

帯鉄筋の鉄筋径が異なるせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性状

Influence of shear rebars diameter on impact resistant behavior of shear failure type RC beams

室蘭工業大学 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
 三井住友建設 (株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
 室蘭工業大学 正 会 員 張 広鋒 (Guangfeng Zhang)
 室蘭工業大学 ○学生会員 東中 邦夫 (Kunio Higashinaka)

1. はじめに

著者らは、RC 梁の耐衝撃性に関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、帯鉄筋を有しない RC 梁の耐衝撃性状に及ぼす、1) 主鉄筋比、2) せん断スパン比、3) コンクリート強度および 4) 載荷方法 (単一載荷と繰返し載荷) の影響を明らかにしている¹⁾。

しかしながら、帯鉄筋を有する RC 梁の耐衝撃性状に関しては実験的な検討事例が少なく、未解明な部分が多く残されている。せん断破壊型 RC 梁においても曲げ破壊型 RC 梁の場合と同様、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ためには、帯鉄筋が耐衝撃性状に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

このような観点より、本研究ではせん断破壊型 RC 梁の帯鉄筋が耐衝撃性状に与える影響を検討することを目的として、帯鉄筋の鉄筋径を変化させた 4 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した。

2. 実験概要

2.1 RC 梁の形状寸法および静的設計値

図-1 には、本実験に用いた RC 梁の形状寸法および配筋状況の一例を示している。本実験に用いた試験体は、断面寸法 (梁幅×梁高) が 180 × 400 mm の複鉄筋矩形 RC 梁である。下端鉄筋には D25 を 2 本束ねて 2 組用いている。本研究では、帯鉄筋を配置しない場合の他、帯鉄筋に直径 4 mm の丸鋼、D6、D10 を 175 mm 間隔で配置する場合について実験を行った。

表-1 には、各試験体の静的設計値および実測値の一覧を示している。試験体名は無補強を N とし、帯鉄筋を配置したものについては、直径を表す D に鉄筋径 (mm) を組み合わせて示している。表中の計算静的曲げ耐力 P_{usc} お

よび静的せん断耐力 V_{usc} は、土木学会コンクリート標準示方書²⁾ (以後、示方書) に基づき算定している。なお、帯鉄筋間隔は、有効高さの 1/2 に設定している。別途実施した静載荷実験で得られた実測せん断耐力 V_{us} は、帯鉄筋を有しない試験体については計算せん断耐力 V_{usc} の 1.1 倍を示し、帯鉄筋を有する試験体は V_{usc} の 1.1 ~ 1.4 倍となっている。また、 V_{us} を V_{usc} で除した実せん断余裕度 α' は α よりも大きくなり、D10 試験体については α' が 1.0 を超えて、静載荷時に曲げ破壊型の特徴を示し終局に至っていることを確認している。なお、コンクリートの圧縮強度は 26.3 MPa、主鉄筋の降伏強度は 412 MPa である。

2.2 実験方法

重錘落下衝撃実験は、跳ね上がり防止用治具付の支点治具上に設置した RC 梁のスパン中央部に、所定の高さから一度だけ重錘を自由落下させる単一載荷法により実施している。治具全体は回転のみを許容するピン支持に近い構造である。重錘は質量 500 kg で載荷点部直径が 150 mm の円柱状鋼製重錘であり、その底部には片当たりを防止するために 2 mm の球状のテーパが施されている。

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) 波形である。実験終了後には、RC 梁側面に生じたひび割れをスケッチしている。

3. 実験結果および考察

3.1 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

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のうち最終衝突速度近傍の結果を示している。図より、重錘衝撃力 P は各梁とも衝突速度 V にかかわらず衝撃初期の振幅が大きく周期の短い第 1 波とその後の振幅が小さく周期の長い第 2 波から構成されていることが分かる。帯鉄筋を有する D 梁の第 2 波の

