

I-17 DYN3D を用いた落石覆工の弾性衝撃解析

室蘭工業大学	正員	岸	徳	光
北海道開発局	正員	中	野	修
防衛庁	正員	安	藤	智啓
室蘭工業大学	学生員	角	掛	久雄

1. はじめに

著者等はこれまで落石による衝撃荷重載荷時のRC製覆工の動特性に関する検討や、設計のための断面力分布の決定に関する検討を有限帯板要素法を用いた簡易な立体解析¹⁾によって行っている。そこでは、実証実験における覆工の最低次固有振動周期を近似させる形で仮想スパン長を決定し、両端単純支持と仮定し、特にスパン中央部に限定して解析を行っている。しかしながら、実RC覆工は軸方向の長さが12m(北海道地域)で互いが独立なブロック構造となっている。より合理的な設計を行うためには、スパン中央部載荷のみならず道路軸方向の任意点に載荷した場合の動特性を明らかにすることが重要である。

本論文ではこのような観点から、覆工の1ブロックの道路軸方向任意点に落石による衝撃荷重が載荷した場合の動的応答状況を明らかにするために、衝撃解析用汎用プログラムであるDYN3D²⁾を用いた弾性衝撃応答解析を行ったので報告する。本解析ではDYN3Dの解析を簡易な解析手法である有限帯板要素法による解析結果のベンチマークとして用いることを前提として考え、両者の結果を比較する形で整理している。従って、DYN3Dによる解析結果の要素応力は全て断面力に換算し評価している。なお、落石による衝撃力は弾性解析であることより有限帯板要素法による解析と同様 $P_0 = 50 \text{ tf}$ とし、荷重の分散幅は落石対策便覧³⁾の規定に従って決定している。

2. 解析仮定

数値解析は北海道開発局が覆工の落石荷重に対する合理的設計手法の検討の一つとして重錘落下による実証実験を実施した国道336号線に建設中の美幌覆道の1ブロックを用いて行った。美幌覆道はその1ブロックの主形状寸法が図-1に示すようにスパン長、幅、高さがそれぞれ12m, 9.75m, 5.05mで海側中央部に4.25m×5mの開口部を有する箱型構造である。解析は軸方向の任意点に衝撃荷重を載荷することとしていることより、1ブロック全てを要素分割している。要素分割は荷重載荷点位置によって多少異なるが、その総数は全ての解析ケースにおいて7000程度である。その一例として図-2に中央点載荷時の要素分割状態を示している。底版底部の境界条件に関しては、実証実験結果より基礎地盤の影響が少ないことが明らかになっていることにより、有限帯板要素法による解析の場合と同様、基礎地盤を無視し底版の端辺を上下方向に拘束している。また、覆工の弾性定数はヤング率 $E = 3 \times 10^5 \text{ kgf/m}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.2$ 、単位体積重量 $\omega = 2.5 \text{ gf/cm}^3$ 、と仮定している。

