

I-61

単一載荷を受けるせん断破壊型 RC 梁の耐衝撃性

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

著者らは、静載荷時に曲げ破壊を示す RC 梁の耐衝撃設計法を確立するために、断面寸法、スパン長および重錘重量の異なる RC 梁の耐衝撃性に関する実験的研究をこれまで継続して行ってきた [1,2]。その結果、1) 梁が破壊に至るまで初速度 1 m/s から 1 m/s ずつ重錘衝突速度を漸増させ載荷する（以下、繰り返し載荷）方法は、実現象に即した単一載荷方法と照らして大略同一の結果を与えること、2) 1) の 2 種類の載荷方法による実験結果より、RC 梁が破壊に至る衝突速度時の最大合支点反力（以下、最大支点反力）と静的曲げ耐力の関係および載荷エネルギーと吸収エネルギーの関係が定式化できること、3) それらの関係を用いることにより、静的曲げ耐力に基づく曲げ破壊型 RC 梁の合理的な耐衝撃設計法が可能であること、などが明らかになった。しかしながら、静載荷時にせん断破壊を示す RC 梁の耐衝撃性は未だ不明であり、せん断作用が卓越する RC 梁の合理的な耐衝撃設計法は確立されていないのが現状である。

本研究では、せん断が卓越する RC 梁の合理的な耐衝撃設計法を確立するために、主にせん断余裕度が 1.0 以下である RC 梁 12 体の重錘落下衝撃実験を行い、RC 梁の各種応答波形の検討を試みた。また、検討は特に単一載荷実験結果に着目して行い、最大支点反力と静的耐力および載荷エネルギーと吸収エネルギーの関係について定量的な検討を試みた。なお、単一載荷で設定した衝突速度は、同時に実施した繰り返し載荷の最終載荷速度（梁側面に明瞭な斜めひびわれが生じたときあるいは梁中央部の累積残留変位が純スパン長の 1/50 程度に達したときの衝突速度）と同一にしている。

2. 実験概要

図 - 1 には試験体の形状寸法および配筋状況を示している。試験体はいずれも断面寸法 15 × 25 cm の単鉄筋矩形 RC 梁である。また、主鉄筋は梁端面に設置した厚さ 9 mm の鋼板に溶接し、その定着長を節約している。なお、本研究では、コンクリートと主鉄筋のみの梁部材のせん断性状に限定して検討することとし、せん断補強筋は配置しないものとした。実験は、RC 梁のスパン中央部に 2.94 kN の重錘を所定の高さから単一載荷させることにより行っている。試験体は支点用治具上に設置し、さらに梁支点上縁には跳ね上がり防止用治具を設けている。また、治具全体は回転を許容し単純支持に近い境界条件となっている。測

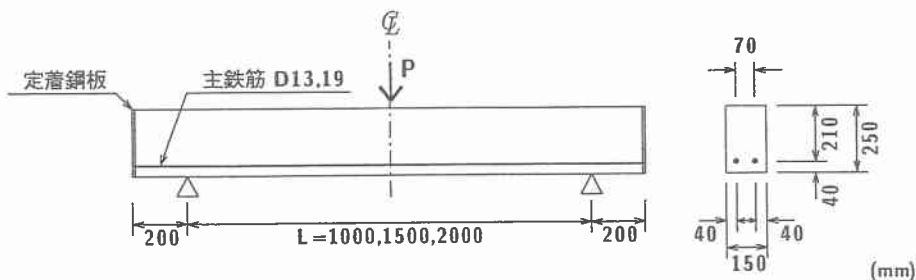


図 - 1 試験体の形状寸法および配筋状況

Impact Resistance of RC Beams with Shear Failure Mode under Single Impact Loading
by Norimitsu KISHI, Hiroshi MIKAMI, Ken-ichi MATSUOKA and Tomohiro ANDO