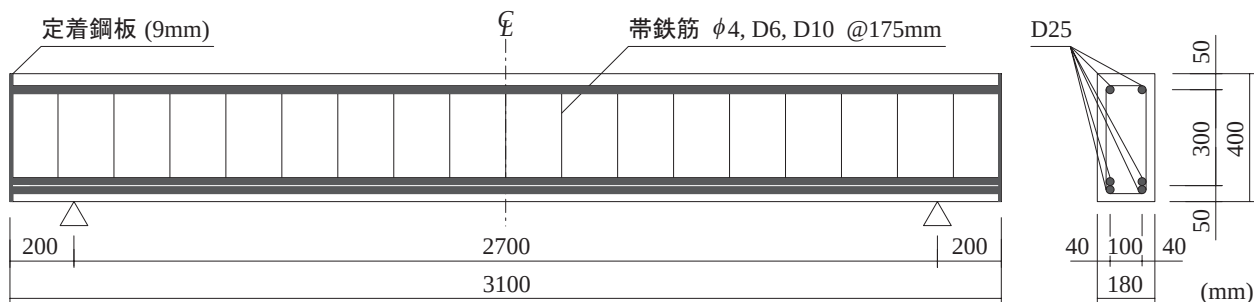


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況 (D4, D6, D10)

表-1 試験体の静的設計値および実測値一覧

試験体名	帯鉄筋比 $P_s(\%)$	帯鉄筋の有無と鉄筋径 (mm)	主鉄筋比 $P_t(\%)$	せん断スパン比 a/d	計算静的せん断耐力 V_{usc} (kN)	計算静的曲げ耐力 P_{usc} (kN)	せん断余裕度 α	実測耐力 V_{us} (kN)	実せん断余裕度 α'	衝突速度 V (m/s)
N	0	無し	3.2	3.86	143.9	372.0	0.39	164.7	0.44	3, 3.25, 3.5, 3.75
D4	0.080	$\phi 4$			169.7		0.46	188.1	0.51	4, 4.5, 5, 5.5
D6	0.201	D6			217.7		0.59	310.3	0.83	5.25, 5.5, 5.75, 6
D10	0.453	D10			330.9		0.89	403.6	1.09	5.75, 8, 10, 10.75

