

I-78

鋼・コンクリート合成梁の重錘落下衝撃実験

室蘭工業大学	正員	岸 徳 光
北海道開発局	正員	今 野 久 志
ショーボンド建設(株)	正員	温 泉 重 治
室蘭工業大学	○学生員	南 出 賢 司

1. はじめに

現在、落石覆道は RC 製や PC 製が多く用いられている。一方、今後の労働者不足に対応するためや、経費削減、工期短縮をはかるためには、落石規模の大型化に対しても対処できる緩衝システムの開発や構造型式の開発が重要である。三層緩衝システムは衝撃荷重低減、荷重分散効果に優れた緩衝システムであり、覆道の小型化を可能にしている。また、PC 構造は工場製作が可能で労働者不足に対処可能な構造形式の一つであるものと考えられる。

本研究では、新しい覆工構造として鋼・コンクリート合成構造形式を取り上げ、重錘落下衝撃実験によってその可能性について検討を行った。本研究では、まず最も単純な梁構造について検討を行うことにし、梁幅 60 cm、純スパン長 3.6 m の合成梁を製作して室内実験を行い基礎的な資料を収集することとした。

2. 実験概要

2.1. 試験体概要および実験ケース

図-1 には、実験に用いた試験体の形状寸法および歪ゲージ貼付位置を示している。試験体は全長 3.9 m、純スパン長 3.6 m、梁高 10.9 cm、梁幅 60 cm の矩形断面でコンクリート上下縁に鋼板を設置したサンドイッチ構造の合成梁である。使用したコンクリートの強度は材令 21 日で 30 MPa であった。鋼板は上下ともに SS400、厚さ 4.5 mm であり、降伏強度は 343 MPa であった。また、軸方向および断面方向には上下鋼板およびコンクリート間の一体化を図るため 20 cm ピッチに D19 (M16) ボルトを配置し、それに軸力 49 kN を導入することにより上下鋼板を連結している。

表-1 には試験体名、実験ケースを一覧にして示している。実験は静的耐力確認のための静載荷実験を 1 体、耐衝撃性確認のための重錘落下衝撃実験を繰り返し載荷 1 体、単一載荷 3 体の合計 5 体について行った。試験体名の第 1 項目は載荷方法 (S: 静載荷, II: 衝撃繰り返し載荷, IS: 衝撃単一載荷) を、単一載荷における第 2 項目は載荷速度を表している。本実験における測定項目は重錘衝撃力、支点反力、上下鋼板の歪、および載荷点変位である。

また、実験終了後には試験体のひび割れ状況を記録している。歪は上下鋼板ともに載荷位置より軸方向に 20 cm ピッチに測定した。載荷位置における歪は 2 点測定しているが、後述の検討に用いた載荷位置の歪は片側 1 点のみの値を使用している。なお、載荷位置における歪の値は断面方向左右でほぼ同等であった。

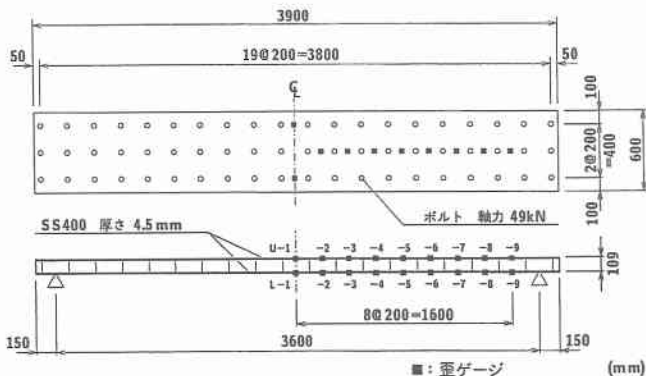


図-1 試験体形状寸法

Impact Test on Concrete-Steel Composite Beam by Weight Falling Method
by Norimitsu KISHI, Hisashi KONNO, Sigeji ONSSEN and Masashi MINAMIDE

2.2. 実験方法

(1) 静載荷実験

静的荷重は載荷治具を用い、断面方向に全幅、スパン方向中央部に 10 cm の部分分布荷重が作用するようにして、油圧ジャッキにより加圧し載荷している。また、支点部は単純支持状態としている。実験は油圧ジャッキのストロークが限界 (15 cm) に達した時点で終了とした。