本研究では落石対策便覧に則して分散させた衝撃

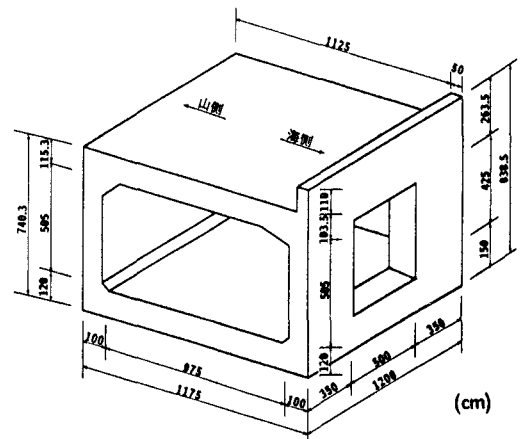


図-1 美幌覆道の1ブロック

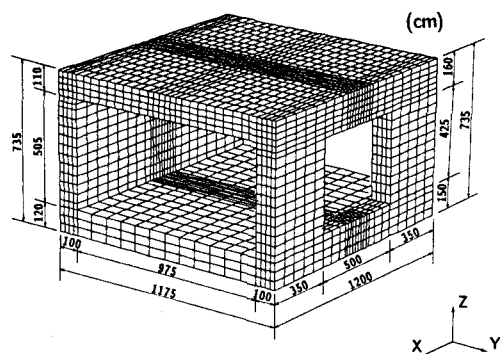
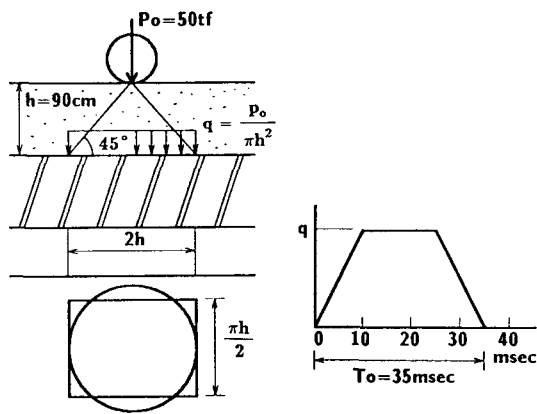


図-2 中央載荷時の要素分割



(a) 荷重の緩衝材による分散 (b) 荷重の時間分布

図-3 基本衝撃荷重

荷重を直接構造物に載荷させて解析することとしていることより緩衝材の質量，剛性を全て無視して検討を行っている．最大衝撃荷重は弾性解析であることにより $P_0 = 50 \text{ tf}$ と仮定している．衝撃荷重の覆工頂版における分布幅は上述のように緩衝材として厚さ $h = 90 \text{ cm}$ の敷砂を仮定し，落石対策便覧に従って道路軸直角方向に幅 $2h$ を有する等価な矩形分布としている．また衝撃荷重の時間方向分布は敷砂緩衝材を用いた実証実験結果および吉田等⁴⁾の研究結果を参考にして継続時間が 35 msec の台形分布状としている．図-3 (a), (b) に解析に用いた衝撃荷重の空間および，時間的分布を図示している．

3. 数値解析結果の比較と考察

3.1 スパン中央部載荷時の応答性状

図-4 には，覆工中央部に荷重を載荷した場合のスパン中央部頂版中央点における各断面力の時刻歴波形を有限帯板要素法 (F.S.M.) による解析結果と比較して示している． Q_y に関しては最大応答となる断面方向荷重載荷端部での応答値であり， Q_x に関しては軸方向荷重載荷端部の頂版中央点の応答値である．図より荷重載荷時 ($t \leq 35 \text{ msec}$) の応答波形は DYNA3D と F.S.M. とほぼ類似の挙動を示していることがわかる．最大応答値の発生時刻は M_x において多少ずれているが他の断面力に関しては両者ほぼ等しい．DYNA3D による各断面力の最大応答値は， Q_y を除いて F.S.M. に対して約 $1.1 \sim 1.2$ 倍程度大きな値とな

