

剛性マトリックス法を用いた落石覆工の衝撃応答解析

IMPACT ANALYSIS OF ROCK-SHED STRUCTURE USING STIFFNESS MATRIX METHOD

中野 修* 岸 徳光** 松岡健一*** 菅田紀之****

By Osamu NAKANO, Norimitsu KISHI, Ken-ichi G. MATSUOKA and Noriyuki SUGATA

In this paper, the dynamic response of rock-shed structure under impact load is studied using stiffness matrix method. Three types of structures are considered here which are practically designed as box type, portal frame type and L-shape type. Numerical calculations are executed for symmetrical, eccentric and sway loading varying the loading time.

From numerical analyses, the following results are obtained;

- 1) Alternate stresses are generated in each member of the structure due to the vibration caused by impact loading.
- 2) And those two stresses are almost same in magnitude and greater than that of the static response value.
- 3) The dynamic amplification factor at the center of the roof member is the same for three types of structures which is equal to 1.6.

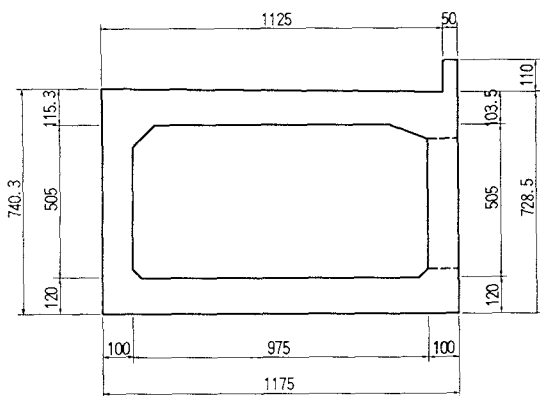
1. はじめに

日本の地理的条件により、交通施設が急峻な山岳あるいは海岸地域に多数建設されている。このような地域では、落石の発生により交通の安全性が損なわれる可能性が大きく、安全性確保のために落石覆工が建設されることが多い。

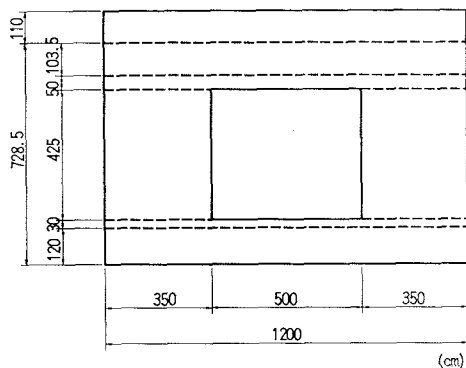
現在、落石覆工の設計は、落石対策便覧¹⁾に基づいて行われている。落石対策便覧では、落石による衝撃荷重を算定式により推定し緩衝材による荷重分散を考慮して等分布静荷重に置き換え、許容応力度法により設計するのが適当であるとしている。しかしながら、衝撃荷重や構造物の動的挙動など未だ不明な点が多く、耐衝撃設計法を確立するため各種の研究が盛んに行われている。例えば、落石によって発生する衝突衝撃力の研究^{2)~5)}、本体構造に伝達衝撃力を和らげるための緩衝構造の研究^{6)~8)}、動的載荷を受ける構造材料の物性に関する研究⁹⁾、衝撃力を受ける構造部材あるいは構造物の動的挙動に関する研究^{10)~14)}、設計法に関する研究^{15),16)}等である。

本論文では、落石覆工の耐衝撃設計に関する基礎資料を得ることを目的として、落石覆工をラーメン構造に仮定した場合の弾性衝撃応答解析¹⁷⁾を試みた。解析は、実構造型式としてよく用いられている三種類の型式を取り上げ落石対策便覧に従って求められた荷重を覆工頂版上に載荷させ行っている。数値解析は数砂

* 工修 北海道開発局開発土木研究所室長 構造研究室 (〒062 札幌市豊平区平岸1-3)
 ** 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒050 室蘭市水元町27-1)
 *** 工博 室蘭工業大学教授 工学部建設システム工学科 (〒050 室蘭市水元町27-1)
 **** 工修 室蘭工業大学助手 工学部建設システム工学科 (〒050 室蘭市水元町27-1)



(a) 正面図



(b) 側面図

図-1 落石覆工の形状寸法

材慣性力の影響を考慮した場合についても行い、各構造型式に対する部材断面力について静的解析結果との比較検討を行うとともに、敷砂材慣性力の断面力応答値への影響や、荷重作用時間を変化させた場合の動的応答値についても検討を行っている。

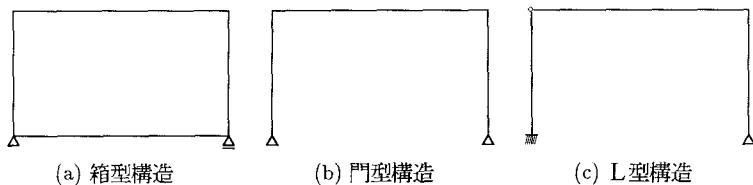


図-2 解析モデル

2. 解析モデルおよび数値解析

解析モデルは、図-1のような実際に建設されているRC落石覆工を参考にして、実構造としてよく採用されている箱型、門型およびL型の三種類を対象とした(図-2)。実務的には各構造型式に対応して最適な部材断面が決定されるものと考えられるが、ここでは各構造型式ごとの動的応答性状について静荷重載荷時の結果と比較する形で検討を行うため、各部材断面は三型式とも同一とした。頂版、底版、側壁および側柱の奥行き 1 m 当たりの断面諸量および材料定数は表-1に示すとおりである。頂版上には、緩衝材として 90 cm 厚の砂 ($\gamma = 1.8 \text{ tf/m}^3$) が敷いてあるものと仮定する。