(2) 重錘落下衝撃実験

衝撃荷重は質量 400 kg、直径 15 cm 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梁スパン中央部に載荷している。試験体には局部破壊防止および重錘とボルトの衝突を避けるため、厚さ 10 cm の敷砂を緩衝材として設置している。支点は回転自由のシャフトを用いて、ピン支持に近い状態にしている。さらに重錘衝突時における試験体の跳ね上がりを防止するため、支点部にはリバウンド防止用治具を設置している。

載荷方法は載荷速度を $V = 1 \text{ m/sec}$ から 1 m/sec 刻みに増加させ、試験体が破壊に至るまで載荷する繰り返し載荷実験とその最終速度および最終速度 + 1, +2 m/sec の速度で載荷する単一載荷実験の 2 種類について行った。なお、繰り返し載荷実験時における破壊基準は累積残留変位が純スパン長の 2% (7.2 cm) を超えた時点とした。

3. 静載荷実験の実験結果

3.1. 荷重 - 変位曲線およびひび割れ状況

図-2 には、実験結果と断面分割法によって求めた計算結果による荷重 - 変位曲線を比較して示している。計算結果には上下鋼板が完全付着状態にあると仮定した場合と、上鋼板を無視し下鋼板のみ完全付着状態にあると仮定した場合を示している。なお、断面分割法の計算には、コンクリート、鋼板の強度に関しては全て材料試験値を用い、断面方向に 22 分割、スパン方向に 10 分割とした。また、表-2 には最大荷重と最大変位を一覧にして示している。図、表より、サンドイッチ梁は荷重の増加とともに上鋼板がコンクリートと分離する傾向にあり、静載荷時の終局時には上鋼板の強度がそれほど期待できないことがわかる。

図-3 には、静載荷実験における終局時の残留変形状態およびひび割れ状況を示している。図より、載荷点で角折れ状態になっていることがわかる。

表-1 実験ケース一覧

試験体名	載荷方法	緩衝材	重錘質量 (kg)	載荷速度 (m/sec)
S	静的	—	—	—
II	衝撃繰り返し	敷砂 10cm	400	1～8
IS-8～10	衝撃単一			8
				9
				10

表-2 実験結果と断面分割法による計算結果の比較

比較項目	実験結果	計算結果	
		上下鋼板考慮	上鋼板無視
最大荷重 (kN)	87.1	108.0	76.5
最大変位 (cm)	14.2	11.6	4.5

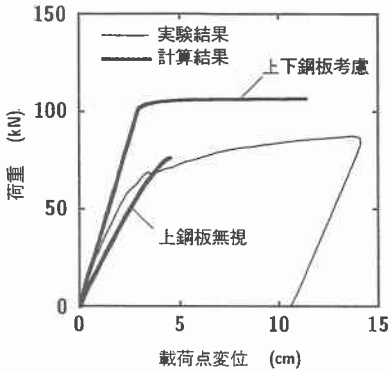


図-2 静載荷時における荷重変位曲線

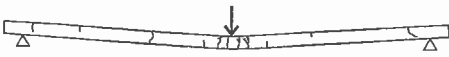
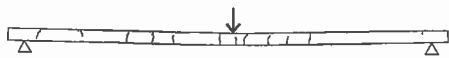


図-3 静載荷時におけるひび割れ状況



(a) 繰り返し載荷



(b) 単一載荷 (V = 8 m/sec)

