論文　載荷位置を変化させた 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

今野　久志[*1]・岸　徳光[*2]・山口　悟[*3]・牛渡　裕二[*4]

要旨：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目的に，その基礎的な検討として載荷位置を変化させた場合の耐衝撃挙動を把握することを目的に 1/2 スケール模型に対し，三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。その結果，1) 本数値解析により，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を精度よく再現可能であること，2) 最大重錘衝撃力は，載荷位置に拘わらず同程度の値を示す。また，載荷点最大変位は，道路軸直角方向では中央部，柱側，壁側の順に大きく，道路軸方向では端部載荷が中央部載荷の 2 倍程度の値を示すこと，等が明らかになった。

キーワード：RC 製ロックシェッド，三次元弾塑性衝撃応答解析，重錘落下衝撃実験，敷砂緩衝材

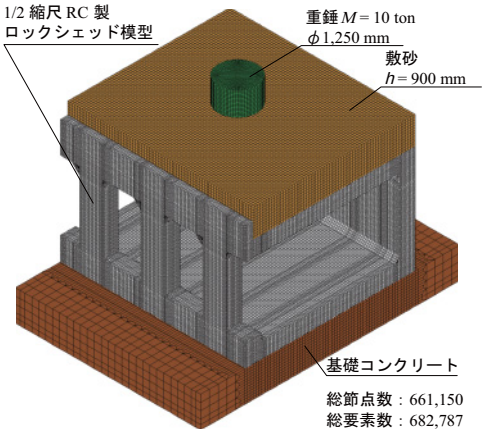
1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線における道路網には，落石災害を防止するための落石防護構造物が数多く建設されている。その落石防護構造物の一つである RC 製ロックシェッドは，現在のところ落石対策便覧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。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，三次元弾塑性衝撃応答解析を基礎として，最終的に二次元解析への移行を図ることが望ましい。ここで，二次元解析によって簡易に耐衝撃性を評価するためには，基礎となる三次元弾塑性衝撃応答解析の精度向上が課題となる。このような背景の下，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 2/5 および 1/2 縮尺 RC 製ロックシェッド模型に対し，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[1),2)]。

本研究では，1/2 縮尺模型に対する三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し，実験結果との比較検討によりその妥当性を検証すると共に，載荷位置を変化させた場合の耐衝撃挙動について数値解析的に検討を行った。なお，本数値解析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. 実験概要

衝撃実験を実施したロックシェッドの断面形状は，実構造物の 1/2 縮尺模型であり，頂版部材厚，側壁および柱部材厚が 500 mm，内空幅 4,500 mm ×高さ 2,500 mm となっており，道路軸方向の 1 ブロック延長は 6,000 mm である。頂版下面および上面の軸方向鉄筋には D22 を 125 mm 間隔で配置し，配力筋は軸方向鉄筋の 50 %を目安に上面，下面ともに D13 を 125 mm 間隔で配置している。実験法は，繰り返し載荷で行うこととし，重錘質量 10,000 kg の鋼製重錘を，落下高さ H = 1 m，2.5 m，5 m，10 m，15 m，20 m と漸増させて実験を行った。載荷点位置はロックシェッド模型の軸方向および幅員方向中心位置（後述の C-CL）に限定している。実験における計測項目は，重錘衝撃力および試験体各部の変位である。また，各実験終了後には，試験体のひび割れ状況をスケッチしている。



図－1　要素分割状況

3. 数値解析概要

3.1 数値解析モデルおよび解析条件

図－1 には，本数値解析で用いたロックシェッド模型の要素分割状況を示す。境界条件として，各接触面には面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した。また，コンク

