

実規模鋼・コンクリート合成サンドイッチ床版の衝撃耐荷性状

Impact Resistant Behavior of Prototype Concrete-Steel Composite Sandwich Slab

室蘭工業大学
北海道開発局
ショーボンド建設(株)
室蘭工業大学

正員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
正員 今野 久志 (Hisashi Konno)
正員 近藤 悦郎 (Etsuro Kondo)
○学生員 南出 賢司 (Masashi Minamide)

1. はじめに

近年の少子化に伴う、今後の技術者、労働者不足に対処するため、施工の省力化や工期短縮に対応できる構造型式の1つとして、鋼・コンクリート合成構造がある。既に鋼・コンクリート合成構造は、高い靱性能を有しかつ同じ静的耐力を有する RC 構造物に比較して断面を小型化できることより、自重を軽減することが可能であるため、近年道路橋等に採用されるようになってきた。一方、道路落石防護施設の一つとして建設される落石覆道のような耐衝撃用途構造物に関しても、上述のような課題に対処するため新しい構造型式の開発が重要である。

著者等は、これまで鋼・コンクリート合成構造の落石覆道頂版部への適用を目的として、鋼・コンクリート合成梁を用いた室内実験を実施し、その耐衝撃特性に関する基礎的な研究¹⁾を行ってきた。その結果、本構造は上下鋼板でサンドイッチしていることより梁の劣化を抑制し、重錘落下衝撃荷重載荷時には延性に富んだ低次振動モードを示すこと、重錘衝撃力および支点反力の第2極大値が静的耐力と類似の値になること等が明らかになり、

実構造物への適用の可能性を示してきた。しかしながら、実規模レベルの部材を用いた耐衝撃特性の検討や実構造物への適用性に関する検討は未だ十分に行われていない。

本研究では、より実現象に近い状態で鋼・コンクリート合成構造の落石覆道への適用性を検討するために、実規模レベルの鋼・コンクリート合成床版を製作し、野外において大規模な重錘落下衝撃実験を行った。また、落石規模に応じた耐衝撃設計を行うための基礎資料を収集することを目的として、厚さの異なる2種類の試験体に対して実験を行うこととした。

2. 実験概要

2.1. 実験ケースおよび試験体概要

表-1には実験ケース一覧を示している。実験には版厚、使用鋼材およびボルト位置の異なる2種類の試験体を用いている。試験体名は表に示すように版厚の大きい場合をA試験体、小さい場合をB試験体としている。

図-1には、実験に用いた鋼・コンクリート合成床版(以下、サンドイッチ版)の形状寸法および歪ゲージ貼

表-1 実験ケース一覧

試験体名	版厚 (mm)	使用鋼材	計算静的耐力 P_{usc} (kN)	重錘質量 (ton)	緩衝材	落下高さ (m)	最終残留変形 δ_r/l
A	318	上鋼板 SS400 下鋼板 SM490	616.3	3	敷砂 厚さ 900 mm	1 ~ 12	0.0128
B	218	上下鋼板 SS400	310.0			1 ~ 9	0.0168