図-4 衝撃載荷実験時におけるひび割れ状況

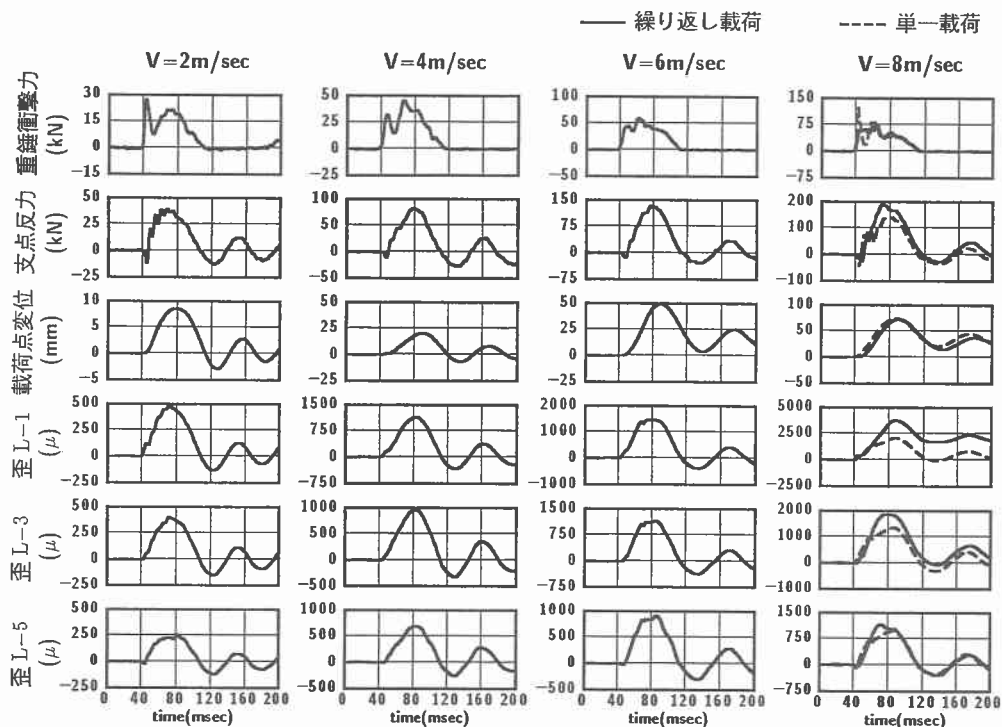


図-5 繰り返し載荷時 ($V = 2, 4, 6, 8 \text{ m/sec}$) および単一載荷時 ($V = 8 \text{ m/sec}$) における各応答波形

4. 重錘落下衝撃実験の実験結果

4.1. ひび割れ状況

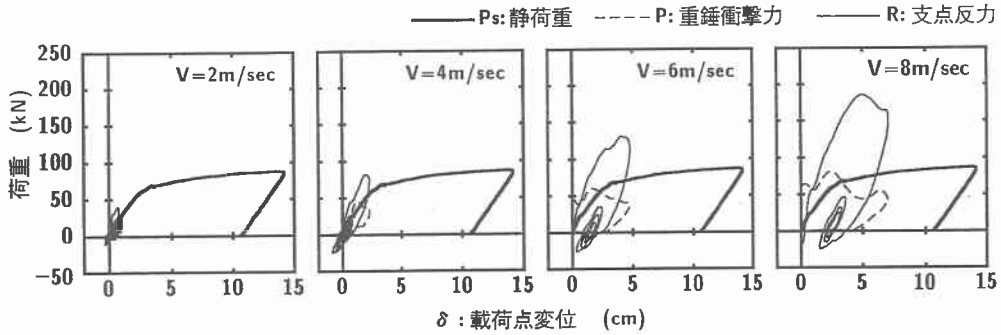
図-4には繰り返し載荷実験終了後および単一載荷実験 ($V = 8 \text{ m/sec}$ 時) のひび割れ状況を示している。図より、繰り返し載荷、単一載荷ともに、静載荷時に比べひび割れが広範囲にわたっていることがわかる。これは、梁高が小さいことより膜構造的な挙動を示すためと推察される。しかしながら、繰り返し載荷時におけるひび割れ性状は静載荷時とは類似しており、梁は角折れ状態になっている。また、単一載荷時における残留変形は静載荷時、繰り返し載荷時に比べ小さく、損傷の度合いが小さいことがわかる。

4.2. 各種応答波形

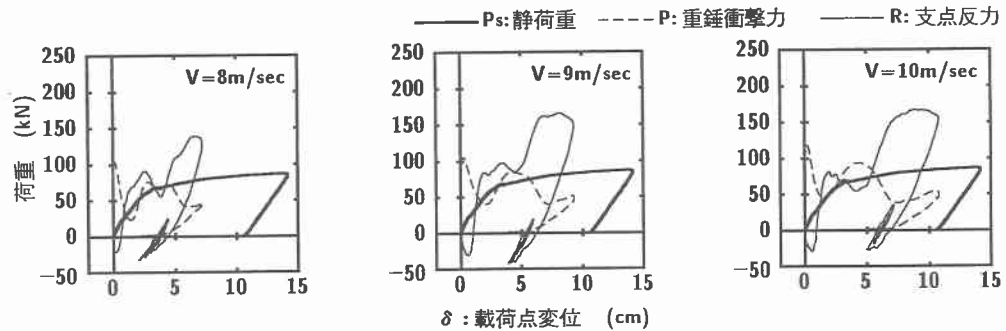
図-5には、繰り返し載荷時の載荷速度 $V = 2, 4, 6, 8 \text{ m/sec}$ における重錘衝撃力、合支点反力 (両支点反力の合力、以後単に支点反力)、載荷点変位 および L-1, -3, -5 での下縁歪波形を示している。また、 $V = 8 \text{ m/sec}$ の場合は、単一載荷実験の結果も併せて示している。なお、各波形は、重錘衝突の 40 msec 前を基準にして 200 msec 間で示している。

