

鋼・コンクリートサンドイッチ梁の耐衝撃挙動に関する実験的研究

Experimental Study on Impact Resistant Behavior of Concrete-Steel Sandwich Beams

岸 徳光* 今野久志** 近藤悦郎*** 安藤智啓****

Norimitsu KISHI, Hisashi KONNO, Etsuro KONDO, and Tomohiro ANDO

* 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

** 工修 北海道開発局開発土木研究所研究員 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

*** 工修 ショーボンド建設(株) 技術本部 (〒003-0004 札幌市白石区東札幌 4条 2丁目 1-6)

**** 工修 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

In this paper, in order to cumulate experimental data for establishment of impact resistant design of Concrete-Steel Sandwich (CSS) beams, weight falling impact tests for simply supported CSS beams are conducted applying two types of loading method: iterative and single impact loading ones. The impact resistant behavior is investigated by comparing with that of Reinforced Concrete (RC) beams having a similar static bending capacity. Here, time histories of weight impact force, reaction force, mid-span displacement, and steel-plate strains are used for the comparison. The results obtained from this study are as follows: 1) the maximum impact and reaction forces occurred in CSS beams are smaller than those in RC beams; 2) but, the maximum displacement and absorbed energy are larger; and 3) damage of concrete can be extremely decreased by applying CSS type structure.

Key Words: Concrete-Steel Sandwich beam, impact resistant behavior, reaction force

キーワード: 鋼・コンクリートサンドイッチ梁, 耐衝撃挙動, 支点反力

1. はじめに

近年, 鋼・コンクリート合成構造が道路橋や鉄道橋等の土木構造物に多く採用されるようになってきた^{1)~4)}. これは, 鋼・コンクリート合成構造が高い靱性を有する構造形式である他, 労働者不足に対処するための施工の省力化や工期短縮による経費削減, スリム化による自重低減に伴う耐震性向上のメリット等が期待されるためである. 一方, 北海道の山岳地帯には, 道路防護施設の一つとして落石覆工が数多く建設されている. 上述した課題に対応するためには, 落石覆工のような耐衝撃用途構造物に関しても, 衝撃荷重の低減や荷重分散効果に優れた緩衝システムの開発のみならず, 新しい構造形式の開発が重要である.

落石覆工に採用する緩衝システムに関しては, 既に著者等によって三層緩衝構造システムが開発され^{例えば5)}, 一部実用化されるまでに至っている. また, 構造形式に関しても, 工場製作が可能で労働者不足に対処可能なプレストレストコンクリート(PC)製落石覆工について, 耐衝撃挙動および耐衝撃性に関する研究が近年精力的に行われている^{6)~8)}. その結果, 鉄筋コンクリート(RC)製のみならず, PC製の落石覆工に対する合理的な耐衝撃設計法が確立されつつある. しかしながら, 鋼・コンクリート合成構造の落石覆工への適用性に関しては, 前川ら⁹⁾や上村ら¹⁰⁾の鋼・コンクリート充填鋼管は

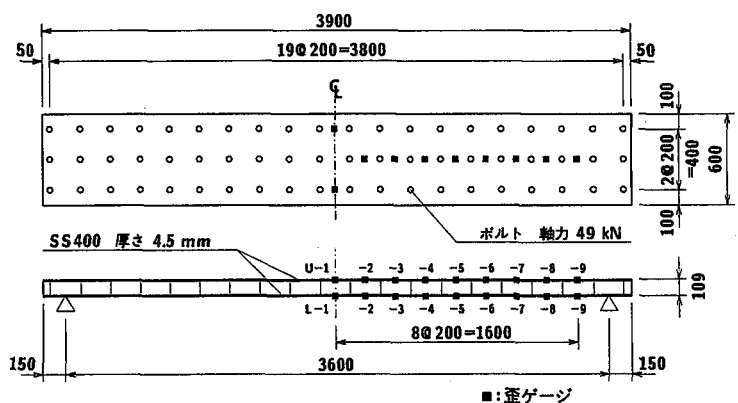
りに関する研究以外検討された事例は見あたらない.

本研究では, 鋼・コンクリート合成構造の落石覆工への適用性検討のための基礎資料を蓄積することを目的として, 第一段階として最も単純な構造部材である梁部材に着目し, 鋼・コンクリートサンドイッチ梁(以後, 単にサンドイッチ梁)の耐衝撃挙動を把握するための重錘落下衝撃実験を実施した. なお, 本研究では, より分かりやすい形で耐衝撃挙動特性を把握するために, RC梁に関する実験結果と比較する形で検討を行った. また, 比較のために用いたRC梁は, 本サンドイッチ梁と静的曲げ耐力が等しくなるように設計・製作している.

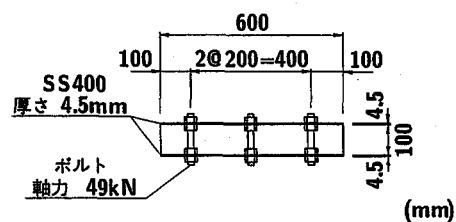
2. 実験の概要

2.1 試験体の概要

図-1には, 本実験に用いた鋼・コンクリートサンドイッチ梁およびRC梁試験体の形状寸法を歪ゲージ貼付位置と併せて示している. 図より, サンドイッチ梁は, 断面寸法(高さ×幅)が109 mm×600 mmであり, 純スパン長が3.6 mの矩形梁である. 上下に設置した鋼板の厚さは4.5 mmである. また, この上下鋼板は, 構造部材としての一体化を図るために, 軸方向および断面方向に200 mm間隔に配置したD19(M16)のボルトに49 kNの軸力を導入することにより緊結している. 一方, RC梁は断面寸法(高さ×幅)が260 mm×600



(a) サンドイッチ梁



(b) RC 梁

図-1 試験体の形状寸法および配筋状況

表-1 サンドイッチ梁の材料特性

(a) コンクリート

実験時材令 (日)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
21	30.0	23.0	0.22

(b) 鋼材

鋼材	規格	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
鋼板	SS400 -t4.5	343	458	206	0.3
ボルト	SD345- D19 (M16)	399	595		

表-2 RC 梁の材料特性

(a) コンクリート

実験時材令 (日)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
28	26.5	21.3	0.21

(b) 鉄筋

鉄筋	規格	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
せん断補強筋	SD345 -D13	403	581	206	0.3
軸方向筋	SD345 -D16	389	574		

mm であり、純スパン長が 3.6 m の矩形梁である。また、軸方向筋は D16 を上下に 5 本ずつ、せん断補強筋は D13 を 200 mm 間隔に配置している。

表-1 および表-2 には、サンドイッチ梁および RC 梁の材料特性を一覧にして示している。前述したように、実験に用いた RC 梁は、本サンドイッチ梁の実測による静的曲げ耐力 P_{uc} 値 (= 87.1 kN) と大略等しくなるように断面分割法により断面を決定し製作している。また、この静的曲げ耐力 P_{uc} の算定には、表-2 に示す材料

物性値を用いている。なお、断面分割法による本 RC 梁の P_{uc} 値は 88.8 kN であり、後述する静載荷実験より得られる静的曲げ耐力 P_{uc} 値 (89.2 kN) とほぼ等しい。

2.2 実験方法

表-3 には、実験ケースを一覧にして示している。表に示すように、実験はサンドイッチ梁および RC 梁の場合とも、静載荷実験 1 体、重錘落下衝撃実験 4 体 (繰返し載荷 1 体、単一載荷 3 体) に対して実施している。

表－３ 実験ケース

試験体名	試験体の種類	載荷方法	重錘質量 (kg)	設定衝突速度 (m/s)
S-S	サンドイッチ梁	静的	—	—
S-II-1~8		衝撃繰り返し	400	1~8
S-IS-8				8
S-IS-9				9
S-IS-10				10
RC-S	RC 梁	静的	—	—
RC-II-1~9		衝撃繰り返し	400	1~9
RC-IS-8				8
RC-IS-9				9
RC-IS-10				10

なお、表中に示す試験体名の第一項目は試験体の種類（S：サンドイッチ梁，RC：RC 梁）を，第二項目は載荷方法（S：静載荷，II：衝撃繰り返し載荷，IS：衝撃単一載荷）を，第三項目は設定した衝突速度（以後，単に衝突速度）を表している．以下，静載荷実験および重錘落下衝撃実験の概要について述べる．