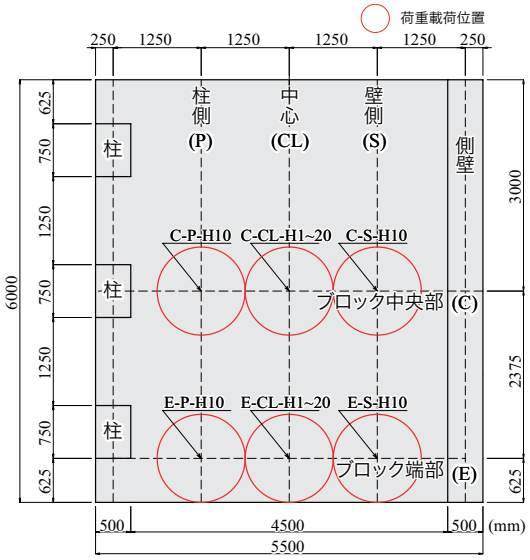
*1（独）土木研究所　寒地土木研究所　寒地構造チーム　総括主任研究員　博（工）（正会員）
*2　室蘭工業大学大学院　くらし環境系領域　社会基盤ユニット　教授　工博（正会員）
*3（独）土木研究所　寒地土木研究所　寒地構造チーム　研究員（正会員）
*4　室蘭工業大学大学院　博士前期課程　建築社会基盤系専攻（正会員）

表－1　解析ケース一覧

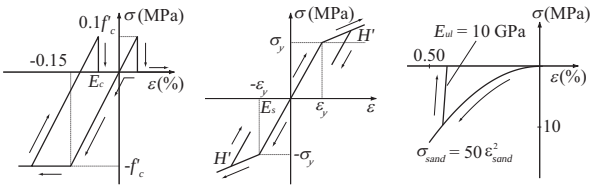
解析ケース	落下高さ H(m)	入力エネルギー E(kJ)	載荷軸	載荷位置
C-P-H10	10	980	ブロック中央部 (C)	柱側 (P)
C-CL-H1~20	1,2.5,5,10,15,20	98~1,960		中心 (CL)
C-S-H10	10	980		壁側 (S)
E-P-H10	10	980	ブロック端部 (E)	柱側 (P)
E-CL-H1~20	1,2.5,5,10,15,20	98~1,960		中心 (CL)
E-S-H10	10	980		壁側 (S)

表－2　物性値一覧

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
鉄筋 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



図－2　荷重載荷位置図



(a) コンクリート　(b) 鉄筋　(c) 敷砂

図－3　各材料の応力－ひずみ関係

リート－鉄筋要素間は完全付着を仮定し，数値解析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は連続と仮定している。用いた要素は，鉄筋には2節点の梁要素を，その他の要素には8節点の固体要素を用いている。減衰定数は，質量比例分のみを考慮するものとし，最低次固有振動数に対して1％と設定している。

表－1，**表－2**には，解析ケースおよび物性値の一覧を示している。また，**図－2**には荷重載荷位置図を示している。実験では繰り返し載荷を行っているが，数値解析においても繰り返し載荷の条件下で解析を実施するためには要素数が多いことから解析に多大な時間が必要となる。また，入力エネルギーが過度に大きくない場合には敷砂によって入力エネルギーが十分に吸収され，損傷が顕在化しないことより，耐衝撃挙動に及ぼす鉄筋のひずみ硬化やひび割れの影響が大きくないものと推察される。以上のことより，本数値解析では繰り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，実験結果との比較により解析手法の妥当性を検討することとした。なお，ブロック端部載荷の場合には，自由端における敷砂緩衝材の水平方向拘束の影響を排除するために，仮想の剛体頂版を設け，敷砂緩衝材のみを道路軸方向に3 m（ブロック長の1/2）連続させて解析を実施している。

3.2 材料物性モデル

図－3には，本数値解析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。

(a) **図**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 -1,500 μ に達した時点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。

(b) **図**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ている。

(c) **図**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。本研究で適用した敷砂の材料構成則モデルは，筆者らが過去に実施した敷砂緩衝材に対する衝撃載荷実験結果 (W = 3 ton，H = 5 ~ 30 m) と数値解析結果を比較することにより，その妥当性を検証したものである[3)]。

