

I-74

断面寸法の異なるせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性に関する実験的研究

室蘭工業大学 正員 岸 徳 光
三井建設(株) フェロー 三 上 浩
室蘭工業大学 フェロー 松 岡 健 一
室蘭工業大学 ○正員 安 藤 智 啓

1. はじめに

耐衝撃用途構造物(落石防護施設, 原子力発電所関連施設など)の構成要素である RC 梁, 柱, 版の耐衝撃性に関する研究は, これまで多くの研究者によって実施されてきた[1-4]. その結果, RC 梁に関してはその耐衝撃性がかなり明らかにされてきており, 簡易な耐衝撃設計法も提案されるに至っている[5]. しかしながら, 上記の研究のほとんどは曲げ先行型で破壊に至る RC 部材を対象としたものであり, せん断先行型で破壊に至る場合の RC 部材を対象としたものではない. そのため, 衝撃荷重を受ける場合の RC 部材のせん断破壊性状は, RC 梁に関してさえも未だ明らかになっていないのが現状である.

本研究では, 静載荷時にせん断破壊型となる RC 梁に着目し, 特に断面寸法の違いがせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性におよぼす影響について検討することを目的として, 断面寸法の異なる2種類の RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を試みた. なお, 実験は漸増繰り返し載荷(以下, 繰り返し載荷)および単一載荷の2種類の方法により行っている. このうち, 繰り返し載荷実験の場合には, ひび割れ幅の大きい斜めひび割れが発生し破壊するまであるいは載荷部近傍のコンクリートが衝撃荷重によって分離・剥落し断面欠損が著しい状態になるまで, 増分速度 1 m/s で同じ試験体に対し重錘を繰り返し落下させている. 単一載荷実験の場合には, 繰り返し載荷実験の最終載荷速度と同一の速度から 1 m/s ごと衝突速度を増加させ, いずれも一試験体に対して一回のみ重錘落下させている.

2. 実験概要

図-1 には RC 梁試験体の形状寸法および配筋状況を示している. 実験に用いた A, B 試験体は, 断面寸

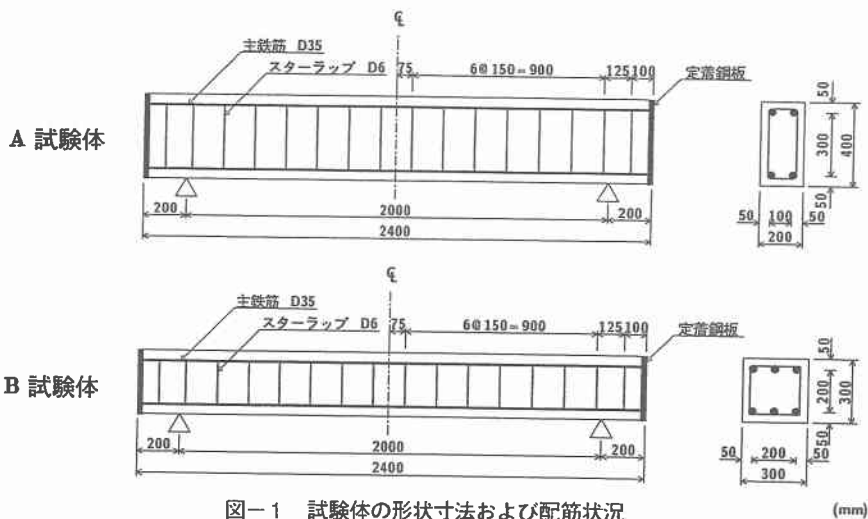


図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

(mm)

Experimental study on impact resistance of shear failure type RC beams with two kinds of rectangular cross section
by Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI, Ken-ichi MATSUOKA and Tomohiro ANDO

表－１ 試験体の設計値一覧

試験体名	衝突速度 V (m/s)	主鉄筋比 P_t	純スパン 長 L (m)	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 $\alpha (= V_{usc}/P_{usc})$	静的耐力 の実験値 P_u (kN)
A	1~6 (6~10)	0.0281	2.0	2.86	261	449	0.58	401
B	1~7 (7~9)	0.0382	2.0	4.00	276	477	0.58	351