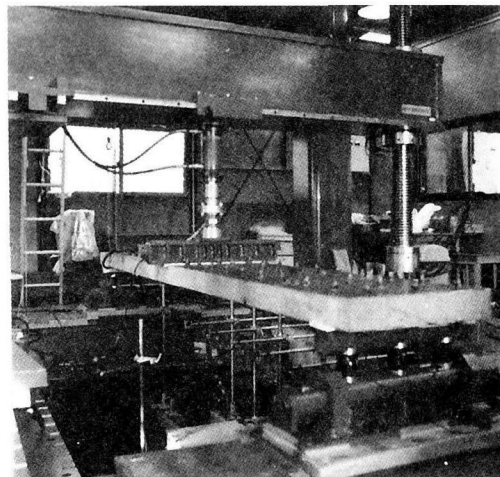
（１）静載荷実験

写真－１には，サンドイッチ梁の場合を例に静載荷実験の状況を示している．荷重は鋼製の載荷治具を用いて，断面方向に全幅，スパン方向中央部に 100 mm の部分分布荷重を作用させ載荷している．載荷は，サンドイッチ梁の場合には油圧ジャッキのストローク限界（150 mm）まで，RC 梁の場合には荷重が最大値に到達後除荷状態を示す時点まで行っている．

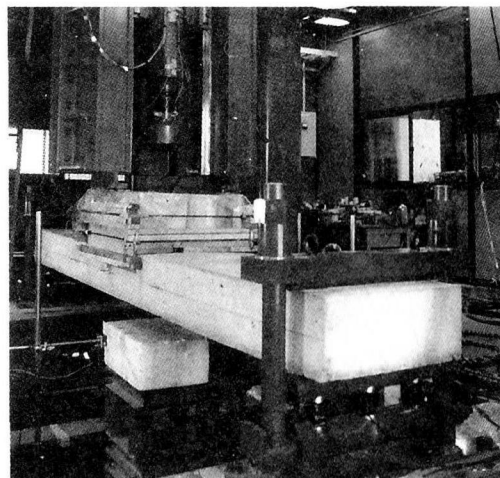
（２）重錘落下衝撃実験

写真－２には，RC 梁の場合を例に重錘落下衝撃実験の状況を示している．写真に示すように，試験体は跳ね上がり防止用治具および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．治具全体は基部で回転できることよりピン支持に近い構造となっている．また，サンドイッチ梁の場合には，図－１からも明らかなように，鋼板上にボルトが突き出ていることより，実験時に重錘との衝突が予想される．本研究では，構造全体系としての衝撃特性に限定して検討することとし，このような局所的な衝突による損傷を防止するために，載荷点部に厚さ 100 mm，スパン方向 700 mm 間に敷砂緩衝材を設置することとした．RC 梁に関しても境界条件を同じにするために同一の緩衝材を設置している．なお，実落石覆工頂版上には必ず緩衝構造が設置されており，落石の直接衝突による頂版部の損傷を軽減している．このような設置条件の下，質量 400 kg，載荷部直径 150 mm 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，荷重を梁スパン中央部に作用させている．

本実験に用いた載荷方法は，表－３に示す通り繰り返し載荷と単一載荷の２種類である．繰り返し載荷の場合は，衝突速度を $V = 1 \text{ m/s}$ から 1 m/s 刻みに増加させ，梁が終局に至るまで重錘を同一試験体に繰り返し衝突さ



写真－１ 静載荷実験の状況（サンドイッチ梁）



写真－２ 重錘落下衝撃実験の状況（RC 梁）

せる方法である．なお，衝撃荷重載荷時の構造部材に関する終局状態は，いずれの示方書においても未だ基準化されていない．著者等は先に曲げ破壊型 RC 梁の耐衝撃性に関する研究において，その終局状態を上述と同様の繰り返し載荷時における累積残留変位が純スパンの 2 % を越えた時点と設定している¹¹⁾．これより，本研究においても，サンドイッチ梁，RC 梁ともに著者等の過去の研究と同様の値を設定し評価することとする．従って，本研究の場合には累積残留変位が 72 mm を越えた時点が終局状態となる．一方，単一載荷の場合は未使用の試験体に一度だけ重錘を衝突させる方法である．本実験の場合には，終局近傍の各梁の耐衝撃挙動を明らかにすること，またサンドイッチ梁と RC 梁に関する耐衝撃性の比較を行うことを目的としていることより，単一載荷実験の衝突速度は，両梁に対してサンドイッチ梁が繰り返し載荷時に終局に至った衝突速度と同一速度およびその $+1, +2 \text{ m/s}$ に設定している．

測定項目は，重錘衝撃力 P ，合支点反力 R （以後，支点反力），載荷点変位 δ （以後，変位），上下鋼板およ

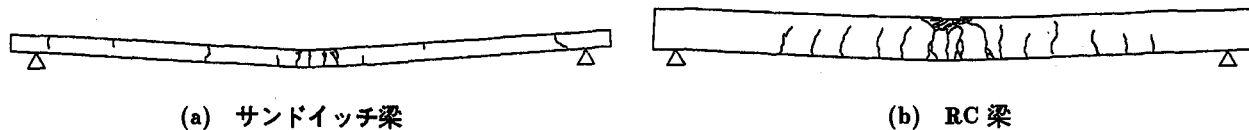


図-2 静載荷実験終了後のひび割れ状況（側面図）

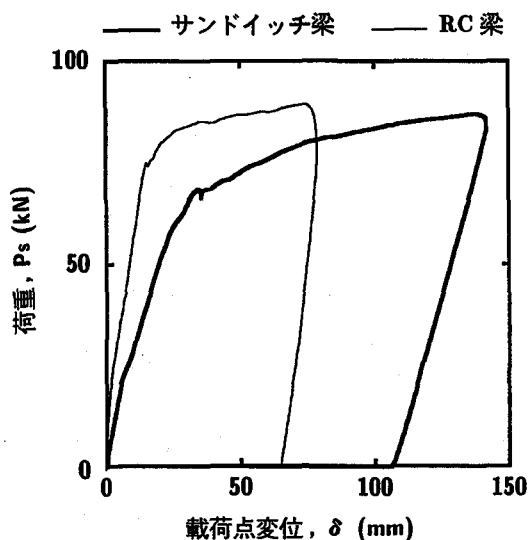


図-3 荷重-変位曲線

び上下端鉄筋の歪 ε である。また、実験終了後には試験体のひび割れ状況もスケッチしている。なお、歪は図-1に示されているように、両梁とも載荷位置より軸方向に 200 mm 間隔に測定している。サンドイッチ梁の場合には、スパン中央部の歪を載荷点を中心として幅方向に 200 mm 離れた 2 箇所について測定しているが、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。また、 P 、 R の測定には、容量および応答周波数がそれぞれ 2.0 MN、1.2 MN および DC ~ 4.0 kHz、DC ~ 2.4 kHz の起歪柱型ロードセルを用いている。 δ の測定にはストローク 200 mm、応答周波数 DC ~ 915 Hz のレーザ式変位計を用いている。各センサーからの出力波形は、全て高帯域用データレコーダ（応答周波数 DC ~ 40 kHz）に一括収録し、その後 100 μ s/word のサンプリング間隔で A/D 変換している。各応答波形は高周波成分を取り除くために 2.5 ms の矩形移動平均法により数値的なフィルター処理を施している。

3. 静載荷実験の結果および考察

3.1 ひび割れ状況

図-2には、サンドイッチ梁および RC 梁に関する静載荷実験終了後のひび割れ状況（側面図）を示している。図より、サンドイッチ梁の場合には、油圧ジャッキのストローク限界である 150 mm 近傍まで梁が変位しているにも関わらず、RC 梁に比べて曲げひび割れの数はいくつか少ないことが分かる。また、曲げひび割れは載荷点近傍部

表-4 静載荷実験結果の一覧

構造形式	静的耐力 P_u (kN)	最大変位 δ_{max} (mm)	吸収エネルギー E_a (kJ)
サンドイッチ梁	87.1	141.7	8.64
RC 梁	89.2	78.8	5.61