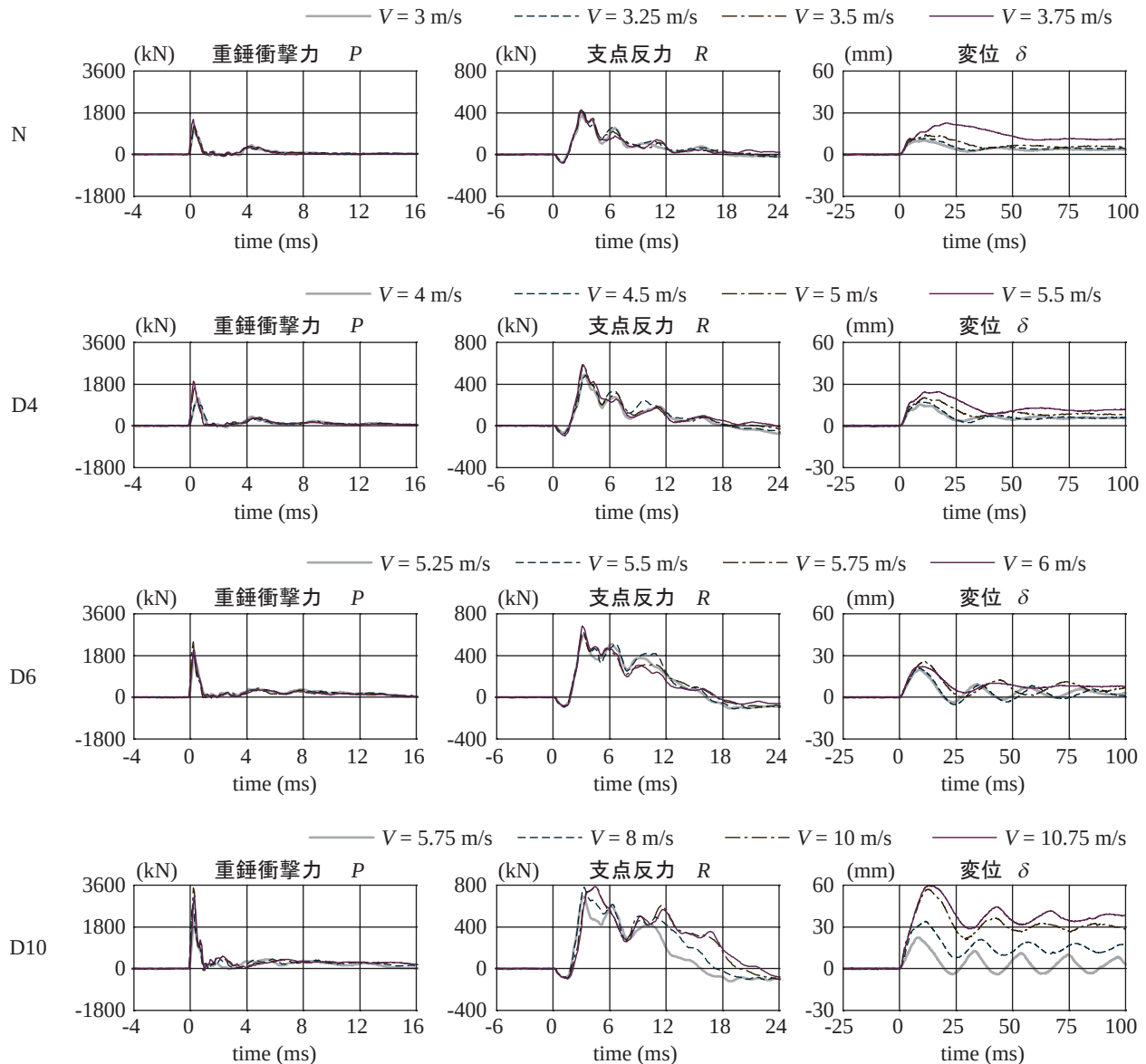


図-2 各種応答波形

継続時間は帯鉄筋の無いN梁と比べると大幅に長く、帯鉄筋の径を大きくするほど長くなる傾向にある。

支点反力波形Rは、D10梁を除いた梁では継続時間が18ms程度の三角形波と周期が3ms程度の波形が合成された分布性状を示している。また、各RC梁では衝突速度の大きさが波形に与える影響は顕著ではない。D10梁では初期の立ち上がり勾配や最大振幅がほぼ同様となっているものの、衝突速度が大きくなるほど波形の継続時間が長くなる傾向にある。D10梁では、衝突速度が2倍近く異なっ

ているにもかかわらず最大振幅がほぼ一致し、他のRC梁でも衝突速度が最大振幅に与える影響は顕著ではないことから、帯鉄筋を有するRC梁の支点反力には上限値があるものと考えられる。

変位波形δより、N梁はいずれの衝突速度においても明確な振動状態を示しておらず、低衝突速度においてもせん断ひび割れが顕在化していることがうかがわれる。帯鉄筋を有する各RC梁では帯鉄筋の径が大きくなるほど振動状態が明瞭にあらわれ、波形の周期も短くなっている。この