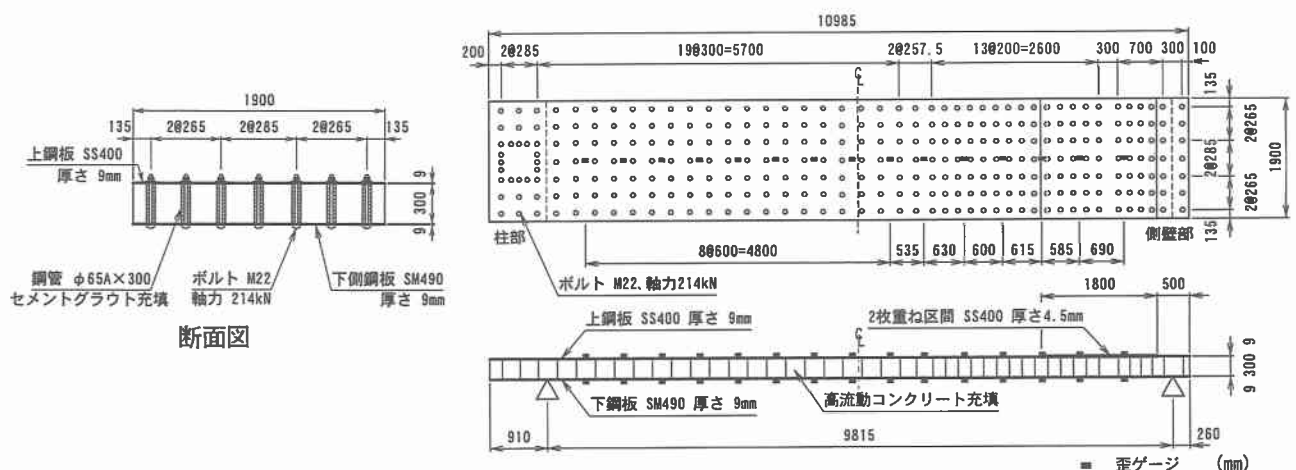


図-1 試験体形状寸法 (A 試験体)

付位置を示している。なお、紙面の都合により、ここではA試験体の場合についてのみを示している。試験体は、全長約 11 m、純スパン約 9.8 m、版幅 1.9 m で、上下 2 枚の鋼板間にコンクリートを充填したサンドイッチ版である。

また、試験体には鋼板とコンクリートの一体化を図るため、A 試験体の場合には図-1 に示す位置に、B 試験体の場合には断面方向およびスパン方向に均一に 300 mm ピッチにボルトを配置し、それに 214 kN/本の軸力を導入することにより緊結している。スペーサーには ϕ 65A のガス管を使用し、ガス管とボルトの間はセメントグラウトにより充填している。なお、できるだけ実構造に即して実験を行うため、落石覆道の柱部と側壁部に対応する位置に支点を設けている。また、過去の実験結果²⁾より頂版と側壁の連結部には大きな負の曲げモーメントが作用することが明らかになっていることより、側壁部近傍を模擬した区間は鋼板を 2 枚重ねている。

使用した鋼板は、A 試験体の場合は上鋼板 SS400、下鋼板 SM490（厚さはともに 9 mm）の材質を、B 試験体の場合は上下鋼板ともに SS400（厚さは 9 mm）の材質である。また、2 枚重ね区間には、A、B 試験体ともに SS400（厚さ 4.5 mm）の鋼板を使用している。降伏強度は材料試験の結果 SS400 の場合が 312 MPa、SM490 の場合が 384 MPa であった。また、コンクリートには充填性を高めるため、高流動コンクリートを使用しており、その強度は 30.1 MPa となっている。

2.2. 実験方法および測定項目

実験は直径 1 m、質量 3000 kg の鋼製重錘をトラッククレーンにより所定の高さまで吊り上げ、自由落下させることにより行っている。なお、試験体の上には落石対策便覧に基づき、厚さ 900 mm の敷砂緩衝材を設置している。載荷方法は落下高さを $H=1$ m から 1 m 刻みに増加させ、版が破壊に至るまで同一試験体に繰り返し重錘を衝突させる漸増繰り返し載荷法を採用している。なお、破壊基準は累積残留変位が純スパンの 1 %（本実験の場合には 98 mm）を越えた時点としている。本実験では、A 試験体の場合で落下高さ $H=12$ m、B 試験体の場合で $H=8$ m においてこの破壊基準に達している。

測定項目は重錘加速度、支点反力、載荷点変位およびスパン方向の上下鋼板歪である。歪ゲージ貼付位置については図-1 に示したとおりである。

3. 実験結果および考察

3.1. 各種応答波形

図-2 には、落下高さ $H=3$ m および 8 m の場合の各種応答波形を示している。前者は両試験体がほぼ弾性的に挙動する場合、後者は B 試験体の累積残留変位が本実験の破壊基準である純スパン長の 1 % を越えた場合の応答波形である。