に集中していることも分かる。しかしながら、上縁部コンクリートには圧壊が見られない。さらに、支点近傍部には上縁から下縁に向かうひび割れも発生している。

一方、RC 梁の場合には、広い領域に渡って曲げひび割れが発生している。また、載荷点上縁部にはサンドイッチ梁の場合と異なり、コンクリートの著しい圧壊が生じており、曲げ圧壊型で終局に至っていることが分かる。

3.2 荷重-変位曲線

図-3には、サンドイッチ梁および RC 梁の荷重-変位曲線（ P_s - δ 曲線）を比較して示している。表-4には、この P_s - δ 曲線より求まる静的耐力 P_u 、最大変位 δ_{max} および吸収エネルギー E_a を一覧にして示している。

図-3および表-4より、静載荷実験より得られる静的耐力 P_u は、両梁でほぼ等しいことが分かる。しかしながら、最大変位 δ_{max} は、サンドイッチ梁の場合が RC 梁の場合より大きく示されている。このため、梁の吸収エネルギー E_a もサンドイッチ梁が RC 梁の 1.5 倍以上の大きさとなっている。これより、静載荷時には、サンドイッチ梁は RC 梁に比べて靱性に優れた構造形式であることが分かる。これは、図-2のひび割れ状況と照らして、サンドイッチ梁の場合には桁高が小さく、RC 構造として評価する場合の鉄筋比が 4.5 % と大きいこと、かつ 200 mm 間隔に配置したボルトおよび上鋼板による拘束効果によって上縁コンクリートの圧壊が防止されるためと推察される。なお、本実験に用いたサンドイッチ梁と RC 梁の質量は、概ね 730 kg、1,520 kg であった。これは、同程度の静的耐力を有する梁を製作する場合、サンドイッチ構造は自重を RC 構造の 1/2 程度に軽減できることを示唆している。

4. 重錘落下衝撃実験の結果および考察

4.1 ひび割れ状況

図-4および図-5には、それぞれ繰り返し載荷実験

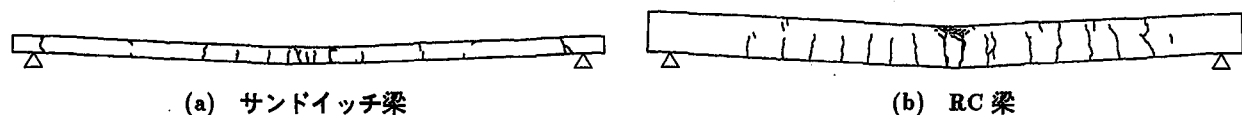


図-4 繰り返し載荷実験終了後のひび割れ状況（側面図）

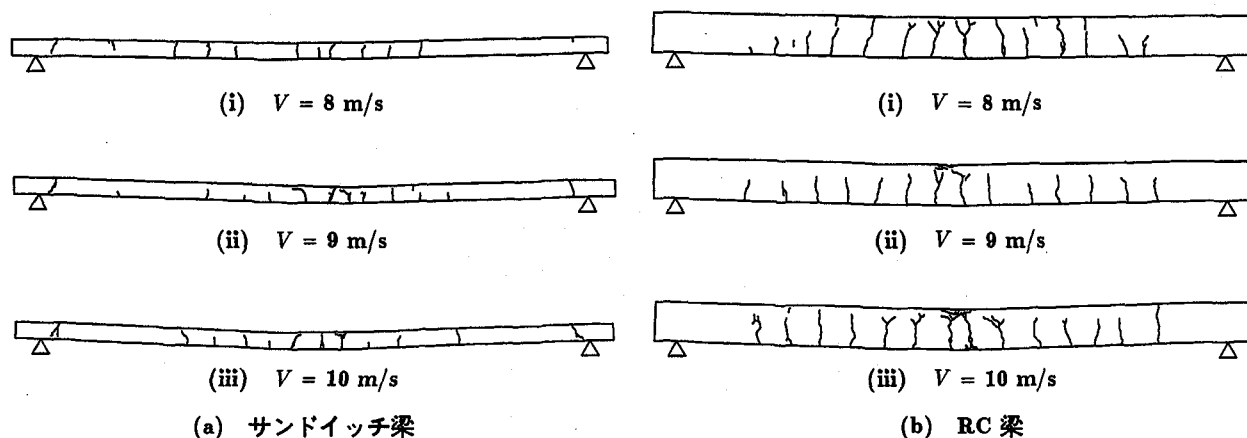


図-5 単一載荷実験終了後のひび割れ状況（側面図）

と単一載荷実験終了後のサンドイッチ梁、RC 梁のひび割れ状況（側面図）を示している。まず、図-4の繰り返し載荷の場合に関して検討すると、サンドイッチ梁の場合には、曲げひび割れが静載荷時（図-2参照）に比べて多少分散して発生していることが分かる。これは桁高が小さいこと、および前述のように上下鋼板が縦横に配置したボルトによって緊結されていることにより内部コンクリートとの一体化が図られ、より均一な曲げ剛性が確保されていることにより、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、載荷点上縁部のコンクリートが圧壊していないことや、支点近傍部に上縁から下縁に貫通するひび割れが生じていること等の分布性状は、静載荷の場合と類似している。

一方、RC 梁の場合には、載荷点部における曲げひび割れの数が静載荷時に比較して若干少ないものの、全体的なひび割れの数や分散性は静載荷時と類似している。また、載荷点部におけるコンクリートの圧壊も、静載荷時と同様の傾向を示している。

次に、図-5の単一載荷時のひび割れ分布性状に関して検討すると、サンドイッチ梁の場合には、衝突速度 $V = 8 \text{ m/s}$ の載荷点部における曲げひび割れ数が、静載荷時や繰り返し載荷時のそれらに比べて若干少ないことが分かる。これは、単一載荷の場合には載荷履歴の影響がないことより、静載荷時や繰り返し載荷時に比較して梁の損傷度合いが小さく、明瞭な角折れ状態には至らないためと推察される。この点を除くと、 $V = 8 \text{ m/s}$ のひび割れ分布は、静載荷時や繰り返し載荷時と大略類似している。また、衝突速度を $V = 9 \text{ m/s}$, 10 m/s と増加させた場合にも、梁の変位量が増大し多少角折れの傾

