

論文 衝撃荷重を受ける RC 製ロックシェッドに関する三次元骨組動的応答解析法の適応性検討

牛渡 裕二^{*1}・小室 雅人^{*2}・今野 久志^{*3}・岸 徳光^{*4}

要旨：本研究では、RC 製ロックシェッドにおける性能照査型設計法の確立を目的に、1/2 縮尺 RC 製ロックシェッド模型を対象に載荷点を変化させて実施した三次元弾塑性有限要素解析 (FEM) に対して、三次元骨組動的解析による再現を試みた。検討の結果、1) 提案の骨組解析手法を用いることにより、敷砂緩衝材を有する RC 製ロックシェッド模型の衝撃実験結果および FEM 結果を概ね再現可能であること、2) 実験結果の再現性に関しては FEM より若干劣るものの、設計的に安全側の評価を与えることから、実務設計の観点からは、コンクリート構造物の耐衝撃問題に十分適用可能であること、等が明らかになった。

キーワード：RC 製ロックシェッド模型、三次元骨組動的解析、三次元弾塑性有限要素解析

1. はじめに

我が国は、地震頻発地帯に位置するとともに台風の常襲地帯でもあり、地震、台風、豪雨などに起因する落石災害が頻発している。特に山岳地帯や海岸線部の急峻な地形に施設された道路や鉄道では、落石災害の危険性が高く落石防護構造物が数多く建設されている。これら落石防護工の一つである RC 製ロックシェッド (以後、ロックシェッド) は現在のところ落石対策便覧¹⁾等の要領に基づき許容応力度法によって断面設計が行われている。

一方、許容応力度法を用いた設計は、耐力的に過大でコスト高となる傾向があるため、近年、さまざまな構造物の設計法が許容応力度法から性能照査型設計法に移行してきており、ロックシェッドにおいても同様に性能照査型設計法の確立が求められている。

落石防護構造物の場合には、耐衝撃応答特性を考慮し、かつ比較的簡易な設計法が必要となることから、三次元弾塑性 FEM を基礎として、最終的には実務レベルでの対応が容易な骨組解析への移行を図ることが望ましい。

このような状況下において、著者らはロックシェッドの性能照査型耐衝撃設計法の確立に向けて、2/5 および 1/2 縮尺 RC 製ロックシェッド模型に関する重錘落下衝撃実験を実施し、その耐衝撃挙動を把握している^{2),3)}。また、これらの実験結果をもとに三次元弾塑性 FEM を実施し、実挙動を高精度に再現可能な解析手法を提案している^{4),5)}。さらに、二次元骨組動的解析によっても荷重負担幅 (有効幅) の調整により簡易に実挙動を比較的精度よく再現可能となることも明らかにしている⁶⁾。しかしながら、二次元化する際の荷重負担幅 (有効幅) は躯体形状や荷重規模によって変化することから、一義的に決定することに対して課題が残る状況であった。そこで、

表-1 実験および解析ケース一覧

解析ケース	落下高さ (m)	実施の有無			載荷軸	載荷位置
		実験	FEM	骨組		
C-P-H10	10	×	○	○	中央 (C)	柱側 (P)
C-CL-H1 ~ 20	1, 2, 2.5, 5, 10, 15, 20	○	○*	○*		中心 (CL)
C-S-H10	10	×	○	○		壁側 (S)
E-P-H10	10	×	○	○	端部 (E)	柱側 (P)
E-CL-H10	10	×	○	○		中心 (CL)
E-S-H10	10	×	○	○		壁側 (S)

* $H = 10 \text{ m}$ のみ実施

著者らは、一般に橋梁設計で用いられている三次元骨組動的解析による実験結果の再現を試み、頂版部中央載荷に関しては概ね適切に評価可能であることを明らかにしている⁷⁾。しかしながら、載荷位置が変化した場合の適用性に関しては検討されていない。このような背景より、本研究ではロックシェッドの性能照査型設計法の確立に向けて、実験で得られた重錘衝撃力をロックシェッドに作用する衝撃力として設定し、三次元骨組モデルにおける載荷位置を変化させた動的解析 (以後、骨組解析) を実施した。さらに本解析結果を実験結果および三次元弾塑性 FEM 結果 (以後、FEM) と比較し、骨組解析手法の適用性に関する検討を行った。

