への影響が、明らかとなっている¹⁾。

しかしながら、静的せん断耐力が同程度の場合における軸方向鉄筋や断面寸法(以後、アスペクト比)による影響が明らかになっていないことより、曲げ破壊型 RC 梁の場合と同様の耐力やエネルギー収支関係に基づいた耐衝撃設計手法を確立するには至っていない。

このような観点より、本研究ではせん断破壊型 RC 梁の断面形状が衝撃耐力に与える影響を検討することを目的として、主鉄筋比および静的せん断耐力を設計的にほぼ同程度とした3種類の RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を実施し、その影響について検討を試みた。

2. 実験概要

2.1 RC 梁の形状寸法および実験方法

図-1には、本実験に用いた RC 梁の断面寸法および配筋状況を示している。RC 梁の断面寸法(梁幅×梁高)は、200×310 mm(AT, AD 試験体)と230×260 mm(BT 試験体)である。軸方向鉄筋には、AT, BT 試験体の場合は

上下端鉄筋に D22 を3本ずつ、AD 試験体の場合には上下端鉄筋に D29 を2本ずつ配置している。純スパン長はいずれの梁も2 mである。これら3種類の RC 梁は、主鉄筋比および静的せん断耐力が大略等しくなるように断面設計されている(表-1参照)。

実験は RC 梁をリバウンド防止用治具付の支点治具上に設置し、スパン中央部に重錘を落下させることにより行っている。支点治具全体は、RC 梁の回転のみを許容するピン支持に近い構造となっている。実験方法は、重錘を所定の高さから一度だけ自由落下させる単一載荷である。用いた重錘は、質量が300 kg、載荷点部の直径が150 mmの円柱状鋼製重錘である。重錘底部には、衝突時の片当たりを防止するために、曲率半径が1,407 mmで高さが2 mmの球面状となっている。測定項目は、重錘衝撃力 P 、合支点反力 R (以後、支点反力)および載荷点変位 δ (以後、変位)の各応答波形である。また、実験終了後には梁側面に生じたひび割れを記録している。

2.2 RC 梁の静的設計値

表-1には、各試験体の静的設計値および実験時の重錘の衝突速度を一覧にして示している。表中、試験体名は、断面形状(A, B)および主鉄筋の配筋本数(T: D22×3本, D: D29×2本)を示している。設計値の静的せん断耐力 V_{usc} および静的曲げ耐力 P_{usc} は、コンクリート標準示方書²⁾に基づき算定している。各試験体は、せん断余裕度 $\alpha (= V_{usc} / P_{usc}) < 1.0$ であることより、静載荷時に設