法および主鉄筋比の異なる複鉄筋矩形 RC 梁である。

A, B 試験体の断面寸法（梁幅 × 梁高）は、それぞれ 200 × 400 mm, 300 × 300 mm である。しかしながら、純スパン長はいずれも 2,000 mm と同様である。また、せん断補強筋間隔も 150 mm ピッチと同様である。さらに、用いた軸方向筋およびせん断補強筋も両試験体で同様であり、それぞれ D35 および D6 を用いている。なお、軸方向筋は梁端面に設置した厚さ 22 mm の鋼板に溶接し、その定着長を節約している。

衝撃実験は、梁スパン中央部に質量 300 kg の円

柱状鋼製重錘を所定の高さから自由落下させることにより行っている。重錘直径は載荷点部で 150 mm である。また、重錘底部には衝突時の片当りを防止する目的で、高さ 2 mm のテーパが施されている。試験体は支点用治具上に設置し、さらに支点部梁上縁には跳ね上がり防止用治具を設けている。治具全体は、回転のみを許容する単純支持に近い構造となっている。測定項目は、重錘衝撃力 P 、支点反力 R および載荷点変位 δ の各応答波形である。 P, R の測定にはそれぞれ容量および応答周波数が 1470 kN, DC ~ 4.0 kHz および 490 kN, DC ~ 2.4 kHz の起歪柱型のロードセルを、 δ の測定にはストローク 200 mm, 応答周波数 915 Hz のレーザ式変位計を用いている。

表－１には、用いた試験体の設計値一覧を示している。表中、衝突速度 V 、主鉄筋比 P_t 、純スパン長 L 、せん断スパン比 a/d の他、計算による静的せん断耐力 V_{usc} 、静的曲げ耐力 P_{usc} 、せん断余裕度 α および静的耐力の実験値 P_u も合わせて示している。衝突速度 V に関しては、括弧内に単一載荷実験における衝突速度も合わせて示している。また、表中 V_{usc} および P_{usc} の値は、土木学会コンクリート標準示方書 [6] に基づき算定している。ここで、 P_{usc} の算定には断面分割法を適用している。なお、各耐力算定時の部材係数には $\gamma_b = 1.0$ を用いている。せん断余裕度 α はこの V_{usc} を P_{usc} で除した値であり、本試験体の場合には全て $\alpha < 1.0$ である。これより、全ての試験体は静載荷時にはせん断破壊することが予想される。ここでは断面寸法が耐衝撃性におよぼす影響に限定して検討するため、せん断耐力 V_{usc} 、曲げ耐力 P_{usc} およびせん断余裕度 α を、A, B 試験体で大略等しい値となるように断面設計している。表－２および表－３には、実験時のコンクリートおよび鉄筋の力学的特性を示している。

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ分布

図－２には、A, B 試験体に関する繰り返し載荷実験終了後のひび割れ分布および各衝突速度における単一載荷実験終了後のひび割れ分布を示している。まず、繰り返し載荷実験結果について見ると、両試験体とも載荷点部から支点部に向かいアーチ状に進展する明瞭な斜めひび割れが見られる。また、載荷点部から 45° 程度の角度で梁下縁に進展している斜めひび割れも確認できる。このひび割れは、主鉄筋位置まで達し

表－２ コンクリートの力学的特性

試験体名	実験時材令 (日)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
A, B	24	40.2	26.8	0.23

表－３ 鉄筋の力学的特性

鉄筋の 呼び径	材質	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
D35	SD345	375	584	206	0.3
D6	SD295A	366	540	206	0.3

た後、主鉄筋に沿う形で支点部まで進展している。さらに、梁下縁から上縁に垂直に進展している曲げひび割れも確認できる。最終的には、両試験体とも載荷点近傍部のコンクリートが損傷し、断面欠損が著しくなった状態で実験を終了している。全般的には、両試験体で類似したひび割れ性状を示しているものと判断される。