なお、本研究では、前述の 1/2 縮尺ロックシェッド模型実験における落下高さ $H = 10 \text{ m}$ のケースについて数値解析結果と比較検討を実施することとした。本ケースの重錘衝撃力に関しては、ラメの定数を $\lambda = 1,000 \text{ kN/m}^2$ とし、敷砂 $t = 0.9 \text{ m}$ と重錘径 $D = 1.25 \text{ m}$ の比に基づいた割り増し係数を考慮した振動便覧式¹⁾では、約 3,250 kN と算出される。

*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科 博士後期課程 建設環境工学専攻 (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット 講師 博 (工) (正会員)

*3 寒地土木研究所 総括主任研究員 寒地構造チーム 博 (工) (正会員)

*4 釧路工業高等専門学校 校長 工博 (正会員)

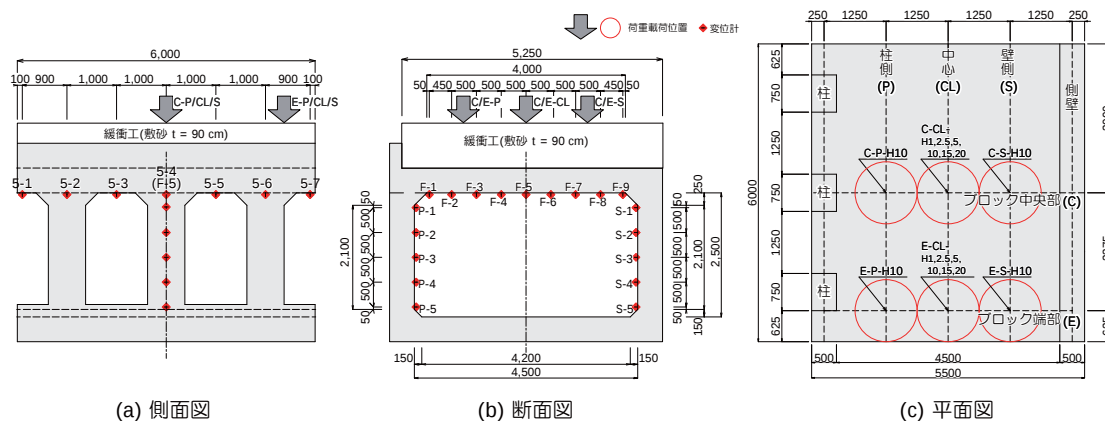


図-1 変位計配置および荷重載荷位置図

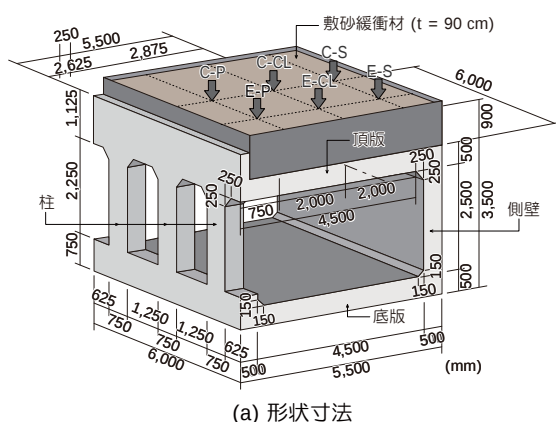


図-2 形状寸法および配筋状況

2. 実験および数値解析概要

2.1 実験概要および共通解析条件

表-1、表-2には、本実験に対応した実験・解析ケースの一覧および物性値一覧を示している。また、図-1および図-2には対象のロックシェッドに関する形状寸法、変位計測位置、配筋状況および荷重載荷位置を示している。実験では繰り返し载荷を行っているものの、数値解析では要素数が多く解析に多大な時間が必要となること、既往研究より衝突速度が $V = 20 \text{ m/s}$ ($H = 20 \text{ m}$) 以下の場合には敷砂によって衝撃エネルギーが十分に吸収さ