表 - 1 試験体および実験結果の一覧

試験体名	計算値			実験値	繰り返し載荷実験結果		単一載荷実験結果	
	静的せん断耐力 V_{usc} (kN)	静的曲げ耐力 P_{usc} (kN)	静的せん断余裕度 α (V_{usc}/P_{usc})	静的耐力 P_{ud} (kN)	最終衝突速度 V (m/s)	破壊形態	衝突速度 V (m/s)	破壊形態
D13-L1.0-H	52.3	78.4	0.67	85.1	2	せん断	2	せん断
D13-L1.5-H	52.3	52.2	1.00	70.9	3	せん断	3	破壊に至らず
D13-L2.0-H	52.3	39.2	1.33	48.7	4	曲げ・せん断	3	破壊に至らず
D19-L1.0-H	68.8	163.1	0.42	169.4	3	せん断	3	せん断
D19-L1.5-H	68.8	108.7	0.63	85.5	3	せん断	3	せん断
D19-L2.0-H	68.8	81.5	0.84	92.7	3	せん断	3	破壊に至らず
D13-L1.0-L	45.7	75.9	0.60	71.2	2	せん断	2	せん断
D13-L1.5-L	45.7	50.6	0.90	61.8	4	曲げ・せん断	4	曲げ・せん断
D13-L2.0-L	45.7	37.9	1.20	45.8	4	曲げ	4	曲げ
D19-L1.0-L	60.0	150.1	0.40	114.6	2	せん断	2	せん断
D19-L1.5-L	60.0	100.1	0.60	82.0	2	せん断	2	せん断
D19-L2.0-L	60.0	75.1	0.80	78.1	4	曲げ・せん断	4	せん断

表 - 2 コンクリートの力学的特性

コンクリート 名称	実験時材令 (日)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
高強度	29	31.7	24.0	0.22
低強度	28	21.1	20.2	0.21

表 - 3 主鉄筋の力学的特性

主鉄筋 名称	材質	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
D13	SD345	380	550	206	0.3
D19	SD345	388	559	206	0.3

定項目は、重錘衝撃力 P 、支点反力 R およびスパン中央部の変位 δ である。衝撃荷重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 500 kN, DC ~ 2.4 kHz の起歪柱型のロードセルを、変位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、試験体および実験結果の一覧を示している。表中の試験体名は、使用した RC 梁の主鉄筋径 (D13, D19)、純スパン長 ($L = 1.0, 1.5, 2.0$ m) およびコンクリート強度 (H, L: 高強度, 低強度) を組み合わせで示している。また、各試験体の計算による静的耐力 V_{usc} , P_{usc} とせん断余裕度 α および別途行った実験による静的耐力 P_{ud} と繰り返し載荷実験結果も表中に合わせて示している。なお、D13-L2.0-H の単一載荷速度は、繰り返し載荷の最終載荷時における梁中央部累積残留変位が純スパン長の $1/50$ を大きく越えたことより、一段低い速度に設定している。また、単一載荷における RC 梁の破壊は、梁側面に明瞭な斜めひびわれが生じた場合にはせん断破壊、繰り返し載荷における最終載荷時と同程度の残留変位が生じた場合には曲げあるいは曲げ・せん断破壊、その他は破壊に至らなかったものとしている。表 - 2 および表 - 3 には、実験時のコンクリートおよび主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 ひびわれ性状

図 - 2 には、単一載荷実験終了後の RC 梁のひびわれ性状を一覧にして示している。図より、単一載荷による RC 梁の破壊形態は、D19-L2.0-L および破壊に至らなかった 3 試験体を除くと、表 - 1 に示した繰り返し載荷における破壊形態に対応していることがわかる。詳細にみると、純スパンが短かつせん断余裕度 α が小さい試験体 D13/D19-L1.0 の場合には、コンクリート強度によらず明瞭な斜めひびわれによるせん断破壊で終局に至っていることがわかる。一方、純スパンが長い試験体 D13/D19-L2.0 に着目すると、せん断余裕度が 1.2 以上である D13 の場合には、コンクリート強度に関わらず曲げひびわれが分散しており、梁中

