

論文 鋼・コンクリート合成梁の衝撃挙動に関する実験的研究

木下昌樹*1・今野久志*2・岸 徳光*3・温泉重治*4

要旨：工期短縮および経費削減に有利である上下鋼板と充填コンクリートから成る合成構造の耐衝撃挙動を把握することを目的として、最も単純な梁構造に関する重錘落下衝撃実験を行った。その結果、1) 上下鋼板でサンドイッチしていることより、延性に富んだ低次振動モードが卓越し、静載荷時に比べてひび割れが広範囲に分散する、2) 単一載荷時における最大支点反力は慣性力の効果により静的耐力の2倍程度であり、衝撃力-変位曲線における第2極大値は静的耐力値と同程度である、等が明らかとなった。

キーワード：鋼・コンクリート合成構造, サンドイッチ構造, 耐衝撃性, 落石覆工

1. はじめに

現在、落石覆工は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、工期短縮を図るためには、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、覆工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。一方、著者等は新しい覆工構造として

鋼・コンクリート合成構造型式を取り上げ、実規模実験によりその妥当性を確認している¹⁾。

本研究では、本合成構造型式の合理的な耐衝撃設計法を確立するための基礎資料を得ることを目的として、梁型式（以下、合成梁）とした場合の重錘落下衝撃実験を行った。本研究では合成梁の小型模型5体を製作し、静載荷実験の他、質量400 kgの重錘を用いた重錘落下方式によって繰り返し載荷および単一載荷実験を行い、耐衝撃特性に関する検討を行っている。

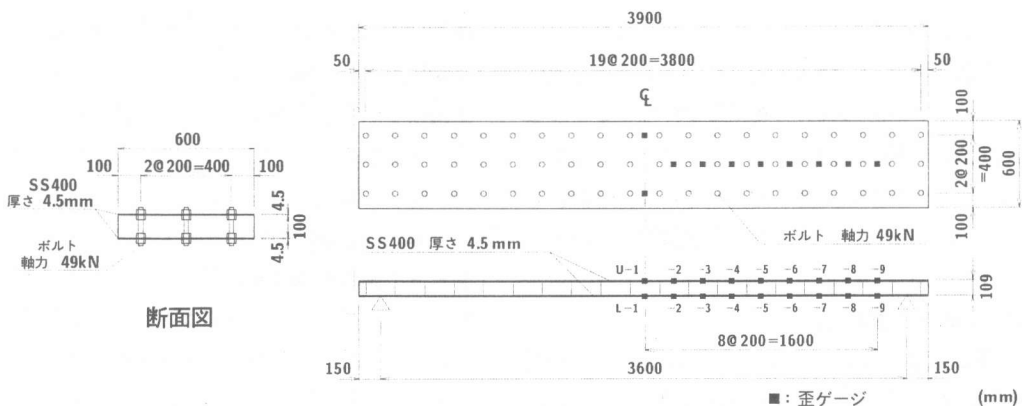


図-1 試験体形状寸法

*1 ショーボンド建設(株) 本社 技術部 (正会員)
 *2 北海道開発局開発土木研究所 研究員 構造研究室 工修 (正会員)
 *3 室蘭工業大学 教授 工学部建設システム工学科 工博 (正会員)
 *4 ショーボンド建設(株) 北海道支店 技術部部長 (正会員)

2. 実験概要

2.1 試験体概要および実験ケース

図-1には、実験に用いた鋼・コンクリート合成梁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、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 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緊結し構造部材としての一体化を図っている。

表-1には、実験ケースを一覧にして示している。実験は静載荷実験 1 体, 耐衝撃挙動検討のための重錘落下衝撃実験 4 体 (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。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。スパン中央部の歪は載荷点を中心として幅方向の左右対称点について測定している。しかしながら、両者の応答性状がほぼ等しいことより、片側 1 点のみの値を用いて考察している。

2.2 実験方法

(1) 静載荷実験

静載荷実験は、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な載荷用具を用い、油圧ジャッキにより載荷している。支点部は単純支持状態としている。なお、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および重錘とボルトとの衝突を防止するため、厚さ 10 cm の敷砂を緩衝材として設置している。また、試験体は反力測定用ロードセルが取り付けられた支点治具上に設置している。治具に

