

I-19

弾性衝撃応答解析による PC 落石覆工の断面力分布特性

室蘭工業大学 フェロー 松 岡 健 一
 北海道開発局 正 員 佐 藤 昌 志
 北海道開発局 正 員 今 野 久 志
 室蘭工業大学 ○学生員 村 本 賢一郎

1. はじめに

著者らは、これまで落石防護構造物の一つである落石覆工について、実験的及び解析的に検討を行ってきた。特に RC 落石覆工については、片側側壁部に開口部を有する箱型構造型式や、片側が柱式である構造型式を対象として、実物実証実験結果に基づき、衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA 3D を用いた解析手法の検証を行っている¹⁾。また、この結果、両型式に対して、衝撃応答特性を考慮した実務設計への適用のための設計手法の提案も行ってきた^{2),3)}。PC 落石覆工についても、頂版部の PC 桁と柱部を剛結し、これを場所打ちの底版及び側壁一体構造にヒンジ結合する、いわゆる逆 L 型構造型式、また、これを剛結接合とする門型構造型式を対象に実規模実証実験を行い、その挙動を実験的に検討した^{4),5),6)}。さらに、これについても LS-DYNA 3D による解析を行い、実験結果と比較する形でその適用性を検討した⁷⁾。その結果、PC 落石覆工に対しても、LS-DYNA 3D による解析的評価が可能であることを示した。

PC 落石覆工の設計は従来、落石対策便覧⁸⁾に基づいて行われており、衝撃荷重は落石による衝撃力を振動便覧式により算出し、緩衝材による分散効果を考慮した上で、静荷重として取り扱われている。また、設計のための断面力の評価は、荷重分担率を仮定して静的な二次元骨組構造として解析することにより行われている。しかしながら、落石覆工は落石等による衝撃力を受ける構造物であるから、当然 PC 落石覆工も RC 落石覆工と同様、衝撃応答特性を考慮した設計手法の確立が求められるが、PC 落石覆工については、このための実務設計に適用可能な設計資料は十分蓄積されていない。

以上の観点から、本論文では逆 L 型 PC 落石覆工に対して実設計のための基礎資料を得ることを目的として、PC 落石覆工の桁に作用する衝撃荷重の載荷位置を変化させ、三次元衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA 3D を用いて検討を行った。また、緩衝構造による影響の検討のため、荷重の分布状態を変化させた場合の比較も行っている。

2. 解析仮定

2.1. PC 桁の設計条件

本研究で解析に用いた PC 覆工のモデルは、北海道開発局開発土木研究所が江別市角山に建設した図-1に示すような実規模 PC 覆工モデルを基本としている。この覆工の PC 桁は、以下に示す条件の下に設計されたものである。すなわち、1) 落石荷重 1 tf、落下高さ 30 m で自由落下させる。2) ラーメ定数を $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ とし、振動便覧式によって算出された 119.2 tf の衝撃荷重が桁中央部に作用するものとする。3) 落石対策便覧に従って荷重が敷砂厚の 2 倍の領域に分散することとする。4) コンクリートの設計基準強度を 600 kgf/cm^2 、許容引張応力度を 28 kgf/cm^2 、

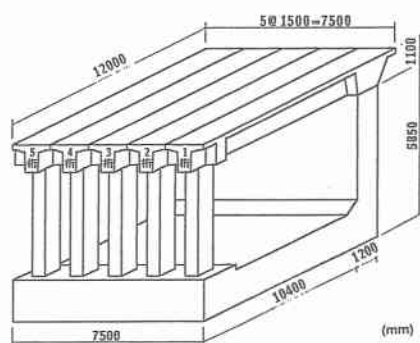


図-1 PC 覆工概略形状図

Elastic impact response analysis on sectional forces of PC rock-shed.