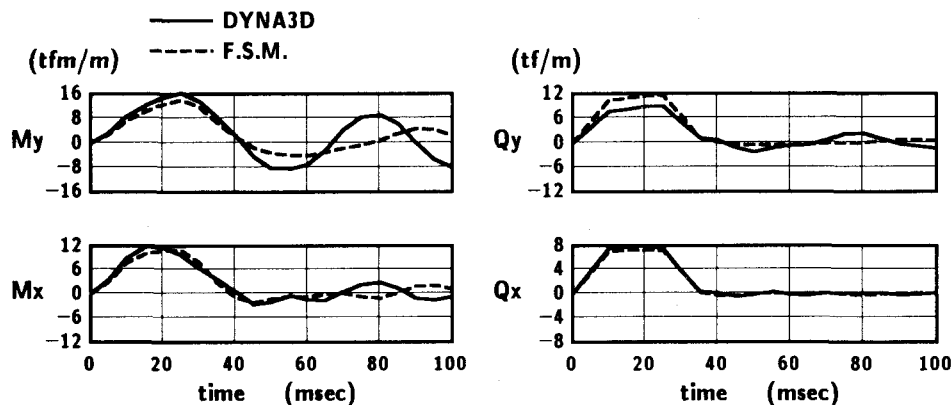
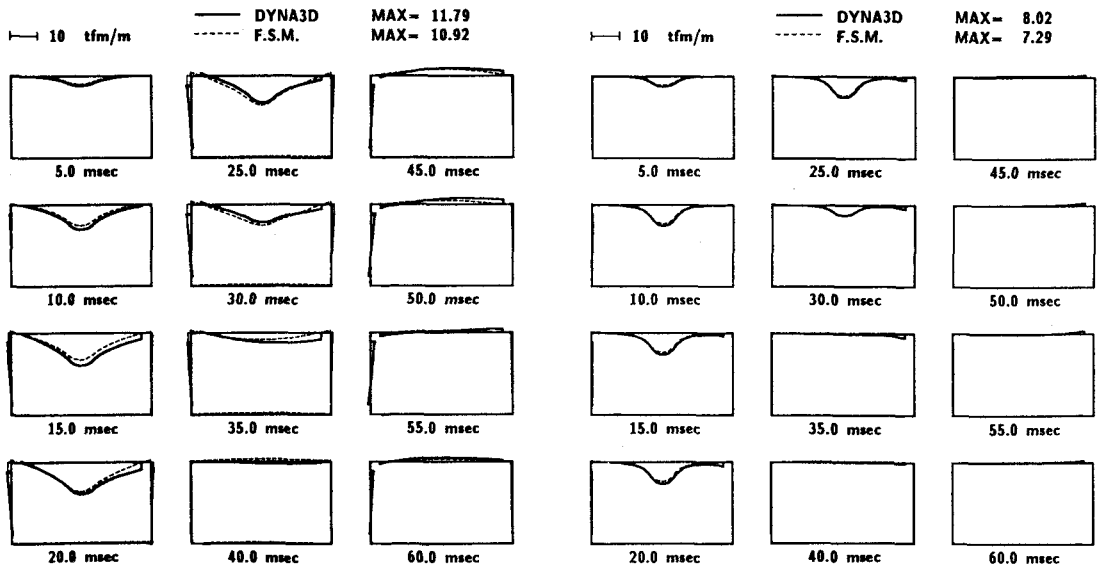
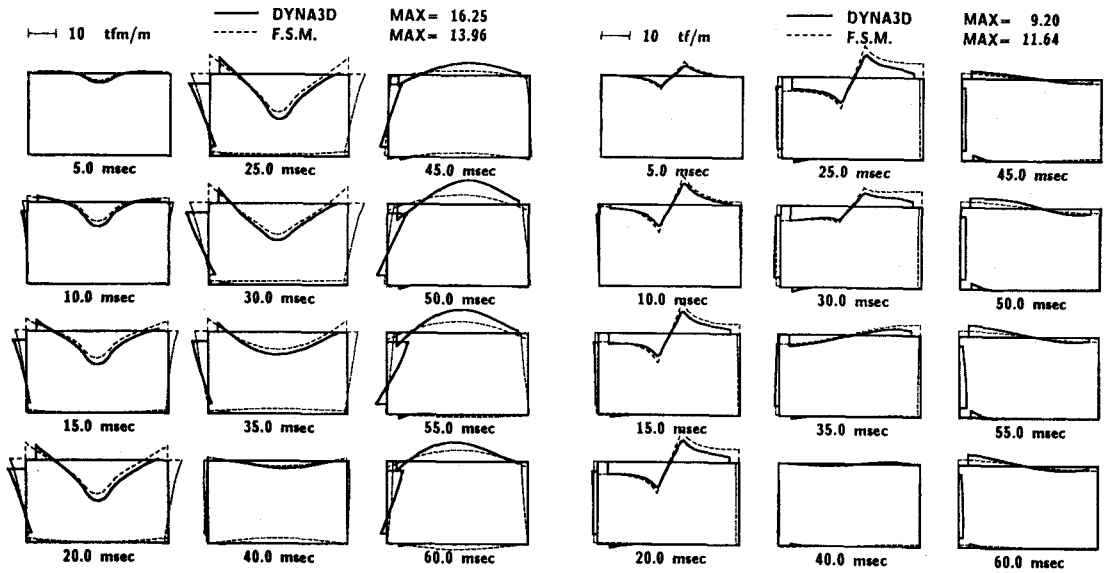
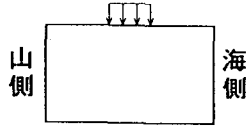


