

堆積圧によるガードレールの脱落とその防止策の検討

渡邊香歩¹・杉原幸信²・〇齋藤進¹・上村靖司²・大久保忠彦³・中川直人³・森山健太郎³・西澤遥耶³

(1:長岡技術科学大学大学院工学研究科 2:長岡技術科学大学機械系 3:(株)ネクスコ・メンテナンス新潟)

1. はじめに

寒冷地の道路施設において、ガードレール等を含む防護柵への雪害がしばしば問題となっている。特に除排雪の影響から堆雪量が多くなる切土法面下の堆雪敷において、部材同士を締結する部品が破損してガードレールが脱落する事例が多数報告されている^[1](写真 1)。部品の変形や破損が発生するとガードレールの安全性能が損なわれるため、修理・交換が必須となる。しかし、修繕費はもちろん交通規制や人員の確保に加え、雪の解ける春先に工事が集中することが問題となっている。本研究では堆雪圧によるガードレールの破損事例を分類し、耐雪型ブラケットおよび雪害対策型ブラケットに作用する応力を数値解析で評価する。



写真1 ガードレールの脱落事例^[1]

2. ガードレールの構成と破損事例の分類

2-1. ガードレールの構成

図1にガードレールの基本構成および各部名称を示す。なお袖ビームとはガードレールのVビーム端部に取り付ける部品である。

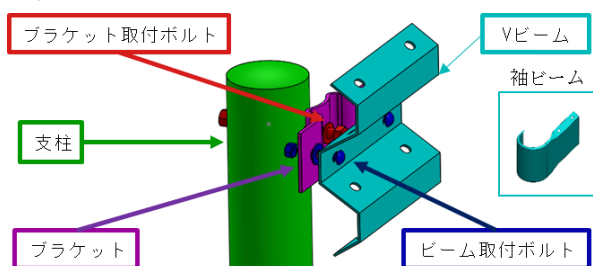


図1 ガードレールの構成

2-2. ガードレールの破損事例の分類

新潟県内で観察されたガードレールの代表的な破損事例を4つの分類に整理した(図2)。ビームが堆積圧を受けることで、ガードレール構成部品に引張りや、せん断、曲げが作用し、破損に至ると考えられる。以下に4つの分類の詳細を示す。

(1) 支柱曲げ破損

ビームが堆積圧を受けることでブラケット取付ボルトに引張り力が作用する。その力がブラケット取付ボルトナット側の角座金に作用し支柱上部に曲げが生じると推測される。予防策として、ブラケット下部に回転変形を防ぐ荷重支持部を取り付けてボルトに働く引張り力を小さくすること、支柱の厚みを増やすことなどが考えられる。

(2) ブラケット取付ボルト引抜け破損

ブラケット取付ボルトの引張り力がナットおよび座金を介して支柱表面に作用し、支柱のボルト取付穴の周囲の応力が高まる。そして、ボルト取付穴からき裂が進展し、ブラケット取付ボルトが引き抜けるのだと考えられる。また、ブラケットのボルト取付穴の周囲においても同様の現象が生じ、ブラケットがブラケット取付ボルトからの脱落と考えられる。予防策として、座金を大きくして支柱およびブラケットのボルト取付穴周囲表面に作用する応力を小さくすること、ブラケット下部に回転変形を防ぐ荷重支持部を取り付けてボルトに働く引張り力を小さくすること、支柱の厚みを増やすことなどが考えられる。

(3) ビーム取付ボルト引抜け破損

ビーム取付ボルトのボルト頭が、ビームのボルト取付穴から引き抜けることで生じる破損である。この事例は交換する部品がビームのみのため、メンテナンスの観点で考えると他の破損に比べ修理が安く済む。そのため大きな負荷が予想される地域においては、意図的にビーム取付ボルト引抜け破損が生じる状態とし、メンテナンスにかかる費用を最小にするという方法も考えられる。

(4) ビーム変形破損

支柱曲げやボルト引抜けに至っていないものの、ビームが変形している破損形態である。特に袖ビーム末端は支柱に締結されないため、袖ビームの支柱締結部を支点としたモーメントが作用し、破損しやすいと考えられる。そのため、予防策として袖ビーム末端をアンカー等で地面や斜面に固定するなどが考えられる。

