

A Study on Experiments and Analysis Methods for Impact Resistance Performance of SRC Rock-sheds

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-07-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/00051457

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



学位論文要旨

SRC 製落石覆道の耐衝撃性能実験と 解析手法に関する研究

A Study on Experiments and Analysis Methods for Impact Resistance
Performance of SRC Rock-sheds

金沢大学大学院自然科学研究科
環境デザイン学専攻

学 籍 番 号 : 1524052002
氏 名 : 北島 幹士

Abstract

The authors have focused on SRC materials for using in rock sheds. Each statical bending test on SRC girders and SRC slabs was carried out to investigate their deformation performance and bending strength. After those tests the FEM analysis software, i.e., LS-DYNA was used to reproduce and analyze the behavior of those specimens. It was confirmed that even minority studs had effects on the anti-slip between steel material and concrete. In consideration of the results of statical tests and FEM analyses, a rock shed roof made of SRC girders and SRC slabs was constructed on a real scale. Weight-drop tests were carried out at a few locations on the roof, and the impact resistance performance was confirmed. Furthermore the effectiveness of 3D dynamic frame analysis software, i.e., Engineer's Studio which is more simple and suitable for the design work was confirmed by reproducing and analyzing the behavior of the roof specimen subjected to a falling weight.

第1章 序論

本論文で対象としているロックシェッドは道路や鉄道などを落石から守るために設置される構造物である。我が国の地形的特徴からも、重要な路線であっても急峻な斜面が隣接していることが多く、ロックシェッドが多く設置されている。しかし現在、老朽化しているロックシェッドは全国的にも数多く存在し、約 20 年後は多くのロックシェッドは竣工後 50 年以上経過する高齢施設になる。またロックシェッドの設計は、落石対策便覧等に基づく許容応力度法が用いられている。そのため多くの安全余裕を有しており、そのため安全性は非常に高いが合理性や経済性に欠ける。ロックシェッドはごく稀にしか設計荷重が作用しない特殊な構造物であり、今後、性能設計に移行していくであろうと思われる。以上の理由より、筆者はエネルギー吸収性能に優れたロックシェッドの開発が急務であると考えている。

第2章 SRC 製主桁および床版の静的曲げ試験と解析

基礎実験として単純梁による静的載荷実験を行った。SRC 製の主桁と床版の各部材の曲げ耐力および変形性能の確認を目的としている。

2.1 単純静的曲げ試験概要

実験装置は写真 2.1 に示す曲げ試験機を用いた。図 2.1 には静的曲げ試験に用いた主桁断面図を示す。ロックシェッドは設計荷重が常時作用しない特殊構造物であるため、積極的な合成効果は期待せず、外鋼板および H 形鋼ウェブにはスタッド($\phi 16 \times 80$)を 1 個/m² 程度で溶植している。試験体は支間長 12m である。引張鉄筋を過密配置しているため下縁から 90mm には無収縮モルタルを打ち込んだ。

図 2.2 には静的曲げ試験に用いた床版断面図を示す。外鋼板と H 形鋼にそれぞれ 2 本ずつスタッド(φ13×50)を 0.8~1m ピッチで溶植している。試験体は支間長 3550mm であり、プレキャストコンクリートと現場打ちコンクリート間の打継目の付着を高めるために、H 形鋼には等辺山型鋼 L50×50×6×250 を溶接したアングルジベルおよび差筋アンカー(D13)が 1m ピッチで配置されている。

H 形鋼と外鋼板に溶接されているスタッドは、完全な合成構造が期待できるだけの本数が設置されていない特徴を有する。より多くのスタッドが設置されれば、挙動は合成構造に近づく。落石覆工は設計荷重が常時作用しない特殊な構造物であるため、橋梁等の合成構造のような積極的な合成効果を期待する必要はない。また、スタッドの本数を増やすことによって経済性が低下する。本落石覆工に SRC 構造を適用した理由は、高い変形性能によって高いエネルギー吸収を実現し、エネルギーを基にした性能設計法が導入された後も落石覆工を他の落石対策工に劣らない対策工とするためである。したがって、本部材には完全な合成構造が期待できるだけのスタッドを設置しなかった。