by Ken-ichi G. MATSUOKA, Masasi SATO, Hisasi KONNO, Ken-ichiro MURAMOTO

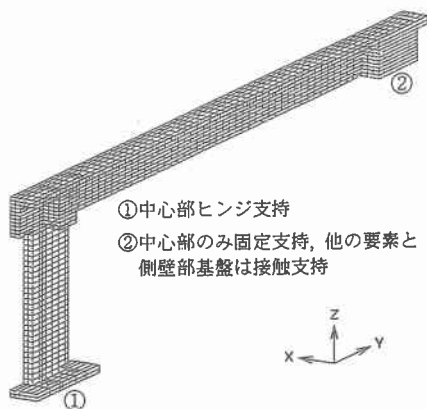


図-2 要素分割状態

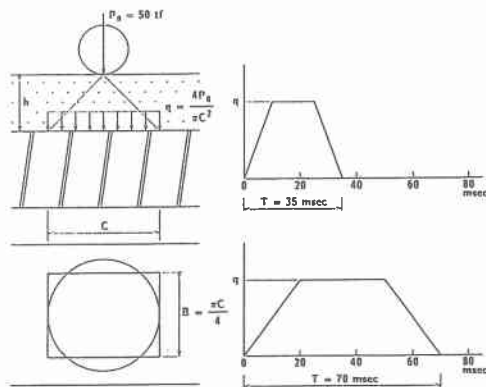


図-3 荷重の分布状況

弾性係数 $3.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ とする。以上により設計したPC桁は頂版幅 149cm, 頂版厚 20cm, ウェブ幅 50cm, 桁高 110cmの単純 T 型断面である。

2.2. 解析モデル

本研究では、PC 落石覆工の特徴である頂版桁と柱部の挙動を検討することとしてこれをモデル化した。従って、底版及び側壁は剛基礎として、解析では考慮していない。要素分割は、一般に PC 覆工が各構成主桁の荷重分担率による設計が可能なこと、及び主桁の対称性を考慮し、桁の $1/2$ をモデル化し、弾性体と仮定して全て三次元固体要素として解析を行った。本解析に用いた要素分割図を図-2に示す。なお、ここで用いる座標軸は、図に示す通り覆工軸方向を x 、幅員方向を y 、鉛直方向を z 軸とした。また、PC 桁-側壁部基盤及び柱-底版部基盤の各接合部は、実際の設置条件によりヒンジ結合としているが、桁-側壁部基盤の接合部については、実構造物が PC 鋼棒による接合であることを考慮して、側壁の厚さ方向に対しての中央部に当たる要素 1 列を側壁部基盤と剛結させ、他の接合面には接触面を定義し、桁を側壁部基盤に載せる形でモデル化している。解析に用いた各材料定数は、弾性係数 $3.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.2$ 、単位体積重量 $\omega = 2.5 \text{ gf/cm}^3$ とした。

2.3. 衝撃荷重分布

本研究では許容応力度法に基づく設計を行うための基礎資料を得ることを目的としていることから、衝撃荷重の最大値は任意に設定できるが、便宜的に 50 tf とした。また衝撃荷重は緩衝材により分散され、部分分布の状態で覆工頂版上に作用するものとして解析を行った。落石による実衝撃荷重は従来同心円上に分散分布すると考えられるが、ここではこれを幅員方向分布幅 C 、軸方向分布幅 $B = \pi C/4$ とする円形分布と等価な矩形分布に換算して入力することとした。覆工頂版上への載荷分布幅は、緩衝構造により異なる。このことからここでは、落石対策便覧で規定している荷重分布特性に基づいて仮定した荷重分布、及び敷砂緩衝材（敷厚 90 cm）並びに三層緩衝構造（表層材：敷厚 50 cm の敷砂、芯材：20 cm 厚の RC 版、裏層材：50 cm 厚の発泡スチロール材）を用いた著者らの実証実験から得られた荷重分布の 3 つの衝撃荷重を対象として検討を行うこととした。衝撃荷重の空間分布及び時間分布を図-3に示し、以下に衝撃荷重の概要を述べる。

ケース 1：敷厚 90 cm の敷砂単層を仮定し、衝撃荷重分布幅を実証実験に基づいて $C = 1.0 \text{ m}$ とし、載荷時間分布を継続時間 $T = 35 \text{ msec}$ と仮定した場合。

ケース 2：敷厚 90 cm の敷砂単層を仮定し、衝撃荷重分布幅を落石対策便覧に基づいて $C = 1.8 \text{ m}$ （敷厚 $\times 2$ ）とし、載荷時間分布を継続時間 $T = 35 \text{ msec}$ と仮定した場合。