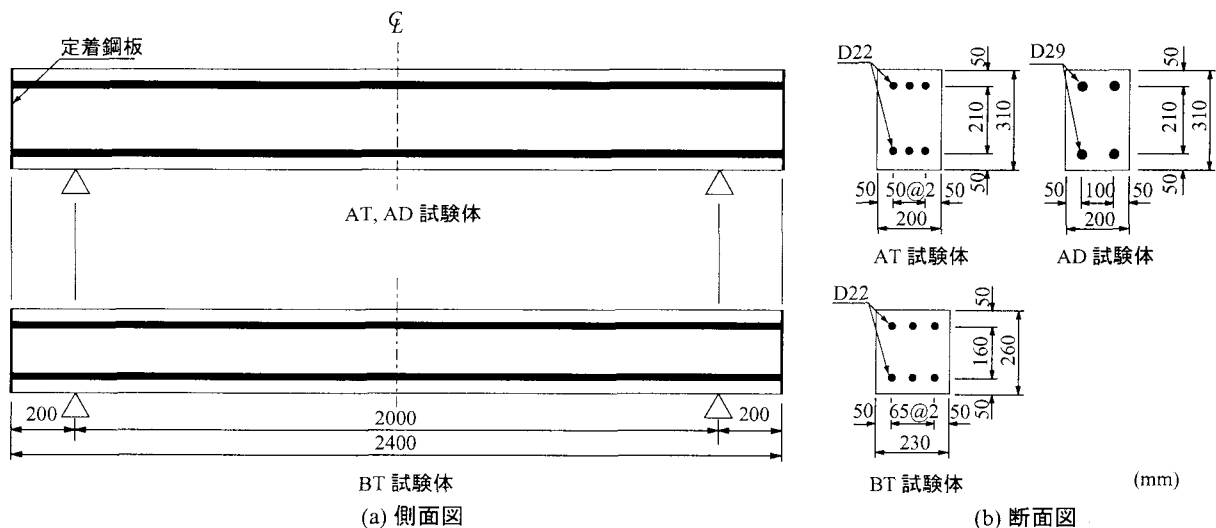


図-1 RC 梁の形状寸法および配筋状況

表-1 試験体の一覧

試験体名	主鉄筋比 ρ_l	せん断 スパン比 a/d	静的 せん断耐力 V_{usc} (kN)	静的 曲げ耐力 P_{usc} (kN)	せん断 余裕度 α	実測静的 耐力 P_{us} (kN)	実せん断 余裕度 α'	衝突速度 V (m/s)
AT	0.022	3.85	123.6	206.0	0.60	137.0	0.66	4, 4.25, 4.5, 4.75
AD	0.025	3.85	124.2	226.7	0.55	116.9	0.52	4, 4.5, 4.75, 5
BT	0.024	4.73	127.9	162.8	0.79	118.3	0.73	4, 4.25, 4.5, 4.75

表-2 コンクリートの力学的特性値

材令 (日)	圧縮強度 f'_c (MPa)	引張強度 f_t (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)	ポアソン比 ν_c
21	34.2	2.52	24.4	0.22

表-3 鉄筋の力学的特性値

鉄筋 名称	材質	降伏強度 σ_y (MPa)	引張強度 σ_t (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
D22	SD345	391	590	206	0.3
D29		391	599		