落石覆工に作用する衝撃荷重は 50 tf の集中荷重とし、落石対策便覧に従って図-3 (a) に示すように 45° の範囲に分散分布するものと考え、円形の等分布荷重を長方形等分布荷重に置き換えて解析を行っている。また、衝撃荷重の時間方向分布は、文献 3) を基にして図-3 (b) のように全載荷時間 T_0 が 35 msec であるものとし、これを基本衝撃荷重として載荷時間を種々変化させている。

断面設計は最も不利となる位置に荷重を載荷して行うものであるが、本研究では荷重載荷位置として図-3 (c) のように頂版の四等分点の三箇所を考え、それぞれ側壁側から 1/4 載荷点、2/4 載荷点、3/4 載荷点とし、2/4 載荷点を中心に解析を行っている。実際の落石運動の形態には、斜面に沿って落下する滑り運動や回転運動、空中を跳躍しながら落下する跳躍運動があり、いずれの場合も頂版に対して傾斜角を持って作用することが明らかになっている。ここでは鉛直成分および水平成分による構造物の応答性状を検討す

表-1 材料諸量および部材定数

部 材	断面積 (cm^2/m)	断面二次 モーメント (cm^4/m)
頂 版	1.10×10^4	1.11×10^7
側 壁	1.00×10^4	8.33×10^6
側 柱	4.12×10^3	3.43×10^6
底 版	1.20×10^4	1.44×10^7
弾性係数	$3.00 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$	
単位体積重量	2.50 tf/m^3	

るために、各成分ごとに分離して解析を行うこととした。特に水平成分に関しては、構造物の側方移動成分が卓越するものと考えられるため、荷重は強度、時間方向分布とも鉛直成分と同一な条件として、2/4 載荷点に限定して載荷している。傾斜載荷による構造物の応答は、これら鉛直成分と水平成分荷重による応答値を重ね合わせることによって可能である。

解析は図-2 に示す三つの構造型式についてそれぞれ 78、54、54 の要素に分割し、モード法を用いて行った。また、本解析では要素分割総数に対応した全固有値を考慮し、減衰定数は全固有値に対して $\lambda_i = 5\%$ と一定にしている。緩衝材を考慮する場合には、その弾性係数がラーメ定数 $\lambda = 100 \text{ tf/m}^2$ のときコンクリートの $1/10000$ 以下となるため、ここではその剛性を無視し質量のみを頂版部要素に付加する形で処理している。なお、敷砂の単位重量は $\gamma = 1.8 \text{ tf/m}^3$ 、厚さは $h = 90 \text{ cm}$ と仮定している。

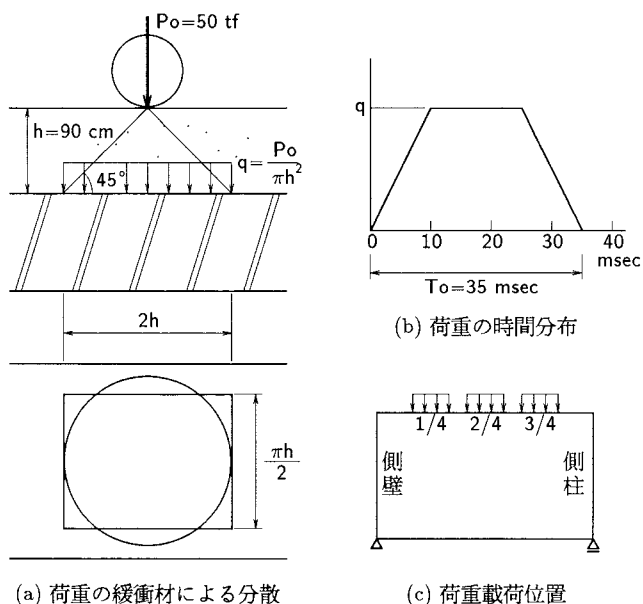


図-3 載荷荷重

3. 数値解析結果と考察

3.1 曲げモーメント分布およびせん断力分布 (2/4 載荷点)

各構造型式による定性的な応答性状を検討するために、2/4 載荷点に基本衝撃荷重が鉛直方向に作用した場合の静的および動的解析を行い、曲げモーメント分布とせん断力分布の経時変化を求めた。ここでは緩衝材の慣性力を考慮している。