表-1 入力衝撃荷重ケース一覧

荷重ケース	幅員方向分布幅	軸方向分布幅	載荷時間
ケース 1	$C = 1.0 \text{ m}$	$B = 0.785 \text{ m}$	$T = 35 \text{ msec}$
ケース 2	$C = 1.8 \text{ m}$	$B = 1.414 \text{ m}$	$T = 35 \text{ msec}$
ケース 3	$C = 3.0 \text{ m}$	$B = 2.356 \text{ m}$	$T = 70 \text{ msec}$

ケース3：三層緩衝構造の緩衝性能実験結果に基づいて、衝撃荷重分布幅を $C = 3.0$ m、載荷時間分布をケース1と同様な台形状分布とし $T = 70$ msec と仮定した場合。

以上の各荷重ケースの一覧を表-1に示す。

表-2 断面力定義一覧

断面力	記号	PC 桁部	柱部
幅員方向曲げモーメント	M_y	$\int_{A_1} \sigma_y z dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_y z dA_2$
幅員方向せん断力	Q_y	$\int_{A_1} \tau_{yz} dA_1$	$\int_{A_2} \tau_{yz} dA_2$
幅員方向軸力	N_y	$\int_{A_1} \sigma_y dA_1$	$\int_{A_2} \sigma_y dA_2$

A_1 : 桁の断面積 A_2 : 柱の断面積

3. 解析結果及び考察

著者らの研究によれば、三次元衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA 3D を用いた解析により、PC 落石覆工の衝撃挙動を十分評価できることが明らかとなっている。しかしながら、PC 落石覆工の三次元衝撃応答特性を考慮した実設計を行うためには、覆工の断面寸法、荷重分布幅、荷重載荷位置等の各種設計条件を変数とした多量の解析を行い、基礎資料を作成することが必要である。本論文では、上で述べた解析モデル及び荷重条件を対象に、荷重載荷位置のみを変化させた解析を行い、PC 落石覆工の衝撃応答特性に及ぼす載荷位置の影響を検討する。また、ここでは実設計における断面力評価を前提としているため、LS-DYNA 3D によって得られた要素応力を断面力に換算して評価を行っている。ここで用いている断面力の定義一覧を表-2に示す。

3.1. 断面各点における最大応答値の包絡線分布

ここでは、柱側の桁端から桁のスパンの $1/4, 2/4, 3/4$ の位置それぞれに衝撃荷重を載荷させ、その各断面力の応答性状について検討を行った。衝撃荷重が各載荷点に作用した場合における曲げモーメント M_y 、せん断力 Q_y 、軸力 N_y に関する各断面の正負の絶対値の最大値包絡線分布を図-4に示す。図では、断面内側に正值を、外側に負値を示している。また、車軸方向の曲げモーメント M_x 、せん断力 Q_x 、軸力 N_x は幅員方向の各断面力に比べて小さいので、ここでは省略した。

(a) M_y の分布

M_y の分布は、図-4 (a)からも明らかのように、各載荷点部において正の最大値を示し、桁の両端部に向かって減少していく。特に $2/4$ 点載荷時における最大値は他の載荷点における最大値よりも2倍程度大きな値を示している。柱部においては、モーメントは上部で大きく、下部のヒンジ支点に向かって直線的に減少していく。また、緩衝材による影響を検討すると、ケース2の挙動を示す図中点線がケース1の実線とほぼ重複していることから、ケース1及びケース2における応答性状には顕著な差が見られないことがわかる。また、ケース3（三層緩衝構造）における応答性状は、敷砂を緩衝材としたケース1、ケース2に比べ、その50%程度の小さな値を示している。これは、本研究においては荷重をPC桁1本に対して載荷していることより、その三層緩衝構造の荷重分散性を考慮した場合、桁1本が分担する荷重が大幅に抑制されていることの結果といえる。