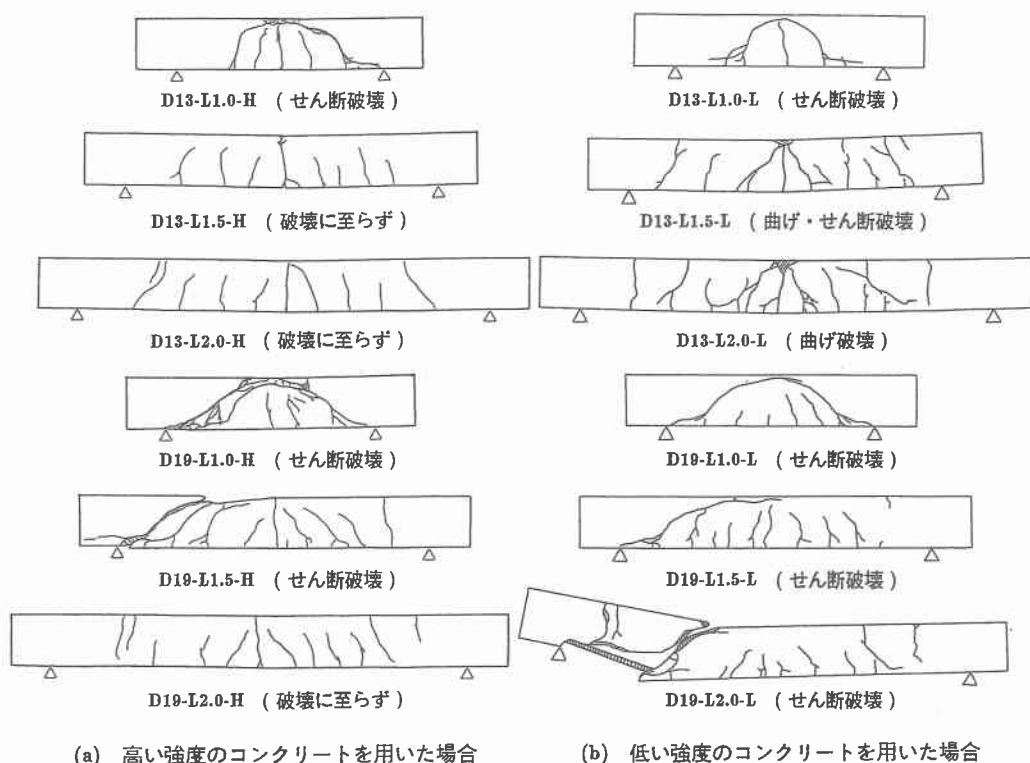


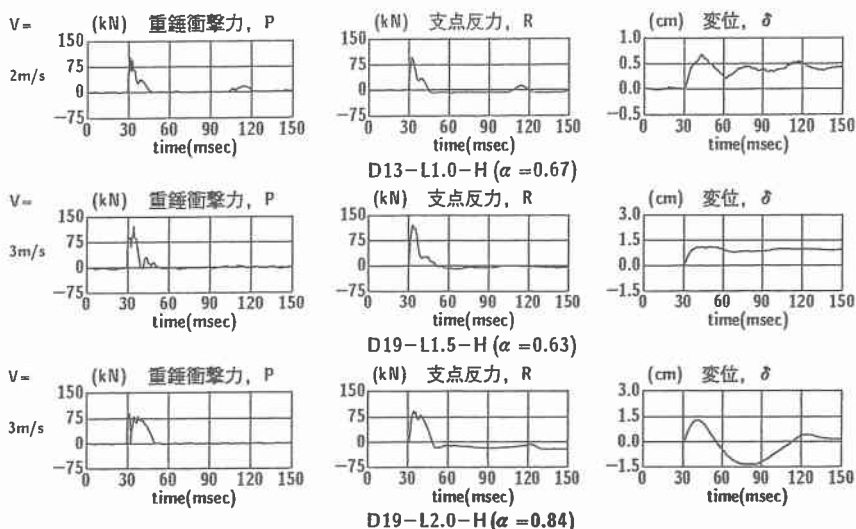
図 - 2 単一実験終了後の RC 梁のひびわれ性状

中央部が角折れしたような変形状態を呈していることがわかる。ただし、高い強度のコンクリートを用いた梁では残留変位量が小さいため破壊には至っていない。せん断余裕度が 0.8 程度である D19 の場合には、高い強度のコンクリートを用いた梁では破壊に至らなかったが、低い強度のコンクリートを用いた梁では明瞭なせん断破壊が生じた。なお、後者の場合、梁中央部の曲げひびわれは梁上縁部まで達していない。最後に、試験体 D13/D19-L1.5 に着目すると、いずれの梁も梁全体に曲げひびわれの分散が認められるが、せん断余裕度が 0.6 程度の D19 の場合にはコンクリート強度に関わらずせん断破壊を示している。また、せん断余裕度が 1.0 程度の D13 の場合には、低い強度のコンクリートを用いた梁のみが曲げ・せん断破壊している。