図より、重錘衝撃力波形は版厚および落下高さに関わらず衝撃初期に急激に励起され、その後小さい振幅の増減を繰り返し緩やかに除荷される波形性状を示している。その主波動継続時間は $H=3$ m の場合には、A、B 試験体に対してそれぞれ約 240 ms、330 ms 程度であり、各固有振動周期に対応した値になっている。

一方、支点反力波形は衝撃初期に負載荷状態を示し、その後単調に増加し一旦わずかに除荷の傾向を示している。この除荷の傾向は版が高次振動モードから低次振動モードに移行する過渡領域での波動伝播の影響によるものと推察される。その後、支点反力は再度増大し、最大応答値に達した後に単調に減少する正弦半波に近い波形性状を示している。その半周期は重錘衝撃力波形に類似である。除荷後、波動は自由振動状態を呈している。また、この波形性状は載荷点変位波形および下側鋼板歪波形に良く対応している。

次に、荷重の継続時間および載荷点変位と下側鋼板歪の振動周期に着目すると、いずれの応答波形も落下高さに関わらず、版厚の小さい B 試験体の場合が荷重の継続時間や載荷点変位および下側鋼板歪波形の振動周期が長くなっている。また、B 試験体の場合には、 $H=8$ m の各波動の継続時間や振動周期が明らかに $H=3$ m の場合に比べて長くなっていることより、版の塑性化が進行していることが伺える。従って、 $H=8$ m の B 試験体の変位波形は、若干正方向にドリフトした状態になっている。一方、A 試験体の場合には、 $H=8$ m においても未だほぼ弾性的な挙動を示している。

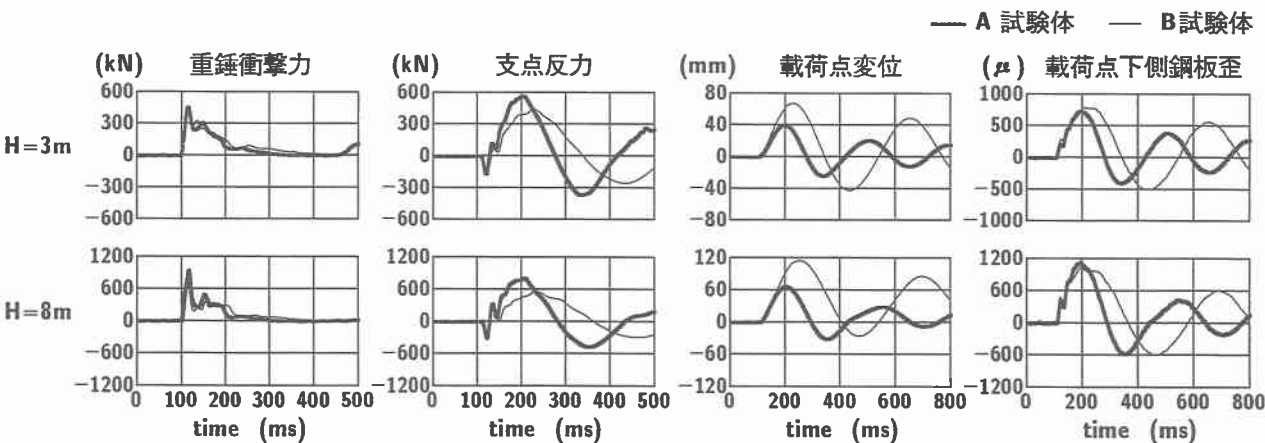


図-2 各種応答波形

3.2. 曲げモーメント分布

図-3には落下高さが $H = 3 \text{ m}$ の場合を例に曲げモーメントの経時変化を示している。ここで、曲げモーメントは上下鋼板に貼付した歪ゲージより測定した歪をもとに断面分割法を用いて算定している。なお、算定には、通常の方法試験により得られた力学的特性値を使用している。また、図は重錘が衝突した時間を 0 ms として整理している。

