

学 位 論 文 題 名

RC 落石覆道の合理的耐衝撃設計手法に関する研究

学位論文内容の要旨

本研究では、RC 落石覆道の合理的な耐衝撃設計手法を提案する目的で、落石覆道設計の現状の分析、さらには近年の落石事故の検討を踏まえ、RC 落石覆道の耐衝撃挙動を解明するための大型衝撃実験および動的応答解析を行い、RC 落石覆道の耐衝撃挙動を詳細に検討した。また最後に、これらに基づき新しいRC 落石覆道の設計法を提案した。

落石覆道は道路防災工の中で最も多くの建設費を要するものである一方、尊い人命を落石災害から守る極めて重要かつ適切な道路構造物である。それ故に、安全かつ経済的な設計法の確立が望まれている構造物の一つであると考えられる。このような観点のもとで、主に次の項目を最新の実験手法と解析で研究を行ってきた。

1. 落石荷重を正しく評価すること
2. 新しい緩衝構造（三層緩衝構造）の適切な適用法を確立すること
3. 動的荷重に対する適切かつ的確で簡易な断面力算定法を確立すること
4. 柱部材の軸衝撃挙動を把握すること

これらに関し、計測の面では中野らの三層緩衝構造の開発に端を発した、高精度な衝撃用ロードセルの開発、さらには計測点が100点を越えるような動的計測法とデータ処理に基づく実験解析、解析面では高速ワークステーションを利用した衝撃解析用汎用コード DYN3D による衝撃挙動解析を行いRC 落石覆道の合理的設計を研究してきたものである。

本研究によって新たに得られた知見等を再度、大きく二つの課題に分けて記述すると、

1) 緩衝材を介した落石荷重評価に関する課題

落石荷重評価に関するこれまでの研究で

- a) 現行の落石荷重算定は、振動便覧式に記載されている Hertz の衝突理論を用いて求められているが、本理論には適用に限界がある。
- b) また、鋼材倶楽部等で行った実験式は重錘衝撃力が主で、実際に構造物に作用する伝達衝撃力ではない。
- c) 緩衝材の緩衝効果には限界があり、経年変化で緩衝特性が変化するという欠点がある。また、敷砂による荷重分散は 45 度としていたが、これまでの研究によると荷重分散幅はこれより小さく、かつ土質特性によってもこれが異なってくる。

等の課題が明かとなってきた。

これに対し、本研究では、伝達衝撃力が覆道本体に作用する本来の荷重であるとのスタンスで次のことを明らかにしている。

- a) 敷砂緩衝材に関して大型実験を行った結果として、落下高さが低い場合は重錘衝撃力と伝達衝撃力はほぼ一致するが、落下高さが高くなると重錘衝撃力より伝達衝撃力が大きくなることを実証した。また、現行の荷重分散幅より分散幅が極端に狭いことを明らかにした。
- b) 一方、中野らが開発した三層緩衝構造の緩衝特性を把握するため、大型野外実験（重錘 3～5 tf、落下高さ 10～40 m）によって、三層緩衝構造を用いた場合の伝達衝撃力は、芯材 RC 版の荷重分散効果、及び EPS 材のエネルギー吸収効果により、敷砂緩衝材より場合によっては1/4 程度の小さくなること、さらに荷重分散範囲が格段に向上することを示し、本構造の緩衝性能が敷砂材より極めて優れていることを立証した。
- c) 三層緩衝構造の伝達衝撃力算定に関し、運動量保存則、およびエネルギー保存則を用いて

これを求め当該構造（芯材 RC 版の剛性および発泡スチロール（EPS）の厚さの決定）の設計を確立した。

2) 断面力評価及び柱部の設計に関する課題

設計断面力の評価及び柱部の設計に関してもこれまでの研究から、

- a) 現行の落石荷重の作用方法は、道路軸直角方向に中央他、5 点を載荷位置としているが、実際の落石は、覆道の 1 ブロックの任意点に落下することから落石荷重も任意点に載荷させることが現実的で、特に端部載荷の場合の部材算定に大きな影響を与える。
- b) 部材の設計における断面力は静的平面骨組解析により行い、この断面力を用いて設計しているが、現実的には覆道は立体構造であるとともに、落石荷重は衝撃荷重であることから衝撃時の応答を考慮した設計が必要となる。
- c) 柱の設計は、一般に曲げで決まることが多いが、これまでの災害ではせん断破壊が多く、この検討が必要である。