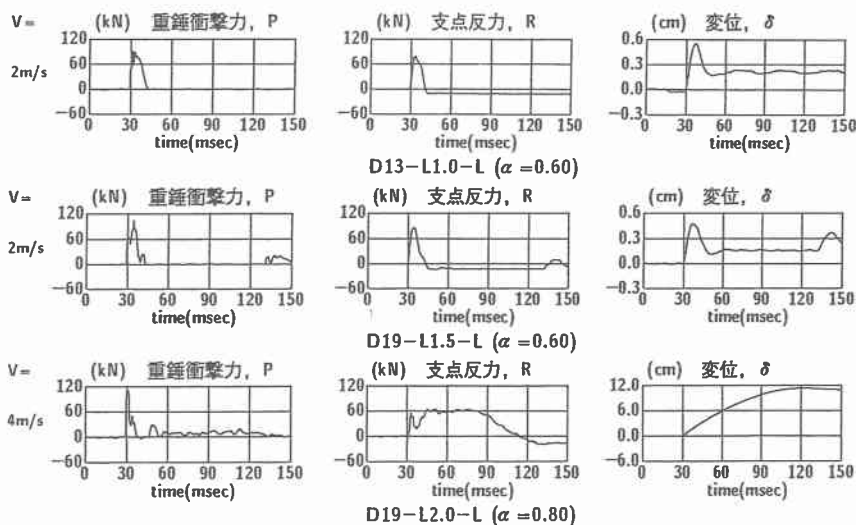
3.2 重錘衝撃力波形、支点反力波形および変位波形

図 - 3 は、各 RC 梁の重錘衝撃力波形、支点反力波形および梁スパン中央部における変位波形を示したものである。ここで、各波形は重錘が RC 梁に衝突する時刻の 30 ms 前の時間を 0 ms とし、150 ms までの時間に対して整理している。なお、支点反力波形は独立に測定した各支点反力を足し合わせた合計としている。また、紙面の都合により、検討は各コンクリート強度に対してせん断余裕度 α が 1.0 以下でかつ純スパン長の異なる計 6 試験体 (D13-L1.0-H,L および D19-L1.5/2.0-H,L) に着目して行うこととした。

まず、重錘衝撃力および支点反力波形に関して検討を行う。図より、D19-L2.0-L の支点反力を除くと、各力の主波動は正弦半波的な波形形状を示していることがわかる。また、D19-L2.0-L を除いたいずれの梁も、各力の波形形状はよく類似している。破壊に至らなかった D19-L2.0-H の各力の主波動継続時間は D19-L2.0-L を除いた他の試験体に比べて若干長く示されている。なお、D19-L2.0-L の支点反力波形は、斜



(a) 高い強度のコンクリートを用いた場合



(b) 低い強度のコンクリートを用いた場合

図 - 3 RC 梁の重錘衝撃力波形, 支点反力波形, 変位波形

めひびわれが大きく開口して試験体が分離したため、非常に周期の長い応答を示したものと考えられる。

次に、変位波形に関して検討を行う。図より、D19-L2.0-L を除き荷重載荷時の各変位波形は、重錘衝撃力および支点反力波形と同様に正弦半波的な波形形状を示していることがわかる。このうち、せん断破壊した試験体 D13-L1.0, D19-L1.5 の荷重除荷後の波形は残留変位による直線分布のみとなり、ほとんど振動していないことがわかる。また、破壊しなかった試験体 D19-L2.0-H の場合には、荷重除荷後に振幅が同程度で下に凸の変位応答が示され、周期の長い振動状態を呈していることがわかる。なお、D19-L2.0-L の場合には、荷重が作用している約 120 msec まで変位は増大し、その後残留変位に至っている。

