Ⅰ－2　重錘落下衝撃を受ける柱式実 RC 覆道の挙動解析

室蘭工業大学　正員　岸　徳光
開発土木研究所　正員　佐藤昌志
開発土木研究所　正員　今野久志
室蘭工業大学　学生員　上坊寺実

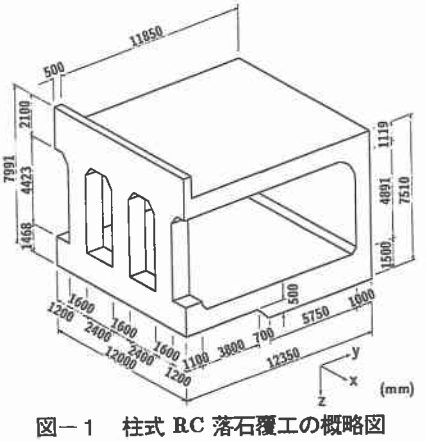
1. はじめに

山岳部や海岸線等、急峻な地形にある道路には落石覆工が設けられているが、落石覆工の設計においては、落石などによる衝撃力の作用を考慮しなければならない点に特徴がある。従って落石覆工の設計法を検討するためには、これら衝撃力に対する落石覆工の挙動の把握が重要となる。しかしながら、衝撃的外力を受ける落石覆工の解析的研究は、これまでそれほど多く行われていない。特に立体的な動的解析は、著者らの他はほとんどみられない。著者らは、これまで主として開口部を有する箱型 RC 覆工を対象とした。帯板理論を用いた簡易解析法の提案や LS-DYNA3D を用いた立体解析を行い、結果を発表してきた。[1),2)] その結果、開口部を有する箱型RC覆工に対しては、許容応力度設計に基づいた実設計手法を提案している。一方、RC覆工は断面形状に対する自由度が大きいことから、種々の形式のRC覆工が建設されている。これを構造形式で分類すれば、先に述べた箱型と柱式に分けられる。従って、衝撃挙動を考慮したRC覆工の実設計手法を確立するためには箱型のみならず柱式のRC覆工に対しても衝撃挙動を把握することが必要である。

本研究では、このような観点から柱式実 RC 覆工の一ブロックを対象として、重錘落下による衝撃力を与えた場合の 3 次元衝撃挙動解析を行った。解析は、主として柱式 RC 覆工の衝撃特性に及ぼす衝撃荷重載荷位置の影響に着目して行った。具体的には、緩衝材として敷砂材を用いた場合を想定し、これの任意点に衝撃荷重を載荷したときの各断面力分布の特性を検討した。また、同じ条件で行われた実覆工の衝撃実験結果とも比較し、解析の妥当性を検証した。

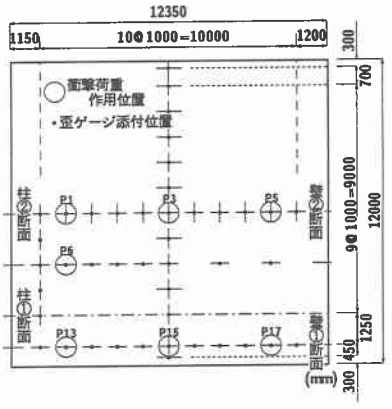
2. 解析条件

解析の対象とした柱式 RC 覆工は、松前町字白神にある一般国道 228 号に設置された立岩覆道の一ブロックである。解析ブロックの概略形状を図－1 に示す。本覆道の設計条件等については、文献 3) に詳しいのでここでは省略する。解析は、衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA3D を用いて行った。解析の目的は、柱式RC覆工の衝撃挙動特性を、特に載荷位置の影響を明らかにすることである。本研究では、特に図－2 に示す荷重載荷位置の解析ケースについて検討を行った。図－3 に立岩覆道のモデル化および要素分割の一例を示す。要素分割は、載荷点部を密にしているため、各解析ケースにより異なる。覆工モデル底版の境界条件は、箱型 RC 覆工の実証実験結果[1)]より、基礎地盤の影響が少ないことが明らかであるため、本解析でも基礎地盤を無視し、底版の端辺を上下方向に拘束することとした。また、コンクリートの弾性係数は $E = 3\times10^5$ kgf/cm^2、ポアソン比は $\nu = 0.2$、単位体積重量 $w = 2.5$ gf/cm^3 と仮定している。衝撃荷重は、本実証実験において覆工への伝達衝撃力分布が求められていないことより、落下条件が同一の開口部を有する箱型 RC 覆工である美幌覆道の実