図-4 (a) は箱型構造における曲げモーメント分布図である。頂版中央で受けた衝撃が底版まで伝播し、振動状態になっている様子がわかる。各部材とも静的曲げモーメントより大きな値を示す場合がある。特に底版部では、頂版部で最大応答を示す 30 msec 前後まで静的と同程度であるが、その後増幅し 45 msec 前後で最大応答に達している。各部材とも静的と同符号の大きな応答を示すばかりでなく、異符号の応答も大きく示され、交番応力となっている状態が示されている。以後便宜的に静的と同符号の応答を正載荷状態、異符号の応答を負載荷状態と呼ぶことにする。図-4 (b) は箱型構造におけるせん断力分布図である。静的応答と同様に頂版部で大きな応答を示し両端部で最大となっている。また、底版でのせん断力は静的応答ではほぼ零であるが、動的解析においては大きな応答を示している。曲げモーメント同様に、負載荷状態の応答も大きく示されている。図-5 (a) は門型構造における曲げモーメント分布図である。動的解析結果は静的分布とほぼ同じ分布形状で振動し、負載荷状態の応答も大きくなっている。図-5 (b) は門型構造におけるせん断力分布図である。箱型構造とほぼ同様の振動周期および分布で振動しているようである。図-6 (a) はL型構造における曲げモーメント分布図である。荷重載荷中、頂版および側柱では大きな曲げを受けているにもかかわらず、側壁ではほとんど曲げを受けない状態が続いている。図-6 (b) はL型構造におけるせん断力分布図である。箱型、門型構造と若干振動周期が異なるようであるが、他二型式と同様のせん断力分布を示しているようである。

