

I-32

衝撃荷重載荷に対する落石覆工の立体解析

室蘭工業大学	正 員	菅田 紀之
室蘭工業大学	正 員	岸 徳光
開発土木研究所	正 員	中野 修
室蘭工業大学	正 員	松岡 健一
室蘭工業大学	正 員	尾崎 詔

1. はじめに

我国では、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多数建設されている。

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、著者等は耐衝撃設計法を確立するため各種の研究を行ってきた。例えば、落石によって発生する衝突衝撃力の研究²⁾、本体構造に伝わる衝撃力を和らげるための緩衝構造の研究³⁾、衝撃力を受ける構造部材の挙動に関する研究^{4),5)}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、衝撃荷重載荷を受ける落石覆工の有限折板理論による立体解析を試みた。解析は実構造型式としてよく用いられている二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。数値解析は頂版上の敷砂材慣性力の影響を考慮して行い、各構造型式に対する部材断面力の経時変化を求め、検討は静的解析結果との比較により行っている。

2. 解析理論

本論文の立体解析に用いた有限折板理論に関する理論的考え方は、奥村等⁶⁾あるいは中村⁷⁾の研究に基づいており、理論の詳細については彼等の研究成果に譲ることとし、ここでは単純支持された薄板構造の弾性衝撃応答解析への応用について簡単に示す。

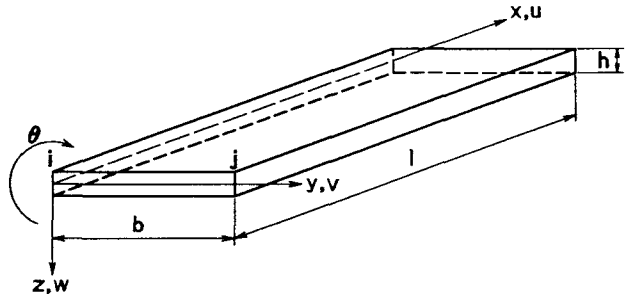


図-1 薄板要素

図-1に示すような薄板要素において x 、 y および z 方向の変位をそれぞれ u 、 v 、 w 、回転角を θ とする。 y に関する変位関数を面内変形では線形、面外変形では三次式と仮定すると、変位 u 、 v 、 w は節点 i での変位 (u_i , v_i , w_i , θ_i) および節点 j での変位 (u_j , v_j , w_j , θ_j) を用いて次のように示すことができる。

$$u = (1 - \eta)u_i + \eta u_j, \quad v = (1 - \eta)v_i + \eta v_j \quad (1), (2)$$

$$w = (1 - 3\eta^2 + 2\eta^3)w_i + (3\eta^2 - 2\eta^3)w_j + (\eta - 2\eta^2 + \eta^3)l\theta_i + (-\eta^2 + \eta^3)l\theta_j \quad (3)$$

ただし、 $\eta = y/b$

式 (1) および (2) を平面応力状態の動的基礎微分方程式に、式 (3) を薄板の曲げの動的基礎微分方程式に用

いて Galerkin 法を適用すると、 x と時間 t に関する線形連立偏微分方程式が得られる。ここで、 x に関して有限 Fourier 変換を施し、像関数に関する薄板要素の運動方程式を求め、マトリックス表示すると次のようになる。

$$[M]\{\bar{S}_m[\dot{\delta}]\} + [K]\{\bar{S}_m[\delta]\} = \{\bar{S}_m[F]\} \quad (4)$$

$[M]$ 、 $[K]$ はそれぞれ要素の質量マトリックスおよび剛性マトリックス、 $\{\bar{S}_m[\delta]\}$ 、 $\{\bar{S}_m[F]\}$ は節点の変位および断面力の像関数ベクトルであり次のように示される。

$$\{\bar{S}_m[\delta]\} = [C_m[u_i] \ S_m[v_i] \ S_m[w_i] \ S_m[\theta_i] \ C_m[u_j] \ S_m[v_j] \ S_m[w_j] \ S_m[\theta_j]]^T \quad (5)$$

$$\{\bar{S}_m[F]\} = [C_m[T_i] \ S_m[S_i] \ S_m[Q_i] \ S_m[M_i] \ C_m[T_j] \ S_m[S_j] \ S_m[Q_j] \ S_m[M_j]]^T \quad (6)$$

また、 $C_m[\]$ 、 $S_m[\]$ は cosine 型および sine 型の Fourier 変換を意味している。

像関数に関する構造全体の運動方程式は、式 (4) に座標変換マトリックスを適用し全体座標系に変換し、変位の適合条件と力のつり合条件のもとに整理すると次のような形で表すことができる。

$$[M_{st}]\{\bar{S}_m[\ddot{\delta}_{st}]\} + [K_{st}]\{\bar{S}_m[\delta_{st}]\} = \{\bar{S}_m[F_{st}]\} \quad (7)$$