写真 2.1 実験装置

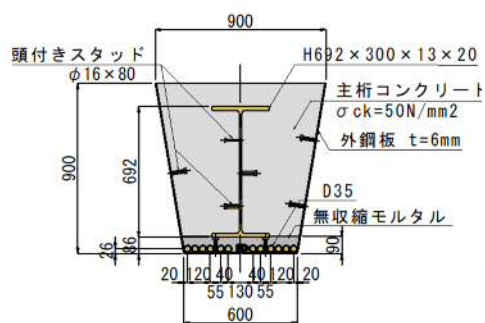


図 2.1 主桁断面図

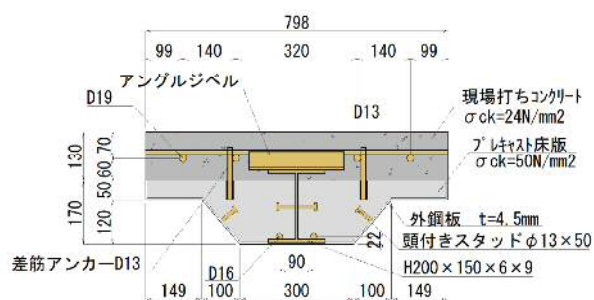


図 2.2 床版断面図

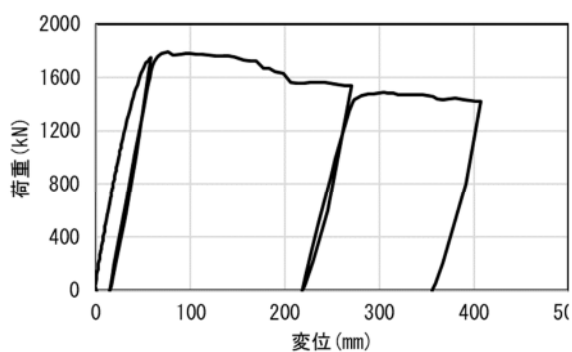


図 2.3 主桁 荷重-変位曲線

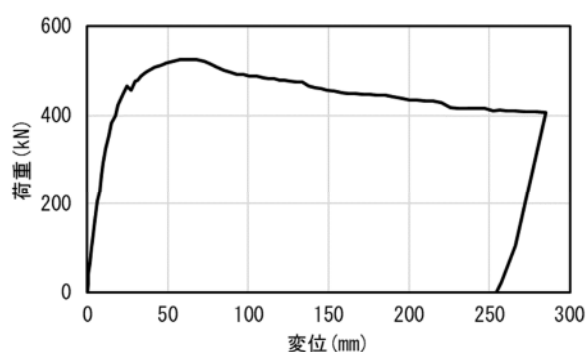


図 2.4 床版 荷重-変位曲線

主桁の荷重－変位曲線を図 2.3 に、床版の荷重－変位曲線を図 2.4 に示す。主桁および床版ともに、最大荷重に達した後も急激に耐力低下するような脆性破壊のような現象は見られず、靱性に富む構造体であることがわかった。

2.2 静的曲げ試験の再現解析

本研究の SRC 部材は、部材に作用する荷重レベルが大きくなるにつれて、合成構造から非合成構造に遷移する挙動を示すと考えられる。本実験の再現解析を実施するにあたり、鋼部材とコンクリートとの接触条件が課題であった。そこで種々の接触条件を利用できる非線形解析コード LS-DYNA の陰解法を使用して静的解析を行った。