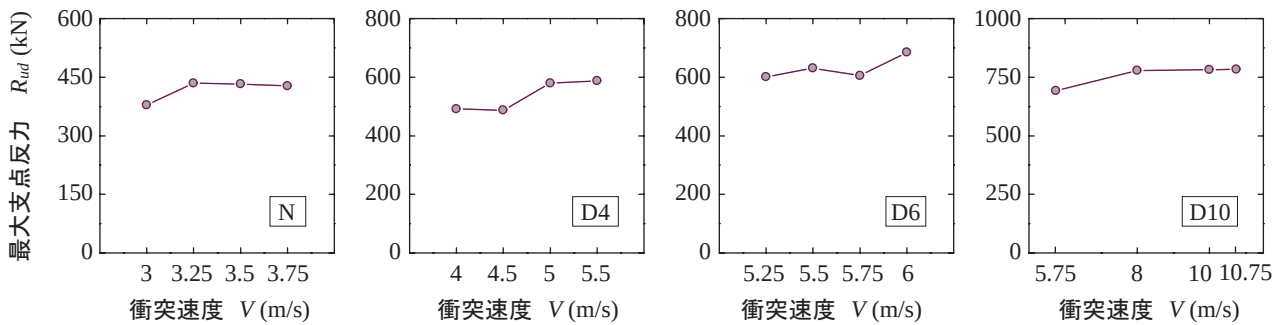


図-3 各RC梁の最大支点反力と衝突速度の関係

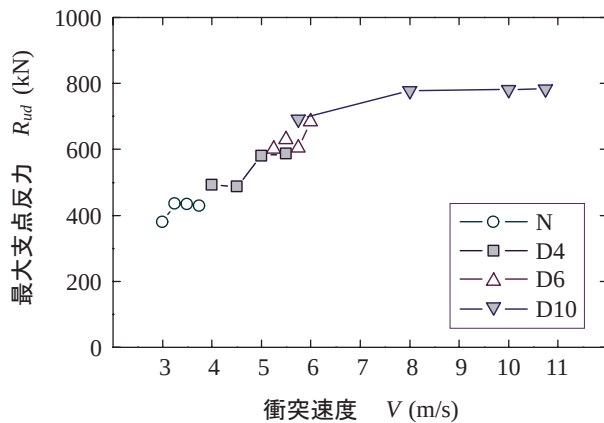


図-4 最大支点反力と衝突速度の関係

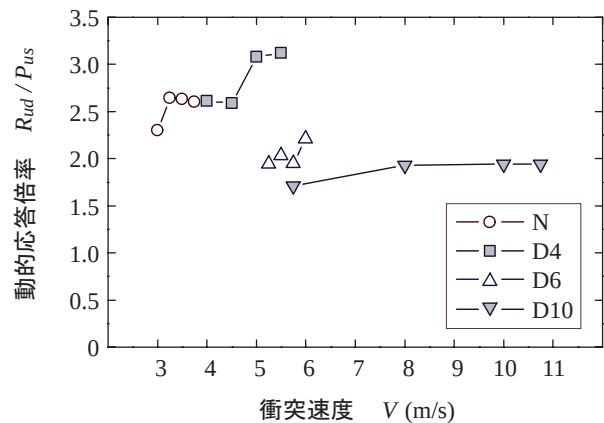


図-5 動的応答倍率と衝突速度の関係

ことより、帯鉄筋を配筋することにより梁の剛性低下が抑制され振動状態を示すことが分かる。ただし、D6、D10梁の場合には、衝突速度の増加に伴い梁の塑性化が進行し、波形の周期が長くなり、応答変位が増加する傾向にある。

3.2 各RC梁の最大支点反力と衝突速度の関係

図-3には、各RC梁の動的耐力を検討するため、衝突速度 V 毎に最大支点反力 R_{ud} を示している。図より、N梁では $V = 3 \text{ m/s}$ から $V = 3.25 \text{ m/s}$ で最大支点反力が 50 kN 程度増加している。しかしながら、 $V = 3.5 \text{ m/s}$ 、 3.75 m/s と衝突速度が上がっても、最大支点反力は増加していない。これは、N梁の支点反力すなわち動的耐力が 430 kN 程度であるためと考えられる。同様にD4梁では $V = 4.5 \text{ m/s}$ から $V = 5 \text{ m/s}$ にかけて 100 kN 程度の上昇が認められるが、 $V = 5.5 \text{ m/s}$ では値が変化していない。よって、 580 kN 程度が動的耐力と考えられる。D6、D10梁の最大支点反力は、衝突速度の増加に伴い多少増加する傾向にあるものの、D6梁では $V = 6 \text{ m/s}$ の値を、D10梁は $V = 8 \text{ m/s}$ の値を動的耐力とみなすことができ、それぞれ 680 kN 、 780 kN 程度となっている。

3.3 動的耐力と動的応答倍率

図-4には、3.2に示した各RC梁の最大支点反力（動的耐力）と衝突速度の関係を1つのグラフにまとめて示した。図より、N、D4、D6梁の最大支点反力は多少のばらつきは見られるものの、大略一致していることが分かる。これは、帯鉄筋の径に対応して動的耐力が決定されるものの、動的耐力以下の範囲内では、励起される最大支点反力は、帯鉄筋の径に依存しないことを示している。