次に、単一載荷実験の結果について検討を行う。A 試験体について見ると、衝突速度 $V = 6 \text{ m/s}$ の場合には、繰り返し載荷の場合と同様に、載荷点部から支点部に至る斜めひび割れおよび 45° 程度の角度で梁下縁に進展する斜めひび割れが発生していることが分かる。しかしながら、曲げひび割れの本数は、繰り返し載荷の場合に比較して少ない。 $V = 7 \text{ m/s}$ の場合には、主鉄筋に沿う形で進展するひび割れも顕著に現れてきている。また、載荷点部の梁高中央部に水平方向に発生するひび割れも出現している。 $V = 8 \text{ m/s}$ 以降では、衝突速度 V の増加とともに、載荷点部から支点部に向かう斜めひび割れが、アーチ状から直線的な分布に推移していく様子も観察される。なお、これらの傾向は、梁高中央部における水平ひび割れの出現を除くと、B 試験体の場合にも同様に見られる。

3.2 重錘衝撃力、支点反力および載荷点変位に関する各応答波形

図-3には、A、B 試験体における重錘衝撃力 P 、支点反力 R および載荷点変位 δ （以下、変位）に関する各応答波形を示している。ここで、支点反力は両支点部に設置したロードセル反力の合力として評価している。なお、紙面の都合により、ここでは単一載荷実験の衝突速度 $V = 7, 8, 9 \text{ m/s}$ の結果に着目して検討を行うこととする。

図より、いずれの応答波形に関しても、A 試験体と B 試験体は衝突速度 V に関わらず、良く対応した分布形状を示していることが分かる。すなわち、重錘衝撃力波形 P の場合には、衝撃初期に波動が急激に立ち上がり、最大応答値を示した後一旦急激に減少する。その後再度波動が増大し第2ピーク値を示した後徐々に除荷されている。支点反力波形 R の場合には、重錘衝撃力波形 P で見られた衝撃初期における第1波は現れていない。従って、ほぼ線形に増大し最大応答値に達した後は時間の経過とともに直線的に減少している。また、その分布形状は三角形の様相を呈している。変位波形 δ について見ると、荷重載荷時には支点反力波形 R に対応した三角形の波形形状を示している。また、荷重除荷後には波動は微かに振動している。しかしながら、その振幅も時間の経過とともに小さくなり、直流成分のみの波動へと移行して