表-2 物性値一覽

材料	密度 ρ (t/m ³)	強度 (MPa)	弾性係数 E (GPa)	ポアソン比 ν
コンクリート	2.35	28.3	20	0.167
D22, D19 D16, D13	7.85	391, 402 389, 389	206	0.3
敷砂	1.531	-	10 (除荷時)	0.06
基礎コンクリート	2.5	-	30	0.2

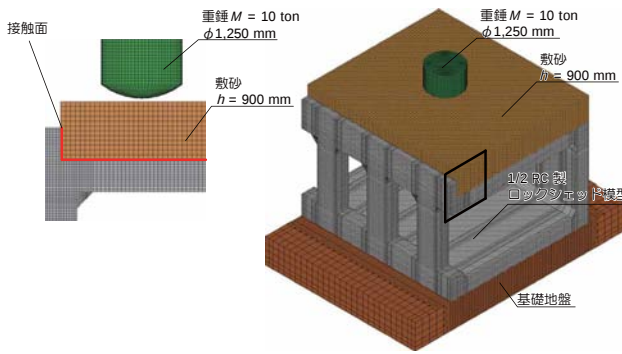
れ、損傷が顕在化していないことより、本研究では、繰返し載荷による損傷の蓄積を考慮せずに各実験ケースに対して単一載荷の条件下で解析を行い、解析手法の妥当性を検討することとした。また、基礎コンクリートに関しては、鉄筋とコンクリートの剛性が一体化しているものとし、かつ弾性体と仮定した。

2.2 FEM 概要

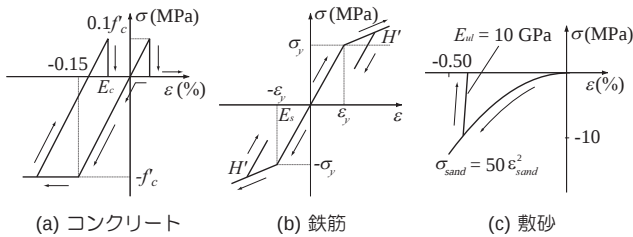
(1) 解析モデルおよび解析条件

図-3 には、本 FEM で用いたロックシェッド模型の解析モデルを示している。衝撃荷重は、頂版および敷砂上にモデル化した重錘に所定の速度を与えることにより作用させている。コンクリート - 鉄筋要素間には完全付着を仮定し、FEM モデルの基礎底面は完全固定、試験体底面 - 基礎コンクリート間には連続と仮定している。なお、ロックシェッド頂版 - 敷砂要素間には、敷砂の浮き上がりや接触圧を考慮可能な接触面（摩擦係数：0）を定義しており、敷砂から頂版に伝達される荷重を適切に評価している。また、重錘と敷砂との接触面にも面と面の接触・剥離を伴う滑り（摩擦係数：0）を考慮している。

使用要素は、鉄筋には2節点の梁要素を用い、その他の要素には8節点の固体要素を用いている。要素積分については、要素の変形量と計算精度を考慮して、敷砂には8点積分、その他固体要素には1点積分、梁要素には4点積分を用いた。減衰定数 h は、質量比例型減衰項のみを考慮することとし、事前解析によって実験結果を適切に再現可能である $h=1\%$ とした。また、本FEMモデルに



図－3 FEM モデル



図－4 各材料の応力－ひずみ関係 (FEM)

において、コンクリートの要素長は 62.5 mm を基本に分割しており、鉄筋および敷砂等は要素分割の制約上、コンクリートと同様としている。総節点数および総要素数は、それぞれ約 660,000、680,000 である。なお、本 FEM には有限要素法に基づいた弾塑性衝撃応答解析用汎用コード LS-DYNA (Ver. 971) を用いている。

(2) 材料物性モデル

図－4 には、本 FEM で用いたコンクリート、鉄筋および敷砂の応力－ひずみ関係を示している。なお、一般に载荷速度が大きい場合には、各材料にひずみ速度効果が発揮されることが知られている。しかしながら、既往の研究において、衝突速度が $V = 20 \text{ m/s}$ ($H = 20 \text{ m}$) 以下の場合には、ひずみ速度効果を考慮しない状態での数値解析結果は、実験結果を精度よく再現可能なことが明らかにされていること、さらに緩衝材の設置により重錘の衝突速度は更に緩和されることから、材料のひずみ速度効果の影響は非常に小さいものと判断し、ここでは考慮しないこととした。