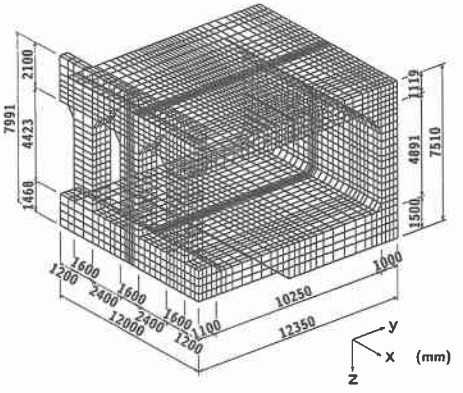


図－1　柱式 RC 落石覆工の概略図

Three-Dimensional Elastic Impact Analysis of Column-Type RC Rock-sheds under Weight Falling
by Norimitsu KISHI, Masasi SATOU, Hisasi KONNO and Minoru JOUBOUJI

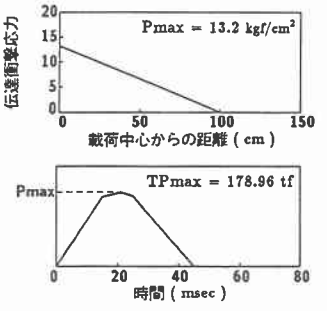


図－２　歪ゲージ位置および荷重作用位置図



図－３　解析モデルおよび要素分割図

証実験で得られた伝達衝撃力分布を用いることとした。数値解析ではこれを図－４に示すように直線近似して入力している。また、荷重は点対称分布しているものと考えられるが、ここでは簡略化して等価な二軸対称分布と仮定している。なお、最大伝達衝撃力 TP_{max} は 178.96 tf である。



図－４　作用衝撃力の空間および時間分布

3. 解析結果および考察

本解析による結果は各要素の歪や応力として得られるが、ここでは実験値との対応を考慮して各断面における断面力に換算して整理し、評価することとする。

3.1. 中央部断面（P1. P3. P5）載荷時

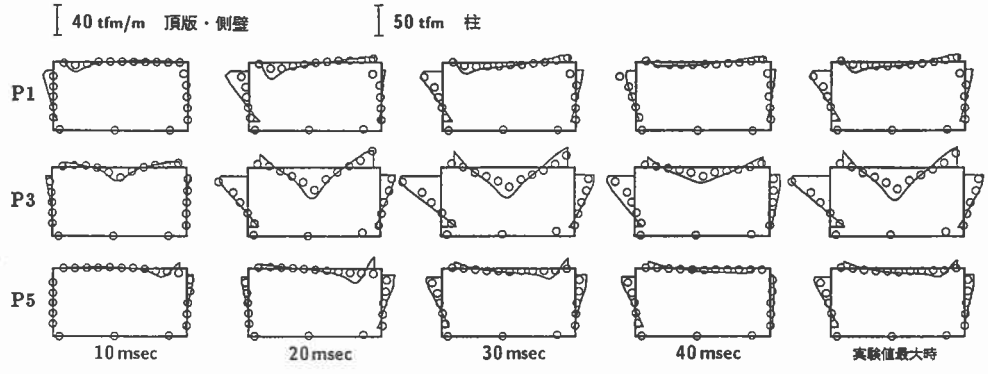
中央部断面（P1, P3, P5）載荷時の断面力（断面方向曲げモーメント My、軸方向曲げモーメント Mx および断面方向軸力 Ny）の断面方向分布の経時変化を図－５、６に示す。図中には解析値を実線で、実験値を○印で示し、解析結果を衝撃荷重の立ち上がりからの時間で 10 msec から 10 msec 間隔に 40 msec までの時間的変化と実験値の最大断面力発生時の分布を解析値とともに示した。

図－５に My および Mx の分布を示す。P3 載荷時の My の分布は、載荷点で最大値を示し端部に向かって減少し、柱部および側壁部との接合部近傍で反転している。柱部および側壁部では上部で大きく、下部で小さな値となっている。全体として解析値と実験値は比較的良く一致しているものと考えられる。これに対して、Mx は My に比べ全体として小さく、解析値は実験値よりやや大きくなっている。P1 および P5 載荷時では、P3 載荷時と比較していずれの場合もかなり小さい。My および Mx は解析値および実験値とも載荷点において大きい傾向を示すものの、載荷点付近では解析値の方が実験値より大きい傾向にある。柱部および側壁部の分布は、解析値と実験値とは比較的良く一致している。