図より、各波形とも主波動継続時間が載荷速度の増大とともに約 70 msec から 80 msec と延びていることがわかる。また、重錘衝撃力は第 1 波目の入力後 80 msec 経過後まではリバウンドによる入力が見られない。一方、重錘衝撃力以外の他の応答波形は、第 1 波目の衝撃荷重入力後にすでに自由振動が励起されている。その固有振動周期は載荷速度が小さい場合で 57 msec 前後である。しかしながら、塑性化の進行により最終載荷速度である $V = 8 \text{ m/sec}$ では 86 msec 前後と 1.5 倍程度延びている。

各応答波形の波形性状についてみると、重錘衝撃力波形の場合は、載荷速度 $V = 2 \text{ m/sec}$ 時より衝撃初期に立ち上がりが急激で振幅が大きく、かつ周期が短い高周波成分が励起されている (第 1 波)。高周波成分の出現後は、周期の比較的長い第 2 波目が生じている。しかしながら、この第 1 波目の高周波成分は載荷



(a) 繰り返し載荷 ($V = 2, 4, 6, 8 \text{ m/sec}$)



(b) 単一載荷 ($V = 8, 9, 10 \text{ m/sec}$)

図-6 荷重 - 変位曲線

速度 V の増加とともに第 2 波目に吸収される形となっている。一方、支点反力波形はほぼ線形的に振幅が増大し、最大応答値発生後に初期勾配と類似の勾配で除荷されている。すなわち、初期半波の分布は高周波成分の少ない正弦半波的な形状を示している。また、この支点反力波形の波形形状は、載荷点変位波形および各歪波形のそれによく対応している。さらに、載荷点変位および歪波形分布をみると、変位波形は $V = 6 \text{ m/sec}$ のレベルで残留変位が発生している傾向を示しているが、歪波形は $V = 6 \text{ m/sec}$ の段階で著しい残留歪の傾向が見られない。 $V = 8 \text{ m/sec}$ では載荷点部下縁において $2,000 \mu$ 程度以上の著しい残留を示している。しかしながら、L-3 および L-5 では残留歪がほとんど発生していない。これより、繰り返し載荷時には載荷点近傍部にのみ損傷が集中する傾向にあることが明らかとなった。

次に、載荷速度 $V = 8 \text{ m/sec}$ における繰り返し載荷と単一載荷の各応答波形を比較する。図より、重錘衝撃波形の場合には衝撃初期における分布が両者で異なるものの、この衝撃初期を除くと大略類似した分布形状を示していることがわかる。また、支点反力波形の場合には最大応答値が繰り返し載荷の場合で多少大きく示されているが、波動の立ち上がりから両者で比較的類似した分布を示している。さらに、載荷点変位波形および各歪波形では、L-1、-3 において残留歪成分の違いによる振幅の差が示されているものの、波動の立ち上がり勾配、最大応答値および周期等は、大略類似している。

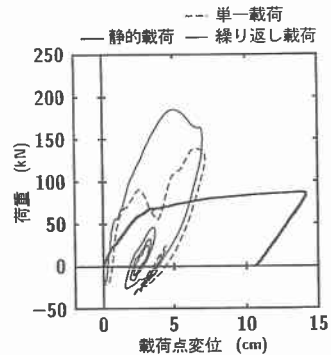


図-7 繰り返し載荷と単一載荷の比較 ($V = 8 \text{ m/sec}$ における $R - \delta$ 曲線)

4.3. 荷重-変位曲線

図-6には、繰り返し載荷および単一載荷の各載荷速度における重錘衝撃力と載荷点変位の履歴曲線（以下、 $P-\delta$ 曲線）および支点反力と載荷点変位の履歴曲線（以下、 $R-\delta$ 曲線）を示している。また、図中には静載荷実験の結果（以下、 $P_s-\delta$ 曲線）も併せて示している。