4. 数値解析結果

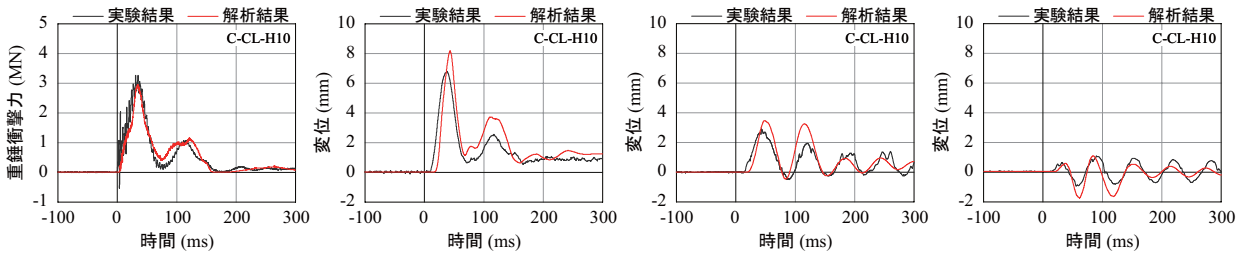
4.1 実験結果と解析結果の比較

本解析手法の妥当性検証を目的とし，ブロック中央部中心載荷における実験結果と解析結果を比較する。

(1) 各種応答波形

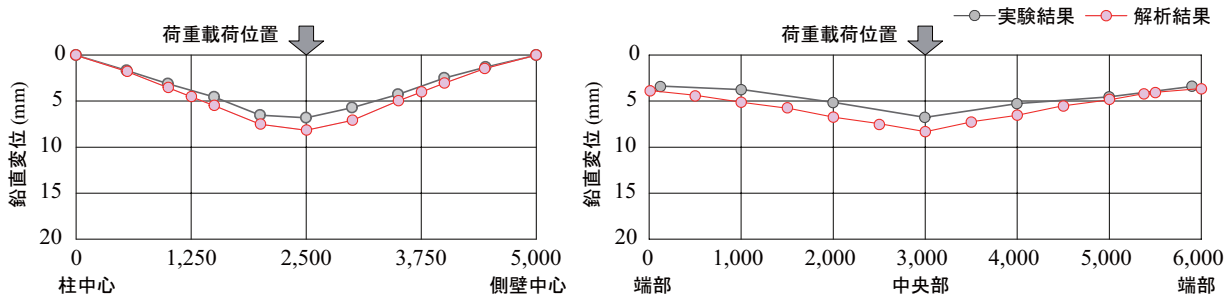
図－4には，C-CL-H10における実験結果および解析結果の重錘衝撃力，載荷点直下の鉛直変位，柱上部および側壁上部（いずれもハンチ下端より50 mm下方）の水平変位の各応答波形を示している。

(a) **図**に示す重錘衝撃力波形に着目すると，実験結果の重錘衝撃力波形は，重錘衝突時から急激に励起して40 ms



(a) 重錘衝撃力　(b) 載荷点変位　(c) 柱上部水平変位　(d) 側壁上部水平変位

図－4　各種応答波形（実験結果と解析結果の比較）



(a) 道路軸直角方向　(b) 道路軸方向

図－5　変位分布図（C-CL-H10）

程度で最大値に至る三角形状の第 1 波と，その後第 1 波より振幅が小さく，周期が同程度の第 2 波で構成されている。解析結果に着目すると，第 1 波，第 2 波ともに最大値，波動継続時間および波形性状が実験結果を精度良く再現していることが分かる。

(b) **図**に示す載荷点直下の鉛直変位波形に着目すると，実験結果の波形性状は，重錘衝突より若干遅れて励起し最大値に達する第 1 波と，その後に続く振幅の小さい第 2 波で構成されており，1 mm 程度の残留変位が発生している。解析結果は，実験結果よりも若干遅れて励起しており，最大値は実験結果よりも 20 % 程度大きいものの，残留変位は実験結果と同程度であり，波形性状も概ね再現している。