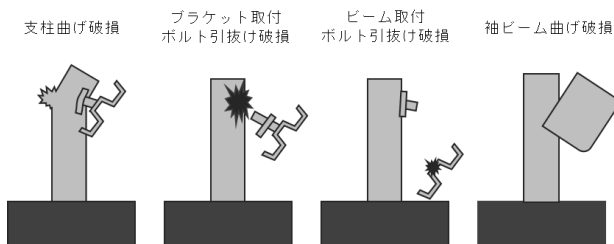


図2 破損の種類

3. ブラケット取付ボルト引抜き破損のメカニズムの考案

本研究ではブラケット取付ボルト引抜け破損に注目する。図3に切土法面下のガードレールに加わる力の模式図を示す。時間経過とともに積雪が圧密されることで、構造物には堆雪の自重に加えて沈降力が働く。伊東ら^[2]の報告には、『防護柵に関する一般的基準として用いられている「防護柵の設置基準・同解説」^[3]で参考掲載されている耐雪型防護柵では、既往研究の成果を基に、鉛直方向の積雪沈降力のみを考慮している^[4]。』と述べられている。そのため、雪に埋もれた構造物の破損には、堆雪の層間で起こる変形（クリープ）および堆雪と地面の境界面で起こる滑動（グライド）による斜面移動雪圧の影響が大きいと考えられる。したがって、堆雪がビームを押すことで、ブラケットが回転中心となり、ブラケット取付ボルトに強い引張方向の力が作用し引抜け破損に至ると考察する。

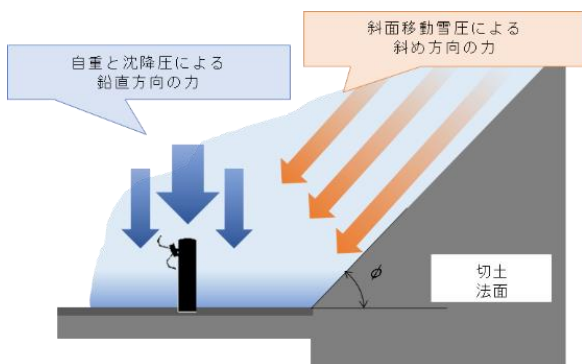


図3 切土方面下の防護柵に加わる力

4. ガードレール脱落事例の数値解析シミュレーション

4-1. ガードレールに働く力の概算

斜面移動雪圧がガードレールに及ぼす影響は認知されているものの、それを検証した例は少ない。本研究ではHaefeliの雪圧論^[5]を流用し、斜面と直角な面に働く力成分が減衰することなくそのままガードレールに作用すると仮定し、簡易的な計算を行った。また、求めた値を北海道で行われた切土法面直下にあるガードレールのブラケット取付ボルトの軸力測定実験^[6]の値と比較し、その妥当性を検証した。

図4に計算モデルを示す。計算を簡単にするため、積雪密度は高さに依らず一定とし、積雪深は雪面から地面までの鉛直方向の深さとした。また、表1、2に計算に用いる各値

を示す。

(1) 防護柵に働く水平方向の力 F_H

任意の地点上の斜面に平行する雪圧がそのまま防護柵に伝播すると仮定して、次式より防護柵に働く水平方向の力 F_H (kN m^{-1}) を算出した。

$$F_H = S_N \times \cos \varphi \quad (1)$$

$$S_N = \gamma_S \times \frac{H_S^2}{2} \times K \times N \times g \quad (2)$$

ここで、 S_N が斜面に平行な斜面雪圧成分 (kN m^{-1})、 φ は斜面傾斜角 [$^\circ$]、 g は重力加速度 [m s^{-2}] である。 H_S が積雪深 (m)、 K がグライド係数、 N がクリープ係数である。