図より、A、B 試験体の分布性状は振動周期が異なるものの、全般的に大略類似していることがわかる。すなわち、両試験体とも衝撃初期にはスパン方向に3次モードが卓越した分布性状を示し、その後、重錘衝突時より約 $30 \sim 40 \text{ ms}$ の時点で低次振動モードに移行している。これは前節で示した支点反力が除荷の傾向を示す時点と一致している。その後の分布性状は自由振動状態に移行していることがわかる。また、衝撃初期段階では集中荷重載荷的な分布性状を示し、その後時間の経過とともに分布荷重載荷に近い分布性状に移行している。これより、

サンドイッチ版は衝撃荷重載荷時の初期段階には載荷点部近傍のみで荷重に抵抗し、その後版全体で大きく振動するような低次振動モードに移行し、版全体で荷重に抵抗している性状が明らかになった。

3.3. 各種最大応答値と落下高さの関係

図-4には、最大重錘衝撃力、最大支点反力および累積残留変位と落下高さの関係を示している。

まず、(a)図の最大重錘衝撃力に関して検討を行う。図中、実線はラーメ定数を $\lambda = 600 \text{ kN/m}^2$ および $\lambda = 1,000 \text{ kN/m}^2$ として振動便覧式³⁾により求めた値である。また、 $\lambda = 1,000 \text{ kN/m}^2$ は文献 3) で重錘直径が敷砂厚と同程度である実験結果と比較的一致している場合のラーメ定数である。図より、両試験体の最大重錘衝撃力はB 試験体が破壊に至る落下高さ $H = 8 \text{ m}$ の前までは、ほぼ類似の値を示していることがわかる。 $H = 8, 9 \text{ m}$ では、A 試験体の最大重錘衝撃力が相対的に大きく示されている。これは、この時点よりB 試験体の塑性化が著しく進行したことを暗示している。なお、両試験体の最

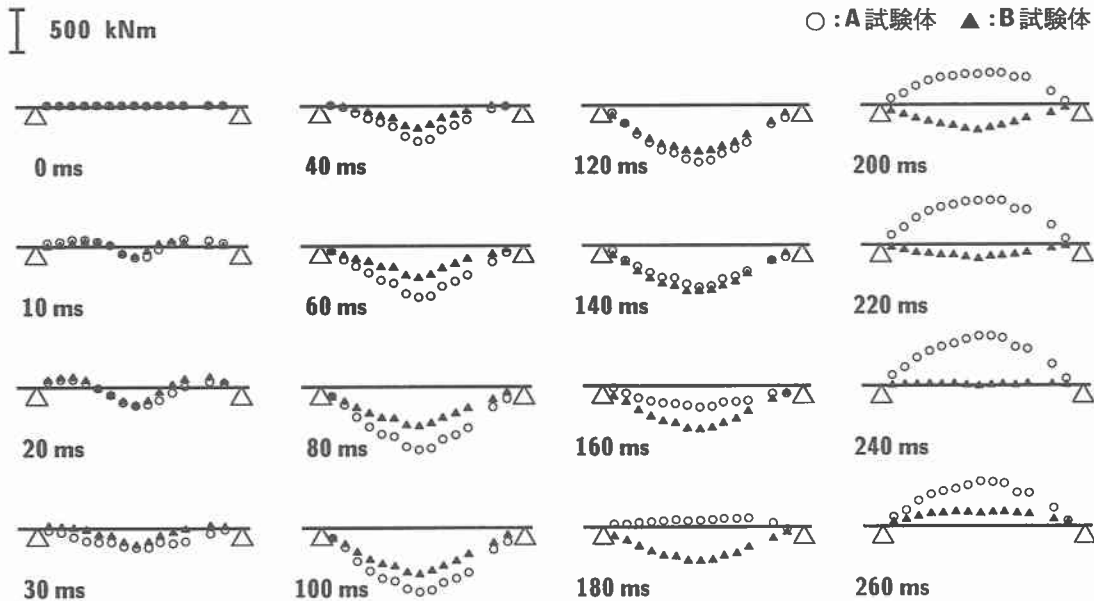


図-3 曲げモーメントの経時変化 ($H = 3 \text{ m}$ の場合)