また、D10梁は曲げ破壊型に移行したことから、この梁の動的せん断耐力は 780 kN 以上であることが分かる。

図-5には、各RC梁の最大支点反力 R_{ud} を実測静的耐力 V_{us} で除した動的応答倍率を示している。図より、N、D4梁については $2.5 \sim 3$ 程度の値を示しているのに対し、D6、D10梁は衝突速度の大小にかかわらず、2程度の値を示していることが分かる。これは、帯鉄筋の径が大きくなり、破壊形式がせん断破壊型から曲げ破壊型に移行したり、せん断破壊でも曲げのモードが卓越することで動的応答倍率が低下し、2程度以下に収束していったものと考えられる。

表-2には、各梁の衝撃・静的実験の結果を示している。N梁では $V = 3.25 \sim 3.75 \text{ m/s}$ までの最大支点反力を平均したものを動的耐力としている。なお、帯鉄筋の分担耐力は無補強のN梁からの増分としている。以下同様にD4梁は $V = 5 \sim 5.5 \text{ m/s}$ 、D6梁は $V = 6 \text{ m/s}$ 、D10梁は $V = 8 \sim 10.75 \text{ m/s}$ の最大支点反力の平均値を動的耐力としている。表-2より、帯鉄筋の分担耐力の動的応答倍率は、帯鉄筋径が大きくなることにより小さくなることが分かる。また、帯鉄筋の分担耐力の動的応答倍率は、D4梁を除いて、梁のせん断耐力の動的応答倍率よりも小さくなる傾向にある。なお、D4梁で著しく帯鉄筋の分担耐力の動的応答倍率は大きいのは、 $\phi 4 \text{ mm}$ の丸鋼を使用したため静載荷時に帯鉄筋の分担耐力がわずかしき増加しなかったことに関連するものと推察される。

3.4 ひび割れ分布性状

図-6には、各RC梁の衝撃実験終了後のひび割れ分布性状を衝突速度毎に示している。なお、図中の斜線部分はコンクリートの剥落部あるいはひび割れ開口部を示している。

帯鉄筋の無いN梁の場合には、 $V = 3 \text{ m/s}$ においてせん断破壊型特有のアーチ状および押し抜きせん断状のひび割

表-2 各梁の静的・衝撃実験結果の一覧

試験体名	帯鉄筋比 $P_s(\%)$	衝撃実験		静載荷実験		動的 応答倍率 R_{ud}/P_{us}	帯鉄筋の 動的応答倍率 R_{sd}/P_{sd}
		動的 耐力 R_{ud} (kN)	帯鉄筋の 分担耐力 R_{sd} (kN)	実測静的 せん断耐力 P_{us} (kN)	帯鉄筋の 分担耐力 P_{sd} (kN)		
N	0	431.5	-	164.7	-	2.62	-
D4	0.08	583.4	151.9	188.1	23.4	3.1	6.49
D6	0.201	684.4	252.8	310.3	145.6	2.21	1.74
D10	0.453	781.4	349.9	403.6	238.9	1.94	1.46