向を示すものの、ひび割れ分布は $V = 8 \text{ m/s}$ の場合と同様である。

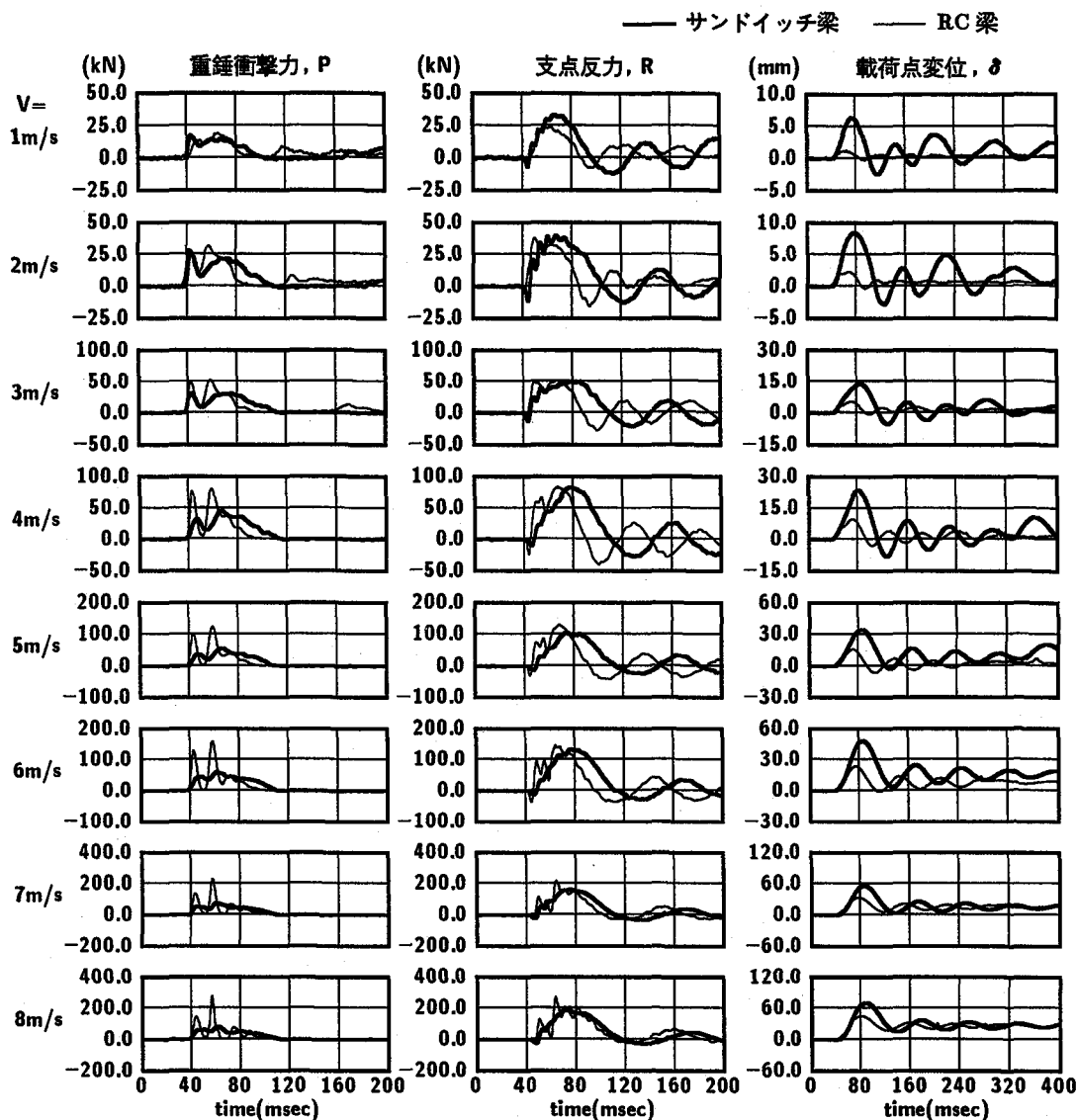
また、RC 梁の場合にも、単一載荷の $V = 8 \text{ m/s}$ 時には、静載荷時および繰り返し載荷時に比べて梁の角折れ程度の小さいことが分かる。そのため、載荷点上縁部にはコンクリートの著しい圧壊は生じていない。この点を除くと $V = 8 \text{ m/s}$ の曲げひび割れ分布は静載荷時や繰り返し載荷時と比較してそれほど顕著な違いが見られない。さらに、衝突速度 V を増加させると、載荷点部の変位量が増大しそれに伴い載荷点上縁部コンクリートの圧壊が徐々に明瞭になっていく状況が確認できる。

4.2 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

図-6には、サンドイッチ梁と RC 梁の繰り返し載荷および単一載荷における重錘衝撃力 P 、支点反力 R および変位 δ の各応答波形を比較して示している。図中、各波形は重錘が梁に衝突する 40 ms 前の時間を 0 ms とし、 P , R の場合には 200 ms まで、 δ の場合には 400 ms までの時間に対して整理している。また、RC 梁の繰り返し載荷における衝突速度 $V = 9 \text{ m/s}$ の結果は、紙面の都合によりここでは省略することとした。なお、ここでは両梁の波形性状の検討に留め、各波形の最大値に関する定量的な検討は、後節の 4.5, 4.6 に譲ることとする。

(1) 繰り返し載荷時

(a) 図には、繰り返し載荷時の各応答波形を示している。図より、重錘衝撃力波形 P は、衝突速度が $V = 1 \text{ m/s}$ と小さい場合には、サンドイッチ梁および RC 梁の場合ともほぼ正弦半波状の分布を示していることが分か



(a) 繰り返し載荷

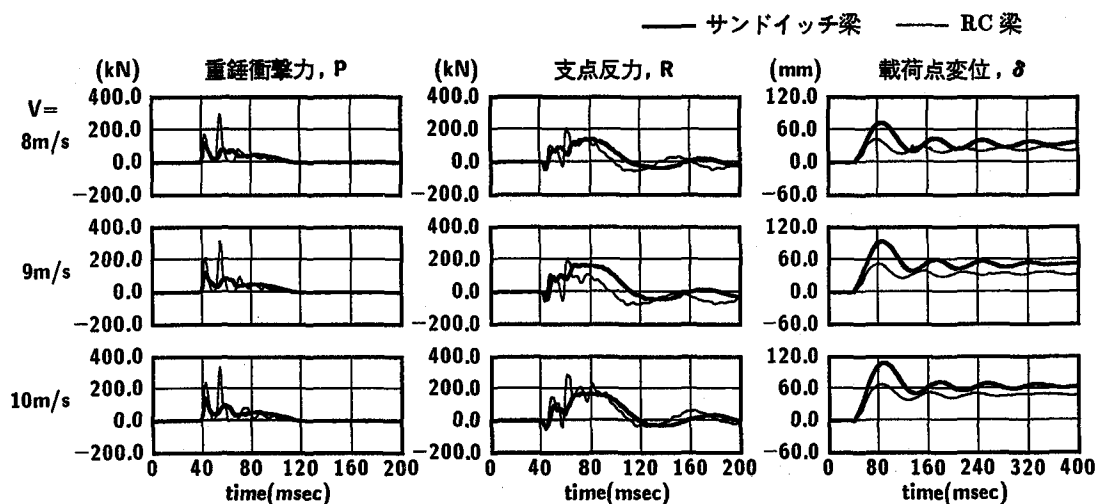
図-6 重錘衝撃力、支点反力および変位波形

る。これは、衝突速度が小さいことより、重錘が敷砂を介して梁上面と衝突する際の衝撃力が小さいため、その後梁に励起される低次振動との連成によって示される波形が卓越した状態になるためと推察される。また、その継続時間はサンドイッチ梁の場合で 60 ms 程度、RC 梁の場合で 45 ms 程度であり、サンドイッチ梁の場合における継続時間が若干長い。

$V \geq 2$ m/s の場合には、いずれの梁の場合とも高周波成分と低周波成分から構成されていることが分かる。前者は衝撃初期に過渡的に励起される高次振動と重錘との相互作用に伴って励起された成分であり、後者は徐々に形成される低次振動と重錘との相互作用に伴う成分であるものと推察される。従って、前者の高次振動に関連する成分は周期も短く、剛性が見かけ上大きく評価されることより、その振幅も大きくなる傾向にあるものと考えられる。サンドイッチ梁の場合に関する波形性状を詳

細に見ると、高周波成分は振幅が衝突速度 V の増加とともに低減して、低周波成分に吸収されるような性状を示している。サンドイッチ梁のこのような現象は、衝突速度が増加することによって入力エネルギーが増加するものの、載荷点部の上鋼板とコンクリートの分離も進行して衝撃力が緩和され高次振動成分が十分励起されないことにより、高周波成分の振幅の増加率が小さいのに対して、後続の低次振動との連成に伴う衝撃力の振幅が相対的に大きくなることによるものと推察される。

一方、RC 梁の場合には、衝突速度 V の増加とともに高周波成分の振幅が低周波成分のそれに比較して大きくなる傾向を示している。これは、1) 敷砂の緩衝効果によって載荷点部コンクリートの圧壊等による損傷が抑制されること、2) 後述のように、入力エネルギーが小さい載荷履歴は、RC 梁の応答性状に与える影響が小さいことより、 V の増加に対応して初期に励起される高周



(b) 単一載荷

図-6 (つづき) 重錘衝撃力, 支点反力および変位波形

波成分の振幅も増加すること, によるものと推察される。

支点反力波形 R は, サンドイッチ梁および RC 梁に関わらずいずれの衝突速度においても, 衝撃初期に負荷荷状態となっていることが分かる。一般に, 重錘衝突によって, 梁に励起された高次振動を伴う曲げ波動は, 先端部が固定端と類似した境界条件を形成しながら支点に向かって伝播する。しかしながら, 支点近傍では, 自由境界が存在するため負曲げ状態を解放するための正曲げ変形を生じさせる運動が励起されることとなる。上述の負荷荷状態はこの運動によって発生するものと推察される。その後, いずれの梁も重錘衝撃力波形を入力波とする強制振動状態を呈している。従って, 除荷後は減衰自由振動状態となっている。RC 梁において高周波成分が顕在化している $V = 7, 8 \text{ m/s}$ の場合を除くと, サンドイッチ梁と RC 梁の振幅はほぼ同様であることが分かる。これは, 静的曲げ耐力の等しい梁では支点反力波形の振幅もほぼ等しくなることを暗示している。すなわち, 支点反力波形を衝撃耐力の指標として用いることにより, 静的曲げ耐力に基づくサンドイッチ梁の耐衝撃設計が可能となることを示唆している。