表-1 実験ケース一覧

載荷方法	緩衝材	重錘質量 (kg)	衝突速度 (m/sec)
静載荷	-	-	-
繰り返し載荷	敷砂 厚さ 10cm	400	1~8
単一載荷			8
			9
			10

は試験体の跳ね上がり防止用具も取り付け、回転のみを許容し単純梁に近い構造になっている。

載荷方法は衝突速度を $V = 1$ 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過去の曲げ破壊型 RC 梁に関する実験と同様、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

図-2には、実験結果と断面分割法により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。実験終了後の載荷点近傍部鋼板の打音検査の結果、上鋼板とコンクリートが分離している箇所が確認されていることより、数値計算では上下鋼板が完全付着状態にあると仮定する場合と、上鋼板を無視し下鋼板のみ完全付着状態にあると仮定する場合について検討している。なお、断面分割法による曲げモーメント-曲率関係および変位の算定は、通常材料試験より得られたコンクリート、鋼板の強度を採用し、断面方向に 22 分割、スパン方向に 10 分割することにより実施している。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、実験値は計算値の上鋼板を考慮した場合と上鋼板を無視した場合の間に位置していることがわかる。このことより、合成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、静載荷時の終局耐力に対しては上鋼板の強度がそれほど期待でき

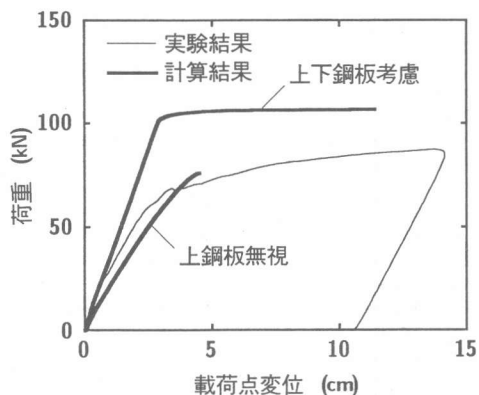


図-2 静載荷時の荷重 - 変位曲線

表-2 静載荷時の実験結果と計算結果の比較

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

ないことがわかる。しかしながら、上下鋼板を考慮する場合の計算結果は実験結果の残留変位程度まで変形が進展しており、20 cm ピッチに配置したボルトおよび上鋼板の効果によって上縁コンクリートの圧壊が防止され延性に富んだ構造特性を再現していることがわかる。

図-3には、静載荷実験における終局時の残留変形およびひび割れ状況を示している。図より、静載荷時には載荷点部に損傷が集中し、角折れ状態になることがわかる。

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および単一載荷実験 ($V = 8 \text{ m/sec}$ 時) 終了後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分散していることがわかる。これは、梁高が小さいことおよび上下鋼板によって曲げ剛性が確保されることにより、延性に富んだ低次振動モードが卓越するためと推察される。しかしながら、繰り返し載荷終了後の梁は載荷点近傍部の劣化が進行し、静

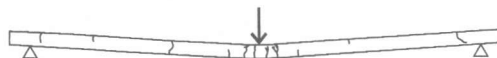
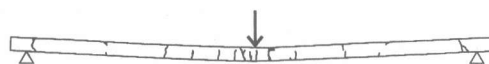
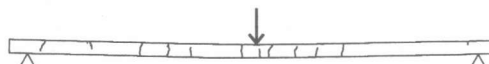


図-3 静載荷時の終局時ひび割れ状況



(a) 繰り返し載荷 ($V = 8 \text{ m/sec}$ 終了後)



(b) 単一載荷 ($V = 8 \text{ m/sec}$)

図-4 衝撃載荷実験時におけるひび割れ状況

載荷時と同様に角折れ状態になっていることがわかる。一方、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て小さく、角折れ現象も現れず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、繰り返し載荷時の衝突速度 $V = 2, 4, 6, 8 \text{ m/sec}$ 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、 $V = 8 \text{ m/sec}$ の場合には、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 間について示している。

