重錘落下衝撃を受ける大型 RC スラブの耐衝撃挙動

Falling-weight impact test of RC slab without cushion material

寒地土木研究所	〇正 員	今野 久志 (Hisashi Konno)
寒地土木研究所	正 員	山口 悟 (Satoru Yamaguchi)
寒地土木研究所	正 員	西 弘明 (Hiroaki Nishi)
室蘭工業大学大学院	フェロー	岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
室蘭工業大学大学院	正 員	栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)

1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線の道路には落石災害を防止する ための落石覆道(以後、ロックシェッド)が数多く建設さ れている。これらの設計は、現在のところ許容応力度法の 下に行われている。また、過去の被災事例の検証や数値解 析的検討から、許容応力度法により設計された同種の構造 物では、耐力的に非常に大きな安全余裕度を有しているこ とが明らかになっている1)。近年、様々な構造物の設計法 が許容応力度設計法から限界状態設計法を経て、性能照査 型設計法へ移行してきていることから、ロックシェッド等 の耐衝撃設計においても各性能に対する断面設計を可能と する性能照査型の耐衝撃設計法の確立が望まれている。こ のような状況下において、土木学会では耐衝撃設計に関し ても性能照査型設計を実現するために、その設計手法の確 立に向けた検討を行っている。著者らも合理的な耐衝撃設 計法を確立するための基礎的な研究として、RC 梁部材に 限定して各種小型 RC 梁の衝撃実験²⁾、RC 製ロックシェッ ド頂版部の道路軸方向単位幅を想定した大型 RC 梁を対象 とした重錘落下衝撃実験を実施し³⁾、破壊に至るまでの耐 衝撃挙動の把握、さらには数値解析的検討を実施し、性能 照査型耐衝撃設計に資する静的曲げ耐力算定式を提案して いる4)。また、ロックシェッド頂版部に着目した検討とし て、各種小型 RC スラブに関する衝撃実験5)、さらに構造 系に関する検討として実ロックシェッドの1/4程度の小型 ラーメン模型に関する衝撃実験を実施し、破壊に至るまで の耐衝撃挙動の把握を行った⁶⁾。

以上のように、部材レベル、全体系小型模型レベルでの 衝撃実験および数値解析的検討を実施してきたが、RC 製 ロックシェッドの性能照査型耐衝撃設計法を確立するため には、ロックシェッドに対する終局までの耐衝撃挙動の把 握ならびに実験結果を基にした数値解析手法の精度向上が 必要不可欠である。そこで、筆者らは、実ロックシェッド の2/5 縮尺模型試験体を製作し、重錘落下衝撃実験により 終局に至るまでの耐衝撃挙動データを取得している。実験 は、緩衝材の影響を受けない状態でのロックシェッドの耐 衝撃挙動の把握および現行設計法を考慮して敷砂緩衝材を 設置した状態での耐衝撃挙動把握を目的に2体の縮尺模型 に対して行っている。その結果、ロックシェッドが終局状 態に至る場合の損傷は、頂版部に集中的に発生することが 明らかとなった。

そこで、本研究ではロックシェッドの頂版部のみに着目 し、緩衝材の影響を受けない状態および緩衝材を設置した 状態でのRCスラブの終局までの耐衝撃挙動データを取得 することを目的として、2辺支持大型RCスラブの重錘落 下衝撃実験を実施した。また、緩衝材としては従来から使 用されている敷砂の他に、ヨーロッパ(スイス)等で同種の 構造物上に使用されている砕石についてもその緩衝特性を 把握することを目的に、合わせて実験を実施している。本 論文では、上記実験ケースの中から緩衝材を設置しない状 態において実施した重錘落下衝撃実験結果について報告す るものである。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、実験に供した大型RCスラブ試験体の形状 寸法および配筋状況を示している。試験体は、著者らが 別途実施した2/5スケールの覆道模型実験試験体の頂版部 を参考に、厚さおよび配筋を決定している。すなわち、長 辺5m、短辺4m、純スパン長4m、版厚0.4mである。配筋 は、下面および上面の軸方向鉄筋としてD19を125mm間 隔(主鉄筋比0.67%)、配力筋についても軸方向鉄筋と同 様に下面、上面共にD19を125mm間隔で配置している。 また、スターラップとしてD13を千鳥配置している。 また、スターラップとしてD13を千鳥配置している。 鉄筋の材質は全てSD345であり、力学的特性値はD19の降 伏強度が393MPa、引張強度が580MPa、D13の降伏強度が 382MPa、引張強度が550MPaである。コンクリートのか ぶりは、鉄筋からの芯かぶりで60mmとしている。コンク リートの設計基準強度は24N/mm²であり、実験時圧縮強 度は34.2N/mm²であった。