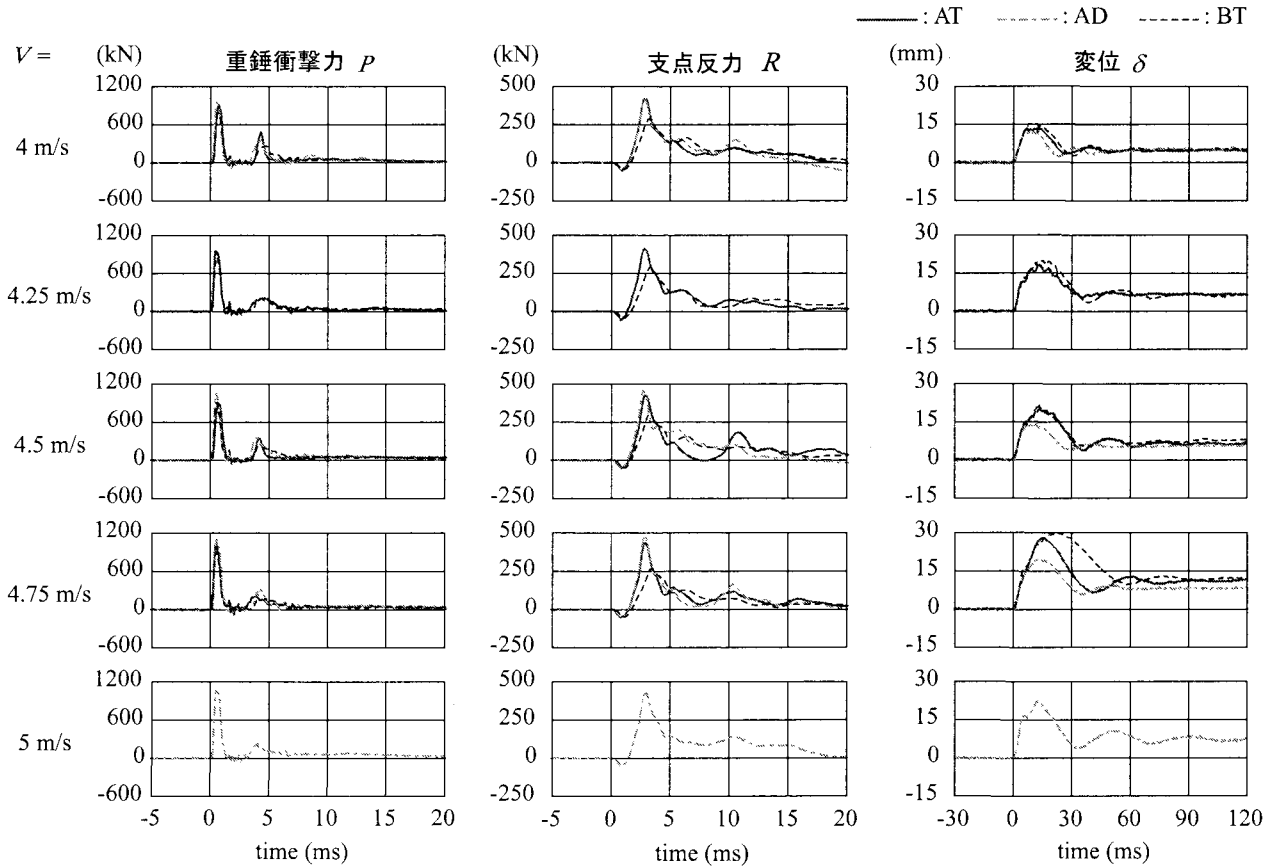


図-2 重錘衝撃力、支点反力および変位に関する応答波形

計的にはせん断型で破壊することが想定される。また、表中には別途実施した静載荷実験より得られた実測静的耐力 P_{us} 、および P_{us} を P_{usc} で除して算定した実せん断余裕度 α' も合わせて示している。なお、衝突速度 V は、RC 梁の弾塑性域から終局状態に至るまでの耐衝撃性状を比較するため、過去の実験結果を踏まえて $V=4\sim 5$ m/s の範囲で設定している。試験体数は、衝突速度欄に示した衝突速度に対応した全 12 体である。また、表-2、表-3 には、実験時のコンクリートおよび鉄筋の力学的特性値を示している。

3. 実験結果および考察

3.1 各種応答波形

図-2 には、各 RC 梁の重錘衝撃力 P 、支点反力 R および変位 δ に関する各種応答波形を衝突速度 V ごとに

示している。図中、各波形は重錘衝突時を 0 ms として整理している。

まず、重錘衝撃力波形 P について見ると、各試験体の波形形状は衝突速度 V にかかわらず、良く一致していることが分かる。すなわち、衝撃初期に継続時間が 1.5 ms 程度の正弦半波(第 1 波)と後続の継続時間の比較的長い正弦半波(第 2 波)から構成されている。また、波形全体の継続時間は衝突速度 V の増加に伴い増大していることがわかる。

次に、支点反力波形 R について見ると、試験体ごとに波動の立ち上がり勾配および最大応答値の差異は見られるものの、最大値以降の波動の減少勾配や継続時間には大きな差異が見られない。すなわち、継続時間が 10 ms 程度の三角形波と継続時間が比較的長く振幅の小さい波形成分が連なった分布性状を示しており、いずれの試験