変位波形 δ は, 両梁の場合とも, 初期に重錘衝撃力波形 P や支点反力波形 R に示される高周波成分の現われない分布性状を示している。これは, 梁の最低次固有振動周期が $40 \sim 80 \text{ ms}$ 程度であるのに対して, 上述の高周波成分の周期が $12 \sim 14 \text{ ms}$ 程度で, 最低次振動周期に対して $1/3$ 以下であるため, 応答倍率が小さくなることによるものと考えられる。従って, 変位波形 δ は, 上述のように両梁とも高周波成分が除去された支点反力波形 R に類似した振動性状を示している。しかしながら, δ の場合には, 両梁とも衝突速度 V の増加に伴い荷重除荷後に正方向にドリフトした状態を示している。これは, 各梁のコンクリート部にひび割れが発生し, かつ鋼材の塑性化が進行して変位が残留していることを意

味している。また, 荷重除荷後の自由振動状態に着目すると, $V = 1 \text{ m/s}$ 時にはその振動周期がサンドイッチ梁および RC 梁の場合でそれぞれ 80 ms 程度, 40 ms 程度となっており, RC 梁の曲げ剛性がサンドイッチ梁に比較して大きいことが確認できる。その後 $V = 8 \text{ m/s}$ 時には RC 梁の振動周期が約 70 ms と長くなるのに対して, サンドイッチ梁の場合は $V = 1 \text{ m/s}$ と同様 80 ms 前後となっている。これより, RC 梁は $V = 8 \text{ m/s}$ 時にはひび割れ等による劣化の進行によってサンドイッチ梁の曲げ剛性に近似した状態になっていることが分かる。

一方, サンドイッチ梁の場合には残留変位を生じつつも, 振動周期が $V = 1 \text{ m/s}$ 時と大差ない。これは, 後述のように衝突速度の増大とともに上下鋼板の応力レベルが降伏点を越え塑性状態に至るものの, 振動中の負荷荷時には初期の剛性勾配のもとに除荷することにより, 弾性状態と類似した振動特性を示すためと推察される。

このように, RC 梁の場合には引張側コンクリートのひび割れによる塑性化の進展が梁全体の剛性低下を引き起こしているのに対して, サンドイッチ梁の場合には, 1) 上下鋼板によってコンクリートのひび割れの進展が抑制されることと, 2) 鋼板が塑性に至った状態でも振動時には負荷荷時に初期の剛性勾配を有すること, により梁全体の剛性が著しく低下しないものと考えられる。

(2) 単一載荷時

図-6(b) には, 単一載荷時の各応答波形を示している。重錘衝撃力波形 P に関して見ると, サンドイッチ梁の場合には, いずれの衝突速度に対しても類似の波形分布を示しており, その分布性状は繰り返し載荷時の $V = 2 \text{ m/s}$ と同様である。これは, 上鋼板とコンクリートの一体化が図られ衝突部が健全であるためと考えられる。一方, RC 梁の場合にも, いずれの衝突速度に対しても類似の波形分布を示していることが分かる。また,

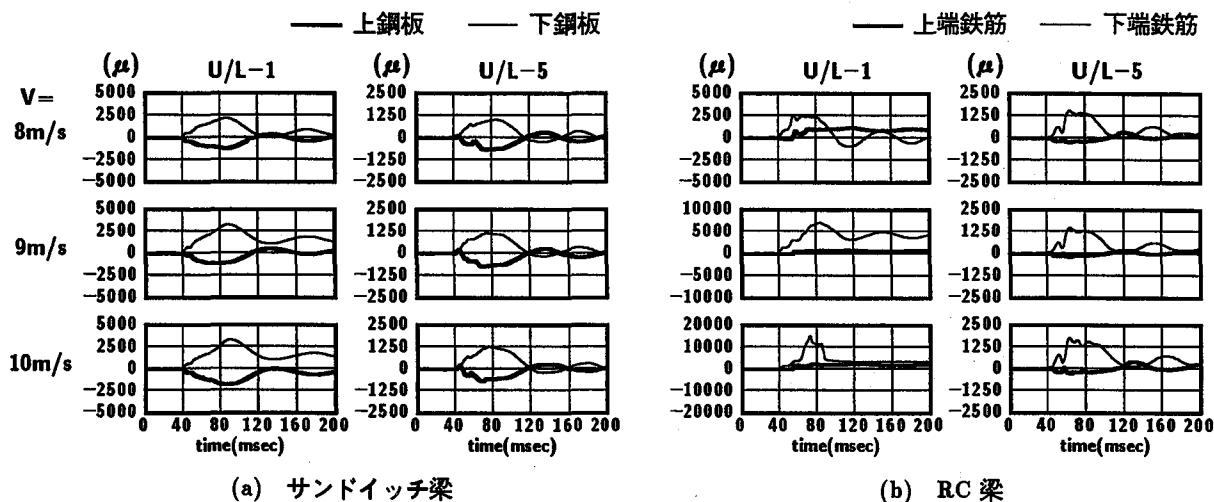


図-7 歪波形 (単一載荷)

その分布性状は繰り返し載荷の $V = 8 \text{ m/s}$ と大差ない。これより、繰り返し載荷の $V = 8 \text{ m/s}$ 時にも RC 梁の衝突部近傍の劣化が進行していないことが分かる。

支点反力波形 R を見ると、サンドイッチ梁、RC 梁ともに繰り返し載荷時の $V = 7, 8 \text{ m/s}$ と類似の分布性状を示していることが分かる。これより、RC 梁の場合には、入力エネルギーの小さい載荷履歴が衝撃応答に与える影響の小さいことが分かる。

載荷点変位波形 δ に関しても、衝突速度 V の増大とともに最大振幅が大きく示されている以外は、支点反力波形 R と同様の傾向を示している。

4.3 歪波形

図-7には、スパン中央部と全スパンの $1/4$ 点近傍におけるサンドイッチ梁の上下鋼板歪と RC 梁の上下端鉄筋歪波形 (U-1, -5 および L-1, -5) を比較して示している。また、ここでは紙面の都合により、単一載荷の結果のみに着目して検討している。なお、図中、負値が圧縮歪を、正値が引張歪を表している。

図より、サンドイッチ梁の場合には、載荷点を含め衝突速度 V に関わらず上下鋼板歪がほぼ対称な分布性状を示しており、中立軸が桁中央部近傍に分布していることが分かる。これは、内部コンクリートのひび割れ等による著しい劣化が進行していないことや、上下鋼板とコンクリートの一体化もある程度保持されていることを暗示している。一方、RC 梁の場合には、特に載荷点 (U/L-1) において、下端鉄筋のみならず上端鉄筋歪波形が衝撃初期より引張領域に分布しており、中立軸が瞬時に上縁かぶり部に推移していることが分かる。この性状は、図-5のひび割れ分布と照らして、載荷点部の曲げひび割れが上縁まで貫通し、引張領域が梁の上縁近傍部まで上昇している状態と対応している。また、全スパンの $1/4$ 点近傍 (U/L-5) では、衝撃荷重載荷時に上端鉄筋では圧縮歪を、また下端鉄筋では上端鉄筋よりも