(2) 防護柵に働く鉛直方向の力 F_V

F_V は S_N の鉛直方向成分と防護柵にかかる堆雪の沈降圧との合力とし、次式により算出した。

$$F_V = (0.8270\alpha - 44.17 + S_N \times \sin \varphi) \times g \quad (3)$$

ここで、 $0.8270\alpha - 44.17$ はガードレールの沈降力^[5] (kg m^{-1}) である。また、 α は標準尺による沈降力 (kg m^{-1}) で、次式^[5]で求める。

$$\alpha = 103.7 + 0.6991 \times W + 0.0003961W^2 \quad (4)$$

ここで W は積雪重量 (kg m^{-2}) であり次式より求める。

$$W = H_S \times \gamma_S \quad (5)$$

ここで γ_S は積雪密度 (kg m^{-3}) である。

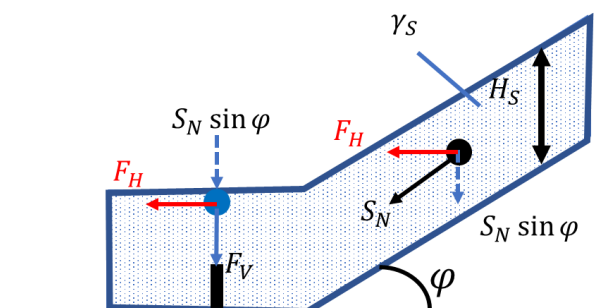


図4 計算モデル

表1 計算に用いる値

積雪密度 γ_S (kg m^{-3})	350
積雪深 H_S (m)	1~5
クリープ係数 N	0.8

表2 グライド係数

グライド係数 K	北向き	南向き
斜面 φ 30	2.6	3.2
斜面 φ 40	3.3	4.0

図5に積雪重量と防護柵に加わる力の関係を示す。グライド係数は $K = 2.6$ とした。今回の計算方法では、水平方

向に加わる F_H よりも鉛直方向に加わる力 F_V の方が大きいことが分かった。また、積雪重量を増加させたとき水平方向に加わる力 F_V の方が、増加量が多いことも分かった。

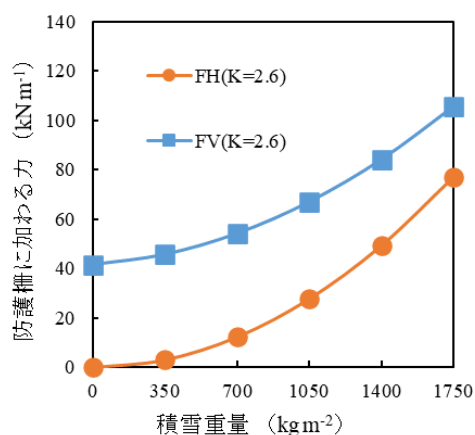


図5 積雪重量と防護柵に加わる力の関係

図6に斜面角度と防護柵に加わる力の関係を示す。鉛直方向に加わる力 F_V は水平方向に加わる力 F_H に比べ、その増加が小さいことが分かった。加えて、耐雪型防護柵は沈降の影響を加味し設計されている。また、破損事例では、いずれも曲げまたは引抜けによる変形・破損が見られ、せん断による破壊は見受けられなかった。

以上の結果から、本報告では鉛直方向に加わる力 F_V を無視し、水平方向に加わる力 F_H のみを考慮として、破壊への影響を考えることとした。

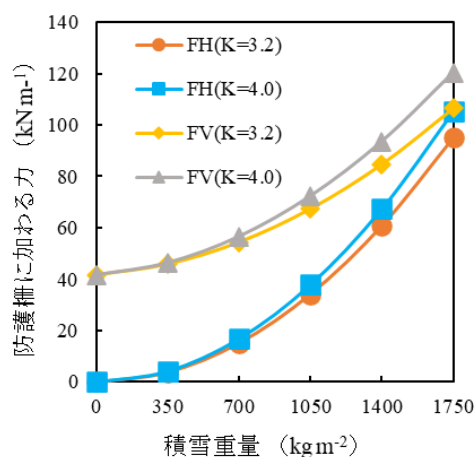


図6 斜面角度と防護柵に加わる力の関係

4-2. ブラケット取付ボルトに働く力の概算

過去に見受けられた破損事例よりブラケットの下端が支柱と接触している様子を確認した。そのため、これらの作用・反作用からブラケット取付ボルトに働く力を試算した。ブラケットとビームを一体とした剛体の平板を仮定し、力のつり合いを考える。その力の関係を図7に示す。計算を簡単にするた