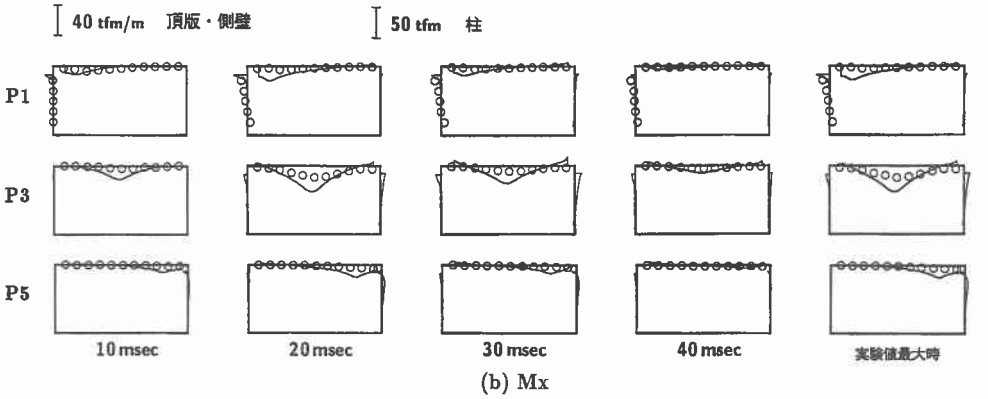
次に Ny（図－６）は、柱部および側壁部で大きな値を示し解析値と実験値は比較的良く一致している。頂版部では解析値と実験値は大きく異なっている。しかしながら、解析値および実験値とも軸力による応力度は、最大でも 5 kgf/cm^2 程度と曲げ応力度に比べて無視できるほど小さい。Ny は、P1 載荷では柱部で大きく、P5 載荷では側壁部で大きくなる分布を示している。Ny 分布状況の解析値と実験値の経時変化は P1 載荷時の側壁部を除いてかなり良く一致している。

3.2. 端部断面（P13, P15, P17）載荷時

端部断面（壁①断面）断面方向（P13, P15, P17）載荷時の載荷断面における断面力分布の経時変化を図－７、８に示す。ただし、実験結果から得られる断面力が My および Ny のみであることより、ここでもこ