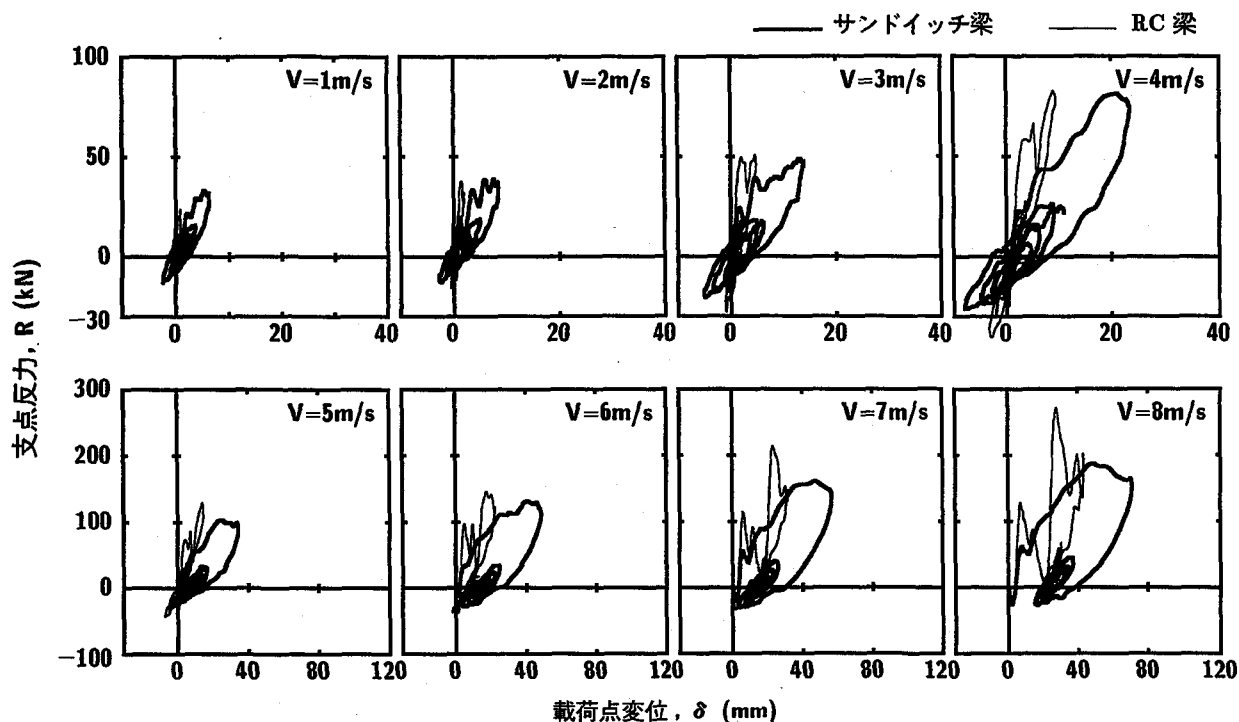
大きい引張歪を示しており、静的な RC 梁と類似の性状を示している。

以上より、サンドイッチ梁の場合は、上下鋼板が緊結されていることより、内部コンクリートの損傷が抑制でき、衝突速度が $V = 10 \text{ m/s}$ 時でも弾性に近い歪性状を示し、耐衝撃性に優れていることが明らかとなった。一方、RC 梁の場合には、特に載荷点部の曲げひび割れの進展が著しく、かつ中立軸が瞬時に上縁かぶり部に推移することより、圧壊が促進され耐衝撃性の向上が期待できないことが明らかとなった。

4.4 支点反力の変位波形に関する履歴曲線

図-8には、繰り返し載荷と単一載荷におけるサンドイッチ梁と RC 梁の支点反力-変位履歴曲線 ($R-\delta$) を比較して示している。ここでも RC 梁の繰り返し載荷における衝突速度 $V = 9 \text{ m/s}$ の結果は、紙面の都合により省略することとした。なお、本来入力エネルギーを議論する場合には、重錘衝撃力波形を用いなければならないと考えられるが、ここでは以下の理由により支点反力波形を用いることとした。すなわち、1) 重錘衝撃力波形は、重錘と敷砂および梁も含めた相互作用のもとで発生し、高周波成分を含む複雑な分布となること、2) これに対して、支点反力波形は変位波形と同様、低周波成分が卓越しており、静載荷時の延長で荷重-変位関係の評価が可能となること、3) 従って、支点反力と静的曲げ耐力との関係を定量的に評価することにより、サンドイッチ梁の場合にも、RC 梁の場合と同様に静的曲げ耐力に基づいた簡易な耐衝撃設計法の適用の可能性が示唆されること、による。

まず、(a) 図の繰り返し載荷の場合に関して考察する。図より、 $R-\delta$ 曲線のループで囲まれる面積 (以後、吸収エネルギー E_a) は、両梁の場合とも衝突速度 V の増加に伴い増大していることが分かる。また、吸収エネルギー E_a は、いずれの衝突速度においてもサンドイッチ



(a) 繰り返し載荷

図-8 支点反力-変位履歴曲線

梁の場合が RC 梁の場合の 2 倍以上の値となっている。表-5 には、参考値として単一載荷の場合も含め、両梁の各衝突速度における吸収エネルギー E_a を示している。

$R-\delta$ 曲線の分布性状を見ると、サンドイッチ梁と RC 梁の場合で大きく異なっていることが分かる。すなわち、サンドイッチ梁の場合には、 $V = 1 \text{ m/s}$ 時より支点反力が変位に対してほぼ線形的に増大し、最大変位値到達後に初期剛性程度の勾配で除荷されている。ループの分布性状は衝突速度に関わらず楕円状となっている。これは、前述のように繰り返し載荷によって梁の固有振動特性が大きく変化しないことや鋼板が降伏後も負載荷時に初期の剛性勾配を有し弾性に近い挙動を示すことによるものと推察される。

一方、RC 梁の場合には、 $V = 1, 2 \text{ m/s}$ における $R-\delta$ 曲線は、直線的な分布性状を示し、弾性的に挙動していることを暗示している。しかしながら、 $V \geq 3 \text{ m/s}$ においては、ほぼ線形的に増加し、最大変位に到達後、初期よりは若干勾配の大きい剛性で除荷に至る成分と、正載荷と負載荷が交番する成分が重ね合わされた分布性状を示している。前述 (4.2) のように、前者は重錘と梁の低次振動の相互作用によって励起される成分であり、後者は重錘と過渡応答時の高次振動との相互作用によって励起される成分である。前者の成分の載荷と除荷時の剛性勾配に着目すると、載荷時の剛性勾配は衝突速度の増加とともに減少する傾向を示している。一方、除荷時のそれは、衝突速度に関わらず類似の傾向を示しているようである。これは、載荷時には衝突速度の増大とともに

に曲げひび割れが下縁から上方に進展して徐々に曲げ剛性も低下していくのに対して、除荷時には上縁に発生する曲げひび割れがそれほど進展せず、曲げ剛性の低下も抑制されていることを暗示している。

次に、図-8(b) の単一載荷の場合に関して考察する。図より、 $R-\delta$ 曲線のループより評価される吸収エネルギー E_a は、両梁とも繰り返し載荷時と同様、衝突速度 V の増加に対応して増大していることが分かる。また、その大きさは V に関わらず、サンドイッチ梁の場合が RC 梁の場合より大きい。表-5 を見ると、その程度は $V = 10 \text{ m/s}$ においては 1.2 倍程度で大差ないが、 $V = 8, 9 \text{ m/s}$ の場合には 2 倍以上の能力を有していることが分かる。

$R-\delta$ 曲線の分布性状に着目すると、サンドイッチ梁の場合には、いずれの衝突速度 V に対しても RC 梁の場合と同様の正載荷と負載荷が交番する成分が励起されていることが分かる。しかしながら、その交番回数や振幅は RC 梁の場合より少なくかつ小さい。これは、前述のようにサンドイッチ梁の場合には桁高や曲げ剛性が小さいことにより、重錘と高次振動との相互作用に基づいた重錘衝撃力および支点反力成分が RC 梁の場合ほど顕著に示されないためと推察される。

以上より、繰り返し載荷時の支点反力-変位曲線 ($R-\delta$) は、サンドイッチ梁の場合には載荷履歴によって梁の固有振動特性が大きく変化しないことや、鋼板が降伏後も負載荷時には初期の剛性を有することより、衝突速度 V に関わらずほぼ楕円状の分布性状を示す。一方、