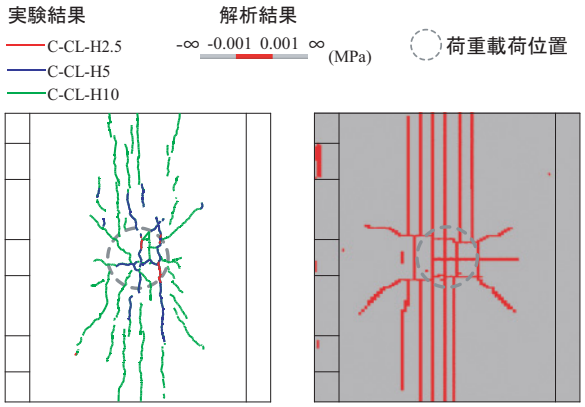
(c), (d) **図**に示す柱上部および側壁上部における水平変位波形は，実験結果および解析結果ともに正弦波状の波形性状を示している。解析結果は，第 1 波の立ち上がりが実験結果よりも若干遅れているものの，各最大水平変位および減衰自由振動も概ね再現している。

(2) **道路軸直角方向および道路軸方向変位分布**

図－5 には，C-CL-H10 の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，実験結果と解析結果を比較して示している。

(a) **図**より，道路軸直角方向の変位分布に関しては，実験結果は載荷点より若干柱側で最大値を示しているが，解析結果は実験結果を概ね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，実験結果および解析結果ともに載荷点直下で最大値を示しており，ブロック端部では載荷点直下の最大値の 50 % 程度の値を示していることが分かる。解析結果は実験結果を概ね再現している。

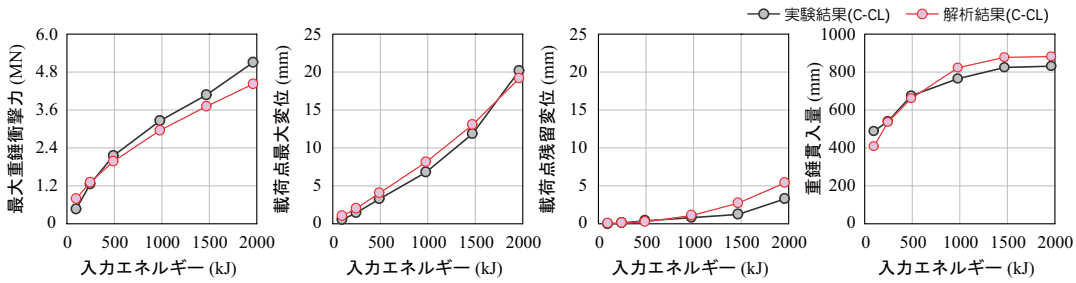


(a) 実験結果　(b) 解析結果

図－6　頂版下面ひび割れ分布図（C-CL-H10）

(3) **ひび割れ発生状況**

図－6 には，C-CL-H10 におけるひび割れ発生状況について，実験結果および解析結果を見下げ図として示している。なお，解析結果において，赤色で示された要素がひび割れと等価な状態であると判断される要素である。すなわち，**図－3** (a) に示したコンクリートの応力－ひずみ関係によると，図中の赤色で示された領域（コンクリート要素の第一主応力が -0.001 ～ 0.001 MPa の範囲）は，ひび割れが発生して除荷状態に至っているか，もしくは載荷状態で発生応力が小さい要素であることを示すこととなる。したがって，変形が大きく示されている領域ではひび割れが発生し，除荷状態にあるものとして評価可能である。図より，道路軸方向および載荷点を中心に放射状に曲げひび割れが発生しており，解析結果は実験結果を良く再現している。