ここで、サフィックス st は構造全体を意味するものとする。

本研究では弾性衝撃解析を行うこととし、式 (7) にモード解析法を適用して解を求めるものとする。いま、モードベクトルからなるマトリックスを $[X]$ 、基準関数ベクトルを $\{\bar{S}_m[\phi]\}$ とすると変位の像関数 $\{\bar{S}_m[\delta_{st}]\}$ は次式のように示される。

$$\{\bar{S}_m[\delta_{st}]\} = [X]\{\bar{S}_m[\phi]\} \quad (8)$$

式 (8) を式 (7) に代入してモードの直交性を考慮し、さらに減衰項を導入して整理すると、第 i 次の固有振動に関する運動方程式は次のように示される。

$$\bar{S}_m[\ddot{\phi}_i] + 2h_i \omega_i \bar{S}_m[\dot{\phi}_i] + \omega_i^2 \bar{S}_m[\phi_i] = \frac{F_i}{M_i} \quad (9)$$

ただし、 ω_i は第 i 次の固有角振動数、 h_i は第 i 次の固有振動に対する減衰定数であり、 F_i および M_i はそれぞれ

$$F_i = \{x_i\}^T \{\bar{S}_m[F_{st}]\}, \quad M_i = \{x_i\}^T [M_{st}] \{x_i\} \quad (10), (11)$$

である。また、 $\{x_i\}$ は第 i 次のモードベクトルである。

式 (9) はデュアメル積分により容易に解くことが可能であり、 $\{\bar{S}_m[\phi]\}$ を求め、式 (8) に代入することにより $\{\bar{S}_m[\delta_{st}]\}$ を得ることができる。したがって、変位 $\{\delta_{st}\}$ はこれを逆変換することにより求められる。

3. 解析モデル

解析モデルは、図-2 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および門型の二種類を対象とした (図-3)。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、各部材断面は二型式とも同一とした。頂版、底版、側壁および側柱の部材厚および材料定数は表-1 に示すとおりである。側柱部に関しては、窓の影響を考慮するため、弾性係数および単位体積重量を 7/12 に低減している。また頂版上には、緩衝材として 90 cm 厚の砂 ($\gamma = 1.8 \text{ t/m}^3$) が敷いてあるものと仮定している。

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-4 (a) に示すような

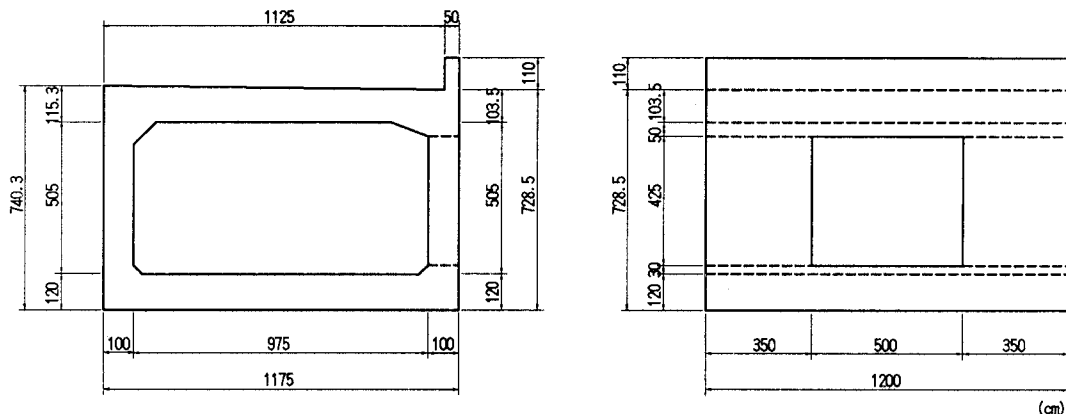


図-2 落石覆工の形状寸法

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 8) を基にして図-4 (b) のように全載荷時間 T_0 を 35 msec としている。

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-4 (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。

解析は図-3 に示す二つの構造型式についてそれぞれ 78、54 の要素に分割し、Fourier 級数の項数を 51 項まで考慮し行った。奥行き方向の長さに関しては、参照構造物では 1 ブロック 12 m として建設されているが、支点部の影響を小さくするためにここでは 30 m としている。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、減衰定数を全固有値に対して $h = 5\%$ と一定にしている。また緩衝材は、その弾性係数がコンクリートの 1/1000 以下と推定されるため、本解析では重量のみを考慮するものとし、その質量を頂版部の要素に付加している。