図より、各波形とも主波動継続時間が衝突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。重錘衝撃力は継続時間が 80 msec 程度の半周期の波動終了後約 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すでに自由振動が励起されている。その固有振動周期は衝突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衝突速度である $V = 8 \text{ m/sec}$ 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を詳細にみると、重錘衝撃力波形の場合には、衝突速度 $V = 2 \text{ m/sec}$ 時において、衝撃初期に立ち上がり急激で振幅が大

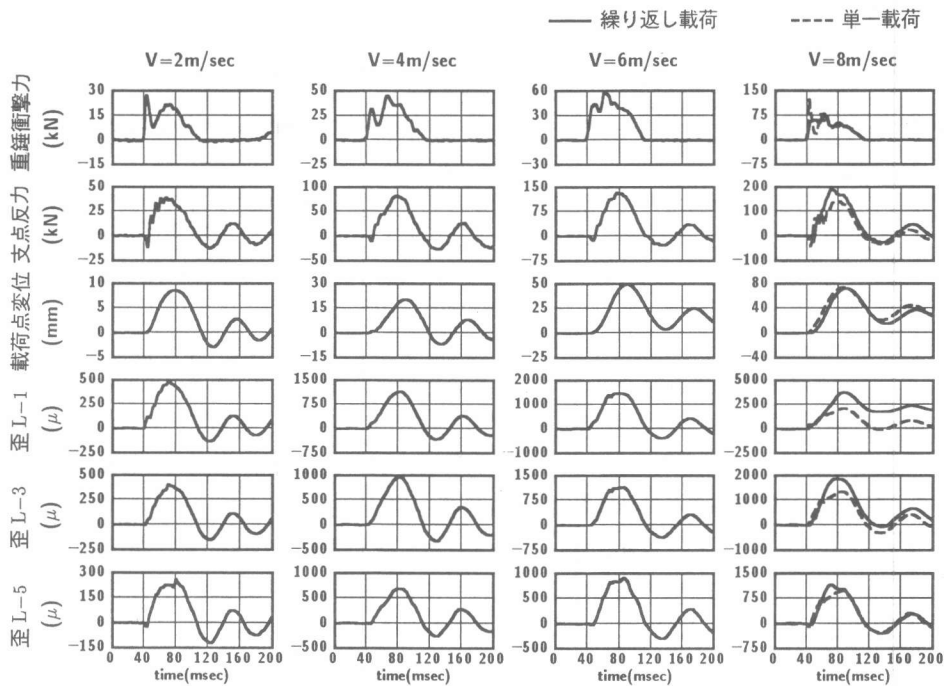
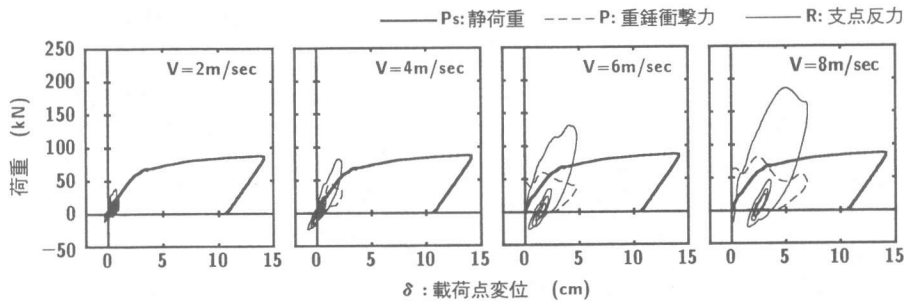