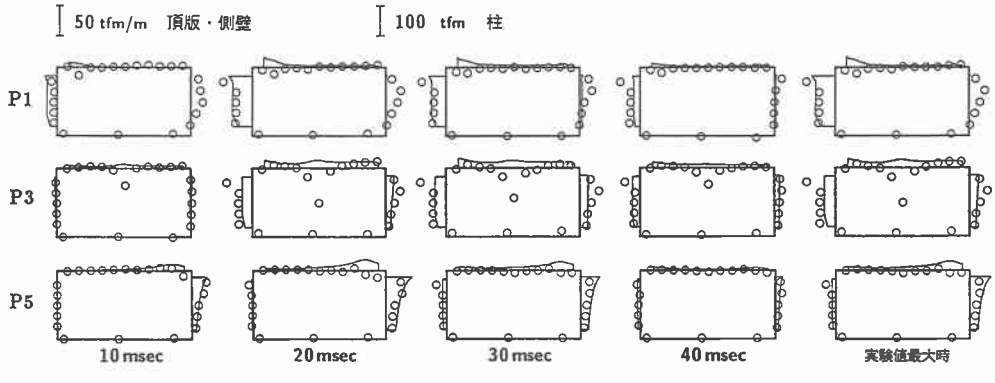


(a) My



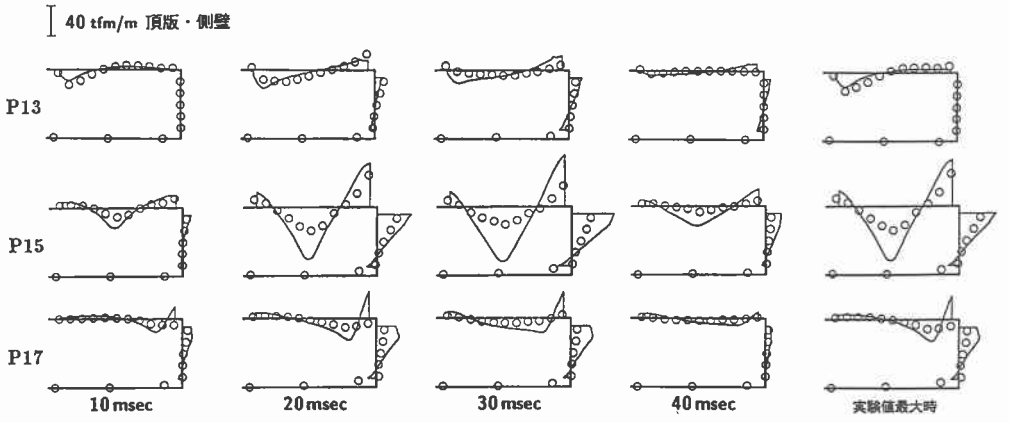
(b) Mx

図－５　P1, P3, P5 載荷時の My および Mx の経時変化

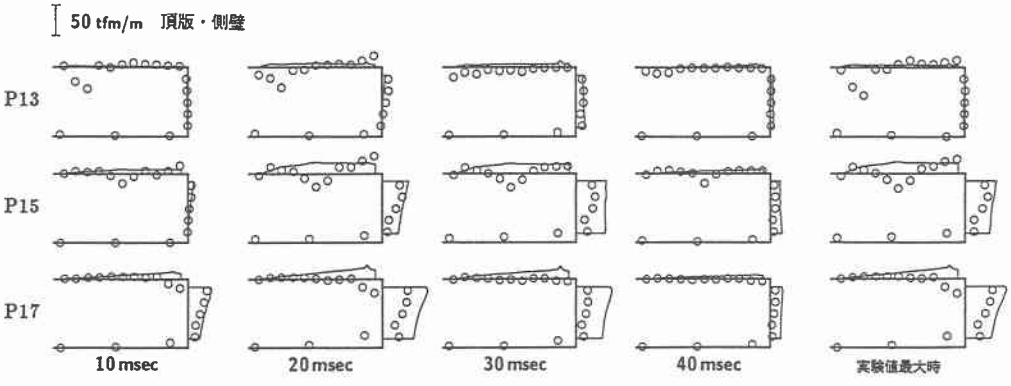


図－６　P1, P3, P5 載荷時の Ny の経時変化

れらの断面力に対してのみ検討することとする。また、本断面には柱部が存在しないため、頂版、側壁および底版部の断面力分布のみを考察することとする。図－７に示すように、解析結果の頂版部の My の分布は、いずれの載荷位置に対しても載荷中心付近で正の最大値をとり、側壁部に向かって減少し接合部で負の最大



図－７　P13, P15, P17 載荷時の My の経時変化



図－８　P13, P15, P17 載荷時の Ny の経時変化

値を示している。最大値は P15 載荷時で約 79.0 tfm/m となっている。実験値と比較すれば、P13 載荷時では比較的良く一致している。P15, P17 載荷時には、載荷中心付近で実験値がかなり小さな値となっており、全体として実験値は解析値より小さめな傾向を示している。側壁部では、いずれの載荷位置でも上部で負の値を示し、ほぼ線形に減少し下部で小さな正の値を示している。P15, P17 載荷で実験値は解析値よりも小さい。また、底版では曲げモーメントがほとんど発生していない。

Ny（図－８）の解析値は、 いずれの載荷位置でも頂版部ではほぼ一定の小さな値を示している。 一方、側壁部の分布形状は、上部でやや大きな分布をするものの、ほぼ一様圧縮に近い形状をしている。しかしながら、その大きさは載荷位置によって異なる。側壁部に近い P17 載荷時で最大圧縮力を発生し、その値は約 77 tf/m である。実験値との比較では、頂版部で大きく異なる。側壁部でも実験値はやや小さい傾向にある。

3.3. 載荷断面の影響

覆道中央断面および端部断面載荷における断面力の分布特性を比較すると、頂版の最大曲げモーメントは、いずれの断面でも中央載荷時に発生し、解析値の最大値は P3, P15 載荷時でそれぞれ約 44.0 tfm/m、79.0 tfm/m である。P15 載荷時の解析値は P3 載荷時の約 2.0 倍となっている。この傾向は先に行った開口部を有する箱型 RC 覆工の解析結果と同様の傾向である。両載荷点とも大きな相違はない。これより、解析値は実測値とかなり異なる傾向にあることがわかる。また、頂版と側壁の接合部の最大曲げモーメントに着目