なお、逆L型構造型式として、ケース2と同様の空間分布及び荷重強度を用いた2次元静的骨組構造により得られる値を $2/4$ 点載荷時のみ、図中に二点鎖線で示した。三次元衝撃応答解析結果は荷重作用時間が短いことから、荷重強度が同一であれば、桁部の正の最大値及び柱部の負の最大値は静的解析値より小さな値を示す。しかし静的解析では、当然のことながら動的解析で見られるそれぞれの逆曲げモーメントの評価は行えない。

(b) Q_y の分布

図-4 (b)より、敷砂単層の場合におけるせん断力の分布は、どの載荷点においても最大値は30 tf程度、三層緩衝構造においてはその半分程度の値を示している。また、桁一側壁の接合部においては、接合点の周囲では桁側と側壁側が線的に互いに接地していることより反力が生じ、接合点を境界に大きな正負のせん断力が発生している。桁部のせん断力の最大値は、 $1/4$ 点載荷では柱側、それ以外では側壁側で生じている。柱

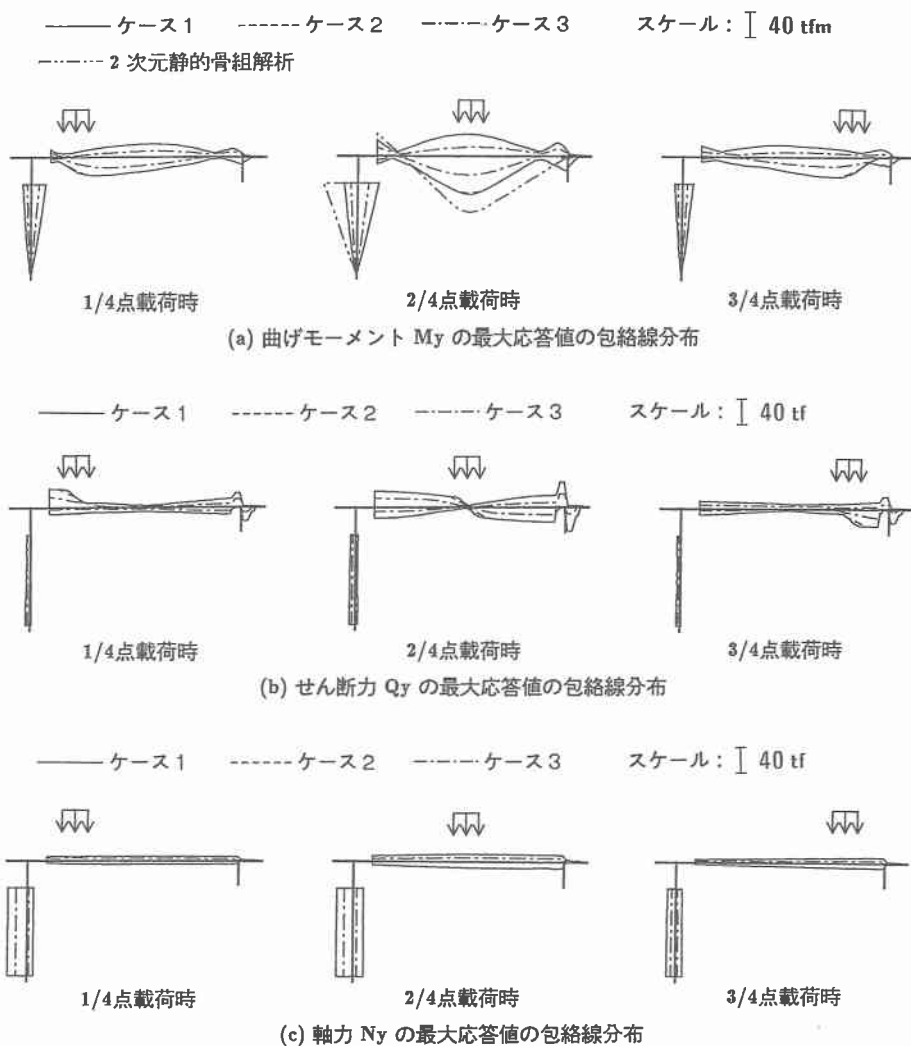


図-4 曲げモーメント M_y , せん断力 Q_y , 軸力 N_y の最大値に関する包絡線分布

部については、荷重載荷位置による変化がそれほど顕著ではない。

(c) N_y の分布

鉛直方向の荷重が桁に作用する場合、柱部の軸力は上部から下部まで一定に作用することが予想されるが、本解析においても、その性状がそのまま表れた形となっている。また、1/4点及び2/4点載荷時の柱部圧縮軸力は、3/4点載荷時に比較して2倍程度の応答を示している。いずれの載荷位置でも最大値は30tf程度であり、桁に関しては、それより小さく10tf程度の値が桁全体に渡って分布している。ここでも、三層緩衝構造を模したケース3が敷砂を用いた場合の50%程度の応答値を示していることがわかる。