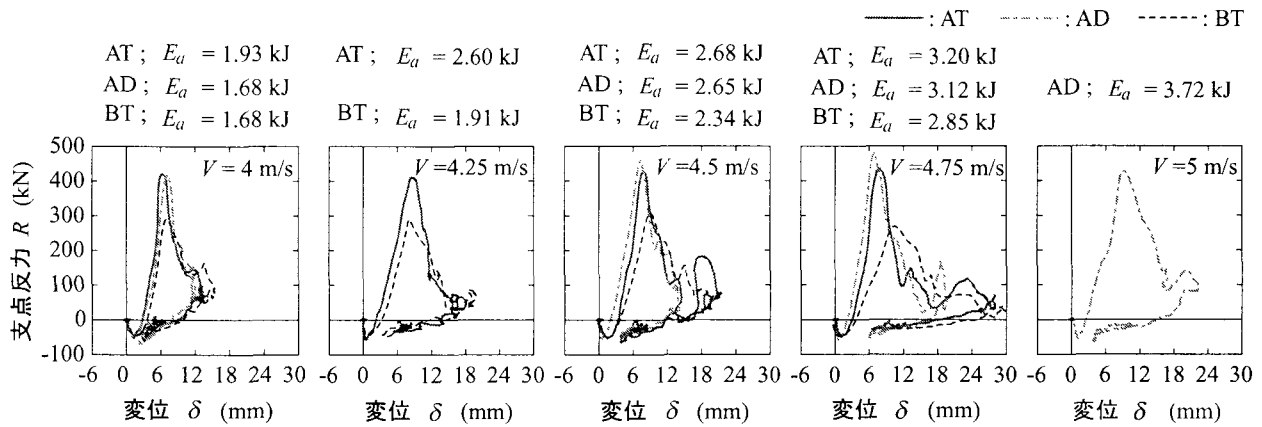


図-3 R- δ 履歴曲線

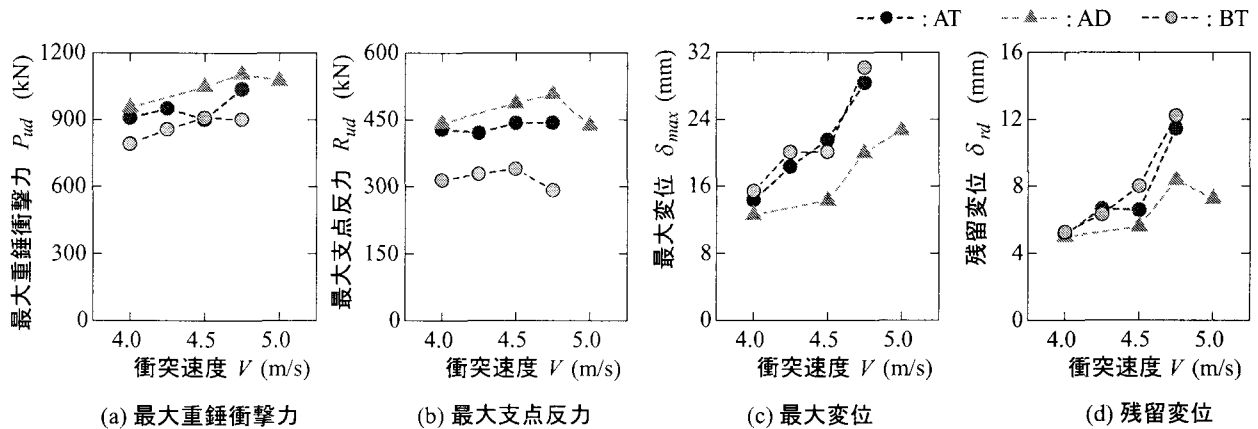


図-4 各種応答値

体においても、類似した波形性状を呈している。AT, AD 試験体と BT 試験体で初期勾配および最大応答値に差異が生じているが、これは、後述のように曲げ剛性の影響によるものと考えられる。

変位波形 δ は試験体の載荷速度にかかわらず、各試験体とも正弦波状の分布を示している。また、衝突速度 V の増加とともに最大変位および継続時間が増大し、塑性化が進行していることが分かる。詳細に見ると、 $V=4$ m/s では、各試験体ともにほぼ同様の波形性状を呈している。 $V=4.5$ m/s では試験体によって振幅に変化が見られる。これは、試験体の損傷度に差異が現れたことによるものと考えられる。 $V=4.75$ m/s の場合には、AT, AD 試験体の波動に比較して BT 試験体の周期が長く示されている。これは BT 試験体で塑性化が大きく進展したことによるものと推察される。

3.2 支点反力-変位履歴曲線

図-3には、各試験体の支点反力-変位履歴曲線 ($R-\delta$ 曲線) を衝突速度 V 毎に示している。なお、図の上方には $R-\delta$ 曲線のループで囲まれる面積で評価される吸収エネルギー量 E_a の値も合わせて示している。

図より、 $V=4$ m/s では、支点反力 R は変位 δ の増加とともに最大値まで単調に増大し、その後最大変位値に達した後、初期剛性とほぼ同様の剛性で減少しており、類似の挙動を示していることが分かる。従って、弾性に近い状態で挙動しているものと推察される。次に、 $V=4.25$ m/s の場合には、最大応答値に達した後減少に至るものの、 δ は増大しており、 $R-\delta$ 曲線は両梁とも類似