用いた接触条件は、Normal contact と Tied contact、および Tiebreak contact の 3 種類である。Normal contact は、通常の接触条件で接触面の剥離は許すが、貫通を許さない接触条件である。Tied contact は、接触面の剥離を許さず固着させる接触条件である。Tiebreak contact は、Tied contact から Normal contact へ切り替わる接触条件である。接触面の内部せん断応力が入力したせん断付着強度よりも小さい時は、Tiebreak contact は Tied contact であり、内部せん断応力がせん断付着強度に達した後は、Normal contact に切り替わる。H 形鋼とコンクリート材料間の接触条件が解析結果に大きな影響を与えると考え、表 2.1 に示す H 形鋼とコンクリート材料間の接触条件のみを種々変更した解析モデルを作成し、適切な接触条件を検討した。

床版に関してはプレキャストコンクリートと現場打ちコンクリート間の打継目の付着向上を目的に設置した補強鋼材の効果を確認するために、モデル S から補強鋼材を取り除いたモデルをモデル S-without とする。主桁試験体の荷重－変位関係を図 2.5 に示す。モデ

表 2.1 静的解析モデル

接触面 A	プレキャスト (床版)	プレキャスト (主桁)	H 形鋼	外鋼板
接触面 B	現場打ち コンクリート	無収縮モル タル	コンクリート	コンクリート
S(Shear)	◎	◎	◎	◎
T(Tied)	◎	◎	●	◎
N(Normal)	◎	◎	○	◎
A(All)	●	●	●	●
S-without	◎	◎	◎	◎

○ : Normal contact, ◎ : Tiebreak contact, ● : Tied contact

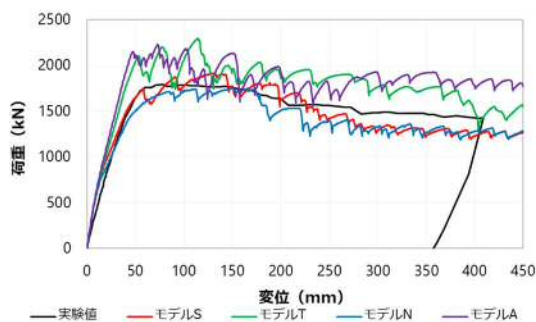


図 2.5 荷重－変位関係（主桁）

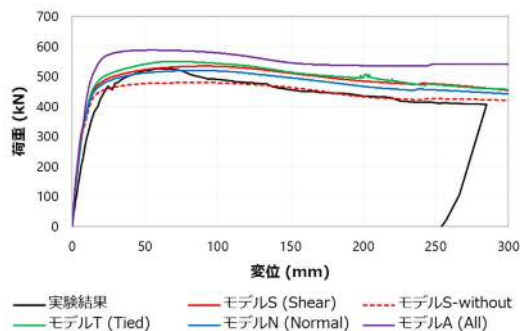


図 2.6 荷重－変位関係（床版）

ル S が最も実験結果と近い最大耐荷力と軟化挙動を示している。H 形鋼とコンクリート材料間に剥離を考慮できる接触条件を適用することで、より実験値に近い剛性、最大荷重、及びピーク後の軟化を表現できることがわかる。また、ピーク後の軟化挙動に着目すると、耐力の変位量に対する低下率はほとんど変わらないことがわかる。したがって、現在のスタッドの本数で十分な変形性能が得られることがわかる。

床版試験体の荷重-変位関係を図 2.6 に示す。モデル S に着目すると、剛性やピーク後の軟化挙動は実験結果と異なっているが、実験結果と近い最大耐荷力が得られていることがわかる。また、ピーク後の軟化挙動に関しては、モデル S から補強鋼材を取り除いた解析モデルであるモデル S-without が実験結果に近い結果を示している。このことから、実験結果は最大荷重載荷時まではモデル S の挙動を示し、ピーク後はモデル S-without の挙動を示していると考えられる。

第3章 SRC 製ロックシェッドの実規模重錘落下実験

3.1 実験概要

本実験では図 3.1 に示す SRC 製主桁と SRC 製床版からなる屋根部について重錘落下実験を行った。重錘落下実験は、クレーンにより重錘を所定の高さまで吊り上げ、自由落下させる。重錘は ETAG27 に規定する重錘形状に準じた。緩衝材には別途開発した①複合緩衝材と、ロックシェッドで一般的に用いられている②敷砂緩衝材の 2 種類で実験を行っている。