図-1 試験体の形状寸法および配筋状況



写真-1 実験状況 (N-IS-H1.0)

実験 ケース	緩衝工	重錘 質量 M(kg)	載荷 方法	落下 高さ H(m)	衝突 エネルギー E _k (kJ)
N-II-H0.25				0.25	5
N-II-H0.50			繰り	0.50	10
N-II-H0.75	無	2,000	返し	0.75	15
N-II-H1.00				1.00	20
N-IS-H1.00	1		単一	1.00	20

表-1 実験ケース

2.2 衝撃実験概要

写真-1には、衝撃載荷実験状況を示している。実験は、 質量 2,000kg の鋼製重錘をトラッククレーンを用いて所定 の高さまで吊り上げ、着脱装置によりスラブ中央部に自由 落下させることにより行っている。使用した鋼製重錘は、 直径が 1.0m、高さが 97cm で底部より高さ 17.5cm の範囲 が半径 80cm の球状となっている。また、重錘質量は鋼製 円筒の内部に鋼塊とコンクリートを充填して所定の大きさ に調整している。なお、試験体は支点反力測定用のロード セルを設置した鋼製治具上に設置しており、重錘衝突時の 跳ね上がり防止のために支点治具上より試験体を貫通させ た鋼棒を用いて固定している。また、支点治具はロードセ ル下部の鋼材位置で回転できることより、両端ピン支持に 近い状態となっている。

表-1には、実験ケースの一覧を示している。実験は、 繰り返し載荷実験1体、単一載荷実験1体の合計2体に対 して実施している。繰り返し載荷実験では落下高さ0.25m から0.25m ピッチで落下高さを漸増させ、試験体の裏面コ ンクリートが押し抜きせん断破壊によって剥落するような 状況に至るまで実施している。単一載荷実験については、 繰り返し載荷実験の最終落下高さである1mで実施した。 実験ケース名は、第1文字目に緩衝材を使用していないこ とを示すN、第2文字目には載荷方法(II:繰り返し載荷 実験、IS:単一載荷実験)、第3文字目にはHの後ろに重 錘の落下高さ(m)を付し、それらをハイフンで結んで示 している。

2.3 計測方法

本実験における計測項目は、1) 重錘の頂部表面に設置し たひずみゲージ式加速度計(容量 500G および 1000G、応 答周波数 DC~5kHz および 7kHz)3 個による重錘衝撃力、 2) 支点治具上に設置した起歪柱型ロードルによる支点反 力、3) 非接触式レーザ変位計(応答周波数約 1kHz)によ る試験体変位である。

衝撃実験時の各種応答波形は、重錘衝撃力についてはサ ンプリングタイム 0.05ms、支点反力および変位については それぞれ 0.1ms および 1ms でデジタルデータレコーダにて 一括収録を行っている。また、各実験終了後には、試験体 のひび割れ状況をスケッチしている。

3. 実験結果

3.1 各種応答波形

図-2には、全実験ケースに関する重錘衝撃力波形、合 支点反力(以後、単に支点反力)波形および載荷点変位波 形をそれぞれのピーク値とともに示している。また、各波 形はいずれも重錘衝突時刻を零として整理している。