図-4 スパン中央部の頂版中央部に載荷した場合の各断面力の時刻歴波形



(c) Mx 分布の経時変化 (d) Qx 分布の経時変化

図-5 スパン中央部の頂版中央部に载荷した場合の断面力の経時変化

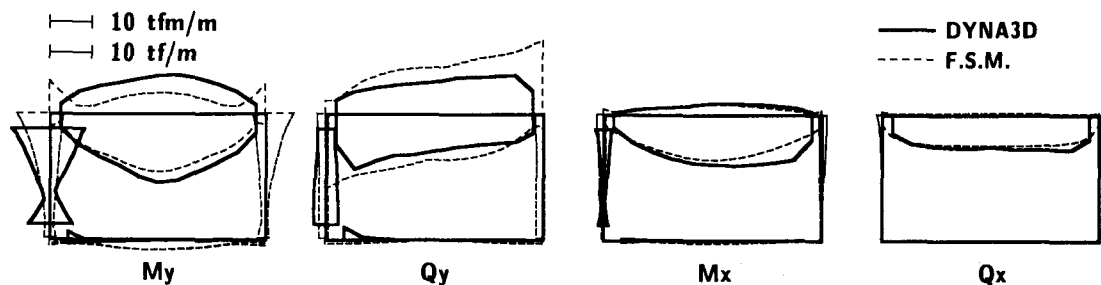


図-6 スパン中央部の頂版各点に載荷した場合の各断面力の最大包絡線分布

っている。Qy は 0.79 倍と F.S.M. による解析結果を下回っている。また Qy, Mx, Qx の場合は荷重除荷後、両解析結果とも小さな応答値を示している。一方 My に関しては、DYNA3D の場合には荷重載荷時の 1/2 程度の振幅となっており、F.S.M. による解析結果より減衰の程度が小さいようである。これは DYNA3D の解析において、減衰項が考慮されていないためであると考えられる。

図-5 には、スパン中央部断面における各断面力の経時変化を示している。DYNA3D の解析結果において、海側側壁部は窓部であるため断面力が存在しない。上述のように、DYNA3D と F.S.M. による解析結果は最大応答値が若干異なるものの、応答の集中状況等応答特性はこの図でも非常に近似していることが確認される。また、両解析結果において My に関しては頂版のみならず山側側壁部においても無視できない応答値となっているが、他 Qy, Mx, Qx は頂版のみに大きな応答値が発生していることが示されている。これより詳細な解析法の 1 つである DYNA3D による解析結果と比較しても、簡易な立体解析手法の 1 つである F.S.M. による解析結果が妥当な値を示していることが確認できる。

3.2 スパン中央部任意点載荷時の断面力の最大包絡線分布

図-6 は、スパン中央部頂版各点に基本荷重を載荷した場合の各断面力の最大包絡線分布を示している。各断面力の着目している断面は、図-4, 5 と同様である。ここでは、スパン中央頂版部の 1 1 箇所の基本荷重を載荷し、その載荷状態毎に荷重載荷点部の要素分割を細かくするようにして解析を行っている。My に関しては図-4 でも示されているように DYNA3D の解析結果が F.S.M. より負載荷状態の応答値が頂版において 2 倍程度大きく示されている。これは前述のとおり DYNA3D においては減衰を考慮していないためであると考えられる。また断面中央部における値は DYNA3D による解析結果が F.S.M. による結果に比べ 1.2 倍程度大きな値となっている。Qy に関しては、DYNA3D による解析結果は F.S.M. より小さくなっており、F.S.M. による解析結果が設計的に安全側の値を与えることがわかる。Mx に関しては中央部より海側頂版において DYNA3D による解析結果が F.S.M. より大きな値になっている。その差は最大で 1.7 倍程度となっている。Qx は両解析結果とも類似の分布値になっている。これより F.S.M. による解析結果を用いて断面設計を行う場合には、特に断面設計において重要な My に関して 1.2 程度の割り増し係数を乗じなければならないと考えられる。