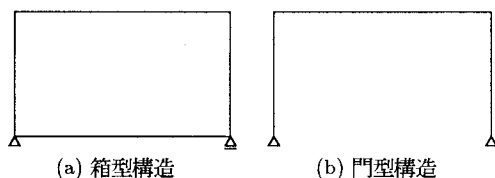
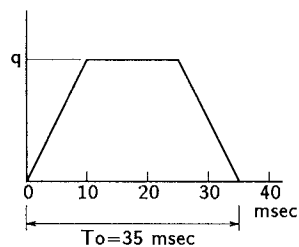
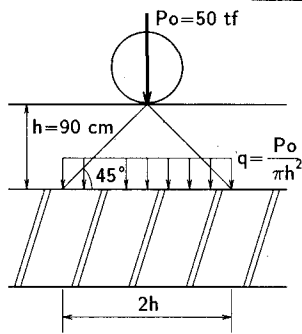


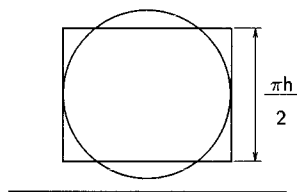
図-3 解析モデル

表-1 部材厚および部材定数

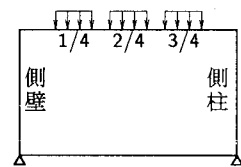
部 材	部材厚(m)
頂 版	1.1
側 壁	1.0
側 柱	1.0
底 版	1.2
弾性係数	$3.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$
単位体積重量	2.5 g/cm^3



(b) 荷重の時間分布



(a) 荷重の緩衝材による分散



(c) 荷重載荷位置

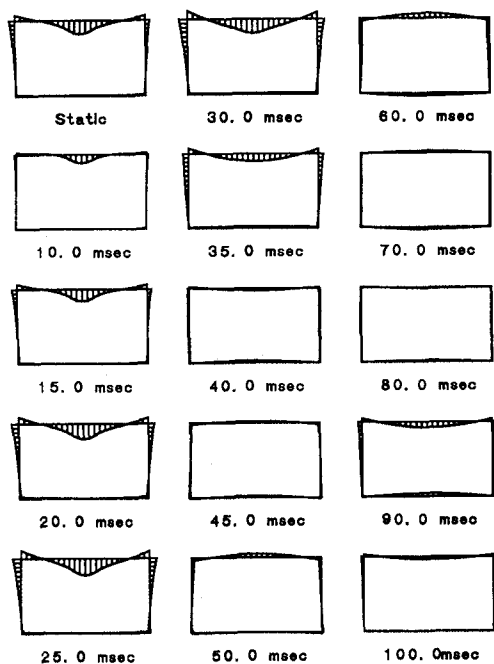
図-4 載荷荷重

4. 数値解析結果と考察

4.1. 曲げモーメント分布およびせん断力分布 (2/4 載荷点)

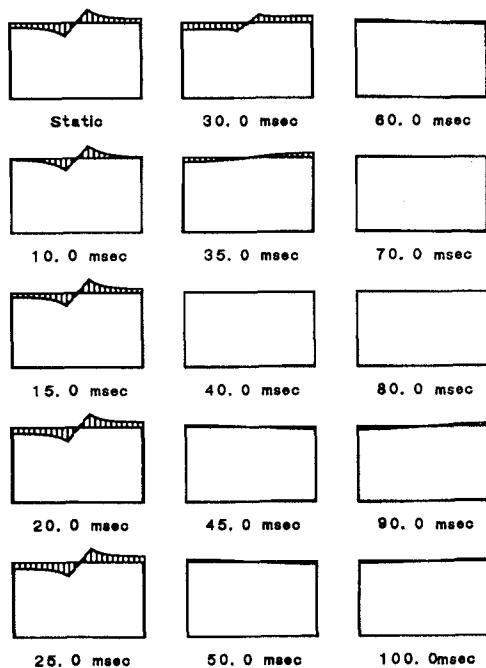
各構造型式による定性的な応答性状を検討するために、2/4 載荷点に衝撃荷重が作用した場合の静的および動的解析を行い、曲げモーメント分布とせん断力分布の経時変化を求めた。図-5 は箱型構造における分布図、図-6 は門型構造における分布図