図－4(a) には、コンクリートに関する応力－ひずみ関係を示している。圧縮側に関しては、相当ひずみが -0.15% に達した状態でコンクリートが降伏するものと仮定し、完全弾塑性体のバイリニア型にモデル化した。引張強度は圧縮強度の $1/10$ と仮定している。降伏の判定には Drucker-Prager の降伏条件式を採用している。

図－4(b) には、鉄筋に関する応力－ひずみ関係を示している。鉄筋要素に用いた物性モデルは、塑性硬化係数 H を弾性係数 E_s の 1% とするバイリニア型の等方硬化則を適用している。降伏の判定には von Mises の降伏条件式

を採用した。

図－4(c) には、敷砂の緩衝特性を評価するための応力－ひずみ関係を示している。本 FEM で適用した敷砂の材料構成則モデルは、著者らが過去に実施した敷砂緩衝材に対する衝撃载荷実験結果と数値解析結果の比較検討により適用の妥当性を検証したものであり、次式のように示される。

$$\sigma_{sand} = 50\varepsilon_{sand}^2 \quad (1)$$

ここで、 σ_{sand} は相当応力 (MPa)、 ε_{sand} は体積ひずみである。除荷勾配は $E_{ul} = 10 \text{ GPa}$ と仮定した。式 (1) は、敷砂厚が本研究の場合と同様に $t = 90 \text{ cm}$ の場合に対して構築された式であり、5 ton 重錘を用いた大型 RC 桁への適用性を検討した研究でも十分な信頼性が確認されている。本研究の場合には質量が 10 ton でかつ重錘径が 1.25 m と若干大きいものの、これらの影響は敷砂厚に比較して小さいものと判断し、式 (1) を適用することとした。なお、本研究に用いた砂は、これまでの敷砂緩衝材実験と同じ石狩市厚田田津狩産の細砂とし、粗粒率や含水比、締め固め方法等も同程度となるよう配慮している。

2.3 骨組解析

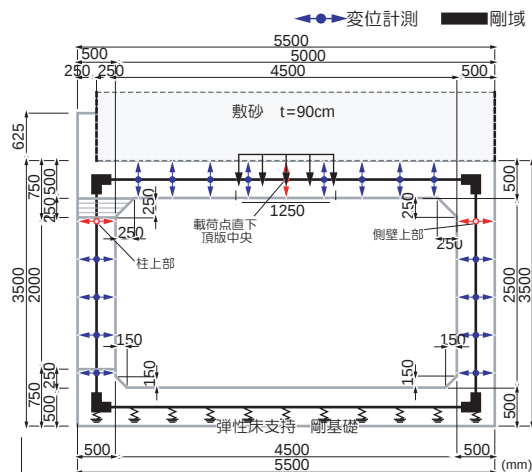
(1) 解析モデルおよび解析条件

図－5 に本骨組解析に用いた解析モデルを示す。骨組モデルは実験供試体の頂版・側壁・柱・底版コンクリート中央に配置するようモデル化している。部材の要素分割は、1 要素長を各部材の有効厚程度とし、最小でも有効高の 0.5 倍程度になるように設定している。また、隅角部には、道路橋示方書⁸⁾に準拠し剛域を設定している。骨組モデルにはファイバー要素を使用し、各部材の断面寸法を設定している。なお、ブロック端部のファイバー要素については (c) 図に示す幅の $1/2$ としている。