すれば、解析値では P3, P15 載荷時にそれぞれ約 26 tfm/m、59.0 tfm/m となっている。端部断面載荷時には、頂版中央部の曲げモーメント同様、中央断面載荷時の 2 倍以上となっている。一方、実測値は頂版側と側壁側で算定値が異なるが、大きい方で比較すると、P3, P15 載荷時の最大値はそれぞれ約 20 tfm/m、43.0 tfm/m となっている。実験値は解析値より小さいものの、この傾向は解析値と同様である。側壁部の軸力 Ny に着目すれば、解析値および実測値が最大となる載荷状態は P5 および P17 載荷時である。すなわち、解析値は P5, P17 載荷時でそれぞれ約 45 tf/m、77 tf/m であり、P17 の値が P5 の値の約 1.6 倍である。実測値はそれぞれ約 33 tf/m、45 tf/m となっている。また、実測値はいずれも解析値より小さいものの、P17 は P5 の約 1.4 倍となっており、その傾向は解析値と一致する。

以上、載荷位置の応答値への影響を検討したが、頂版の実測最大断面方向曲げモーメントを除いて、端部断面載荷の方が大きく、その傾向は解析と実験で一致している。

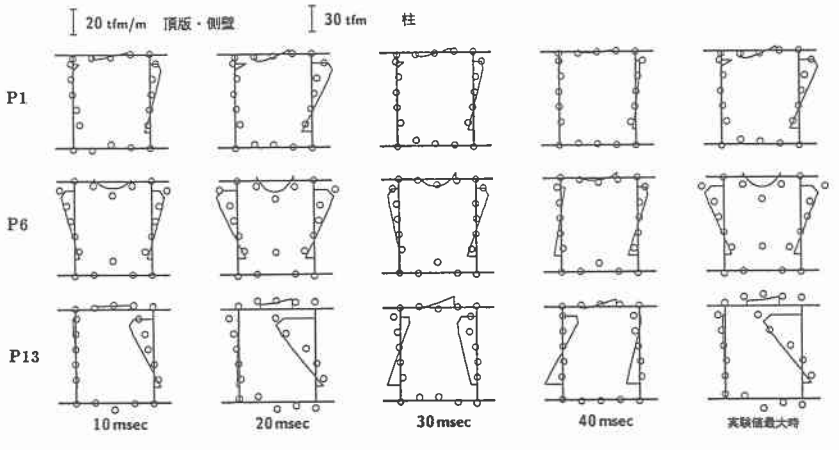
3.4. 柱部側（P1, P6, P13）載荷の影響

柱式 RC 覆工では、柱部の断面力は、柱部側への載荷時にその構造形式の影響が現れるものと考えられる。ここではこの点を考慮して、柱部側の P1, P6 および P13 載荷時の柱部周辺の軸方向曲げモーメント（Mx）および軸力（柱部は Ny、頂版及び底版は Nx）の応答特性を考察する。

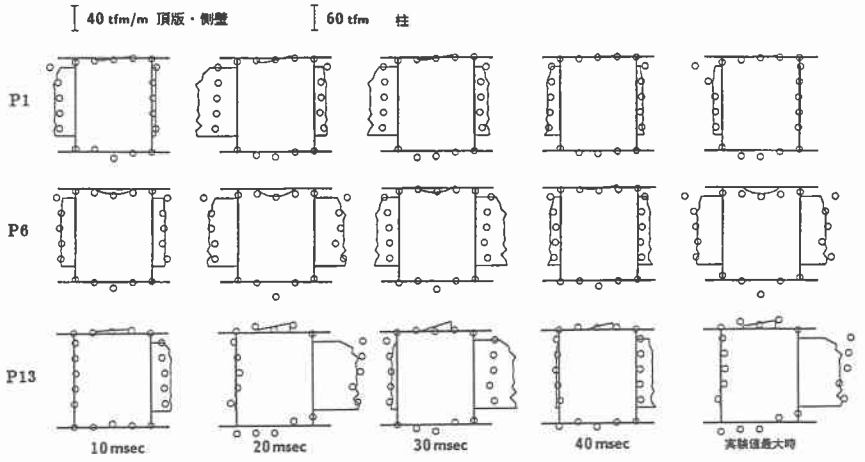
図－9 に各載荷位置に対する Mx の分布の経時変化を示す。解析値は、P1 載荷時には覆工に対して対称載荷となることから、中央柱には曲げモーメントが発生せず、端部の柱（柱①）部に比較的大きな曲げモーメントが生じている。その最大値は上部で約 −20 tfm である。P6 載荷では、柱①②の中間部への載荷となることから、両柱部に対称的な曲げモーメントが生じている。また、頂版部にも載荷点に多少大きめな曲げモーメントが生じている。P13 載荷時には、頂版が片持版のような状態になっているため 40 msec においても振動状態にあると思われる曲げモーメントが生じている。この場合、特に柱①に大きな曲げモーメントが発生している。柱①に対しては、P13 載荷時の影響が一番大きいことがわかる。実験値も多少変動はあるもののほぼ解析値と同様の傾向であり、実験値と解析値は比較的良く一致している。