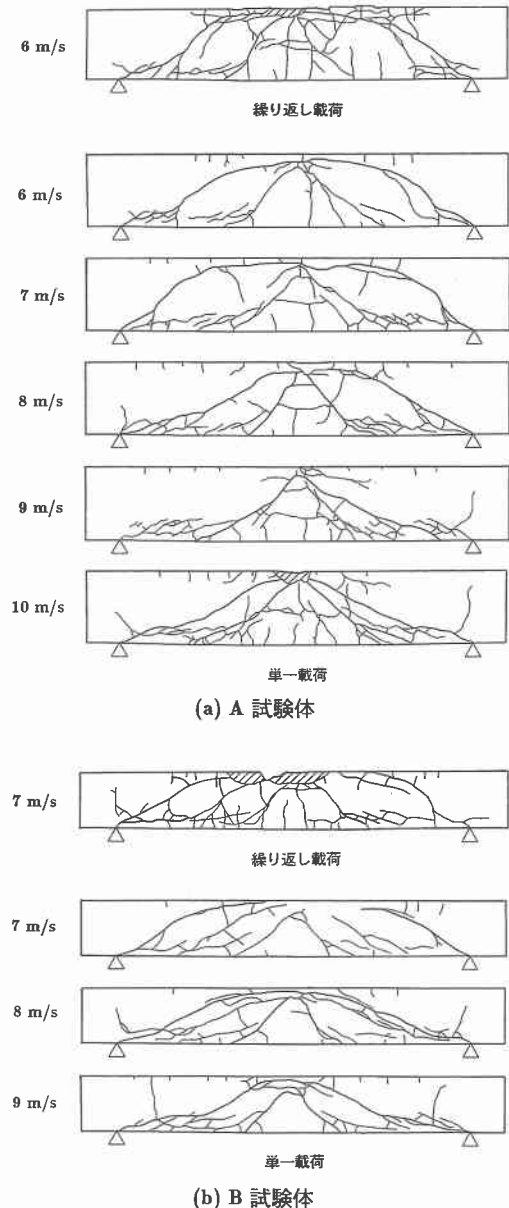


図-2 実験終了後のひび割れ分布

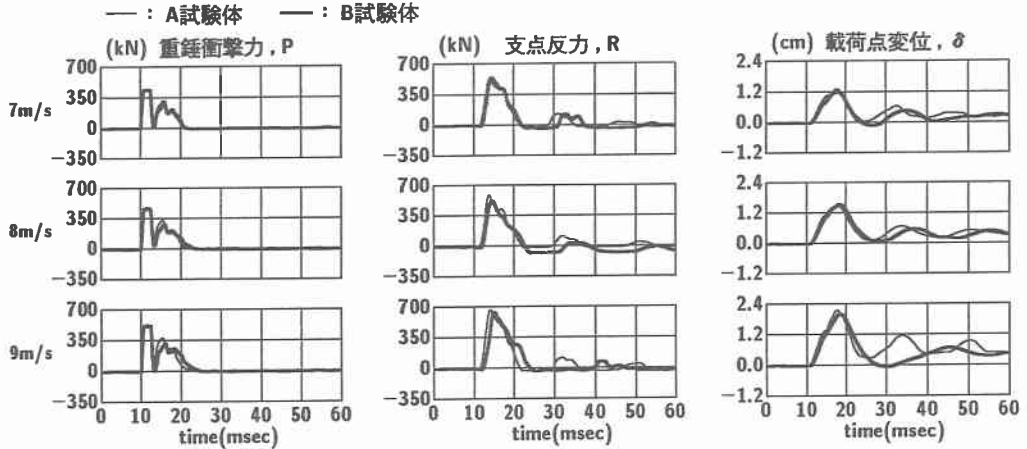


図-3 重錘衝撃力、支点反力および載荷点変位に関する応答波形
(単一載荷, $V = 7, 8, 9 \text{ m/s}$ の場合)

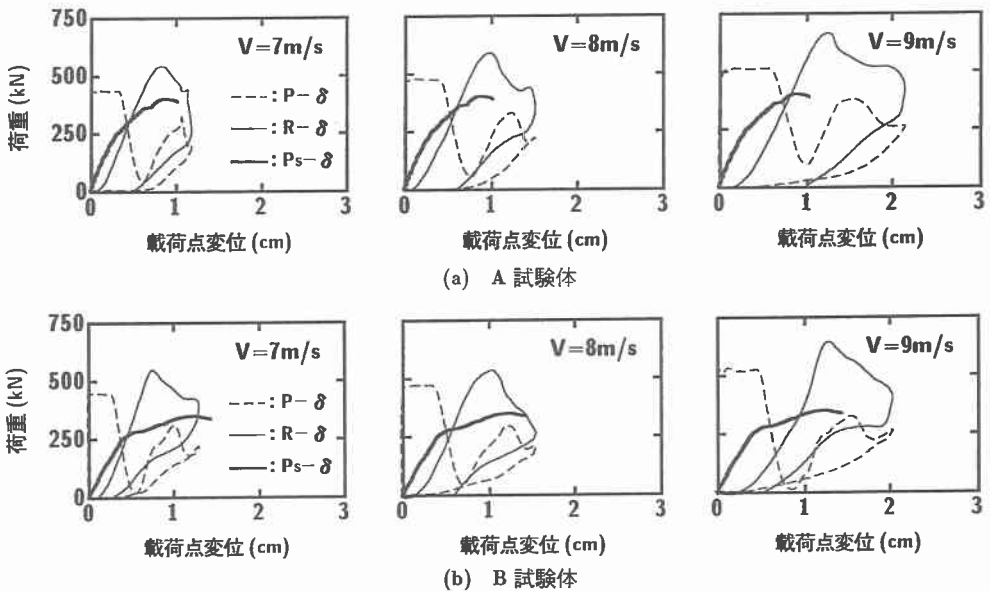


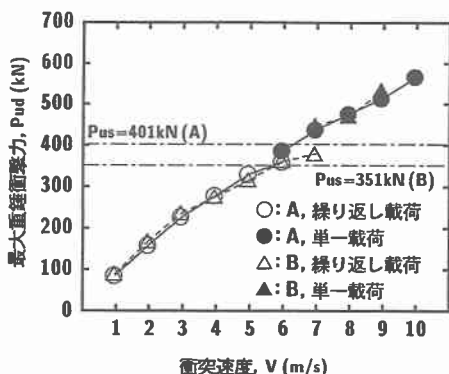
図-4 重錘衝撃力および支点反力の載荷点変位に関する履歴曲線
(単一載荷, $V = 7, 8, 9 \text{ m/s}$ の場合)