(a) 最大重錘衝撃力　(b) 載荷点最大変位　(c) 載荷点残留変位　(d) 重錘貫入量

図－7　各種応答値と入力エネルギーの関係（実験結果と解析結果の比較）

(4) **各種応答値と入力エネルギーの関係**

図－7には，各種応答値と入力エネルギーの関係について，C-CL の実験結果および解析結果を合わせて示している。

(a) **図**の最大重錘衝撃力と入力エネルギーの関係より，解析結果は実験結果よりも若干小さめの値を示しており，入力エネルギーの増加と共にその差が大きくなる傾向が示されている。しかし，その差は小さく，解析結果は実験結果を概ね再現している。実験結果では，入力エネルギーが E =1,470 kJ 以降で入力エネルギーに対する重錘衝撃力の増加割合が大きくなっている。これは，敷砂への重錘貫入量が限界値に達しているためと推察される。

(b) **図**の載荷点最大変位と入力エネルギーの関係より，載荷点最大変位は入力エネルギーの増加に対応して増加しており，解析結果は実験結果を精度よく再現している。

(c) **図**の載荷点残留変位と入力エネルギーの関係より，載荷点残留変位は載荷点最大変位と同様に入力エネルギーの増加に対応して増加している。入力エネルギー E =980 kJ までは解析結果は実験結果と非常によく整合しているが，それ以降の入力エネルギーでは解析結果が実験結果よりも大きめの値を示している。

(d) **図**の重錘貫入量と入力エネルギーの関係より，解析結果は入力エネルギー E =980 kJ 以降，実験結果よりも大きな値を示しているものの概ね再現できている。

以上より，本解析手法を用いることにより，ロックシェッド模型の耐衝撃挙動を精度良く評価可能であることが示された。

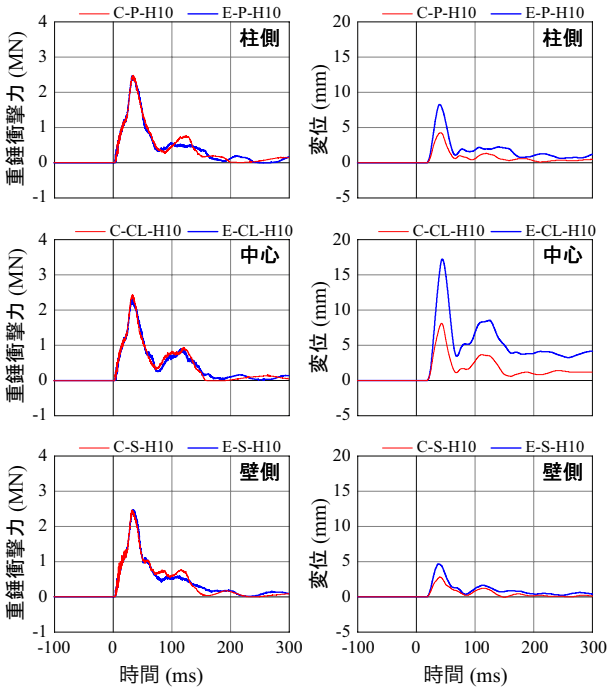
4.2 載荷位置を変化させた解析結果の比較

前節で示された検討結果より，本解析手法を用いることで載荷位置を変化させた場合の耐衝撃挙動の再現も可能であるものと判断し，載荷位置の異なる場合の解析結果について比較検討する。

(1) **重錘衝撃力および載荷点変位波形**

図－8には，C/E-P/CL/S-H10 の 6 ケースにおける重錘衝撃力および載荷点変位の応答波形を示している。

(a) **図**より，重錘衝撃力波形について比較すると，いずれも重錘衝突時から急激に励起して 40 ms 程度で最大値に至る三角形状の第 1 波と，その後第 1 波より振幅が小さく，周期が同程度の第 2 波で構成されている。中心載荷の C/E-CL-H10 については載荷断面によらずほぼ同一の波形性状を示している。柱側および壁側載荷の C/E-P/S-H10 では，第 1 波はほぼ同一の波形性状を示しているものの第 2 波は載荷断面によって若干異なる波形性状を示し，その振幅は中心載荷の場合より小さい。