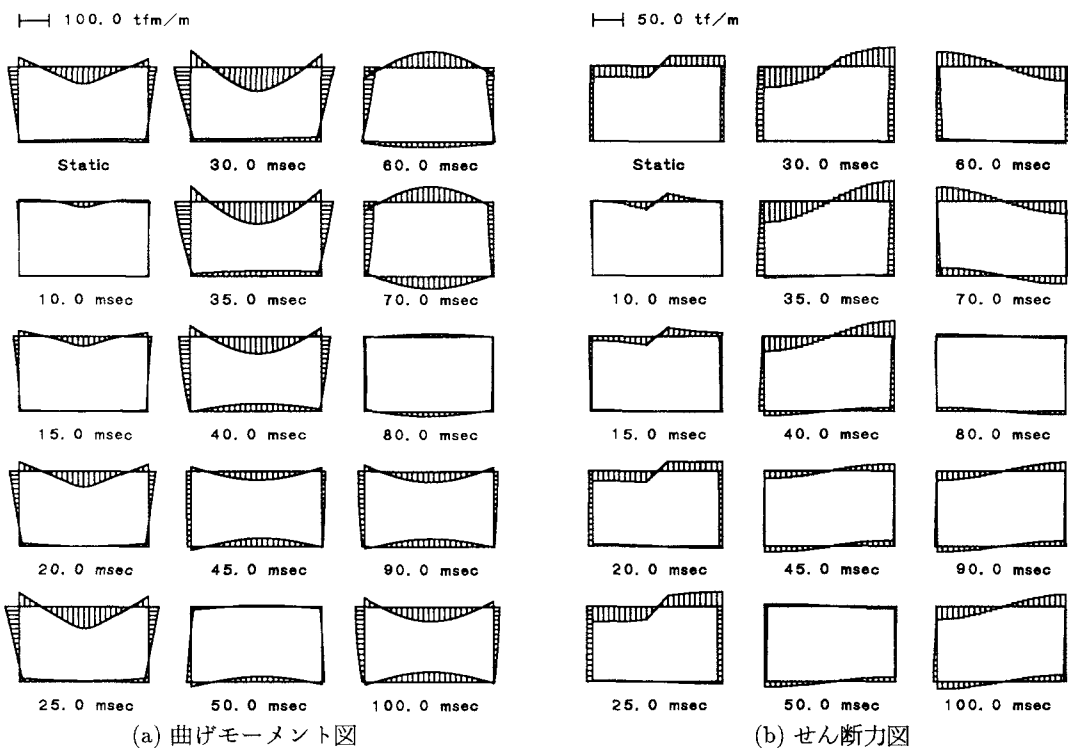


図-4 基本衝撃荷重載荷時における箱型構造の断面力図（緩衝材考慮、2/4 載荷点）

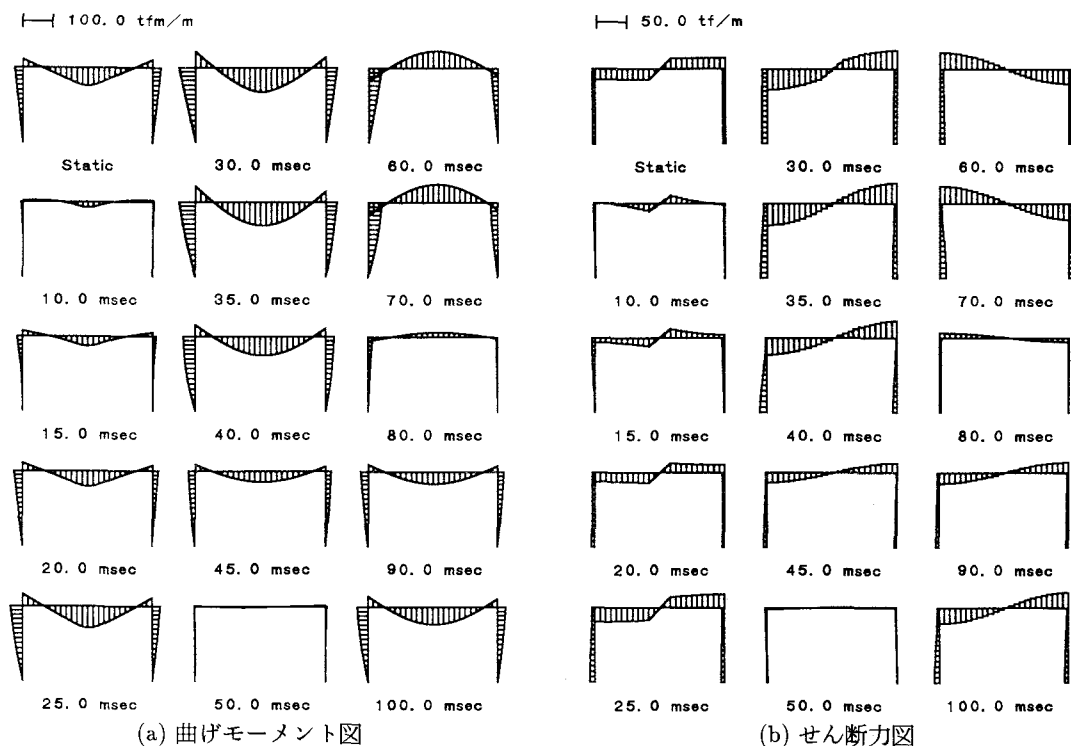


図-5 基本衝撃荷重載荷時における門型構造の断面力図（緩衝材考慮、2/4 載荷点）

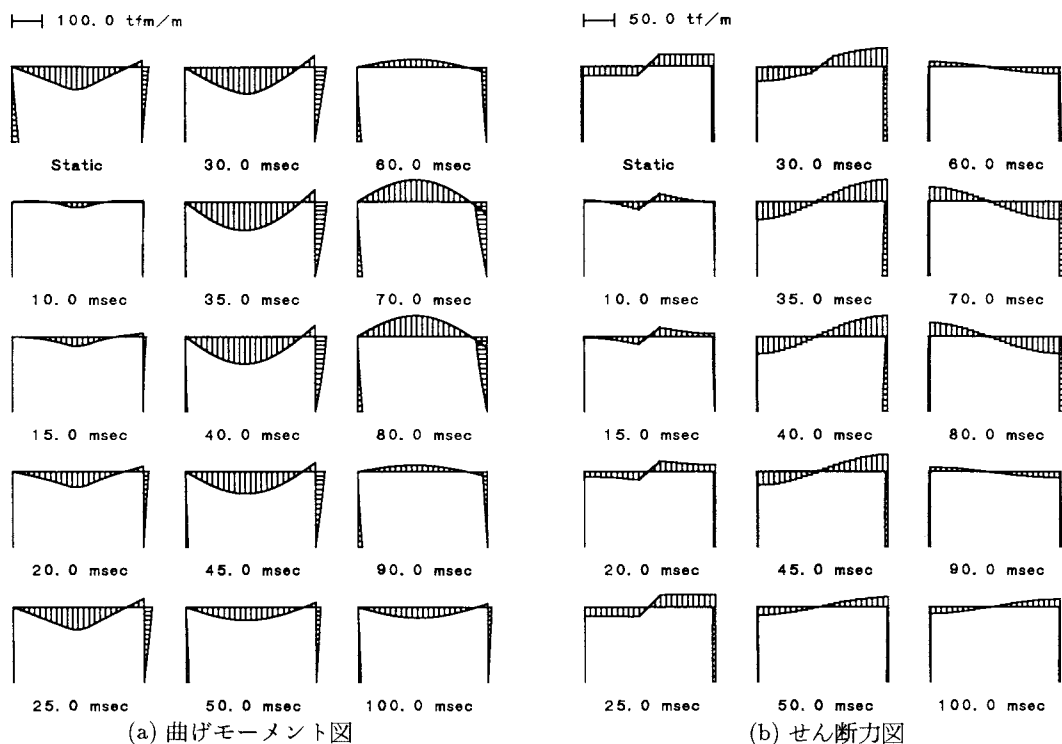


図-6 基本衝撃荷重載荷時におけるL型構造の断面力図(緩衝材考慮、2/4 載荷点)

以上より、静的荷重載荷時には曲げおよびせん断が問題にならないような部材においても、衝撃荷重載荷時には大きな応答を示す場合があり、また各部材において大きな負載荷状態の応答を示すこともわかった。せん断力については、三構造形式とも同様な分布を示すことが明らかになった。

3.2 荷重載荷時間と最大曲げモーメントの関係(2/4 載荷点)

構造物の動的挙動は、荷重分布および時間分布の差異でその応答結果が異なってくるため、実際に作用する荷重分布および時間分布に近い入力荷重により解析する必要がある。しかしながら、衝撃荷重の緩衝材による分散および時間分布については不明な点が多く、研究が盛んに行われているのが現状である。過去の研究成果によると、荷重載荷時間は数 10 msec から 100 msec 程度であることがわかっている。ここでは載荷時間が応答値に与える影響を検討するために、荷重強度