図-5 繰り返し載荷時 ($V=2, 4, 6, 8$ m/sec) および単一載荷時 ($V=8$ m/sec) における各応答波形

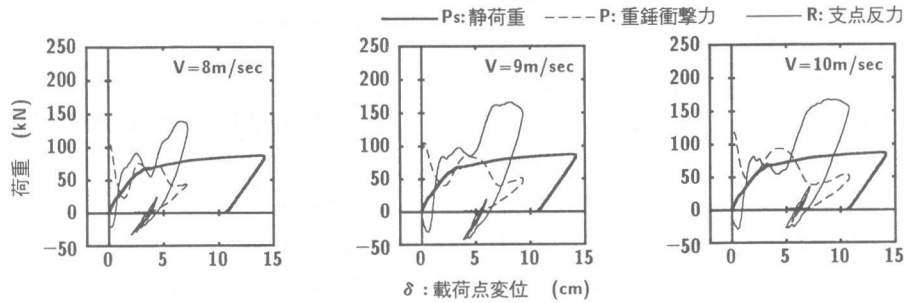
きくかつ継続時間が短い波形が励起されている(第1波)。この波形の出現後は、継続時間の比較的長い第2波目が生じている。しかしながら、この第1波目の波形成分は衝突速度 V の増加とともに第2波目に吸収される形となっている。一方、支点反力波形は重錘衝撃力の継続時間と同程度の正弦半波状の波形を示し、その後振幅の小さな自由振動状態に移行している。さらに、載荷点変位および歪波形分布をみると、変位波形は $V=6$ m/sec のレベルで残留変位が発生する傾向を示しているが、歪波形は $V=6$ m/sec の段階では残留歪の傾向が見られない。 $V=8$ m/sec では載荷点部下縁において $2,000 \mu$ 程度の残留歪を示している。しかしながら、 $L-3$ および $L-5$ ではそれほど大きな残留歪は発生していない。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わかる。

次に、衝突速度 $V=8$ m/sec における繰り返し載荷と単一載荷時の各応答波形を比較する。重錘衝撃力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。なお、単一載荷時の衝撃初期における振幅が大きく継続時間の短い波形は、繰り返し載荷時の $V=2$ m/sec における結果と類似の性状を示している。これは、いずれの場合も合成梁の載荷点近傍部が健全であるため、衝撃初期には載荷点近傍部のみで衝撃力に抵抗することによるものと考えられる。また、支点反力波形に関しては、最大応答値が単一載荷時に比較して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に関しては、 $L-1, -3$ の各歪波形に直流成分の差が示されているものの、波動の立ち上がり勾配、周波数特性は両実験で大略類似している。なお、歪波形における直流成分の差異は $L-1$ で $2,000 \mu$ 程度となっているものの、 $L-5$ においてはほぼ零となっており、繰り返し載荷による損傷は局所的であることがわかる。また、応答波形の周波数特性が類似していることより、合成梁全体としての損傷度合いは入力エネルギーが同一であれば実験方法によって類似していることがわかる。



(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

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衝突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。

繰り返し載荷時の結果を考察すると、 $P-\delta$ 、 $R-\delta$ 曲線のループのなす面積は、衝突速度 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初期段階で急激に励起されていることがわかる。その後は変位の増加とともに増減を繰り返しながら推移し、最大変位到達後零まで減少している。最大重錘衝撃力は $V \geq 4 \text{ m/sec}$ において、変位が最大変位量の $1/3$ 程度に達した時点で発生している。これは、繰り返し載荷によって載荷点近傍部が劣化していることにより、最大重錘衝撃力は合成梁が低次振動モードに移行した状態で発生し

ていることを意味している。次に $R-\delta$ 曲線についてみると、各衝突速度における支点反力は、載荷点変位に対してほぼ線形的に増大し、最大応答値に達した後初期剛性程度の勾配で除荷している。その後残留変位値近傍で変位振幅が小さくかつエネルギー吸収量の小さい履歴曲線を示している。また、各衝突速度毎の最大支点反力値に着目すると、その最大値は V の増加とともに増大する傾向を示している。その傾向は最大重錘衝撃力値よりも著しい。また、対応する履歴曲線の囲むエネルギー吸収量も同様の増加傾向を示している。これは、合成梁の梁高が小さく曲げ剛性も低減しているにも関わらず、サンドイッチ構造によって梁の劣化が抑制されているため、入力エネルギーの増加に対して常に類似の低次振動モードが励起され慣性力も増加するためと考えられる。