3.3 道路軸方向任意点における最大断面力分布

図-7 には頂版中央線に沿って載荷位置を軸方向に移動させたときの各最大断面力を、スパン中央部載荷時のそれぞれの最大応答値に対する比率で示している。なお軸方向に関しては、スパン中央点に関し対称な構造になっていることよりスパンの 1/2 のみを示している。図の横軸は基本荷重の中央点に当たる位置を示している。基本荷重の中央点が覆工の自由端部からはずれる場合に、My, Qy, Mx に関しては自由端部の値を用いている。なお、Qx の負載荷状態の断面力は値が小さいことよりここでは無視している。図より、Mx

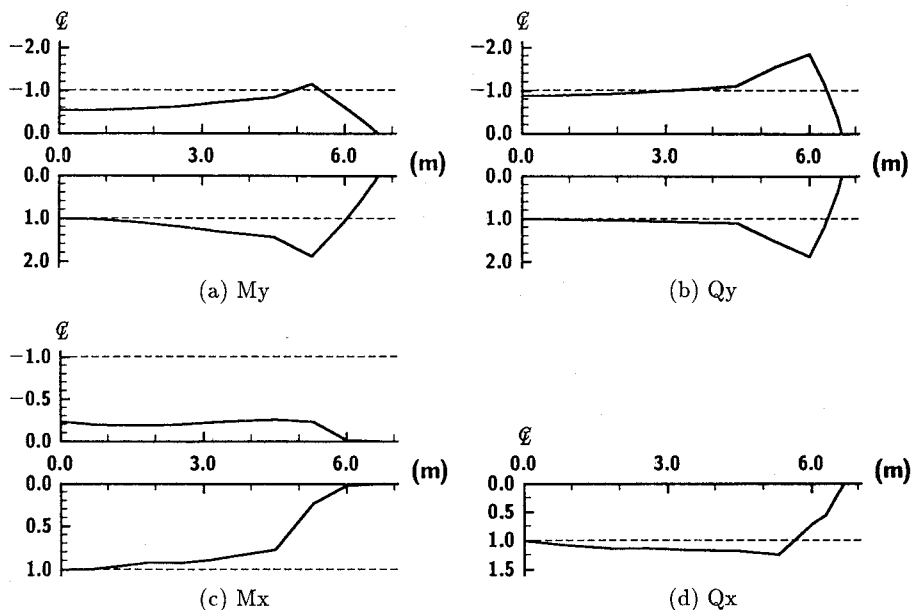


図-7 頂版中央部のスパン各点に載荷した場合の各最大断面力の無次元包絡線分布

については、中央点載荷時を最大として応答値が減少していることが分かる。しかしながら、他の断面力分布に関してはスパン端部に移動するに従って応答値が増大傾向にあることがわかる。My, Qx はスパン端部に基本荷重全てが載荷したとき最大となり、その時の倍率はそれぞれ約 1.88 倍, 1.24 倍となっている。また、Qy は載荷点中心がスパン端部と一致するとき最大になり、約 1.88 倍となっている。これは自由端の存在により自由端側の Qx の分担力を Qy が担うためと考えられる。これより、覆工の合理的な断面力設計を行うためには、スパン方向任意点に荷重が載荷する場合についても考慮しなければならないことがわかる。