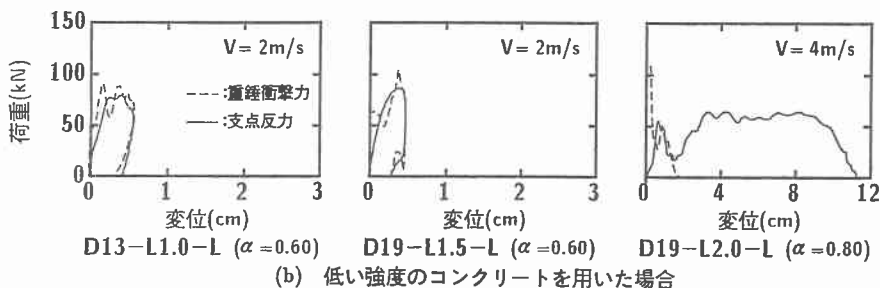
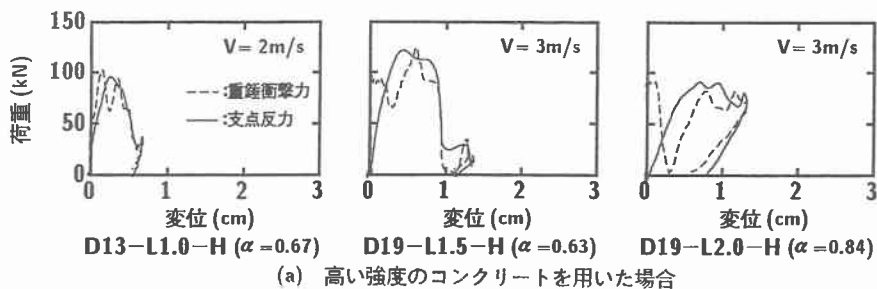


図 - 4 重錘衝撃力および支点反力と梁スパン中央部変位の関係

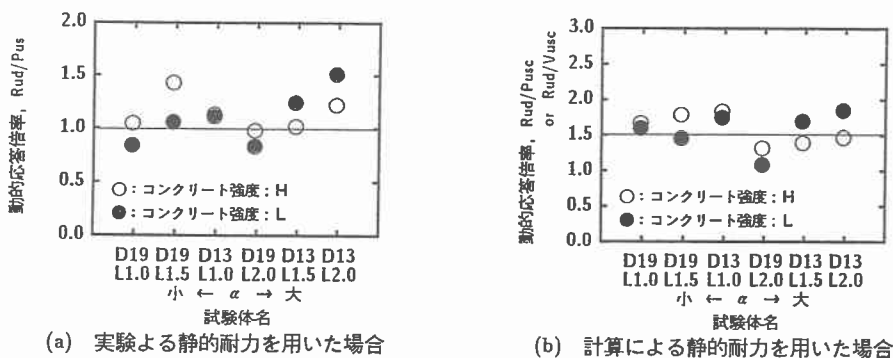


図 - 5 各 RC 梁の動的応答倍率

3.3 重錘衝撃力および支点反力と梁スパン中央部変位の関係

図 - 4 は、各 RC 梁の重錘衝撃力 P および支点反力 R と梁スパン中央部変位 δ の関係を示したものである。ここでも、前節の検討同様 D13-L1.0-H,L および D19-L1.5/2.0-H,L の計 6 試験体に着目して検討を行うこととした。純スパンが短くかつせん断余裕度 α が小さい D13-L1.0 および D19-L1.5 では、支点反力は重錘衝撃力と大略類似した性状を示していることがわかる。また、各力は変位が小さい段階で最大値に達した後急激に除荷され、脆性的な荷重 - 変位関係を示している。これは、これら RC 梁の破壊形態がせん断破壊であることに関連している。一方、純スパンの長い試験体 D19-L2.0 では、低い強度のコンクリートを用いた L 梁の場合にはひびわれが開口して梁が二分されるようなせん断破壊を示したため、開口部鉄筋がヒンジ状態となり、支点反力は最大値程度の荷重を持続した状態で変位が増大するあたかも曲げ破壊型 RC 梁の挙動に類似した性状を示している。これに対し、破壊に至らなかった H 梁では荷重除荷後の変位の戻りがみられ、その荷重 - 変位関係は既往の曲げ破壊型 RC 梁と類似した平行四辺形 [1,2] を示している。