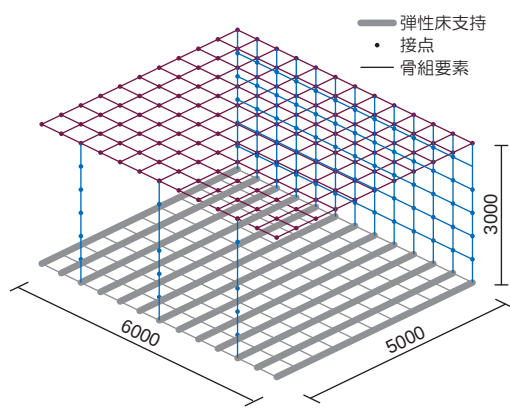
ファイバー要素のセル分割については、図－5 に示すようにセル要素の中心近傍に軸方向鉄筋が配置されるように設定している。境界条件は底面を弾性床支持とし、圧縮方向のみバネを考慮している。ただし、剛基礎を模擬するため、バネ定数は十分に大きな値を入力している。頂版上の敷砂緩衝工の質量は要素に付加することで考慮している。減衰定数 h は、質量比例型減衰項のみを考慮することとし、事前に本解析モデルを用いた固有振動解析を行い、载荷点が卓越する鉛直方向曲げ振動モードに対応した固有振動数に対して、予備解析の下に $h = 2.5\%$ と設定している。なお、骨組モデルの総節点数は 496、総要素数は 802 である。また、本数値解析には Engineer's Studio⁸⁾ Ver.1.07.00 を使用している。

(2) 材料物性モデル

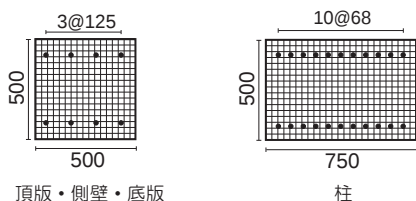
図－6 には、解析に用いた各材料物性モデルを示している。(a)、(b) 図には、コンクリート要素および鉄筋要素に用いた応力－ひずみ関係を示している。本論文では実



(a) 骨組断面



(b) 骨組全体系



(c) ファイバー要素断面

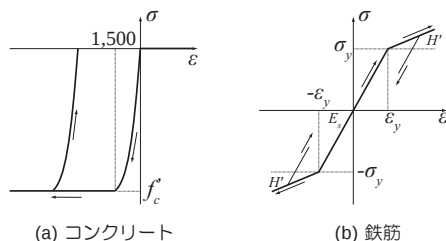
図－５ 骨組解析モデル

務設計を念頭に、それぞれコンクリート標準示方書⁹⁾および道路橋示方書¹⁰⁾に則して設定している。なお、コンクリートの圧縮側に関しては、三次元弾塑性有限要素解析と同様に、相当ひずみが -0.15% に達した状態でコンクリートが降伏するものと仮定している。

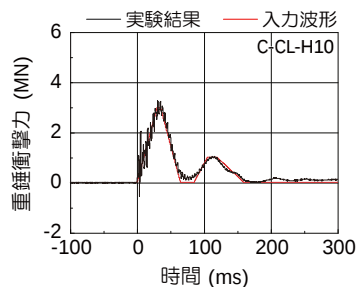
鉄筋要素に用いた物性モデルは、塑性硬化係数 H を弾性係数 E_s の 1% とするバイリニア型の等方便化則を適用している。

(3) 衝撃力入力モデル

図－７には、骨組解析に用いた衝撃力波形を示している。入力波形は実験から得られた重錘衝撃力波形を簡易化し、載荷範囲にある節点に面積比を考慮し分割して与えている。載荷範囲は敷砂に衝突する点を中心に重錘径で作用するものと仮定し設定した。なお、前述の通り、敷砂はその質量のみを頂版に付加しており、載荷荷重は直



図－６ 各材料の応力－ひずみ関係(骨組解析)



図－７ 骨組解析モデルへの入力波形

接頂版骨組へ入力している。

3. 衝撃実験結果と各種解析結果の比較

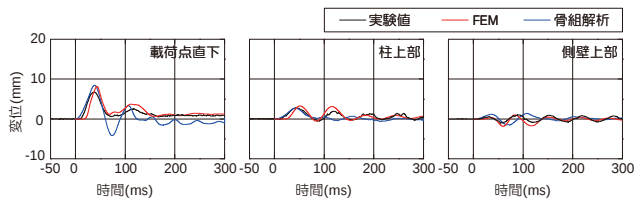
3.1 変位波形

図－８には、落下高さ $H=10\text{ m}$ における載荷点を変化させた場合の載荷点直下、柱上部および側壁上の変位波形に関して、FEM および骨組解析の結果を比較して示している。なお、本グラフは重錘衝突時刻を 0 としている。また、C-CL-H10 に関しては実験結果も併せて示している。