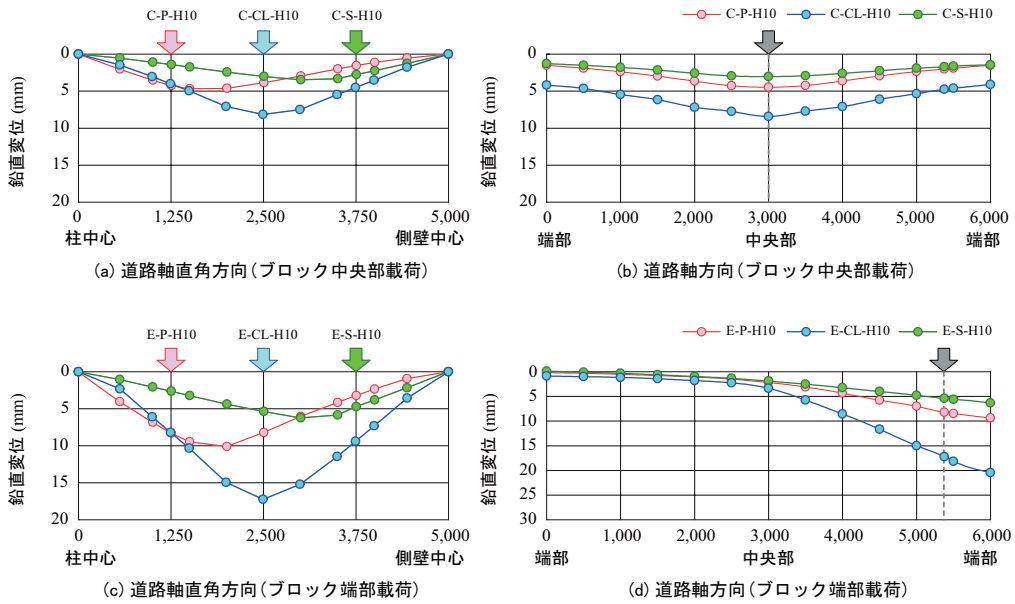
(a) 重錘衝撃力　(b) 載荷点変位

図－8　各種応答波形（載荷位置を変化させた場合）

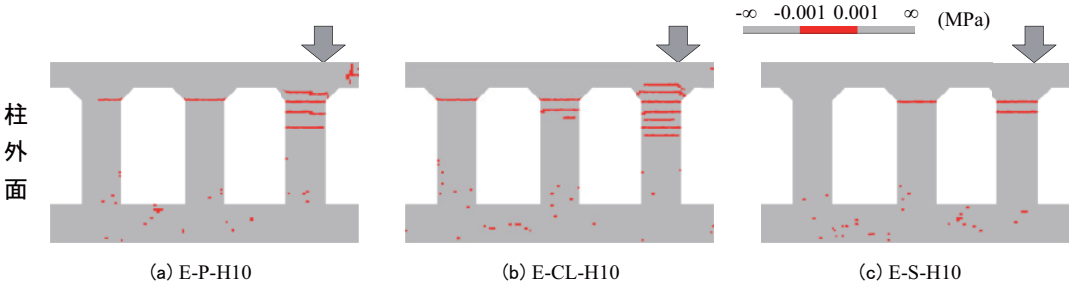
(b) **図**より，載荷点変位波形について比較すると，いずれも重錘衝突時より若干遅れて励起しているものの，波形性状は重錘衝撃力波形に良く対応しており，振幅が最大となる正弦半波状の第 1 波とその後のリバウンドと思われる振幅の小さい第 2 波およびその後に続く減衰自由振動波形より構成されている。また，第 1 波の最大変位は道路軸直角方向には中心，柱側，壁側の順に大きく，道路軸方向には端部載荷が中央部載荷の 2 倍程度の値を示している。