等の課題が指摘されていた。

これに対し本研究では、覆道が実際には 3 次元構造物であることから、落石荷重の作用位置（幅員方向任意点載荷、軸方向端部載荷、柱間載荷）によって断面力が異なることは明らかであり、地震時の動的応答と同じように、覆道自体の固有周期が載荷時間に近いため、動的（衝撃）応答倍率も考慮するのが重要であるとの認識に立ち、DYNA3D を用いて、断面方向載荷分布幅、軸方向載荷分布幅、および荷重載荷時間をパラメータとして解析を行なった。また、実覆道のこれまでの被災例を検証すると、頂版部の損傷とあわせて柱部材のせん断破壊が比較的多かったことから、RC 柱模型を用いた軸衝撃実験により、耐衝撃挙動に及ぼす帯鉄筋の影響の検討を行った。

この結果、

- a) 断面力評価に関しては、任意の載荷位置に関する静的解析に対する応答倍率、すなわち実応答値に関する最大包絡線分布を求めることができた。また、設計を簡便にするための動的応答値を考慮した単位荷重断面力算出表を作成した。この中で、軸方向の端部載荷に関し、応答断面力は、中央載荷に対して約 2 倍となること。
- b) 柱の帯鉄筋は、0.2 % 程度でも衝撃荷重載荷に対して耐荷力向上および損傷抑制効果があること。

等を明らかにした。

これらの結果をもとに、試設計を行ったところ、覆道頂版厚で比較すれば敷砂緩衝材を用いた場合、これまで現実的には落石覆工の適用範囲を超えると判断されていた落石荷重に対しても充分設計が可能であり、三層緩衝構造を用いた場合には、比較的大きな落石荷重に対しても極めて経済的かつ安全な覆道を設計することが可能であることが分かった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 角 田 興史雄

副 査 教 授 三 上 隆

副 査 教 授 佐 伯 昇

副 査 教 授 石 山 祐 二

学 位 論 文 題 名

R C 落石覆道の合理的耐衝撃設計手法に関する研究

わが国の道路は海岸部や山岳部を通過するものが数多くあり、落石に対する利用者の安全および交通障害の防止をはかるため、落石覆道の重要性は非常に大きい。しかし、落石覆道は覆道本体と緩衝工との複合構造からなり、その耐衝撃挙動は極めて複雑であり、従来の設計手法は経験に依存するところが多い。本研究は、落石覆道の実規模大型模型実験による重錘衝撃力および伝達衝撃力の高精度の測定と3次元衝撃応答解析に基づき、耐衝撃応答の基本性状を明らかにし、合理的な設計手法を提案したものである。

はじめに、数年前に北海道で最大規模の落石による損傷を受けた落石覆道について、その被害状況の詳細な調査分析および3次元衝撃応答解析による検討を行い、その損傷のメカニズムを解明することに成功し、従来の落石覆道の設計法の問題点を明らかにした。次に、落石覆道の3次元衝撃応答解析によって、端部など任意の位置に落石荷重が作用するときの応答断面力特性を明らかにし、最大断面力が中央部載荷時の断面力に対する応答倍率によって評価しうることを示し、それをもとに2次元解析による実用設計手法を提案し、その有用性を明らかにした。また、落石覆道の実規模大型模型実験を行い、重錘衝撃力および伝達衝撃力を精密に測定することによって、敷砂緩衝工の工学的な有効性は衝撃力がある限界値以下に限られることを明らかにするとともに、それを超える衝撃力に対しては、敷砂の表層材、芯材RC版、EPS（発砲スチロール）裏層材からなる3層緩衝構造が有利であることを明らかにした。また、実験結果の詳細な分析より、3層緩衝構造の芯材RC版の最小厚は落石衝撃力による貫通破壊防止の条件より、またEPSの最小厚は所定の塑性限界ひずみより決定するのが合理的であることを見い出すとともに、一方の厚さが多少不足しても、他方の厚さに余裕を持たせることで相互に補い得ることを明らかにした。次に、隣接する芯材RC版間の継手について検討するため、各種継手工法を用いた落石覆道の模型実験を行い、最も簡単な単なる突き合わせで十分なことを明らかにした。また、落石覆道の柱には従来、用心鉄筋としての最小量の帯鉄筋しか配置されないのが通例であったが、耐衝撃性能にとって帯鉄筋の適切な配置が肝要であることを明らかにした。最後に、以上で得られた知見を総合し、落石覆道の新たな合理的設計手法を提案している。

これを要するに、著者は、従来未解明な点が多かった落石覆道の耐衝撃性状について、実規模大型模型実験による重錘および伝達衝撃力の精密な測定結果と3次元衝撃応答解析に基づいてその基本性状を明らかにし、落石覆道の合理的な耐衝撃設計手法を提案したもので、構造工学の発展に寄与するところ大である。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。