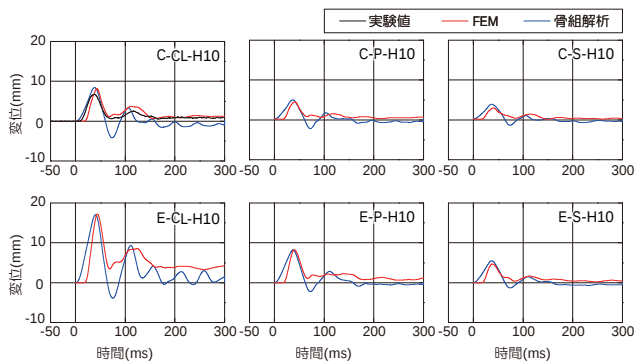
(a) 図より、載荷点直下の変位波形に着目すると、解析結果の波形は、FEM および骨組解析共に実験値に比べて立ち上がり時刻や勾配に多少の差異はあるものの、最大応答発生時刻および最大応答値については、いずれの解析結果も実験結果と概ね同程度の値を示していることが分かる。ただし、最大応答値発生以降の振動特性に関しては、FEM では精度良く再現されているのに対し、骨組解析では再現性が低く残留変位についても FEM および実験値より小さな値を示す傾向にある。

柱上部の変位波形に着目すると、実験結果では第 1 波目に最大値を示し、その後、減衰自由振動を呈している。FEM の場合には第 1 波目の最大値から第 2 波以降の減衰自由振動までを概ね再現していることが分かる。これに対して、骨組解析の場合には第 1 波目の最大値から第 2 波以降の減衰自由振動の周期は実験結果よりも長く、早期に振動が収束する傾向を示している。これは隅角部に剛域を考慮したため、頂版部の振動と連動したことによるものと推察される。

一方、側壁上部の変位波形に着目すると、実験結果は第 2 波目に最大値を示し、その後減衰自由振動状態となる。FEM の場合には、第 2 波目の最大値から自由減衰振

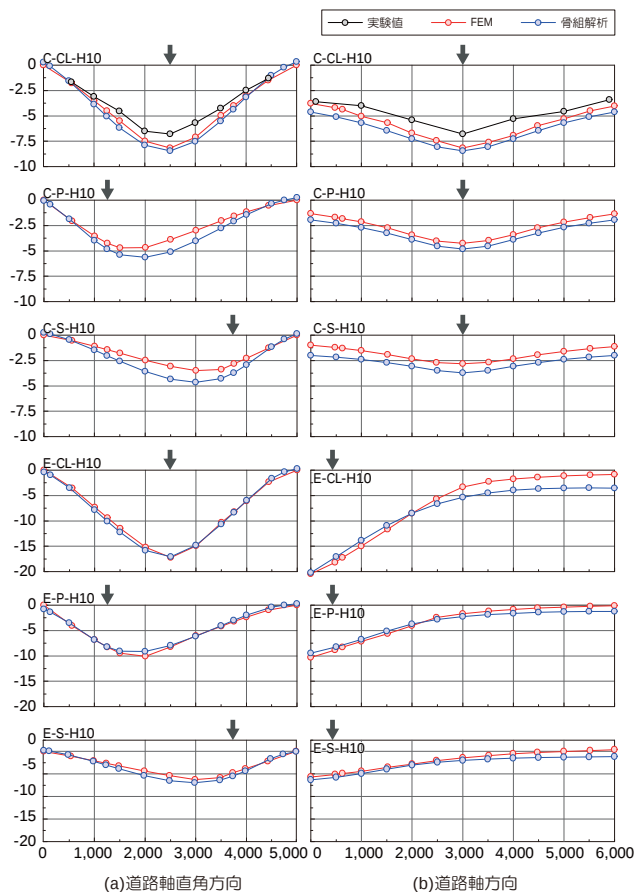


(a)頂版中央載荷 (C-CL-H10) 時における変位応答波形



(b)頂版部載荷点直下変位応答波形

図-8 変位波形



(a)道路軸直角方向 (b)道路軸方向

図-9 変位分布図

動状態まで概ね精度よく再現されている。それに対して、骨組解析はいずれの場合においても、第2波目に最大値を示し、その後自由減衰振動状態を示すものの、FEMより長周期となり、早期に振動が収束する傾向を示している。これは、柱と同様に隅角部に考慮した剛域の影響であるものと推察される。