3.2. 断面の最大断面力包絡線分布

ここでは、覆工のPC桁1本に対して、衝撃荷重を幅員方向の任意の位置に載荷させた場合の挙動について考察する。具体的解析手法としては、PC桁上に載荷させる衝撃荷重の位置を柱側端から40cmピッチで側壁端まで変化させ、その各数値解析結果を断面力に換算し、全載荷位置、全応答時間中の最大値を取る

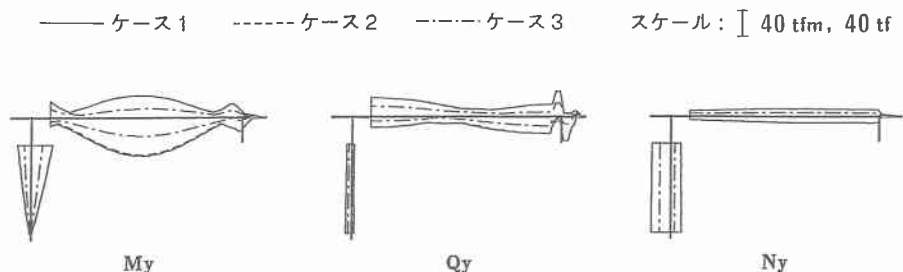


図-5 断面の最大断面力包絡線分布

形で包絡線を作成した。本研究における総解析ケース数は、予備解析も含め、約 120 ケースである。これより得られた各断面力の最大包絡線分布を図-5 に示す。正負の表示は図-4 と同じく、断面内側に正値を、外側に負値を取り、ケース 1 を実線、ケース 2 を破線、ケース 3 を一点鎖線で表している。また、各最大値のうち、代表的な点について数値的な検討も行うため、その各点の断面力値を表-3 に示した。ここで用いた代表的着目点の位置を図-6 に示す。車軸方向の各断面力については、幅員方向の値と比べごく小さいので、前項と同様ここでも省略する。

(a) My の最大包絡線分布

最大断面力包絡線における My の分布は、形状的には前項の 1/2 点載荷時のものと同様であるが、桁の中央部を極大としてより緩やかな曲線を描き、端部に向かって減少していく。その値は、ケース 1 の着目点①では 60.8 tfm、ケース 2 では若干載荷幅の違いによる緩衝効果より、58.7tfm を示している。また、幅員方向載荷幅が 3 m であるケース 3 については 30.0 tfm を示し、桁 1 本の負担する応力としては敷砂単層の半分程度であることがわかる。桁の両端部②、③における負の曲げモーメントについては、最大でも 25 tfm 程度であり、中央部の衝撃反動より生じる負の曲げモーメントの最大値とほぼ同じ、もしくはやや小さい値を示している。

また、柱部においても前項と同様の性状を示しており、モーメントは上部で大きく、下部ヒンジ端に向かって直線的に減少していく形となる。その値はケース 1 では柱上部で最大 35.1 tfm、ケース 3 では 18.7tfm となっている。

(b) Qy の最大包絡線分布

Qy の分布については、PC 桁一側壁部基盤の接合部を除いては特異な性状は示しておらず、桁部で着目点②に表れているような 29.0 tf、柱部では④の示す 8.5 tf 程度の値が各部一定に作用していることがわかる。また、ここでもケース 3 における挙動は他の