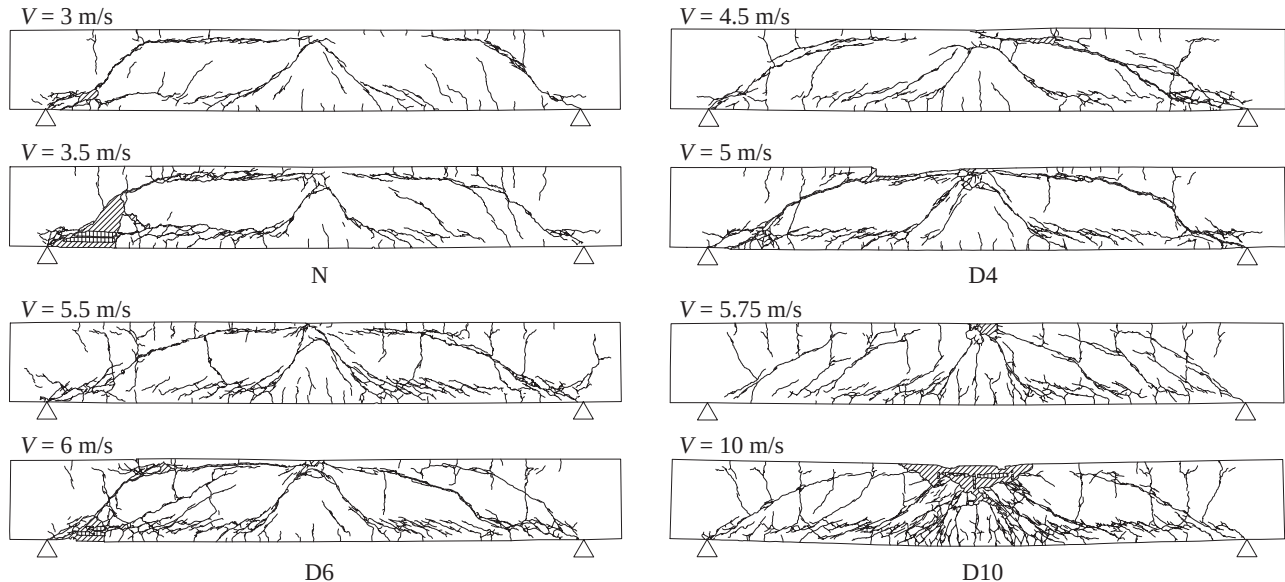


図-6 ひび割れ分布性状

れが見られ、 $V=3.5$ m/s になると開口幅が大きくなり、支点部近傍のコンクリートが剥落している。これは、衝撃荷重載荷時に、支点反力として吸収しきれなかった余剰エネルギーに起因するものと考えられる。

D4 梁の場合には、 $V=4.5$ m/s でアーチ状ひび割れが開口し、 $V=5$ m/s になると載荷点部付近のコンクリートが局所的に剥落することでエネルギーを消費するため、支点反力の大きな増加が抑制されたものと考えられる。

D6 梁では、N 梁と同様の傾向が見られ、 $V=5.5$ m/s ではアーチ状のひび割れや押し抜きせん断状のひび割れが発生しているのに対し、 $V=6$ m/s では余剰エネルギーによって支点部近傍のコンクリートが剥落したものと考えられる。

D10 梁においてはアーチ状のひび割れが顕在化せずに、押し抜きせん断状のひび割れや曲げひび割れが卓越し、特に $V=10$ m/s では載荷点部の局部破壊が顕著になっている。これは、帯鉄筋の鉄筋径が大きくなることにより破壊形式がせん断破壊型から曲げ圧縮破壊型に移行したことを示している。また、帯鉄筋による耐力向上効果が設計値よりも大きいために、計算せん断余裕度が1以下で、せん断破壊が予想される RC 梁であっても、1.0に近い場合は静載荷時、衝撃荷重載荷時ともに曲げ破壊型で終局に至る可能性があることを示している。

4. まとめ

本研究では、帯鉄筋の有無およびその径を変化させて、

せん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性状について検討を行った。得られた結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 帯鉄筋を有する RC 梁は、設計時にせん断余裕度が0.9でも静・衝撃載荷実験時には曲げ破壊型で終局に至ることがある。
- (2) 帯鉄筋を有する RC 梁の支点反力には上限があり（動的耐力）、入力エネルギーを増大させてもほぼ同様の値を示す。
- (3) 支点反力の上限値（動的耐力）以下の場合には、帯鉄筋の径は支点反力の大きさに影響を及ぼさない。
- (4) せん断破壊する場合は、帯鉄筋の径によらず動的応答倍率は2.5～3程度を示し、曲げ破壊する場合には、2.0程度以下の値を示す。帯鉄筋の分担耐力の動的応答倍率は、RC 梁の動的応答倍率よりも小さい傾向にある。

参考文献

- 1) 安藤 智啓, 岸 徳光, 三上 浩, 松岡 健一, 蟹江 俊二: 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, No.2, pp.1809-1818, 2000.3
- 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