め静定問題とし、変形・平行移動・回転は生じないと仮定した。斜面雪圧 S_N の水平方向成分、すなわち防護柵に働く水平方向の力 F_H がビーム上端へ静的荷重として作用し、ビーム中央に回転中心を取るものとした。

まず、力のつり合いを考えたと次式となる。

$$(F_H \times b) + P = Q \quad (6)$$

ここで、 P はブラケットが支柱を押す力[kN] (すなわち、支柱がブラケットを押し返す力と等しい)、 Q はブラケットがブラケット取付ボルトを引っ張る力[kN] (すなわち、ブラケット取付ボルトがブラケットを引っ張る力と等しい。以降、軸力と表記する。)である。ここで、 b はガードレールの支柱間隔[m]である。支柱間隔は北海道で行われた実験の際に用いられた Gr-A2-4E タイプを想定し、北海道開発局道路設計要領⁶⁾を準拠し $b = 4 \text{ m}$ とした。

次に、回転中心まわりのモーメントのつり合いを考える。以下に計算過程を示す。

$$P \times L_1 + Q \times 0 = (F_H \times b) \times L \quad (7)$$

$$P \times L_1 = (F_H \times b) \times L \quad (8)$$

ここで、 L はビーム上端からブラケット中心までの距離[m]、 L_1 はブラケット中心からブラケット下端までの距離[m]である。伊東ら²⁾の報告によると、「耐雪型は、ブラケット部が一般型に比べて板厚や幅が大きくなっており、積雪沈降力に対抗している。(板厚: 4.5 mm → 6.0 mm, 幅: 70 mm → 120 mm)」と述べられている。そのため、今回は $L = 175 \text{ mm}$ 、 $L_1 = 60 \text{ mm}$ とした。したがって、式⑥と式⑧よりブラケット取付ボルトに作用する軸力 Q は次式となる。

$$Q = \left(1 + \frac{L}{L_1}\right) \times F_H \times b \quad (9)$$

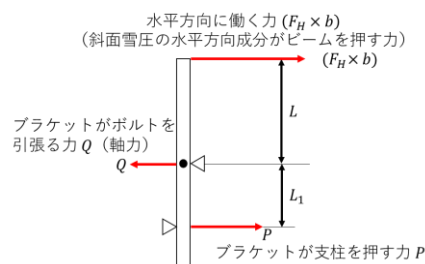


図7 ブラケットおよびビームを一体の平板とした簡易剛体モデルに働く力

図8に式⑨より得られた軸力 Q と積雪深 H_s の関係を示す。グライド係数を変更し、 Q を評価した。ここで、伊東ら²⁾は北海道の旭川門別自動車道のうち、比布JCT～愛山上川IC上にある切土法面直下にあるガードレールにかかる雪圧の被害状況の調査の中で、ブラケット取付ボルトの軸力測定を行った。実験に使われたボルトはM20の普通ボルトで、許容軸力は31.3[kN]である。このボルトが2月中旬、積雪深80[cm]時にボルト穴の一部が破損し応力開放が起こった。このときの軸力は42.6[kN]で許容値を超えていたと報告し

ている。図8を見ると、積雪深 80 [cm]のときの軸力は 30.3 ~ 41.3 [kN]となり、伊東ら^[2]の北海道で行われた結果と近いものとなった。そのため、本報告では、伊東らの軸力の測定結果 42.6 [kN]を次項の解析に用いることとした。

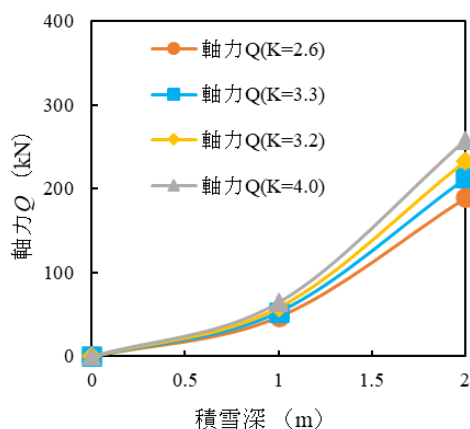


図8 軸力と積雪深の関係

4-3. ブラケット解析方法と結果

Solidworks2019を使用し、ブラケット表面の応力解析を行った。図9に解析モデルを示す。このモデルはVビーム、ブラケット、座金によって構成されている。それぞれの部品は結合されておらず、独立している。シミュレーション上、ブラケット中心線の下端、座金を完全固定とし、Vビーム上部の鉛直面に対して水平に負荷をかけた。このときの負荷 F_H は、11 [kN]とした。(軸力 42.6 [kN]を式⑧の Q に代入し導出)座金、ボルトはステンレス鋼 (sus304)とした。その他の部品は材料を普通鋼 (ss400)とした。