図より、 $P-\delta$ 、 $R-\delta$ 曲線のループのなす面積は、載荷速度 V の増加とともに増大

していることがわかる。このうち、 $P-\delta$ 曲線についてみると、重錘衝撃力は載荷方法に関わらず、変位のほとんど生じていない段階で急激に励起されていることがわかる。その後は増減を繰り返しながら変位が増大し、最大変位到達後零まで減少している。しかしながら、最大重錘衝撃力発生時の変位量は載荷方法により異なっている。すなわち、繰り返し載荷の場合には、最大重錘衝撃力は変位が最大変位の $1/3$ 程度に達した時点で発生している。一方、単一載荷の場合には、変位がほぼ零の時点において発生している。また、単一載荷における重錘衝撃力は最大値を示した後一旦大きく減少する傾向が見られる。

次に、 $R-\delta$ 曲線についてみると、繰り返し載荷の場合には、支点反力はほぼ線形的に増大し、最大応答値発生後に初期剛性程度の勾配で除荷している。一方、単一載荷の場合には、変位が最大応答変位発生まで単調に増加しているものの、支点反力は衝撃初期に負載荷状態に陥りその後静的耐力程度まで上昇し、一旦一定値で持続傾向を示した後に再び上昇し、最大支点反力値に達する。その後は単調に零レベルまで除荷されている。なお、単一載荷において、静的耐力程度まで達した支点反力が一旦持続状態を示した後再び増大する性状は、支点反力波形に高次振動波形が含まれていることと変位波形と支点反力波形に若干の位相差が生じていることに起因しているものと推察される。また、繰り返し載荷の支点反力に上記のような分布が示されないのは、載荷点部の塑性化の進行とともに、支点反力に含まれる高次振動モーメント成分が小さく、変位波形と類似の性状となっているためと考えられる。

図-7には、載荷速度が $V = 8 \text{ m/sec}$ 時における各載荷方法の $R-\delta$ 履歴曲線を比較して示している。図より、最大応答変位発生時における支点反力の値は、繰り返し載荷および単一載荷の場合で 150 kN と大略類似していることがわかる。しかしながら、最大支点反力発生時における変位量は載荷方法により異なっている。すなわち、最大支点反力は繰り返し載荷の場合で変位 5 cm 程度、単一載荷の場合で 7 cm 程度である。また、最大支点反力は、繰り返し載荷および単一載荷の場合で静的耐力のそれぞれ 2 倍、 1.5 倍程度大きい値を示している。なお、支点反力に関する各載荷方法でのこれらの差異は塑性化の進行程度を含む各履歴曲線の分布が異なることに起因しているものと考えられる。

4.4. 曲げモーメント分布

図-8には、載荷速度 $V = 8 \text{ m/sec}$ 時での繰り返し載荷および単一載荷における曲げモーメントの経時変化を示している。図中、上側を負値、下側を正值として示している。なお、ここに示す曲げモーメントは、鋼板の上下縁歪より断面の平面保持を仮定して算出したものである。

図より、繰り返し載荷の場合には、 50 msec 程度までは載荷点部より支点部に向かいほぼ線形的に小さくなる分布を示していることがわかる。また、いずれの測定点の曲げモーメントも $30 \sim 40 \text{ msec}$ 程度で最大値を示し、その後減少に転じている。しかしながら、梁は 80 msec 程度で負載荷状態に至っているにも関わらず、載荷点近傍部の値は未だ正值を示している。これより、載荷点近傍部の鋼板は降伏し残留歪が生じているものと考えられる。

一方、単一載荷の場合には、初期時間から振動状態に至るまで、曲げモーメント分布が載荷点部より支点

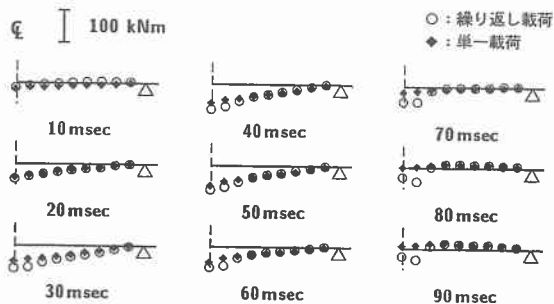


図-8 モーメント分布の経時変化 ($V = 8 \text{ m/sec}$)