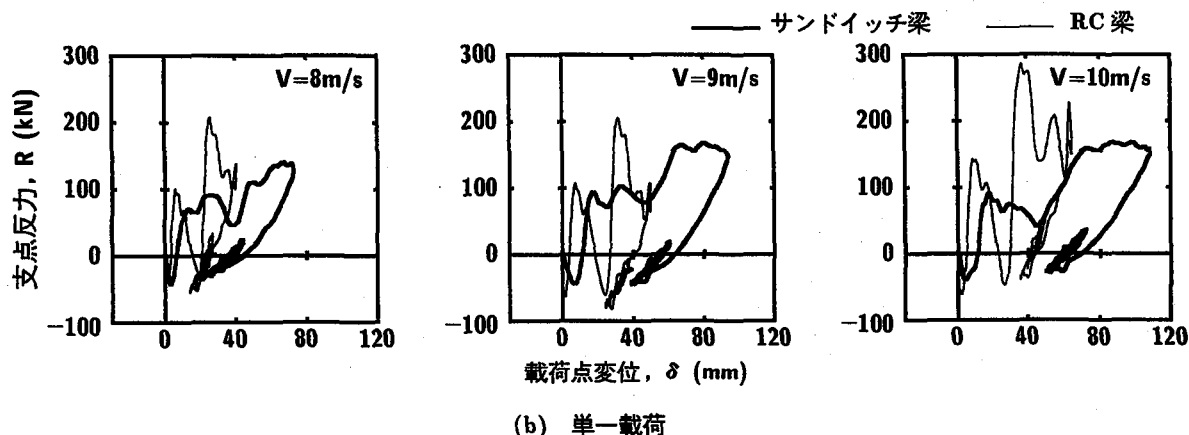


図-8 (つづき) 支点反力-変位履歴曲線

表-5 吸収エネルギー E_a の一覧 (単位: kJ)

試験体名	衝突速度 V (m/s)										
	繰り返し載荷の場合								単一載荷の場合		
	1	2	3	4	5	6	7	8	8	9	10
サンドイッチ梁	0.15	0.22	0.45	1.20	2.36	3.86	5.46	8.13	4.61	7.76	8.50
RC 梁	0.002	0.02	0.13	0.29	0.52	1.23	2.00	3.55	2.71	3.56	7.10

RC 梁の場合には、重錘と梁の低次振動との相互作用によって励起される成分の他に、重錘と高次振動との相互作用により励起される正載荷と負載荷の交番する成分が顕在化している。また、単一載荷時には、サンドイッチ梁においても正載荷と負載荷が交番する成分が励起されている。なお、 $R - \delta$ 曲線のループで囲まれる面積で評価される吸収エネルギー E_a は、サンドイッチ梁の場合が RC 梁の場合より大きい。その程度は、 $V \leq 9 \text{ m/s}$ において繰り返し載荷、単一載荷を問わず RC 梁の2倍以上である。

4.5 最大重錘衝撃力と最大支点反力

図-9には、図-6より得られるサンドイッチ梁とRC梁の最大重錘衝撃力 P_{ud} と衝突速度 V の関係を示している。図中、丸印●、○が繰り返し載荷の結果を、三角印▲、△が単一載荷の結果を表している。また、 P_{ud} には、図-6に示す重錘衝撃力波形において発生時間に関わらず最大振幅を示した時点の値を用いている。なお、後述する最大支点反力 R_{ud} の場合にも、図-6に示す支点反力波形に励起される最大振幅値を用いている。

図より、繰り返し載荷時のサンドイッチ梁に関する P_{ud} の分布は、衝突速度 V に対してほぼ線形の性状を示しているが、RC 梁の場合には2次曲線状の傾向を示していることが分かる。これは、サンドイッチ梁の場合には、前述のように $V > 2 \text{ m/s}$ において P_{ud} が主に重錘と梁の低次振動との相互作用によって発生し、かつ梁の振動特性も衝突速度 V に依存しないことより、力積に比例した分布性状を示したものと推察される。一方、RC 梁の場合には、 P_{ud} が主に重錘と梁の高次振動との

相互作用によって発生しており、振動周期が短く、剛性が見かけ上大きい状態下での応答となったため、入力エネルギーに比例するような分布性状を示すものと考えられる。

単一載荷時には、サンドイッチ梁の場合には繰り返し載荷時の延長線上より若干大きめの分布を示している。これは、載荷履歴がないことより、鋼板とコンクリートの一体化が十分図られ健全であるため、衝撃初期により大きい P_{ud} が発生していることに起因しているものと考えられる。一方、RC 梁の場合には、前述のように、入力エネルギーが小さい載荷履歴の耐衝撃挙動に与える影響が小さいことより、ほぼ繰り返し載荷時の延長線上に分布していることが分かる。構造系で比較すると、入力エネルギーの大きい領域でサンドイッチ梁の場合が RC 梁の1/2程度の値に低減していることが分かる。これは、サンドイッチ梁の曲げ剛性が RC 梁のその約1/7と小さいことおよび上下鋼板のサンドイッチ効果によって延性に富んだ構造となっているためと推察される。

図-10には、サンドイッチ梁と RC 梁の最大支点反力 R_{ud} と衝突速度 V の関係を示している。図より、 R_{ud} は、 $V = 6 \text{ m/s}$ 程度までは両梁で同程度でほぼ線形の分布性状を示していることが分かる。これは、最大重錘衝撃力 P_{ud} の場合と比較して、最大支点反力 R_{ud} の場合には、重錘と高次振動との相互作用によって発生した重錘衝撃力の高周波成分の影響が大きいことを暗示している。これに対して、 $V \geq 7 \text{ m/s}$ では、RC 梁の R_{ud} がサンドイッチ梁のそれよりも大きく示されている。これは、図-6にも示されているように、RC 梁の支点反力波形に励起される高周波成分が顕在化し、低

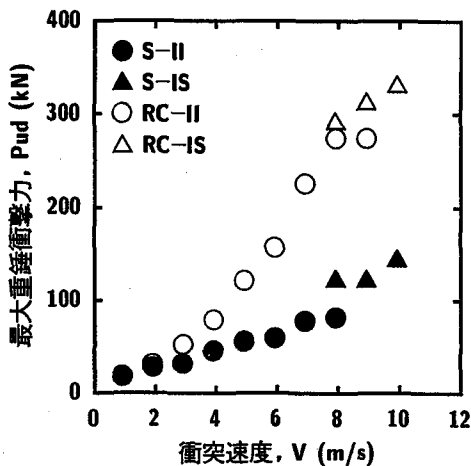


図-9 最大重錘衝撃力と衝突速度の関係

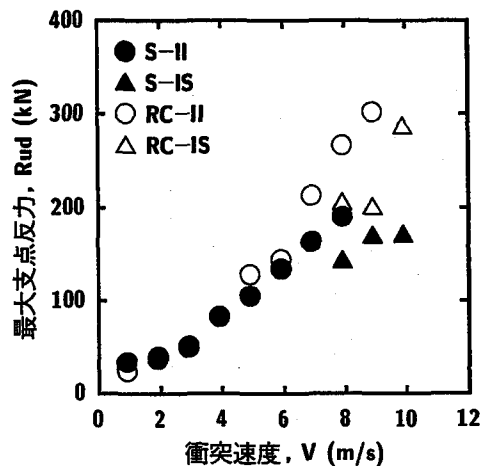


図-10 最大支点反力と衝突速度の関係

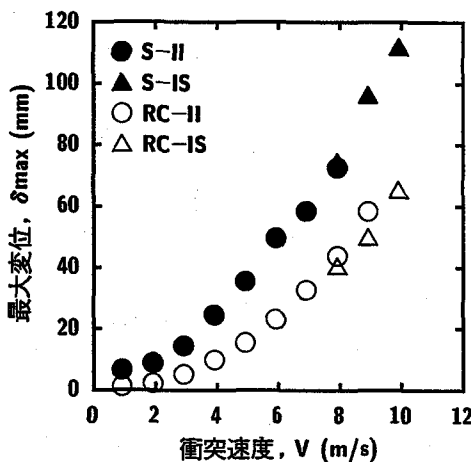


図-11 最大変位と衝突速度の関係

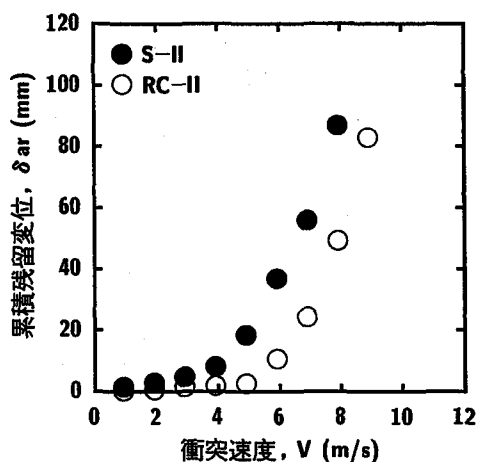


図-12 累積残留変位と衝突速度の関係

次の振動モードにこの高周波成分が重ね合わさったことによるためであるものと考えられる。

繰り返し載荷と単一載荷の R_{ud} 値を比較すると、単一載荷の場合が繰り返し載荷時より小さく、最大重錘衝撃力 P_{ud} の場合と異なった結果を示している。これは、単一載荷の場合には、梁の載荷点部が健全であるため重錘と高次振動との相互作用によって発生する重錘衝撃力の振幅が大きく、かつその周期も短くなることより、応答値としての支点反力値が小さく評価されるためと推察される。