次に、柱上部および側壁上部における最大変位および残留変位に着目すると、柱上部および側壁上部共に、残留変位に関しては骨組解析はFEMより若干小さな値を示す傾向にあるものの、最大変位に関しては、FEMと骨組解析は共に同程度の値を示している。

(b)図には、載荷点を変化させた場合の載荷点直下における変位応答波形を示している。骨組解析とFEMを比較すると、骨組解析の最大応答値の発生時刻および変位は、FEMをほぼ再現していることが分かる。しかしながら、2波目以降の自由減衰振動および残留変位については再現できていない。

以上のことから、骨組解析法は、FEMより再現性は劣るものの全体的には安全側の評価を与えることが明らかになった。これより、設計レベルでの衝撃問題への適用は十分可能であるものと判断される

3.2 変位分布

図-9には、載荷点直下の最大鉛直変位発生時における道路軸直角方向および道路軸方向鉛直変位分布に関して、FEMと骨組解析結果を比較して示している。なお、C-CL-H10に関しては実験結果も併せて示している。

(a)図より、道路軸直角方向の変位分布に関しては、何れのケースにおいても、骨組解析結果はFEMおよび実験結果を精度よく再現していることが分かる。

(b)図より、道路軸方向の変位分布に関しては、C-CL-H10の場合、実験結果およびFEM結果は共に載荷点直下で最大値を示し、ブロック端部で載荷点直下の約50%程度の値を示しており、両者がよく対応していることが分かる。骨組解析の場合についても、概ねFEMと同程度の値を示している。ただし、端部載荷の場合には、載荷点の最大変位は概ねFEMと同程度の値を示すのに対し、載荷点と逆のブロック端部の変位量がFEMより大きな値となっている。これは、骨組解析では版構造のモデル化において道路軸方向の曲げ剛性が若干固く評価されたために、特に端部載荷の場合にその差が顕著に現れたものと推察される。しかしながら、いずれの場合も載荷点の最大変位量はFEMと同程度の値を示していることから、提案の手法による解析結果は実務的には実験結果を概ね再現しているものと判断される。

3.3 曲げモーメント分布

図-10には、載荷点直下の最大鉛直変位発生時刻における曲げモーメント分布について、FEMおよび骨組解析結果を比較して示している。

図より、道路軸直角方向の曲げモーメント分布に関しては、骨組解析はFEMと概ね同様の分布性状を示していることが分かる。

頂版部に着目すると、骨組解析は載荷点近傍でFEMより僅かに小さな値を示す傾向にある。これは、FEMは載

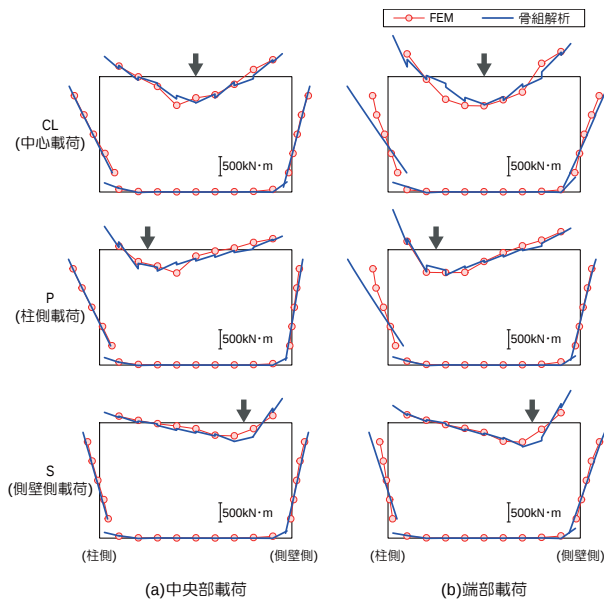


図-10 モーメント図

荷点近傍部の押し抜きせん断等の局所的な変形も評価可能であるのに対し、骨組解析は有限変形理論に基づいて行われているものの、せん断成分が卓越する様な局所的な大変形への対応は難しいものと推察される。