— 25.0 tfm/m



(a) 曲げモーメント図

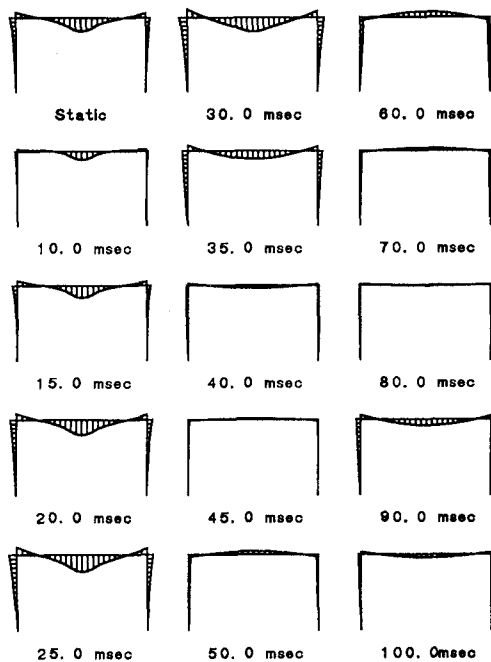
— 25.0 tf/m



(b) セン断力図

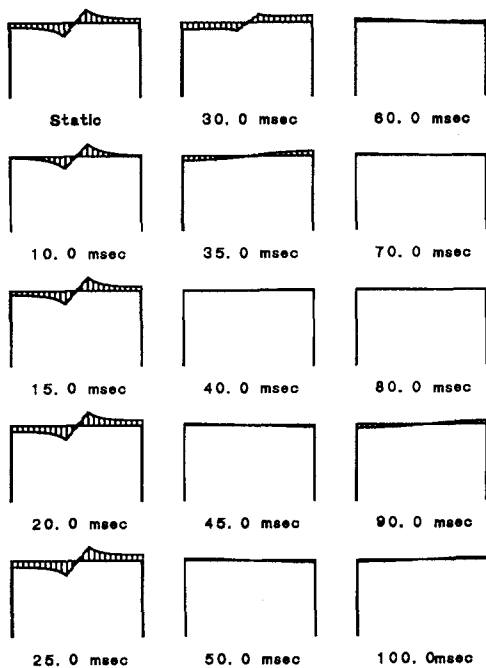
図-5 箱型構造

— 25.0 tfm/m



(a) 曲げモーメント図

— 25.0 tf/m



(b) セン断力図

図-6 門型構造

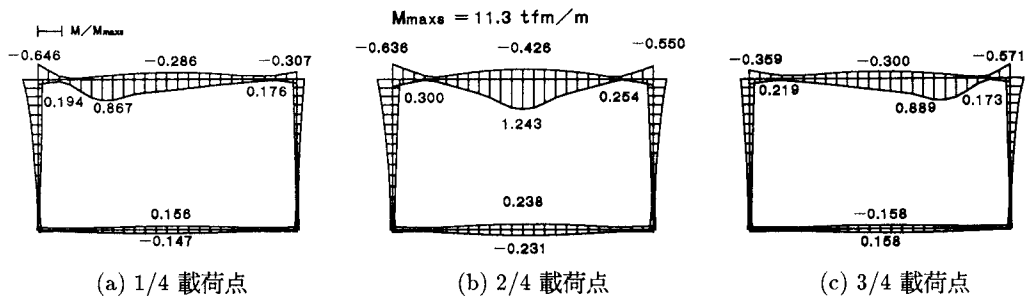


図-7 箱型構造の最大曲げモーメント分布

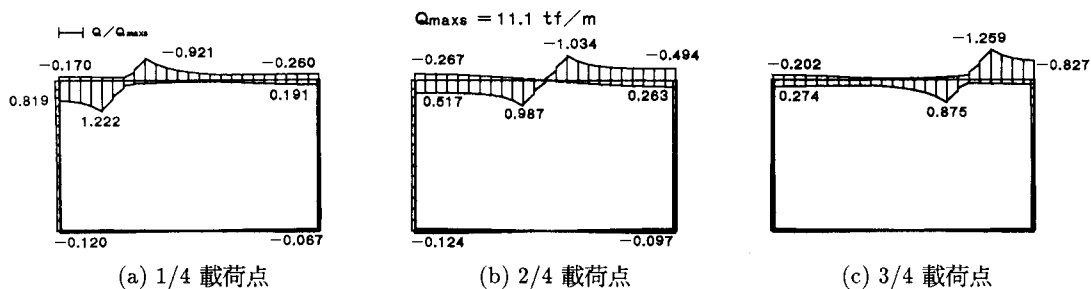


図-8 箱型構造の最大せん断力分布

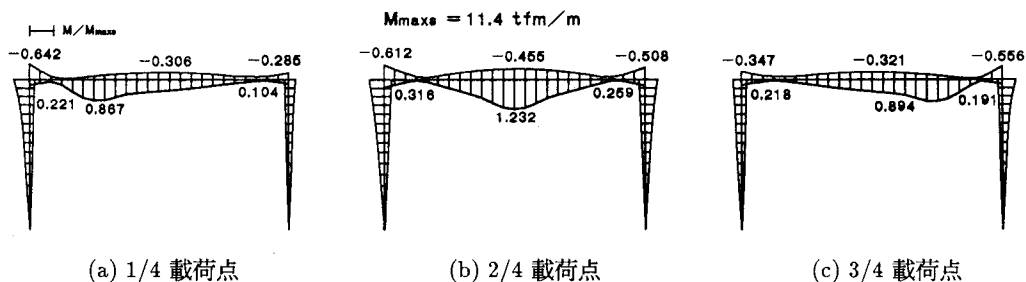


図-9 門型構造の最大曲げモーメント分布

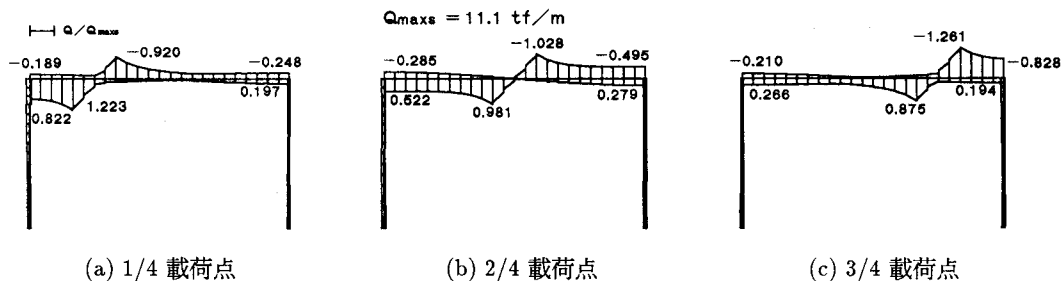


図-10 門型構造の最大せん断力分布

である。

図より頂版中央で受けた衝撃が時間とともに底版あるいは支点部まで伝播し、減衰振動状態に移行している様子がわかる。振動時の底版部以外での応答値は、衝撃荷重載荷時の 1/2 以下になっている。また、各部材の応答は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示され、交番応力状態となっている。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。衝撃荷重載荷時の分布形状は静的応答と同様になっており、曲げモーメントに関しては各部材とも静的応答値よ

りも大きな応答を示す場合がある。また、せん断力に関してはその最大応答値は静的応答値にほぼ等しいようである。

4.2. 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、各部において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 載荷点に衝撃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。各分布図は、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。図-7～10 は、それぞれ箱型構造および門型構造の最大応答値の分布図である。