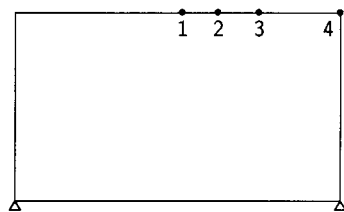
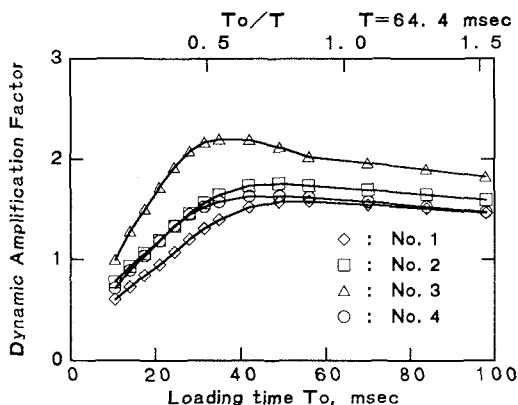


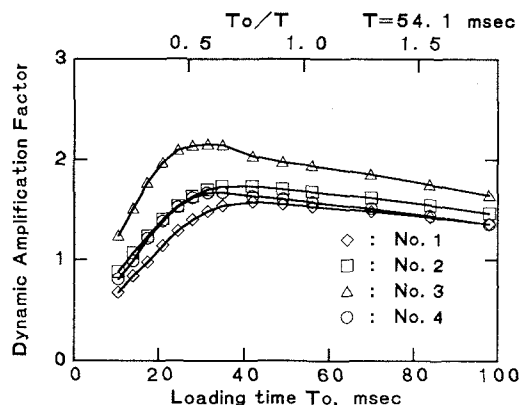
図-7 応答計算の着目点

q を一定にし、全載荷時間 T_0 を基本荷重分布(図-3 (b))と相似的に 10.5 msec から 98 msec まで変化させて解析を行った。また、緩衝材の慣性力が構造物の動的応答に与える影響について検討するため、緩衝材の質量を考慮した場合と、無視した場合について解析している。なお、解析は荷重載荷点を 2/4 点に限定し、図-7 に示す 4 点の最大曲げモーメントに注目して行い、各点の最大応答値とその点の静的応答値との比を応答倍率として示している。また、荷重載荷時間 T_0 と基準固有周期 T の比 T_0/T に対する応答値の関係について検討を行うため、 T_0/T も示している。本論文では、基準固有周期 T として頂版が対称曲げ振動になる最低次振動周期を採用している。

図-8~10 は、それぞれ箱型構造、門型構造およびL型構造の最大曲げモーメントの応答倍率である。図より、着目点によって応答倍率が異なり、最大応答倍率を示す時の荷重載荷時間も異なっていることがわ