また、サンドイッチ梁の場合には両載荷方法における R_{ud} 値とも、衝突速度 V に関らず P_{ud} 値より大きく示されている。一般に、入力波に対する梁の応答結果として支点反力が励起されることより、これらの現象はサンドイッチ梁の動特性の一つとして評価されるものと考えられる。

4.6 最大変位と累積残留変位

図-11には、図-6より得られるサンドイッチ梁とRC梁の最大変位 δ_{max} と衝突速度 V の関係を示している。ここでも、図中の丸印●、○が繰り返し載荷の場合

における結果を、三角印▲、△が単一載荷時の結果を示している。

図より、両梁の δ_{max} は、衝突速度 V の増加とともに2次放物線的に増大していることが分かる。また、サンドイッチ梁の δ_{max} は、 V に関わらずRC梁のそれに比べて大きい。これは、サンドイッチ梁の場合にはRC梁に比べて桁高や曲げ剛性が小さいことより、同じ入力エネルギーに対してより多くの変位が生じたためと判断される。また、単一載荷時の δ_{max} 分布は、サンドイッチ梁、RC梁とも大略繰り返し載荷時の分布曲線上に分布している。これより、入力エネルギーの小さい載荷履歴は δ_{max} に与える影響の小さいことが確認できる。

図-12には、サンドイッチ梁とRC梁の繰り返し載荷の場合における累積残留変位 δ_{ar} と衝突速度 V の関係を示している。 δ_{ar} は、サンドイッチ梁の場合には $V = 4$ m/s まで、RC梁の場合には $V = 5$ m/s まで、衝突速度 V に対してほぼ線形に増加しており、曲げ剛性が大きいことの効果が示されている。その後、 δ_{ar} は V の増加とともに、両梁とも指数関数的に増加しており、塑性化の領域の拡大していることが推察される。

以上より、最大重錘衝撃力および最大支点反力は、桁

高と曲げ剛性の小さいサンドイッチ梁の場合が RC 梁の場合よりも小さいのに対して、最大変位および累積残留変位は逆に大きいことが明らかになった。また、最大重錘衝撃力と最大支点反力には、両梁とも載荷履歴の影響が若干見られるものの、最大変位に関してはその影響の小さいことが明らかになった。

5. まとめ

本研究では、鋼・コンクリート合成構造の落石覆工への適用性検討のための基礎資料を蓄積することを目的として、最も単純な構造部材である梁部材に着目し、鋼・コンクリートサンドイッチ梁の耐衝撃挙動を RC 梁のそれと比較することにより、実験的に検討した。本実験で得られた結果を整理すると、以下の通りである。

- 1) 静載荷時には、サンドイッチ梁は曲げひび割れが載荷点近傍に集中しているにも関わらず、ボルトおよび上鋼板の拘束効果により上縁部コンクリートが圧壊しない。また、衝撃荷重載荷時にも、曲げひび割れは多少分散して発生するものの、静載荷時とほぼ同様の分布性状を示す。
- 2) サンドイッチ梁は、曲げ剛性が小さいことおよび上下鋼板のサンドイッチ効果によって延性に富んだ構造となっていることより、重錘と高次振動との相互作用によって励起される重錘衝撃力の高周波成分が RC 梁ほど顕著に示されない。従って、サンドイッチ梁の最大重錘衝撃力は RC 梁のそれに比べて小さい。
- 3) 上述の高次振動は支点反力波形にも伝達されるが、重錘衝撃力波形の場合に比べて顕著ではない。従って、RC 梁の高周波成分が顕著化しない衝突速度レベルでは、静的曲げ耐力の等しい両梁の最大支点反力はほぼ等しくなる。
- 4) 変位波形は RC 梁の場合と同様の正弦波状になる。しかしながら、サンドイッチ梁の場合には上下鋼板によってコンクリートのひび割れの進展が抑制されること等より、衝突速度の増加に伴う振動周期の増分は RC 梁に比べて小さい。
- 5) 衝撃荷重載荷時の RC 梁は、載荷点近傍で中立軸が上縁かぶり部に移行し圧壊の傾向を示すが、サンドイッチ梁は終局に至るまで上下鋼板内に分布し、載荷点部の圧壊も抑制され、耐衝撃性に優れた構造である。
- 6) サンドイッチ梁の支点反力-変位履歴曲線は、繰り返し載荷の場合には載荷履歴によって梁の固有振動特性が大きく変化しないことや、鋼板が降伏後も負載荷時に初期の剛性を有することより、衝突速度に関わらず楕円状の分布となる。単一載荷時には RC 梁の場合と同様、正負載荷の交番する成分が励起された分布となる。なお、同一衝突速度における吸収エネルギー量は、静載荷時の場合と同様にサンドイッチ梁が RC 梁より大きい。

謝辞：本研究を行うにあたり、室蘭工業大学建設システム工学科の松岡健一教授には、その都度適切なご指導を戴きました。また、当時室蘭工業大学建設システム工学科構造力学研究室の林 雄志君（現大成建設株式会社）および同大学院構造力学研究室内の南出賢司君にも多大なるご支援を戴いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 上田多門，塩屋俊幸：鋼コンクリート系サンドイッチ構造，コンクリート工学，第 30 巻 5 号，pp. 5-20, 1992.
- 2) 太田貞次，清宮 理，清水功雄：オープンサンドイッチ梁の耐力に及ぼすスターラップと主桁間隔の影響に関する静的載荷実験，構造工学論文集，Vol. 42A，pp. 1147-1156, 1996.
- 3) 佐々木保隆，平井 卓，明橋克良：鋼・コンクリート複合ラーメン橋の剛結部に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 44A，pp. 1447-1457, 1999.
- 4) 大山 理，栗田章光，渡辺 晃：鋼・コンクリート二重合成連続桁橋の経時挙動に及ぼす断面構成比の影響，第 4 回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，pp. 13-18, 1999
- 5) 岸 徳光，佐藤昌志，中野 修：三層緩衝構造の緩衝性能に関する大型野外実験，構造工学論文集，Vol. 41A，pp. 1257-1265, 1995.
- 6) 佐藤昌志，西 弘明，岸 徳光，松岡健一：三層緩衝構造を用いた実規模 PC 製落石覆工の重錘落下衝撃挙動，構造工学論文集，Vol. 42A，pp. 1347-1356, 1996.
- 7) 松葉美晴，後藤吉晴，佐藤 彰，音田 奨，岡畑博子，井上理恵：実物大 PC 製シェットの落石による破壊実験について (1)，(2)，第 2 落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，土木学会，pp. 241-246, 1996.
- 8) 佐藤昌志，西 弘明，岸 徳光，松岡健一：実規模 PC 覆工モデルの耐衝撃性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 44A，pp. 1851-1860, 1998.
- 9) 前川幸次，吉田 博：コンクリート充填鋼管はりの静的および重錘衝撃実験，土木学会論文集，No. 513/I-31，pp. 117-127, 1995.
- 10) 上村浩茂，前川幸次，中村昭英，吉田 博：コンクリート充填鋼管連続はりの載荷実験とロックシェット設計への応用，構造工学論文集，Vol. 44A，pp. 1575-1584, 1998.
- 11) 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，pp. 1069-1074, 1998.

(2000 年 9 月 14 日受付)