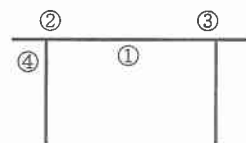


図-6 着目点の位置

表-3 代表的な点における各断面力の比較

断面力	ケース	着 目 点			
		①	②	③	④
My (tfm)	1	60.8	-24.9	23.8	35.1
	2	58.7	-24.7	-23.6	34.8
	3	30.0	-13.2	-10.6	18.7
Qy (tf)	1	18.3	-29.0	-39.0	-8.5
	2	19.5	-28.9	-38.7	-8.4
	3	8.6	-16.1	-20.2	-4.5
Ny (tf)	1	-11.3	-8.1	-10.0	-30.0
	2	-11.1	-8.0	-9.8	-28.9
	3	-5.1	-3.8	-4.8	-16.6

される。

(c) N_y の最大包絡線分布

軸力の性質上、最大包絡線においても柱部の応答値は上端から下端までほぼ一定の値を示している。この圧縮最大値は、当然のことながら荷重が柱の直上に載荷したときのものであり、その値はケース 1 で 30.0 tf、ケース 3 においても 16.6 tf 程度を示している。また、桁部においては、柱側から桁一側壁部のヒンジ点まではケース 1、ケース 2 で 10 tf 程度の軸力が発生しており、ケース 3 で 5 tf 程度となっているものの、応力値としてはごく微小値である。

また、側壁部基盤に剛結している節点に作用する合応力の正負の最大値は、ケース 1 で 25.0 tf、-30.4 tf、ケース 2 で 24.7 tf、-30.0 tf、ケース 3 では 8.0 tf、-16.3 tf である。これらは実構造では接合部の鋼棒が負担することとなるが、引張力の最大値は、ケース 1、2 で作用荷重の約半分であり、これに対応した鋼棒の配置が必要となると考えられる。

4. まとめ

逆 L 型 PC 落石覆工に対して実設計のための基礎資料を得ることを目的として、衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA 3D を用いた解析を行った。本研究では、PC 桁 1 本に対して衝撃荷重の載荷位置、及び分布幅による影響を検討するため、これらのパラメータを基に数種の解析ケースを設定し、数値解析を行った。本研究で得られた結果を要約すると以下のようである。

- 1) 本 PC 桁の桁幅が約 1.5 m であることから、各断面力の性状は、緩衝材が敷砂単層である場合には衝撃荷重の分布幅の違いによる影響がほとんど見られない。
- 2) 緩衝材が三層緩衝構造である場合の断面力性状は衝撃荷重の分散効果により、敷砂単層を用いた場合の 1/2 程度となる。
- 3) PC 桁一側壁部基盤の接合部については、鋼棒による接合の場合には、その鋼棒に作用する引張力に対して十分な検討が必要であると考えられる。

設計のための簡易で合理的な PC 覆工の断面力算定を実現するためには、さらに多様のパラメータを設定、変化させた解析を行なうとともに、側壁部の影響についても検討する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 佐藤昌志, 今野久志: 敷砂や三層緩衝構造を設置した場合の柱式 RC 覆道の衝撃挙動解析, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1773 ~ 1782, 1998.3.
- 2) 佐藤昌志, 岸 徳光, 松岡健一: 3 次元挙動を考慮した RC ロックシェッドの設計断面力評価, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 52 号 (A), pp.278 ~ 283, 1996.2.
- 3) 岸 徳光, 松岡健一, 佐藤昌志, 今野久志, 上坊寺実: 柱式 RC 覆道の弾性衝撃挙動, 第 4 回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム公演論文集, pp.71 ~ 78, 1998.6.
- 4) 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, 1996.3.
- 5) 西 弘明, 佐藤昌志, 岸 徳光, 松岡健一: 敷砂緩衝材を用いた実規模門型 PC 落石覆工の衝撃挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.1181 ~ 1186, 1996.
- 6) 岸 徳光, 松岡健一, 佐藤昌志, 今野久志, 池田泰博: 逆 L 型及び門型 PC 覆工の衝撃応答性状, 第 4 回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム公演論文集, pp.59 ~ 64, 1998.6.
- 7) 岸 徳光, 佐藤昌志, 角掛久雄, 山内昌昭: PC 覆工の衝撃挙動への梁柱部接合方法の影響, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 52 号 (A), pp.266 ~ 271, 1996.2.
- 8) 日本道路協会: 落石対策便覧, pp.16 ~ 17, 1983.