二構造型式とも、モーメントの最大応答は荷重が 2/4 載荷点に載荷した場合に発生し、静的最大応答値の約 1.2 倍になっている。せん断力の最大応答は 3/4 載荷点に載荷した場合に発生し、2/4 載荷点に静的載荷した場合の最大応答値の約 1.3 倍になっているが、2/4 載荷点の動的応答の最大値は静的最大応答値とほぼ等しくなっている。底版部以外の負載荷状態の応答は正載荷状態の約 1/3 ～ 1/2 の値を示し、底版部では正載荷状態と負載荷状態の応答が同程度になっている。

5. まとめ

落石覆工の耐衝撃設計に関する基礎的資料を得ることを目的として、箱型および門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) 衝撃荷重載荷時の断面力分布形状は静的分布と同様になっている。
- 2) 負載荷状態の応答は正載荷状態の約 1/3 ～ 1/2 の値を示す。
- 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、頂版中央部では二構造型式とも約 1.2 である。
- 4) せん断力の動的応答値は、荷重が 2/4 載荷点に載荷する場合よりも 1/4 あるいは 3/4 載荷点に載荷する場合の方が大きくなる。

以上、本解析は落石覆工をスパン 30 m の折板構造と仮定して行った。実構造物の支持条件および境界条件が本解析での仮定と異なり、忠実に現象を再現できるとはいえないが、本解析手法による解析結果を実験結果等により検証することにより、さらに有効な資料が得られるものと考えられる。

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) 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。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 奥村敏恵・坂井藤一：薄肉平板より成る立体的構造物の静力学的解析に関する一方法とその応用、土木学会論文報告集、第176号、pp.43～59、1970。
- 7) 中村秀治：断面変形を考慮した薄肉はりの振動解析、土木学会論文報告集、第223号、pp.11～22、1974。
- 8) 吉田 博・榎谷 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。