の三角形の分布を示している。これは、せん断破壊特有の分布性状であり、この衝突速度で各試験体ともせん断破壊に至っていることが推察される。 $V=4.5$ m/s になると各試験体の $R-\delta$ 曲線は衝撃初期には $V=4.25$ m/s と同様に三角形の分布を示すものの、AT, BT 試験体では再度載荷状態となり、対応して変位も増加していることが分かる。これは、せん断破壊によってエネルギーが吸収された後も余剰エネルギーによって主鉄筋を介した梁の振動が励起されたためと考えられる。なお、 $V \geq 4.75$ m/s では、入力エネルギーが増加するにもかかわらず、最大支点反力がほぼ同程度の値を示し、変位のみが大きくなる傾向を示している。これは、せん断破壊型に必要となるエネルギーよりも大きいエネルギーが入力したことにより、せん断破壊後の主鉄筋の剛性に対応した変位が励起したことによるものと推察される。

吸収エネルギー E_a に着目すると、 $V=4$ m/s ではほぼ同様の値を示していることより、損傷が軽度の場合の E_a は、アスペクト比の影響が小さいことが分かる。 $V \geq 4.5$ m/s では、AT, AD 試験体の方が BT 試験体に比べて、吸収エネルギー E_a が大きくなっていることがわかる。これは試験体の損傷モードにも深く関連しているものと推察される。

3.3 各種応答値の比較

図-4には、各試験体の衝突速度 V に対する最大重錘衝撃力 P_{ud} 、最大支点反力 R_{ud} 、最大変位 δ_{max} および残留変位 δ_{rd} の分布図を示している。

(a) 図より、最大重錘衝撃力 P_{ud} についてみると、 P_{ud} は

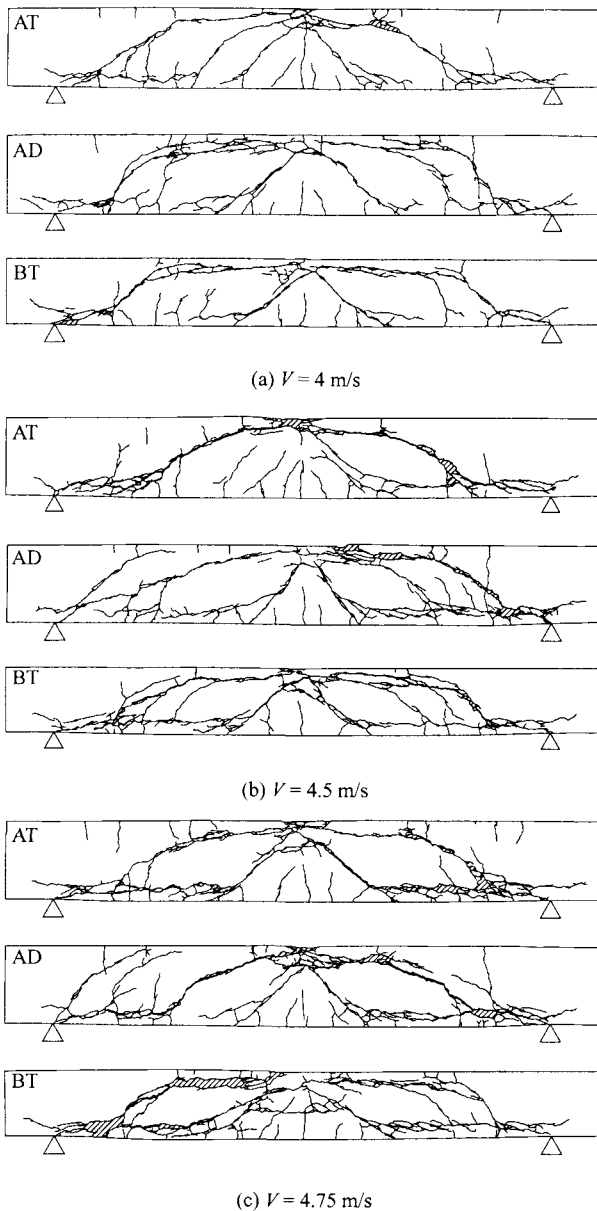


図-5 ひび割れ分布性状

各試験体で応答値に多少の違いはあるが、各試験体間で大略類似している。V=4.5 m/sのAT試験体およびV=5 m/sのAD試験体で応答値の減少が見られる。これは、載荷点部でのコンクリートの剥落が確認されたことにより、この剥落現象が衝撃力の低下に関与しているものと推察される。なお、 P_{ud} は全体的にはVの増加に伴い、線形的に増大する傾向がうかがえる。