一方、単一載荷の場合には、 $P-\delta$ 曲線より、いずれの衝突速度 V に対しても最大重錘衝撃力は応答変位零の時点で発生していることがわかる。これは、繰り返し載荷時の場合と異なり、載荷履

歴を受けていないことより梁が健全であるため、衝撃初期には載荷点近傍部のみで衝撃力に抵抗するためと推察される。

また、 $R-\delta$ 曲線を見ると、支点反力は繰り返し載荷時と異なった性状を示している。すなわち、衝撃初期には、負反力値を示し、その後正方向に向かい、静的耐力値レベルまで上昇した段階で載荷と除荷現象を示している。変位が最大応答値の1/2程度で再度単調に増加し最大値に達した後零レベルまで除荷している。除荷後は繰り返し載荷時と同様、残留変位値近傍で弾性状態に近い履歴曲線を描いている。衝撃初期の負反力値は梁全体が健全であるため、支点部がリバウンド状態になったためと推察される。また、静的耐力レベルにおける載荷と除荷の現象は載荷点からの衝撃力が支点部に完全に伝達され低次振動モードに移行する過渡領域で、反射波等の作用により載荷状態でリバウンド現象が重ね合わされた状態になったためと考えられる。その後、最大値に達し除荷する現象は繰り返し載荷時と同様、低次振動状態下で慣性力が大きく影響しているものと推察される。

4.4 指標衝撃力と静的耐力の関係

単一載荷時に限定して、指標となる衝撃力値と静的耐力の関係について検討を行う。ここでは図-6の結果を踏まえ、その衝撃力値として重錘衝撃力値に関しては衝撃初期の最大値および最大応答変位の1/2程度の時点で発生している第2極大値、支点反力についても同様に最大値と中間部の第2極大値を取り上げることとする。図-7にはこれらの値を静的耐力で無次元化して示している。図より、重錘衝撃力と支点反力の第2極大値は共に静的耐力と同程度であることがわかる。また、最大重錘衝撃力、最大支点反力値は静的耐力よりも大きく評価され、それぞれ1.4~1.7、1.6~2.0に分布していることがわかる。これより、これら第2極大値あるいは最大支点反力値を設計のための指標衝撃力と仮定し、残留変位およびエネルギー収支関係を定式化することにより、耐衝撃設計が可能になるものと考えられる。

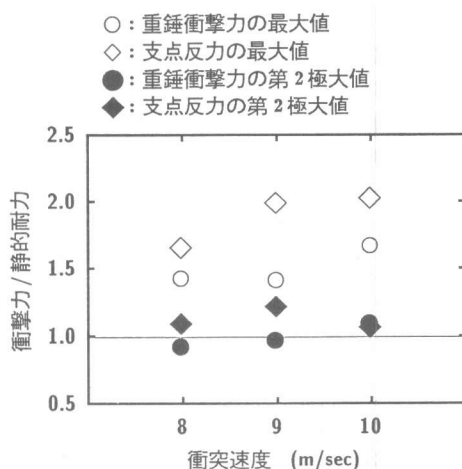


図-7 指標衝撃力と静的耐力の関係

5. まとめ

本実験より得られた結果を要約すると、

- (1) 合成梁は荷重の増加とともに載荷点近傍部の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は完全には期待できない。
- (2) 梁高が小さく曲げ剛性が低減するが上下鋼板でサンドイッチしていることより、梁の劣化が抑制され、延性に富んだ低次振動モードが支配する。その結果、ひび割れ分布も梁全体に分散する。
- (3) 繰り返し載荷時の最大重錘衝撃力は衝突速度の増加とともに静的耐力レベルで徐々に増大するが、支点反力は低次振動状態の慣性力の効果が顕在化し増加率も大きい。
- (4) 終局時近傍における単一載荷時には重錘衝撃力、支点反力とも最大応答変位の1/2程度の状態で現れる第2極大値が静的耐力と類似の値になる。最大支点反力は慣性力の影響により約1.6~2.0倍程度の応答倍率を示す。

参考文献

- 1) 木下昌樹, 今野久志, 佐藤昌志, 岸 徳光: 鋼・コンクリート合成板を用いた落石覆道の開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1591~1596, 1999.