(a) 図より、繰り返し載荷実験である N-II-H0.25~N-II-H1.00の重錘衝撃力波形は、落下高さが低い N-II-H0.25 の 場合にはピーク近傍が比較的滑らかな正弦半波状の波形性 状を示しているが、落下高さの増加と共に波形の立ち上が り勾配が急になると共にピーク値近傍が鋭い三角形状の波 形性状を示している。波形の継続時間は N-II-H0.25 の場合 で約5ms であり、落下高さの増加と共に若干増加の傾向が 示されている。次に、落下高さが同一で載荷方法の異なる N-II-H1.00 と N-IS-H1.00 の波形を比較すると、波形の立ち 上がりからピークに至るまでの性状はほぼ同様であるもの の、N-II-H1.00 の場合には N-IS-H1.00 よりもピーク値が小 さく波形の継続時間も長くなっている。これは、それ以前 の繰り返し載荷により試験体にひび割れが多数発生し、剛 性が低下していたためと推察される。

(b) 図より、支点反力波形についてみると、繰り返し載 荷実験である N-II-H0.25~N-II-H1.00 では、いずれも重錘 衝撃力波形より若干遅れて励起されており、正弦半波状の 波形に高周波成分が合成されたような波形性状を示して いる。落下高さの増加と共に支点反力の最大値が増加し、 かつ最大値発生までの時間が遅くなる傾向が示されてい る。最大値発生以降は、減衰自由振動に対応した支点反力 波形が励起されている。次に、N-II-H1.00 を N-IS-H1.00 を 比較すると、波形の立ち上がりは両者共にほぼ同様であ るものの、単一載荷実験である N-IS-H1.00 のピーク値が N-II-H1.00 それよりも小さくなっていることが分かる。

(c)図より、載荷点変位波形についてみると、繰り返し 載荷実験ではいずれも重錘衝突によって励起される第1波 目の主波動とその後に続く減衰自由振動波形より構成され ている。また、緩衝材を設置していない実験であることか ら各波形は重錘衝突時刻との時間遅れがなく励起されてい る。最大変位および残留変位は、落下高さの増加に対応し て増加する傾向を示しており、共に除荷後の振動周期も延 びる傾向を示している。次に、N-II-H1.00 を 比較すると、波形性状は両者ほぼ同様であるものの、最大



図-2 各種応答波形

値は繰り返し載荷の場合が大きくなっている。これは繰り 返し載荷によって損傷が蓄積され剛性が低下しているため と推察される。一方、残留変位は単一載荷の場合が繰り返 し載荷の場合よりも大きい。これは、繰り返し載荷の場合 には、載荷履歴によってすでに曲げひび割れが発生してい る。そのため、主鉄筋は塑性化し、かつ残留変位が発生し ている状況下での再載荷状態であるため、歪硬化によって 単一載荷時に比較して見かけ上降伏点が上昇していたため と推察される。

なお、いずれの変位波形においても第1主波動が2つの ピークよりなっているが、2つ目のピーク発生時刻が重錘 衝撃力の第2波目と近似していることから、重錘衝突によ り鉛直下方に変位した RC スラブが最大変位を発生し、そ の後復元しようとした際に再度重錘が衝突しスラブが鉛直 下方に押し戻されるためと推察される。

3.2 各種応答値と衝突エネルギーの関係

図-3には、最大重錘衝撃力、最大変位、残留変位の各 種応答値と衝突エネルギーの関係を示している。

(a) 図には、全実験ケースの最大重錘衝撃力と衝突エネル ギーの関係を示している。繰り返し載荷実験における最大重 錘衝撃力は、衝突エネルギーが $E_k = 5kJ$ である N-II-H0.25 から $E_k = 15kJ$ の N-II-H0.75 までほぼ線形に増加している ものの、 $E_k=20kJ$ の N-II-H1.00 では N-II-H0.75 における最 大重錘衝撃力とほぼ同程度の値を示している。これは繰り 返し載荷による RC スラブの剛性低下や曲げ破壊および押 し抜きせん断破壊が顕在化したことに起因しているものと 推察される。一方、単一載荷実験である N-IS-H1.00 の最大 重錘衝撃力は、N-II-H0.25 から N-II-H0.75 までの最大重錘 衝撃力の増加傾向とほぼ線形的な関係を示していることか ら、試験体の衝突時の剛性低下が小さければ最大重錘衝撃 力は衝突速度に比例して増加するものと考えられる。