3.5 スパン中央部載荷時とスパン端部載荷時の最大断面力分布の比較

前節の結果を踏まえて、My, Qy に限定してスパン中央部載荷の場合とそれぞれが最大応答値を示す載荷位置（頂版中央部載荷）における断面力分布を比較して示している。すなわち My に関してはスパン中央部載荷と 5.3 m 載荷の場合について、また Qy に関しては中央部載荷と 6.0 m（自由端）載荷の場合である。正載荷状態の My に関して、5.3 m 載荷の場合における応答値は頂版中央部のみならず断面全体でスパン中央部載荷時の 2 倍程度の大きさになっている。これに対して負載荷状態の場合は正載荷状態の場合に比較して応答倍率が小さくなっている。また 5.3 m 載荷の場合には海側側壁が存在していることによりその部分における分布も示されているが、その値は山側側壁部の値と類似の値を示していることがわかる。一方 Qy について言

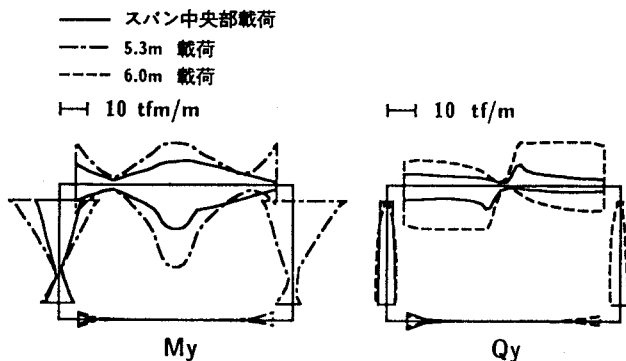


図-8 頂版中央部のスパン中央部とスパン端部における載荷時の最大断面力分布

及すると、特に 6 m (自由端) 載荷の場合の頂版の分布はスパン中央部載荷の場合と異なり幅員方向に減衰せず様な分布となっている。載荷位置による応答値を比較すると、頂版部では 6 m 載荷の場合が載荷端部で 2 倍程度、中間部で 3 倍程度スパン中央部載荷時より大きくなっている。しかしながら、山側側壁では両者類似の分布になっている。

4 まとめ

非線形衝撃解析プログラム DYNA3D を用いて落石による衝撃荷重載荷時の RC 覆工の動的応答性状を明らかにすること、さらに合理的な設計のための断面力に関して検討を行うことを目的として、弾性衝撃応答解析を行い有限帯板要素法による解析結果と比較しながら検討を行った。本研究により得られた結果をまとめると以下ようになる。

・スパン中央載荷において

- 1) DYNA3D は開口部周辺等の詳細な解析ができ、有限帯板要素法等の簡易な解析方法のベンチマークとして用いることが可能である。
- 2) 荷重載荷時の応答特性は DYNA3D による解析結果と F.S.M. の解析結果が両者近似している。最大応答値については Q_x を除く M_y , Q_y , M_x は DYNA3D による解析結果が F.S.M. より 1.1 ~ 1.2 倍程度大きい値になる。
- 3) 移動荷重による解析結果から、F.S.M. による解析結果を用いて断面設計を行う場合には、 M_y , Q_y に関し 1.1 ~ 1.2 程度の割増し係数を乗じなければならないことが明らかになった。

・軸方向の断面力分布について

- 4) M_y , Q_y , Q_x は荷重の端部が自由端と一致する場合に最も大きくなり、その値はそれぞれスパン中央部載荷の 1.88, 1.88, 1.24 倍となる。
- 5) M_x に関してはスパン中央部載荷時が最も大きい応答値を示す。
- 6) ブロック施工される覆工を合理的に設計するためには、スパン中央部載荷時のみならずスパン方向各点に荷重が載荷する場合も考慮しなければならないことを数値的に明らかにすることができた。

参考文献

- 1) 菅田紀之・岸 徳光・中野 修：RC 覆工の衝撃応答解析法の適用性に関する実証的検討，土木学会論文報告集，No.483/I-26, 1994.1.
- 2) Hallquist.J.O. : Dyna3D User's Manual, University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Rept.UCID-19592, Rev.4, 1988-4
- 3) 日本道路協会：落石対策便覧，日本道路協会，1983.
- 4) 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.