3.4 RC 梁の動的応答倍率

図-5 は、各 RC 梁の動的応答倍率をせん断余裕度 α の小さい順に示したものである。ここで動的応答倍率とは、最大支点反力 R_{ud} を実験より得られた静的耐力 P_{usc} および計算より得られた静的耐力 V_{usc} あるいは P_{usc} で除すことにより求めた値である。(a) 図より、純スパンが長くかつせん断余裕度が 1.0 以上で曲げ破壊した試験体 D13-L2.0-L の動的応答倍率は約 1.5 であることがわかる。また、純スパンが長い場合でもせん断余裕度が 1.0 以下でせん断破壊した試験体 D19-L2.0-L の動的応答倍率は 1.0 以下であることがわかる。これは、動的応答倍率が RC 梁の破壊形態と密接に関連することを示している。このような観点から考察すると、曲げ・せん断破壊した D13-L1.5-L の動的応答倍率が 1.0 以上を示し、せん断破壊した他の試験体のそれが D19-L1.5-H を除いて大略 1.0 程度の値を示すことは、妥当であるものと判断される。なお、(b) 図より、計算による静的耐力を用いた場合の各 RC 梁の動的応答倍率は D19-L2.0-L で 1.0 程度と最も小さく、平均的には 1.5 程度であることがわかる。

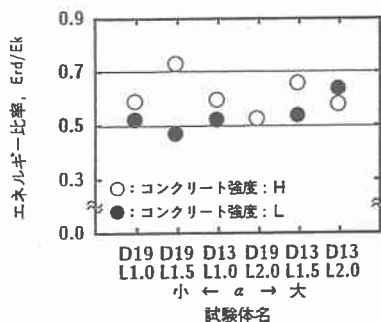


図-6 各 RC 梁のエネルギー比率

3.5 RC 梁のエネルギー比率

図-6 には、支点反力より求まる吸収エネルギー E_d を載荷エネルギー E_k で除すことにより算出した各 RC 梁のエネルギー比率を示している。なお、D19-L2.0-L の吸収エネルギー比率は試験体の著しい損傷により非常に大きな値を示したため、本考察からは除外することとした。図より、本 RC 梁のエネルギー比率は、純スパン長、主鉄筋径およびコンクリート強度に関わらず、概ね 0.5 ~ 0.7 の範囲内にあることがわかる。

4. まとめ

本研究では、せん断が卓越する RC 梁に関する合理的な耐衝撃設計法を確立するために、主としてせん断余裕度が 1.0 以下である RC 梁 12 体の単一載荷による重錘落下衝撃実験を行い、各種応答波形および動的応答倍率とエネルギー比率に関する検討を試みた。得られた結果を要約すると、

- (1) せん断余裕度 α が 0.8 以下の RC 梁は、衝撃荷重載荷時において明瞭なせん断破壊を呈する。
- (2) 重錘衝撃力と支点反力波形の主波動は正弦半波的な分布を示し、両者で大略類似する。
- (3) 荷重載荷時の変位波形は重錘衝撃力および支点反力波形と同様な分布を示す。また、せん断破壊する場合には除荷後の波形が残留変位による直線分布のみとなる。
- (4) 純スパンが短くかつせん断余裕度が小さいせん断破壊型 RC 梁の荷重 - 変位曲線は、重錘衝撃力と支点反力の場合で大略一致する。
- (5) せん断余裕度が 1.0 程度以下でせん断破壊型となる RC 梁の動的応答倍率は、実験による静的耐力を用いた場合には大略 1.0 程度、計算による静的耐力を用いた場合には大略 1.5 程度である。
- (6) せん断余裕度が 1.0 程度以下でせん断破壊型となる RC 梁のエネルギー比率は、概ね 0.5 ~ 0.7 である。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 安藤智啓, 三上 浩, 松岡健一: RC 梁の耐衝撃性に及ぼす断面寸法の影響, 第 4 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 1998.
- 2) 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.2, 1998.