(b) 図には、最大変位と衝突エネルギーの関係を示して いる。繰り返し載荷実験における最大変位は、衝突エネル ギーに対してほぼ線形に増加していることがわかる。一 方、単一載荷実験である N-IS-H1.00 の最大変位は、試験体 に繰り返し載荷による損傷の累積がないことから、繰り返 し載荷実験の N-II-H1.00 に比較して 24 % 程度小さな値を 示している。

(c)図には、残留変位と衝突エネルギーの関係を示している。繰り返し載荷実験における残留変位は、衝突エネル ギー E_k=10kJを境に残留変位の衝突エネルギーに対する増加割合が増加していることが分かる。単一載荷実験である N-IS-H1.00の残留変位は、繰り返し載荷実験のN-II-H1.00 に対して約25%増加しており、最大変位とは逆の傾向を



示している。この原因は前述の通りである。

3.3 ひび割れ発生状況

図-4には、各実験終了後のスラブ下面のひび割れ状況 を示している。なお、N-II-H0.25の場合には、載荷点直下 のスラブ下面に微細なひび割れが若干発生しているが、紙 面の都合より割愛した。

繰り返し載荷実験では、N-II-H0.50において載荷点直下 を中心に放射状に斜めの曲げひび割れと、支点部に平行な 曲げひび割れが中央部に発生している。衝突エネルギーを 増加させた N-II-H0.75 および N-II-H1.00 では、放射状の斜 めひび割れが延伸し、支点部に平行な曲げひび割れが多数 発生すると共に押し抜きせん断破壊に起因する円形状のひ び割れが顕在化している。単一載荷実験の N-IS-H1.00 で は、同一の衝突エネルギーである N-II-H1.00 に比較してひ び割れの数は少なく、N-II-H0.50 と N-II-H0.75 の中間的な ひび割れ状況を示している。これは、載荷履歴の有無によ る差であると推察される。

4. まとめ

緩衝材を設置しない2辺支持大型 RC スラブの重錘落下 衝撃実験により以下のことが明らかとなった。

- 衝突エネルギーの増加に対応して最大重錘衝撃力はほ ぼ線形に増加するが、曲げ破壊および押し抜きせん断 破壊モードが顕在化することにより最大重錘衝撃力は 増加しなくなる。
- 載荷点の最大変位は、衝突エネルギーの増加に対応してほぼ線形に増加する。

- 3)残留変位は、衝突エネルギーの増加に対応して大きく なるが剛性の低下に伴い、衝突エネルギーの増加に対 する残留変位の増加割合は大きくなる。
- 4) 2辺支持大型 RC スラブの最終的な破壊モードは曲げ 破壊および押し抜きせん断破壊の複合したモードで ある。

参考文献

- 1) 熊谷守晃:ルランベツ覆道における落石災害に関する 報告、第2回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、pp.286-290、1993.6
- 2)岸 徳光、三上 浩:衝撃荷重載荷時に曲げ破壊が卓 越する RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提 案、構造工学論文集、Vol.53A、pp.1251-1260、2007.3
- 今野久志、岸 徳光、石川博之、三上 浩:敷砂を設置した大型 RC 梁の重錘落下衝撃実験、コンクリート 工学年次論文集、Vol.28、No.2、2006.6
- 4)岸 徳光、今野久志、三上 浩、岡田慎哉:大型 RC 梁の性能照査型耐衝撃設計法に関する一提案、構造工 学論文集、Vol.54A、pp.1077-1088、2008.3
- 5) 岸 徳光、三上 浩、栗橋祐介:矩形 RC 版の衝撃耐 荷挙動に及ぼす重錘直径の影響、構造工学論文集、 Vol.54A、pp.1034-1043、2008.3
- 6) 岡田慎哉、岸 徳光、西 弘明、今野久志: RC ラーメン構造の耐衝撃挙動に関する実験的検討および数 値解析手法の妥当性検討、構造工学論文集、Vol.55A、 pp.1388-1398、2009.3