いる。なお、両試験体の場合とも衝突速度 $V = 7 \text{ m/s}$ の時点から残留変位が生じていることが確認できる。

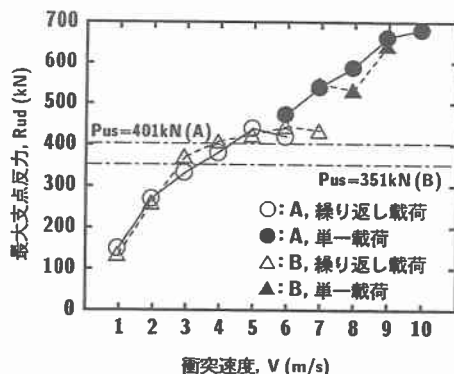
3.3 重錘衝撃力および支点反力の載荷点変位に関する履歴曲線

図-4には、重錘衝撃力および支点反力に関する $P-\delta$ 、 $R-\delta$ 履歴曲線の衝突速度 V による推移状況を示している。また、図中には別途実施した静載荷実験の結果 ($P_s-\delta$) も示している。なお、ここでも前節と同様に、単一載荷実験における衝突速度 $V = 7, 8, 9 \text{ m/s}$ に着目して検討を行う。

図より、 $P-\delta$ 曲線および $R-\delta$ 曲線の分布は、いずれの衝突速度 V においても、両試験体で比較的類似して



(a) 衝突速度と最大重錘衝撃力との関係



(b) 衝突速度と最大支点反力との関係

図一五 衝突速度と最大重錘衝撃力および最大支点反力との関係

いることが分かる。すなわち、 P - δ 曲線の場合には、重錘衝撃力は変位がほとんど生じていない段階で最大応答値を示し、最大値程度の荷重が持続した状態で変位が増大している。その後、重錘衝撃力は一旦減少し再度増加した後再び減少に転じている。一方、 R - δ 曲線の場合には、支点反力は P - δ 曲線の勾配と概ね同程度の勾配で増大している。また、重錘衝撃力が一旦零程度に低下した時点で支点反力は最大応答値を示している。最大支点反力発生後は、支点反力は減少するものの変位は最大応答変位値まで線形的に増大している。これは P - δ 曲線の第2ループの挙動とほぼ対応している。最大変位到達後は、支点反力と変位は初期剛性と類似の勾配で除荷状態となっている。なお、 P - δ 曲線 および R - δ 曲線とも、ループの面積は衝突速度 V の増加とともに増大している。

3.4 衝突速度と最大重錘衝撃力および最大支点反力の関係

図一五には、衝突速度 V と最大重錘衝撃力 P_{ud} および最大支点反力 R_{ud} の関係を示している。また、図中には静載荷実験より得られた静的耐力の値 P_{us} も合わせて示している。なお、白抜き○、△印は繰り返し載荷の結果を、黒塗り●、▲印は単一載荷の結果を示している。

(a)、(b) 図より、繰り返し載荷および単一載荷の場合ともに、両試験体の最大重錘衝撃力 P_{ud} および最大支点反力 R_{ud} は、衝突速度に関わらず非常に良く一致していることが分かる。詳細に見ると、繰り返し載荷実験における P_{ud} 、 R_{ud} は、静的耐力 P_{us} 程度まで衝突速度 V の増加とともにほぼ線形的に増大している。しかしながら、静的耐力 P_{us} を越える荷重レベルでは V の増加に対して増分は小さくなっている。これは、前述のひび割れ分布より、静的耐力を超える状態では載荷点近傍部コンクリートの劣化が進行し、衝突速度に比例した衝撃力が励起されないためと推察される。一方、単一載荷実験における P_{ud} 、 R_{ud} は、繰り返し載荷実験における P_{ud} 、 R_{ud} と衝突速度 V の分布線上に分布していることが分かる。

3.5 衝突速度と残留変位の関係

図一六には、衝突速度 V と残留変位 δ_r の関係を示している。ここでも、白抜き○、△マーク印は繰り返し載荷の結果を、黒塗り●、▲マーク印は単一載荷の結果を示している。