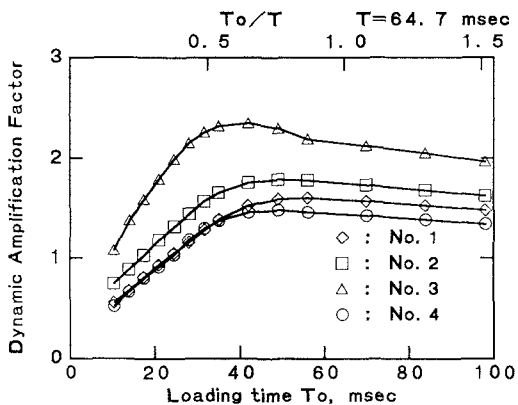


(a) 砂の慣性力を考慮

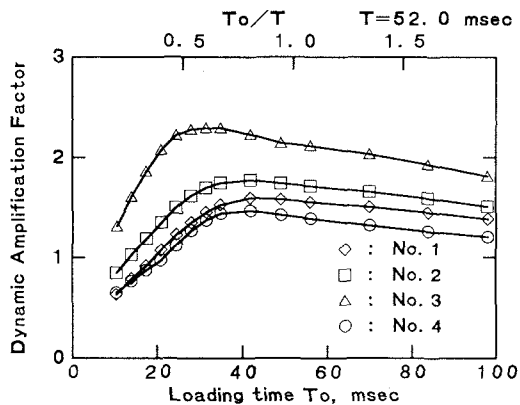


(b) 砂の慣性力を無視

図-8 2/4 点載荷時の箱型構造の最大曲げモーメントの応答倍率

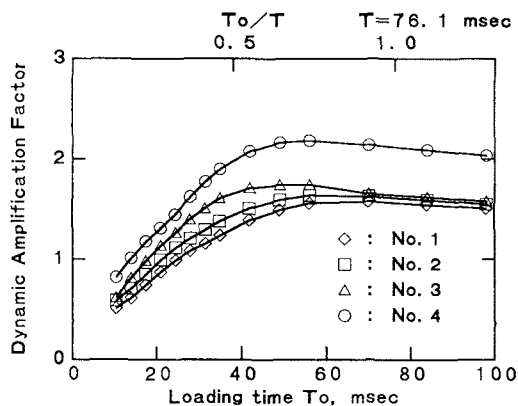


(a) 砂の慣性力を考慮

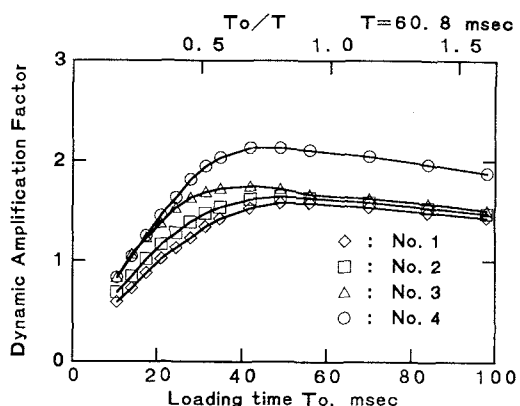


(b) 砂の慣性力を無視

図-9 2/4 点載荷時の門型構造の最大曲げモーメントの応答倍率



(a) 砂の慣性力を考慮



(b) 砂の慣性力を無視

図-10 2/4 点載荷時のL型構造の最大曲げモーメントの応答倍率

かる。頂版中央部で応答倍率が最大となる荷重載荷時間は、他の位置よりも長いようである。また、緩衝材の慣性力を考慮することにより、最大応答倍率を示す荷重載荷時間は緩衝材の慣性力を無視する場合に比べ 10 msec 程度長くなっている。最大応答倍率を示す荷重載荷時間と固有振動周期の比 T_0/T は、箱型で 0.55~0.75、門型で 0.6~0.8、L型で 0.7~0.9 と構造形式で異なるようである。

表-2 曲げモーメントの最大応答倍率の一覧
(10.5 msec $\leq T_0 \leq$ 98 msec)

着目点 番 号	箱 型		門 型		L 型	
	砂考慮	砂無視	砂考慮	砂無視	砂考慮	砂無視
1	1.57	1.57	1.59	1.59	1.57	1.57
2	1.75	1.73	1.78	1.77	1.63	1.64
3	2.19	2.15	2.34	2.29	1.74	1.74
4	1.63	1.66	1.47	1.46	2.18	2.13

表-2 は図-8 ~ 10 における各着目点での最大応答倍率を一覧にして示している。表より、頂版中央での応答倍率の最大値は、箱型で 1.57、門型で 1.59、L型で 1.57 であり、構造形式に依存せずほぼ一定値を示している。また、静的応答値の小さな位置ほど応答倍率が大きくなっているようである。

3.3 曲げモーメントおよびせん断力の最大応答分布

構造物の動的応答値は、経時変化により部材各部で最大応答を示す時間および応答倍率が異なってくる。ここでは、1/4、2/4 および 3/4 載荷点に基本衝撃荷重が鉛直に作用した場合と、2/4 載荷点に同一の水平方向荷重が作用した場合の各部における正および負の最大応答値を求め検討を行うこととする。図-11 ~ 16 は、それぞれ箱型構造、門型構造および L型構造の最大応答値の分布図である。各分布図は、基本衝撃荷重が 2/4 載荷点に静的載荷した場合の最大応答値との比で図示している。なお、解析は緩衝材の慣性力を考慮して行っている。

図より三構造型式とも、荷重が 2/4 載荷点に載荷したとき応答が最大になっていることがわかる。鉛直荷重載荷時には、負載荷状態の応答も正載荷状態の応答に近い値を示しており、特に水平荷重載荷時には両者ほぼ等しい値になっている。また、箱型構造の底版では、頂版中央での静的応答値と同程度の応答が示さ

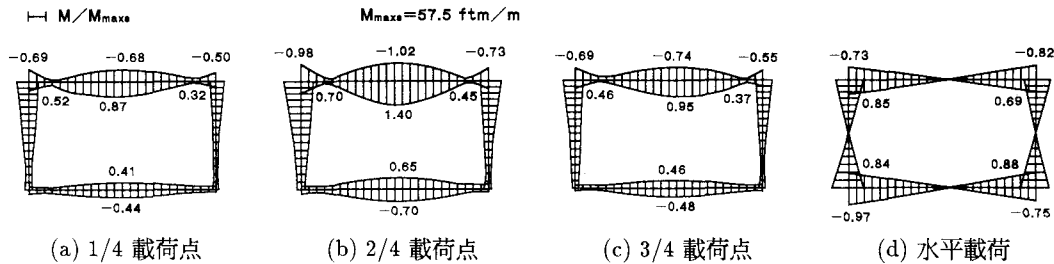


図-11 基本衝撃荷重載荷時における箱型構造の最大曲げモーメント分布 (緩衝材考慮)