(2) **道路軸直角方向および道路軸方向変位分布**

図－9には，各載荷点直下における最大鉛直変位発生時の道路軸直角方向および道路軸方向鉛直変位分布を各載



図－9　変位分布図（載荷位置を変化させた場合）



図－10　柱部のひび割れ発生状況（端部載荷時）

荷位置で整理して示している。

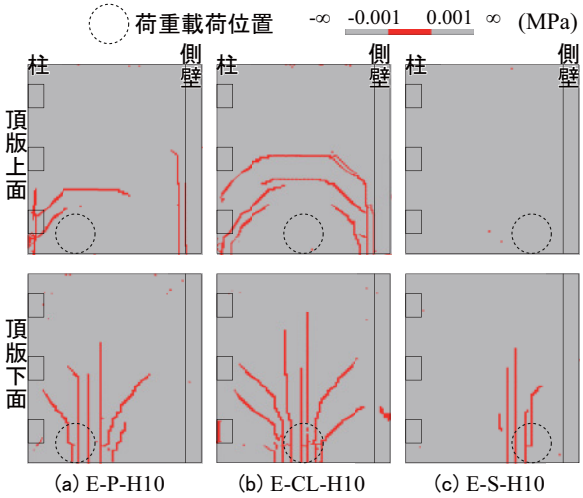
(a) **図**のブロック中央部載荷時における道路軸直角方向の変位分布より，C-CL-H10 の場合には載荷点で最大変位を示し，C-P/S-H10 の場合には載荷点よりも CL 側の位置で最大値を示している。これは，これらの場合には，載荷点位置が柱あるいは側壁に近接していることから，載荷点近傍の変形がこれらの部材によって拘束されるためと考えられる。

(b) **図**のブロック中央部載荷時における道路軸方向の変位分布より，載荷点である中央部から端部までのブロック全幅で変形が生じ，ブロック端部における変位は中央部の 50 % 程度となっていることが分かる。

(c) **図**のブロック端部載荷時における道路軸直角方向の変位分布は，(a) **図**のブロック中央部載荷時と比較すると，最大変位が中央部載荷時の 2 倍程度であるが，分布性状は類似の傾向を示している。

(d) **図**のブロック端部載荷時の道路軸方向変位分布は，ブロック端部を自由端とした片持ち梁に類似した変位分布性状を示し，分布範囲はいずれもブロック中央部近傍で収束している。

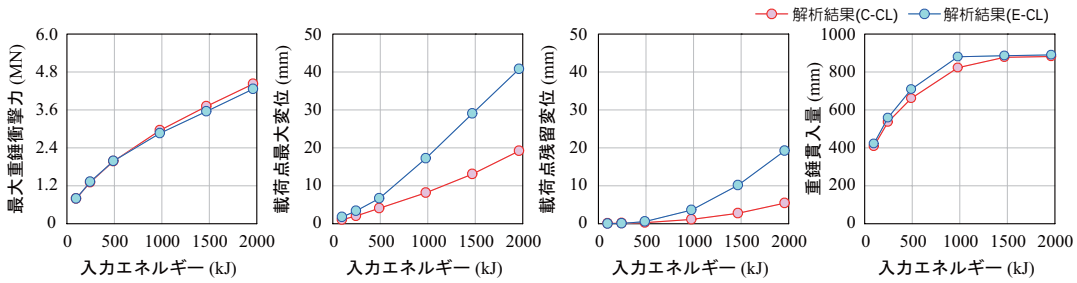
これらの変位分布から，ブロック中央部載荷時には道路軸直角方向および道路軸方向ともに頂版下面が引張状態であるのに対し，ブロック端部載荷時には道路軸直角方向は頂版下面が，道路軸方向は頂版上面が引張状態になっていることが分かる。



図－11　頂版部のひび割れ発生状況（端部載荷時）

(3) **ひび割れ発生状況**

図－10 には，ブロック端部に載荷した落下高さ H =10 m の各解析ケースにおける柱部外側のひび割れ分布を示している。いずれのケースにおいても柱上部にひび割れが発生し，かつ，載荷点近傍部の柱に最もひび割れが集