図より、低速度領域から衝突速度 $V = 10$ m/s の高速度領域に至るまで、両試験体の結果は非常に良く対応していることが分かる。また、残留変位 δ_r は、衝突速度 V の増加とともに指数関数的に増大している傾向も読み取れる。

以上より、断面寸法が異なる RC 梁でも、静的せん断耐力 V_{uc} が大略等しい場合には耐衝撃性も類似であ

ることが明らかとなった。

4. まとめ

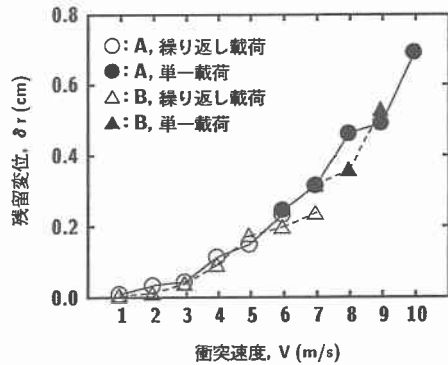
本研究では、静載荷時にせん断破壊型となる RC 梁に着目し、特に断面寸法の違いがせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性におよぼす影響について検討することを目的として、静的せん断耐力は大略等しいものの、断面寸法が異なる 2 種類の RC 梁に関する重錘落下衝撃実験を試みた。本実験より得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

- 1) 実験終了後のひび割れ分布には、両試験体とも載荷点部から支点部に向かいアーチ状に進展する斜めひび割れおよび載荷点部から 45° 程度の角度で梁下縁に進展している斜めひび割れが見られ、両試験体でその分布性状が良く類似している。また、衝突速度の増加とともに、載荷点部から支点部に向かう斜めひび割れが、アーチ状から直線的な分布に推移していく性状も両者で対応している。
- 2) 両試験体の重錘衝撃力、支点反力および載荷点変位の各応答波形は、衝突速度に関わらず波動の立ち上がりから減衰していく傾向まで良く対応している。
- 3) 重錘衝撃力は変位がほとんど生じていない段階で最大値を示すこと、また、支点反力は重錘衝撃力が一旦零程度に減少した時点で最大値を示すこと等、重錘衝撃力－変位曲線および支点反力－変位曲線の各履歴挙動は両試験体でその特性が類似している。
- 4) 両試験体の最大重錘衝撃力および最大支点反力は、いずれの衝突速度においても良く一致している。また、各最大応答値は繰り返し載荷において梁の載荷点近傍部が著しく損傷する場合を除き、衝突速度の増加とともに線形的に増大している。
- 5) 両試験体の残留変位は、いずれの衝突速度においても良く一致している。また、残留変位は衝突速度の増加とともに指数関数的に増大する。
- 6) 1) ～ 5) より、断面寸法が異なる場合でも、静的せん断耐力が大略等しい RC 梁の耐衝撃性は類似であることが明らかとなった。これは、せん断破壊型 RC 梁の耐衝撃設計法確立の可能性を示唆している。

謝辞：最後に、本研究を行うにあたり、室蘭工業大学大学院建設システム工学専攻構造力学研究室の長谷川弘毅君に多大なる御支援を戴いたことを付記し、ここに感謝の意を表する。

参考文献

- (1) 井元勝慶，大野友則，佐々木晃，小暮幹太：重錘落下衝突を受ける RC はり部材の衝撃挙動と衝撃応答解析における材料の非線形特性，構造工学論文集，Vol.41A，1995。
- (2) 佐藤昌志，岸 徳光，三上 浩，松岡健一：大型 RC 版の耐衝撃性，構造工学論文集，Vol.43A，1997。
- (3) 岸 徳光，三上 浩，松岡健一，安藤智啓：静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の弾塑性衝撃応答解析，土木学会論文集，No.619/I-47，1999。
- (4) 三上 浩，岸 徳光，吉田紘一，安藤智啓：RC 柱模型の横衝撃載荷実験，応用力学論文集，Vol.1，1998。
- (5) 松岡健一，岸 徳光，三上 浩，安藤智啓：スパン長の異なる RC 梁の重錘落下衝撃実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.3，1998。
- (6) コンクリート標準示方書（平成 8 年制定）設計編，土木学会，1996。



図一 6 衝突速度と残留変位の関係