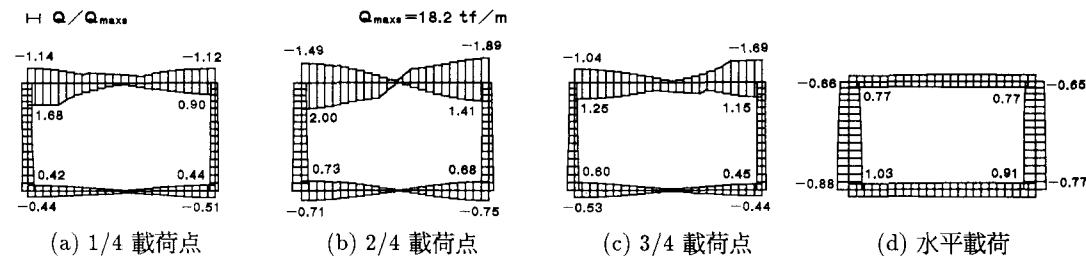
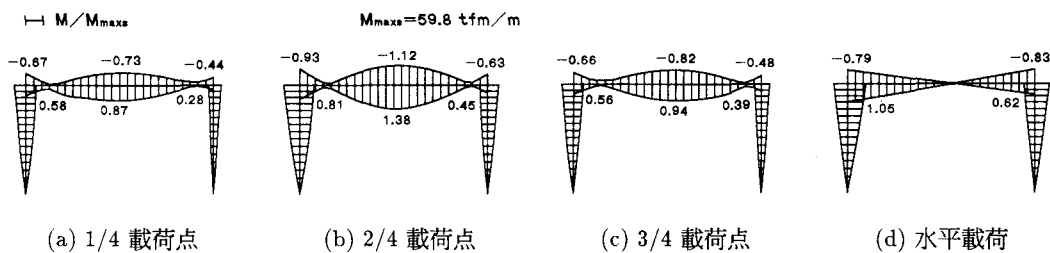
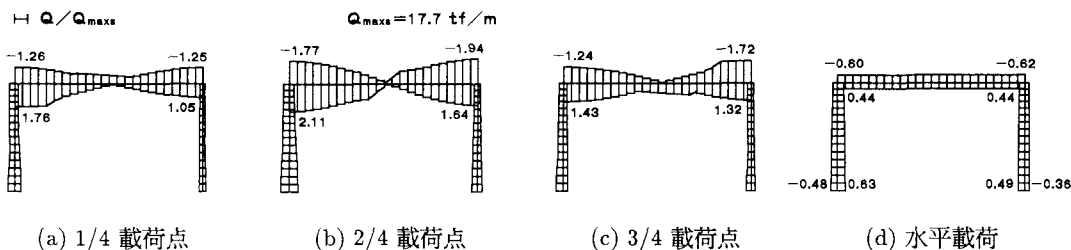


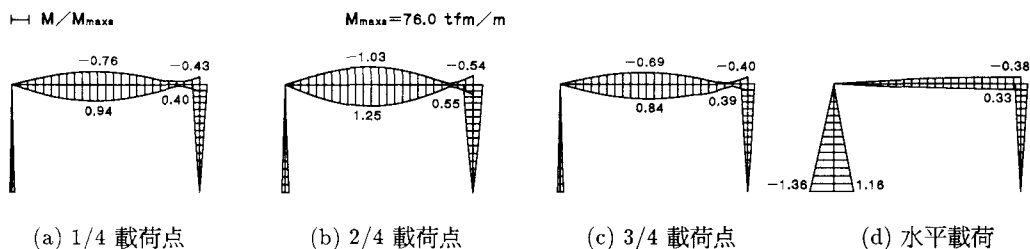
図-12 基本衝撃荷重載荷時における箱型構造の最大せん断力分布 (緩衝材考慮)



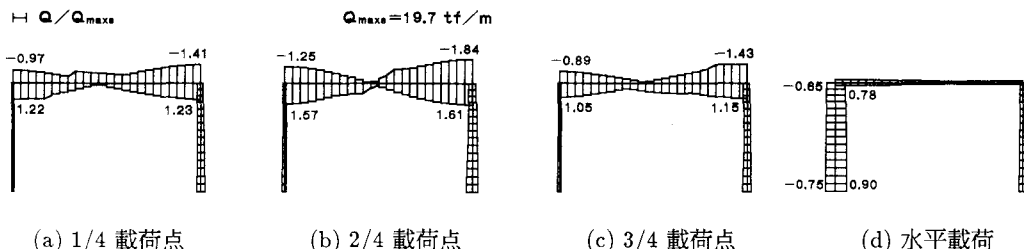
図一 1 3 基本衝撃荷重載荷時における門型構造の最大曲げモーメント分布 (緩衝材考慮)



図一 1 4 基本衝撃荷重載荷時における門型構造の最大せん断力分布 (緩衝材考慮)



図一 1 5 基本衝撃荷重載荷時におけるL型構造の最大曲げモーメント分布 (緩衝材考慮)



図一 1 6 基本衝撃荷重載荷時におけるL型構造の最大せん断力分布 (緩衝材考慮)

れている。箱型と門型の頂版部における応答分布は両者とも同様になっている。L型では水平載荷を受けた場合、側壁下部に他型式では見られない大きな曲げモーメントが発生している。

3.4 構造型式による断面力の比較

載荷位置および載荷時間を変化させ各構造型式に対する解析を行ったが、特に基本衝撃荷重が 2/4 点に鉛直載荷する場合における断面力の最大値をまとめて示すと表一 3 のようになる。この結果をもとに各構造

型式による特徴を述べると、静的解析における曲げモーメントは箱型、門型、L型の順に大きくなっている。箱型と門型の両者には大きな差は認められないが、L型の場合は箱型より 30 % 程度大きな値

表－3 2/4 点に基本衝撃荷重を載荷した場合の最大断面力一覧

構 造	曲げモーメント (tfm/m)			せん断力 (tf/m)		
	静 的	動 的	応答倍率	静 的	動 的	応答倍率
箱 型	57.5	80.2	1.40	18.2	36.4	2.00
門 型	59.8	82.5	1.38	17.7	37.4	2.11
L 型	76.0	94.6	1.25	19.7	36.3	1.84