図－12　各種応答値と入力エネルギーの関係（解析結果の比較）

中する傾向にある。損傷の程度を比較すると，(b) **図**に示す E-CL-H10 がクラックの発生範囲が最も広く，ひび割れ間隔も密になっている。

図－11 には，ブロック端部に載荷した落下高さ H =10 m の各解析ケースにおいて載荷点で最大変位が発生した時点における頂版のひび割れ分布を示している。E-CL-H10 の場合には，頂版上面においてブロック端部を自由端とする 3 辺固定スラブのような半円状の曲げひび割れが載荷点を中心に発生している。また，頂版下面には，柱と側壁間を曲げスパンとする道路軸方向の曲げひび割れと載荷点から放射状に 2 方向曲げとしての曲げひび割れが発生している。一方，E-P/S-H10 の場合には，柱および側壁の影響により載荷点直下の変位が小さいことからひび割れも E-CL-H10 の場合に比較して少なく，特に E-S-H10 の場合には頂版上面にひび割れが発生していない。

上記の頂版および柱の損傷状況より，載荷位置としては CL が最も厳しいケースであることが分かる。

(4) 各種応答値と入力エネルギーの関係

図－12 には，C-CL および E-CL において落下高さを H = 1, 2.5, 5, 10, 15, 20 m と変化させた場合の各種応答値と入力エネルギーの関係を示している。

(a) **図**より，最大重錘衝撃力は載荷位置に拘わらず同程度の値を示し，入力エネルギーの増加に対応して同様に増加する傾向が示されている。入力エネルギー E =980 kJ 以降において E-CL の場合が若干小さめの値を示しているが，これは頂版部の変形量の違いによる影響と推察される。

(b) **図**には，載荷点最大変位と入力エネルギーの関係を示している。図より，載荷点最大変位は，入力エネルギーの増加に対応して増加しており，E-CL が C-CL の 2 倍程度の値を示していることが分かる。これは，**図－9** (d) に示したようにブロック端部を自由端とする片持ち梁に類似した変位分布性状を示すためと推察される。

(c) **図**には，載荷点残留変位と入力エネルギーの関係を示している。図より，載荷点残留変位はいずれの場合も入力エネルギーの増加に対応して 2 次放物線的に増加している。その増加割合は，E-CL の場合が大きく，部材各所の損傷による塑性化の進行が著しいことが分かる。

(d) **図**には，敷砂緩衝材への重錘貫入量と入力エネルギーの関係を示している。図より，重錘貫入量は入力エネルギー E =980 kJ まで E-CL が C-CL よりも若干大きめの値を示していることが分かる。これは，頂版部の変形状況の違いによるものと推察される。さらに入力エネルギーが増加すると両者の貫入量は一定値に収束しており，貫入量が限界値に達しているものと推察される。

5. 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目的に，その基礎的な検討として載荷位置を変化させた場合の耐衝撃挙動を把握することを目的に 1/2 縮尺模型に対し，三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。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) 本数値解析により，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を精度よく再現可能である。
2) 最大重錘衝撃力は，載荷位置に拘わらず同程度の値を示す。また，載荷点最大変位は，道路軸直角方向では中央部，柱側，壁側の順に大きく，道路軸方向では端部載荷が中央部載荷の 2 倍程度の値を示す。
3) ブロック端部載荷では，頂版部のひび割れは 3 辺支持スラブに類似した性状を示す。
4) ブロック中央部載荷の場合には，ブロック全体で衝撃荷重を分担しており，端部の鉛直変位は中央部の 50 % 程度である。また，端部載荷の場合には軸方向の中央部近傍を固定端とする片持ち状の応答性状を示す。

参考文献

1) 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載荷実験，構造工学論文集，Vol.56A，pp.1149-1159，2010.3
2) 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
3) 岸　徳光，岡田慎哉，今野久志，池田憲二：敷砂緩衝材の緩衝特性評価のための数値解析モデルに関する一考察，構造工学論文集，Vol.49A，pp.1323-1332，2003.3