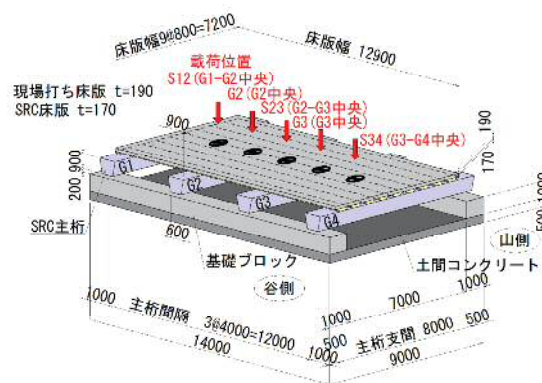


図 3.1 試験体の形状寸法

3.2 複合型緩衝材を用いた重錘落下実験の結果と考察

表 3.1 には実験ケースの一覧を示す。ケース名 (○-E△) の○は図 3.1 に示す荷重位置を表し、△は落石エネルギーの概数である。全ての実験ケースにおいて床版コンクリートは無損傷であった。また主桁および床版において残留変形などは見られていない。

S23-E3160 では $T=140\text{ms}$ 付近で最大変位 $\Delta=10\text{mm}$ 程度を示した。G2-E3160 では $T=150\text{ms}$ 付近で最

表 3.1 実験ケース一覧

No	ケース	緩衝材	荷重位置	重錘質量 (ton)	落下高さ (m)	落石エネルギー (kJ)
1-1	G2-E1100	2 段+砂	G2	5.2	21.50	1,096
1-2	S23-E1100		S23			
1-3	G2-E2130	3 段+砂	G2	10.1		2,128
1-4	S23-E2130		S23			
1-5	G2-E3160		G2			
1-6	S23-E3160	S23				

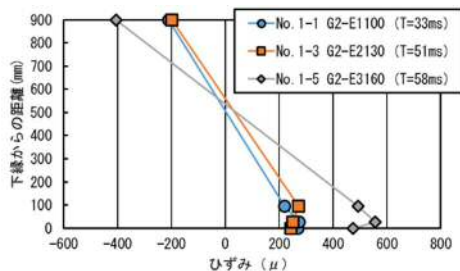


図 3.2 荷重－変位関係（主桁）

大変位 $\Delta=10\text{mm}$ 程度を示した。

G2 主桁荷重ケースの最大ひずみ発生時刻の断面内ひずみ分布を図 3.2 に示す。ひずみ値は荷重ケース毎に初期化している。G2 主桁においては、最下段鉄筋のひずみより、さらに下縁側にある外鋼板のひずみが小さい。これは外鋼板が付着切れを起こし、剥離していたと考えられる。

表 3.2 実験ケース一覧

No	ケース	緩衝材	荷重位置	重錘質量 (ton)	落下高さ (m)	落石エネルギー (kJ)	
2-1	S12-E60	砂	S12	5.2	1.22	62	
2-2	S12-E320				6.22	317	
2-3	S12-E1060				20.72	1,056	
2-4	S12-E1390				27.22	1,387	
2-5	S12-E2030				10.1	20.52	2,031
2-6	S12-E3000				15.0	20.38	2,996
2-7	G3-E320		900mm	G3	5.2	6.22	317
2-8	G3-E470					9.22	470
2-9	G3-E730					14.22	725
2-10	G3-E1060					20.72	1,056
2-11	S34-E4390			S34	15.0	29.88	4,392
2-12	G2-E4390			G2			