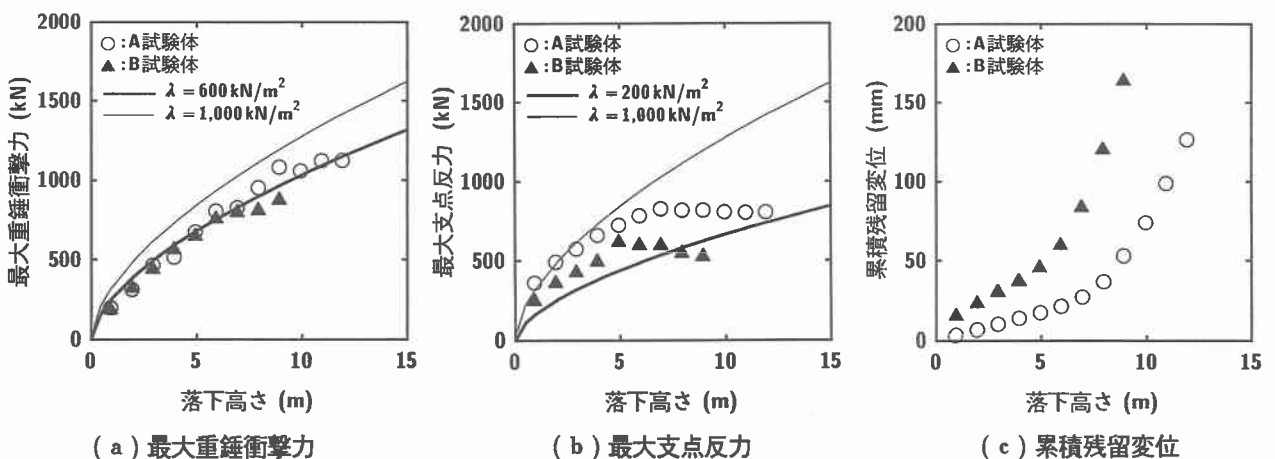


図-4 最大重錘衝撃力、最大支点反力および累積残留変位と落下高さの関係

大重錘衝撃力は、試験体が弾性的挙動を示す落下高さから終局状態に至る落下高さまで、 $\lambda = 600 \text{ kN/m}^2$ として評価される振動便覧式の値に概ね対応している。これは、サンドイッチ版の版厚が薄いことおよび上下鋼板とボルトの拘束効果により版の劣化が抑制され、延性に富んだ低次振動モードが卓越し、版が大きく変位することにより衝撃力を緩和するためと推察される。

次に、(b)図について見ると、最大支点反力は、落下高さの小さい時点より両試験体の値に差異のあることがわかる。その差は落下高さに関わらず A 試験体が B 試験体の約 1.3 ～ 1.4 倍となっている。また、最大支点反力は A 試験体の場合で $H = 7 \text{ m}$ 、B 試験体の場合で $H = 5 \text{ m}$ までは線形的に増大するが、その後、落下高さの増大に対して緩やかに減少する傾向を示している。これは、版の塑性化が徐々に進行し、版の変位やコンクリート部のひび割れ等の損傷に、衝撃荷重の一部が消費されたためと推察される。なお、両試験体の最大支点反力は落下高さの小さい場合には $\lambda = 1,000 \text{ kN/m}^2$ 、終局時 (A 試験体で $H = 12 \text{ m}$ 、B 試験体で $H = 8 \text{ m}$) には $\lambda = 200 \text{ kN/m}^2$ から算出される値に類似している。

最後に、(c)図について見ると、累積残留変位は A 試験体では $H = 7 \text{ m}$ 、B 試験体では $H = 5 \text{ m}$ までほぼ線形的に増大していることがわかる。この落下高さは最大支点反力が一定値に停滞する落下高さに対応しており、この時点より版の塑性化が進行したことを裏付けている。それ以降の落下高さでは、いずれの試験体の累積残留変位も急勾配でさらに線形的に増大していることがわかる。

3.4. 耐力比

図-5 には最大重錘衝撃力および最大支点反力を表-1 に示す計算静的耐力 P_{usc} で無次元化した値を示している。静的耐力は通常材料試験値を用いて断面分割法により算定した値である。なお、ここでは安全側に評価するため、文献 1) に基づきサンドイッチ版の上鋼板を無視している。