を示している。一方せん断力に関しては、三型式とも大きな差はないが、L型が若干大きな値となっている。また、曲げモーメントの動的応答倍率は、L型、門型、箱型の順で大きくなっている。L型の応答倍率は他型式に比べ 10 % 程小さいが、実際の曲げモーメントは、L型の方が 15~17 % 程度大きい。動的せん断力は静的と同様にそれほど差異は見られない。

以上のことから、三型式とも同一断面であることを前提として優劣を論ずれば、図－15 (d) に示したように、L型は水平載荷に対して不利なこともあり適当とは思われない。一方、箱型と門型では頂版部の曲げモーメントに著しい差は認められず、全体としては優劣はつけ難いものと考えられる。

4. まとめ

落石覆工の耐衝撃設計に関する基礎的試料を得ることを目的として、箱型、門型およびL型の構造型式について衝撃応答解析を行い、次のような結果が得られた。

- 1) 静的には曲げモーメントあるいはせん断力が問題とならないような部材においても、動的には大きな応答を示す場合がある。
- 2) 負載荷状態の応答は正載荷状態の応答に近い値を示す。
- 3) 曲げモーメントの静的応答に対する動的最大応答値の倍率（応答倍率）は、注目する点によって異なるが、頂版中央部では三構造型式とも約 1.6 である。
- 4) 最大応答倍率発生時の荷重載荷時間は、緩衝材の慣性力を考慮することによって、考慮しない場合より 10 msec 程度長くなる。

以上、本解析は落石覆工を奥行が単位長さであるラーメン構造と仮定して行った。しかしながら、実構造は数十メートルの長さを有する立体構造物であり、固有振動周期もラーメン構造の場合と異なることや、軸方向への荷重分担を期待できること等により、応答値も大幅に低減されるものと推察される。今後は、立体解析を行うことにより、本解析等ラーメン構造を仮定する場合の解析結果の工学的な適用性について検討を試みたいと考えている。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧、日本道路協会、1983.
- 2) 古賀泰之・佐々木康：敷砂上の落石の衝突現象に関する考察、土木学会論文報告集、第346号／Ⅲ-1、pp.27~35、1984.
- 3) 吉田 博・榊谷 浩・岡 衛：落石覆工屋根上への落石による衝撃荷重特性について、土木学会論文報告集、第362号／Ⅰ-4、pp.461~470、1985.
- 4) 三上敬司・能町純雄・松岡健一・岸 徳光：落石による落石覆工への衝撃力に関する評価、構造工学論文集、Vol.33A、pp.559~569、1987.
- 5) 宮本文穂・M. W. King・榊井弘樹：構造物に作用する衝撃力特性のモデル化に関する基礎的研究、構造工学論文集、Vol.37A、pp.1555~1566、1991.

- 6) 岸 徳光・吉田紘一・松岡健一・能町純雄：層状弾性体にモデル化した覆工敷砂部の衝撃応答解析、構造工学論文集、Vol.34A、pp.817~826、1988.
- 7) 吉田 博・松葉美晴・法貴貫志郎・久保田努：発泡スチロールの落石に対する緩衝効果に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第427号／Ⅲ-14、pp.143~152、1991.
- 8) 園田佳巨・佐藤尋志・石川信隆：エネルギー基準による落石覆工上のサンドクッション厚の算定法に関する一考察、構造工学論文集、Vol.37A、pp.1617~1636、1991.
- 9) 高橋芳彦・大野友則・太田俊昭・日野信一：衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの弾塑性挙動に及ぼす材料のひずみ速度効果、構造工学論文集、Vol.37A、pp.1567~1580、1991.
- 10) Ohnuma, H., C. Ito, N. Kishi and S. G. Nomachi : On the Impact Behavior of Reinforced Slab, Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol.6, pp.575~580, 1984.
- 11) 藤井 学・宮本文穂・森川英典：衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの力学的挙動に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第360号／V-3、pp.51~60、1985.
- 12) Miyamoto, A., M. W. King and H. Masui : Non-Linear Dynamic Analysis and Evaluation of Impact Resistance of Reinforced Concrete Slabs under Impulsive Load, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.11, pp.643~648, 1989.
- 13) Takano, H., N. Kishi and S. G. Nomachi : On Dynamic Behavior of Beams with Rectangular Cross Section under Impact Load, Theoretical and Applied Mechanics, Vol.28, pp.369~378, 1980.
- 14) 三上 浩・岸 徳光・松岡健一・能町純雄：組紐状AFRPロッドを用いたコンクリートスラブの重錘落下衝撃挙動、構造工学論文集、Vol.37A、pp.1591~1602、1991.
- 15) 吉田 博・榎谷 浩・右城 猛・柴田健次：落石覆工の設計の現状と合理的設計へのアプローチ、土木学会論文報告集、第421号／VI-13、pp.213~222、1990.
- 16) 本名一夫・今野久志・太田利隆：緩衝砂を有するRC版の耐落下物衝撃性能と落石覆工の動的設計法、土木学会論文報告集、第426号／V-14、pp.37~44、1991.
- 17) 菅田紀之・岸 徳光・松岡健一・尾崎 諒：剛性マトリックス法の衝撃応答解析への適用性、構造工学論文集、Vol.37A、pp.1519~1527、1991.

(1991年9月30日受付)