柱部に着目すると、骨組解析結果は中央部荷荷に関してはFEMとほぼ同程度の値を示しているのに対し、端部荷荷の場合はFEMより大きな値を示している。これは、頂版の道路軸方向の変位分布でも示される通り、頂版の道路軸方向の剛性が若干大きく評価されるため、荷点に最も近い柱部に大きな断面力が発生しているためと推察される。一方、側壁部に着目すると、骨組解析結果はいずれの場合でもFEMと比較して概ね同様の値を示している。

以上のことから、骨組解析による解析結果はFEMによる解析結果に対して多少の差異はあるものの、FEM結果を概ね再現しており、実務的には十分適用可能であるものと考えられる。解析時間に着目すると、骨組解析はFEMの約1/100程度で済み、解析コストの面でも大いに期待できるものと考えられる。

4. まとめ

RC製ロックシェッドの性能照査型耐衝撃設計法の確立を最終的に、その基礎的な検討として三次元動的骨組解析法の適用を提案し、実規模の1/2縮尺模型を用いた実験結果や三次元弾塑性有限要素解析結果との比較によりその妥当性を検討した。本研究で得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- (1) 提案の骨組解析手法を用いることにより、敷砂緩衝材を有するRC製ロックシェッド模型の衝撃実験結果およびFEM結果を概ね再現可能である。
- (2) 道路直角方向の変位分布はFEMを精度良く再現可能

であるが、道路軸方向の変位分布に関しては再現性がやや低い。

- (3) 端部荷荷の場合には柱部の断面力評価は、FEMの解析結果よりも過大に評価する傾向にあるが。その他のケースではFEM結果を精度良く再現可能である

以上のことから、提案の骨組解析法はFEMより再現性にやや劣るものの設計的に安全側の評価を与えており、実務設計の観点から曲げ破壊モードが卓越するコンクリート構造物における耐衝撃問題に関しては十分適用可能であるものと判断される。

謝辞：本研究を行うにあたり、室蘭工業大学大学院工学研究科博士前期課程建築社会基盤系専攻構造力学研究室の武田雅弘君ならびに池田翔哉君に多大なるご支援を戴いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧，2000.6.
- 2) 山口 悟，岸 徳光，今野久志，西 弘明：敷砂緩衝材を有するRC製ロックシェッド模型に関する衝撃荷重実験，構造工学論文集，Vol.56A，pp.1149-1159，2010.3
- 3) 西 弘明，岸 徳光，牛渡裕二，今野久志，川瀬良司：敷砂緩衝材を設置した1/2縮尺RC製ロックシェッド模型の重錘落下衝撃実験，構造工学論文集，Vol.57A，pp.1173-1180，2011.3
- 4) 岸徳光，牛渡裕二，今野久志，山口悟，川瀬良司：重錘落下衝撃荷重を受ける1/2スケールRC製ロックシェッド模型に関する数値解析的検討，構造工学論文集，Vol.58A，pp.1029-1040，2012.3
- 5) 今野久志，岸徳光，山口悟，牛渡裕二：荷重位置を変化させた1/2縮尺RC製ロックシェッド模型の耐衝撃挙動に関する数値解析的検討，コンクリート工学論文集，Vol.34，No.2，pp.673-678，2012.6
- 6) 牛渡裕二，川瀬良司，今野久志，岸 徳光：RC製ロックシェッド模型の重錘落下衝撃挙動に関する二次元骨組解析法の妥当性検討，コンクリート工学論文集，Vol.33，No.2，pp.61-66，2011.6
- 7) 牛渡裕二，今野久志，小室雅人，保木和弘，岸 徳光：RC製ロックシェッドに関するファイバー要素を用いた三次元骨組動的解析法の適用性検討，構造工学論文集，Vol.59A，pp.1008-1016，2013.3
- 8) Engineer's Studio
<http://www.forum8.co.jp>
- 9) (社)土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，2007.3.
- 10) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2012.3.