(b)図より、AT, AD試験体について着目すると、最大支点反力 R_{ud} は衝突速度Vの大きさにかかわらず、ほぼ同様の値であることより、軸方向鉄筋の違いが最大支点反力に与える影響は小さいことがうかがえる。しかしながら、BT試験体ではAT試験体に比べて小さい。両者で本実験の範囲内における絶対最大支点反力値で比較すると、AT試験体がBT試験体の1.5倍程度となっている。また、AT, BT試験体の実測静的せん断耐力や、鉄筋の剛性を無視したコンクリートの弾性的なせん断剛性、および(c)図の最大変位が両試験体で大差ないのに対して、AT, AD試験体の弾性的な曲げ剛性はBT試験体の1.5倍程度大きい。これより、AT, AD試験体とBT試験体間の最大支点反力の差は曲げ剛性の大小に起因しているものと

と推察される。

(c), (d)図より、最大変位 δ_{max} 、残留変位 δ_{rd} について見ると、V=4 m/sでは各試験体でほぼ同様の値を示している。V \geq 4.5 m/sになるとAD試験体がAT, BT試験体に比べて小さい値を示していることがわかる。これは、斜めひび割れ発生後に衝撃力に抵抗する主鉄筋量がAD試験体がAT, BT試験体に比べて多いためと考えられる。

3.4 ひび割れ分布性状

図-5には、各試験体の衝撃実験終了後のひび割れ分布性状を示している。ここでは、衝突速度V=4, 4.5, 4.75 m/sについて示している。

(a)図より、V=4 m/sでは、各試験体とも載荷点部から支点部に向けてアーチ状に進展する斜めひび割れや、載荷点部から梁下縁に約45°の角度で進展するひび割れが発生していることが分かる。また、後者のひび割れは主鉄筋に達すると主鉄筋に沿う形で進展している。各試験体ともこの時点でせん断破壊型のひび割れ分布性状を呈している。(b)図からV=4.5 m/sになると、アーチ状のひび割れや約45°の斜めひび割れおよび割裂ひび割れが明瞭に形成され、載荷点部のコンクリートの剥落もあり、この時点で梁がせん断破壊で終局に至っている様子がうかがえる。(c)図のV=4.75 m/sになるとアーチ状のひび割れがさらに大きく開口し、支点部ではコンクリートの剥離がみられ、せん断破壊が顕在化していることが分かる。

以上より、静的せん断耐力および主鉄筋比が設計的にほぼ同様であるせん断破壊型RC梁の場合には、アスペクト比の大小にかかわらずほぼ同様のひび割れ分布性状を示すことが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、断面形状の違いがせん断破壊型RC梁の耐衝撃性状に与える影響について検討した。本研究の範囲内で得られた結果は以下の通りである。

- 1) 重錘衝撃力、支点反力、変位波形については、アスペクト比が異なる場合においても類似の波形性状を示す。
- 2) しかしながら、最大支点反力は梁の曲げ剛性比と同程度の差異を示す。
- 3) ひび割れ分布性状は、アスペクト比の大小にかかわらずほぼ同様である。
- 4) 最大支点反力値を用いて衝撃耐力を評価するものと仮定すれば、本試験体の場合にはアスペクト比によって耐力が異なる結果となる。ただし、終局時の入力エネルギーはほぼ等しい。

参考文献

- 1) 安藤智啓, 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 蟹江俊仁: スターラップを有しないせん断破壊型RC梁の単一載荷衝撃実験, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1809-1818, 2000.
- 2) コンクリート標準示方書(2002年制定)構造性能照査編, 土木学会, 2002.