図-4 より明らかなように、本実験で想定した終局時において、A 試験体で最大重錘衝撃力 P_{max} は約 1,100 kN、最大支点反力 R_{max} は約 800 kN、B 試験体で P_{max} は約 800 kN、 R_{max} は約 600 kN となっている。これらの値を計算静的耐力 P_{usc} で無次元化すると A 試験体の場合で P_{max} は P_{usc} の約 1.8 倍、 R_{max} は約 1.3 倍、B 試験体の場合で P_{max} は P_{usc} の約 2.6 倍、 R_{max} は約 1.8 倍となっていることがわかる。

4. まとめ

本研究では版厚の異なる 2 種類の実規模サンドイッチ版に対して野外における大規模な重錘落下衝撃実験を行い、その耐衝撃特性について検討を行った。本実験で得られた成果を示すと以下のとおりである。

- 1) 重錘衝撃力波形は、版厚に関わらず急激に励起され、その後緩やかに除荷する波形性状を示す。一方、支点反力は正弦半波に近い波形性状を示し、その波形は載

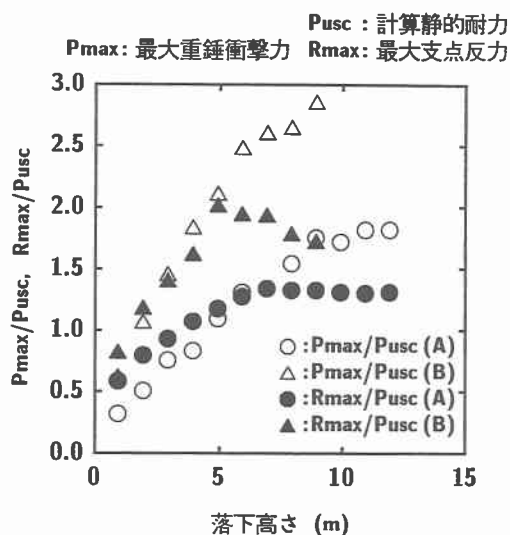


図-5 耐力比と落下高さの関係

- 荷点変位および下側鋼板歪波形に良く対応している。
- 2) 衝撃荷重載荷時の初期段階には、サンドイッチ版は載荷点部近傍のみで荷重に抵抗し、その後低次振動モードに移行し最終的には版全体で荷重に抵抗している。
- 3) サンドイッチ版は版厚が薄いことおよび上下鋼板とボルトの拘束効果より、版の劣化が抑制され、延性に富んだ低次振動モードが卓越する。
- 4) その結果、版に作用する重錘衝撃力は緩和され、版厚および落下高さに関わらずラーメ定数 $\lambda = 600 \text{ kN/m}^2$ とする振動便覧式の値にほぼ対応する。
- 5) 最大支点反力は版の塑性化が進行する時点より落下高さの増大に対して緩やかに減少する。従って落下高さの小さい場合にはラーメ定数 $\lambda = 1,000 \text{ kN/m}^2$ 、終局時近傍にはラーメ定数を $\lambda = 200 \text{ kN/m}^2$ とした時の値に概ね対応している。
- 6) 最大重錘衝撃力は版厚に関わらずほぼ同程度の値を示しているが、最大支点反力は版厚の影響により差異が生じる。
- 7) 本サンドイッチ版を用いた実験の範囲内では、終局時には、最大重錘衝撃力が上鋼板を考慮しない場合の計算静的耐力の約 1.8 ～ 2.6 倍、最大支点反力は約 1.3 ～ 1.8 倍の値となることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 木下昌樹, 今野久志, 岸 徳光, 温泉重治: 鋼・コンクリート合成梁の衝撃挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22-3, .pp 1105 ～ 1110, 2000
- 2) 佐藤昌志, 岸徳光, 西弘明, 温泉重治, 川瀬良司: 鋼・コンクリート合成頂版を有するロックシェッドの衝撃挙動, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 55 号 (A), .pp.84～89, 1999.2
- 3) 日本道路協会, 落石対策便覧, 1983.7