解析結果を図10に示す。図10(a)より、ブラケット表面の応力は座金接触面上部において大きくなっており、座金の片当たりが起きていることが確認できた。ブラケット取付ボルトがブラケットから引抜ける破損パターンの防止策として座金の外形を大きくし受圧面を広げることなどが考えられる。

荷重支持機構を取り付けたモデルを図10(b)に示す。図10(a)と比較すると、座金接触面上部に集中していた応力が分散していることが確認できた。よって図10(b)に示す雪害対策ブラケットは、ブラケット取付ボルト引抜け破損の防止に有用であることが分かった。

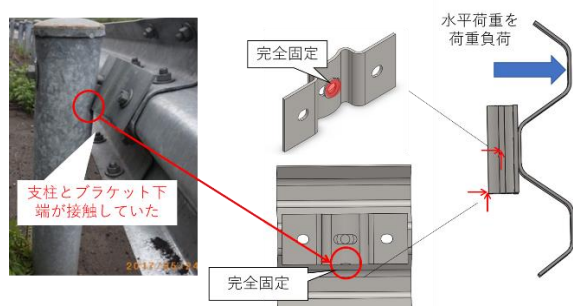
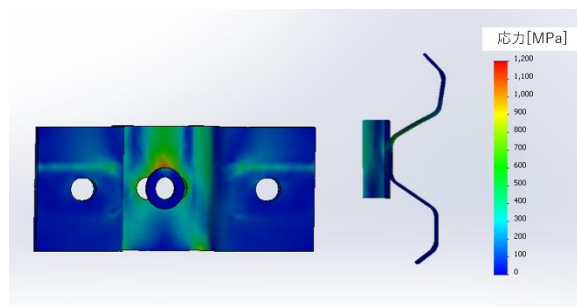
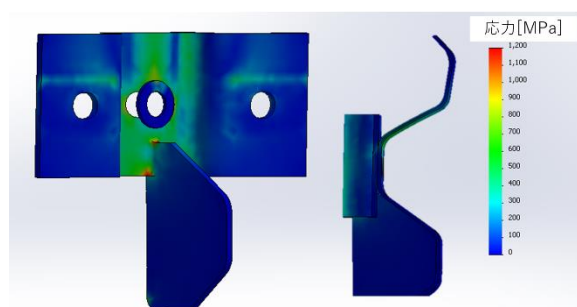


図9 ビーム-ブラケット-座金モデル



a. 耐雪型ブラケット



b. 雪害対策型ブラケット(荷重支持機構取付)

図10 ブラケット表面の応力分布

5. まとめ

本研究では、本研究では堆雪圧によるガードレールの破損事例の分類および構成部品の変形を数値解析で再現した。また、座金接触面上部に強い片当たりが起きていたことへの防止策として取り付けけた荷重支持機構は、有用であることがシミュレーション上で分かった。

文献

1. 渡邊香歩, 杉原幸信・上村靖司, 大久保忠彦・中川直人(2022): 堆雪圧によるガードレールの脱落とその防止策の検討, 寒地技術論文・報告集, Vol.38, 論文番号 II-009
2. 伊東靖彦, 山田毅, 加治屋安彦(2008):切土法面直下の路側に設置された防護柵にかかる堆雪圧, 寒地土木研究所月報, 660, 28.
3. (社)日本道路協会(2004):防護柵の設置基準・同解説, (株)丸善
4. (株)日本道路協会(1986):防護柵の設置要領・資料集(橋梁用防護柵・耐雪型防護柵), (株)丸善
5. 社団法人日本建設機械化協会(2004):2005 除雪・防雪ハンドブック
6. 国土交通省北海道開発局(2022):令和4年度北海道開発局道路設計要領 第2集 道路付帯施設