同様の載荷位置における軸力分布を図－10 に示した。解析値の軸力は柱部に集中しており、頂版及び底版ではごく小さな値となっている。柱の軸力は、P1 載荷時には柱②、P6 載荷時には柱①と②、P13 載荷時には柱①で大きい値を示している。その中で P13 載荷時の柱①の軸力が最も大きく、柱式 RC 覆工の特性が良く示されている。覆工端部付近 P13 載荷時の柱の最大軸力は約 113 tf であり、中央部または中間部（P1, P6）載荷時の最大値 80 および 98 tf より大きい。

一方、実験値は個々の値には変動がみられるものの、全体的な傾向や最大値等は、解析値に比較的一致していると考えられる。



図－9　P1, P6, P13 載荷時の柱部での Mx の経時変化



図－１０　P1, P6, P13 載荷時の柱部での軸力の経時変化

4. まとめ

柱式 RC 落石覆工の衝撃応答特性を解析的に検討するため、LS-DYNA3D を用いた 3 次元衝撃応答解析を行った。解析は、実際の柱式 RC 落石覆工である松前郡白神の一般国道 228 号にある立岩覆道の 1 ブロックを対象に行った。解析では、敷砂を緩衝材とする場合に限定して、主として載荷位置による応答特性の影響を検討した。また、すでに実施されている同一覆工の重錘落下衝撃による実証実験結果との比較により、解析の妥当性についても検討した。本研究で得られた結果を要約すれば、以下の通りである。

1) いずれの載荷位置に対しても底版の断面力は無視できるほど小さい。
2) 頂版及び側壁部の曲げモーメントは、断面中央載荷時に最大となる。
3) しかも、実験値の頂版部断面方向曲げモーメントを除いて、各断面力とも中央部断面より端部断面載荷時の方が大きく、端部断面載荷では中央部断面載荷の約 1.5 ～ 2.0 倍である。この傾向は箱型 RC 落石覆工と同様である。
4) 柱部の断面方向曲げモーメントは、頂版等と同様断面中央載荷時に最大となる。
5) 柱部の軸方向曲げモーメントは、中央部柱に対しては柱側の柱間載荷時、端部柱に対しては端部断面柱側載荷時に最大となる。
6) 柱の軸力は各柱側載荷時に大きな値となるが、特に端部の柱に対しては端部断面柱側載荷時に最大となり、これが柱の最大軸力となっている。
7) 以上の特性は解析値、実験値とも同様である。解析値と実験値の比較において、軸力の一部で両者一致はしないものの、分布傾向、最大値は良く一致しており、本解析は妥当であるものと判断される。

参考文献

1) 岸　徳光・中野　修・松岡健一・菅田紀之：　RC　覆工の衝撃力応答解析手法の適用性に関する実証的検討、土木学会論文集、No.483/I-26, pp.97 ～ 106,1994.1.
2) 岸　徳光・佐藤昌志・西　弘明・安藤智啓：　弾性衝撃応答解析による RC 落石覆工の断面力分布特性、構造工学論文集、vol.41A, pp.1185 ～ 1191,1995.3.
3) 佐藤昌志・岸　徳光・今野久志・前山順宏：三層緩衝構造を用いた柱式実　RC　覆道の重錘落下衝撃実験、土木学会北海道支部論文報告集、第 53 号 (A)、1997.