部に向かい線形的に小さくなる分布を示している。従って、繰り返し載荷時に生じた載荷点近傍での鋼板の残留歪はほとんど発生していないものと判断される。なお、周期に関しては、載荷方法に関わらず両者で大略類似していることがわかる。

4.5. 最大支点反力および最大変位と載荷速度の関係

図-9には、最大支点反力 $R_{\max}$ および最大変位 $\delta_{\max}$ と載荷速度

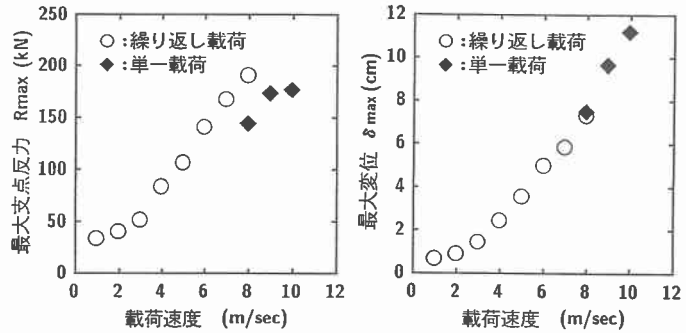
V の関係を示している。図中には繰り返し載荷および単一載荷の結果をそれぞれ○印、◆印として表している。(a)図より、繰り返し載荷における $R_{\max}$ は $V = 6$ m/sec 程度の時点まで V の増加とともに指数関数的に増大していることがわかる。しかしながら、 $V = 7, 8$ m/sec と梁の損傷が著しくなってくる時点では、 $R_{\max}$ の増分は若干小さくなっている。一方、単一載荷の場合には $R_{\max}$ は、繰り返し載荷における $R_{\max}$ と V の分布線より下側に分布している。また、 $V = 9$ m/sec から $V = 10$ m/sec における $R_{\max}$ の増分がほぼ零となっている。これより、サンドイッチ梁はこの時点で載荷点部で角折れするような著しい損傷状態に至っているものと推察される。

(b)図より、繰り返し載荷の最大変位 $\delta_{\max}$ は、載荷速度 $V = 1$ m/sec 時から $V = 8$ m/sec 時まで V の増加とともに指数関数的に増大していることがわかる。これは、最大支点反力で示された傾向にほぼ対応している。また、単一載荷の $\delta_{\max}$ は、繰り返し載荷における $\delta_{\max}$ と V の分布線上に分布している。

5. まとめ

本研究では、鋼・コンクリート合成梁の耐衝撃性に関する基礎資料を得ることを目的として、全長 3.9 m、純スパン長 3.6 m、梁高 10.9 cm、梁幅 60 cm のサンドイッチ梁を用いた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、

- 1) サンドイッチ梁は荷重の増加とともに上鋼板がコンクリートと分離する傾向にあり、静載荷時の終局時には上鋼板の強度がそれほど期待できない。
- 2) 梁高さが小さいことより、繰り返し載荷、単一載荷ともに膜構造的に挙動し、静載荷時に比べひび割れが広範囲にわたっている。また、繰り返し載荷時におけるひび割れ性状は静載荷時とほぼ類似しており、載荷点部における角折れ状態を示す。
- 3) 重錘衝撃力波形には、衝撃初期に立ち上がりが急激で振幅が大きい高周波成分が励起される。
- 4) 支点反力波形は衝撃初期に高周波成分の少ない正弦半波的な形状を示す。また、この支点反力波形の波形形状は、載荷点変位波形および各歪波形のそれによく対応している。
- 5) 重錘衝撃力は載荷方法に関わらず、変位のほとんど生じていない段階で急激に励起される。
- 6) 支点反力は変位初期では変位の増加とともにほぼ線形的に増大する。しかしながら、その後の分布形状は載荷方法により異なる。
- 7) 梁に発生する曲げモーメントは載荷点から支点に向かいほぼ線形的に小さくなる分布を示す。最終的には、載荷点部近傍の鋼板が降伏し終局に至る。
- 8) 最大支点反力および最大変位は載荷速度の増加とともに指数関数的に増大する。なお、単一載荷における最大支点反力は繰り返し載荷におけるそれより小さく示される傾向にある。



(a) 最大支点反力

(b) 最大変位

図-9 繰り返し載荷と単一載荷の比較