3.3 敷砂を緩衝材に用いた重錘落下実験の結果と考察

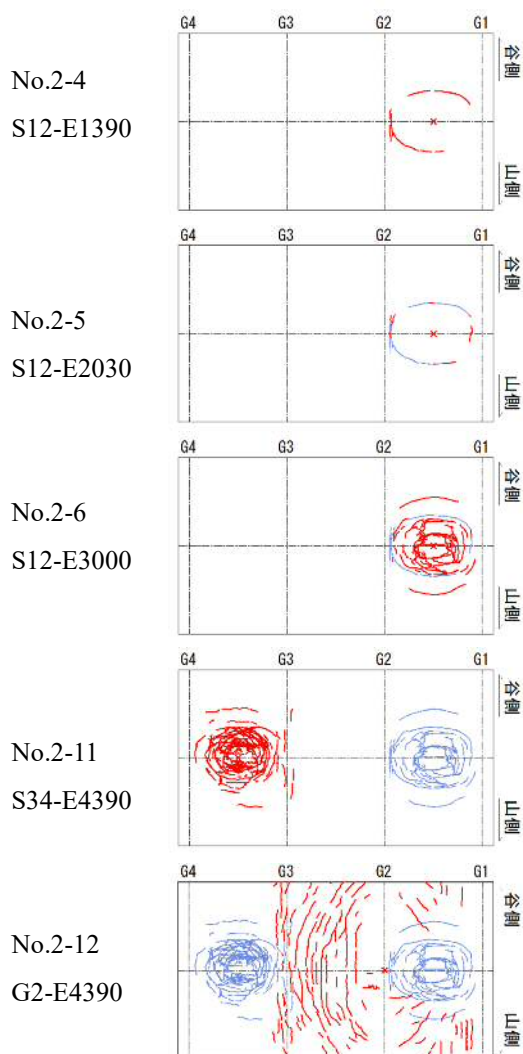
表 3.2 には実験ケースの一覧を示す。実験後の床版上面コンクリートのひび割れ分布性状を図 3.3 に示す。No. 2-4 のケース以前の実験ケースではひび割れは一切生じていない。No.2-6 のケースでは荷重点で残留変位約 90mm を生じた。No.2-11 のケースでも残留変位 250mm を生じた。いずれのケースにおいても全体破壊モードの様子を示した。また主桁荷重ケースである No.2-12 では荷重点で残留変位 120mm が生じたが、ひび割れは両隣の桁まで広がる全体破壊モードであった。いずれのケースにおいても主桁および床版の外鋼板下面が落下するような状況にはならず、故にかぶりコンクリートが剥離することもなかった。よって外鋼板がコンクリートの剥離・剥落防止に十分寄与できることがわかった。

図 3.4(a), (b) は衝撃力の力積と入力エネルギーの関係について整理し、プロットしたものである。いずれの力積の場合においても、力積と入力エネルギーとの関係には、重錘質量や落下位置に関わらず比例の相関関係があるように見える。参考まで西らが行った類似の実験結果における力積赤い十字の点で示す。本実験の対象エネルギーと比べると、やや低いエネルギー範囲であるものの、相関関係は合致していると考えられる。また、直線近似式を求め、式(3.1)と式(3.2)を得た。

$$\text{重錘衝撃力の力積} \quad J_i = 0.0738E \quad (3.1)$$

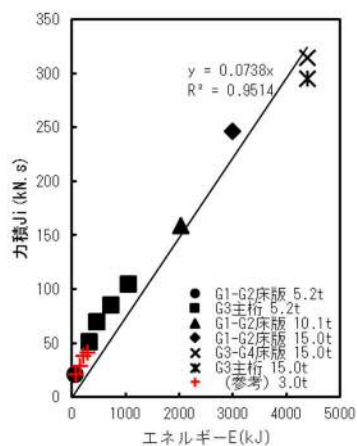
$$\text{伝達衝撃力の力積} \quad J_t = 0.1696E \quad (3.2)$$

ここに、 J_i : 重錘衝撃力の力積(kN・s)、 J_t : 伝達衝撃力の力積(kN・s)、 E : 入力エネルギー(kJ)である。しかし比例の相関性が高いと結論づけるには実験ケースの母数がまだ少ない。今後はデータ収集し、関係性について検討する必要がある。

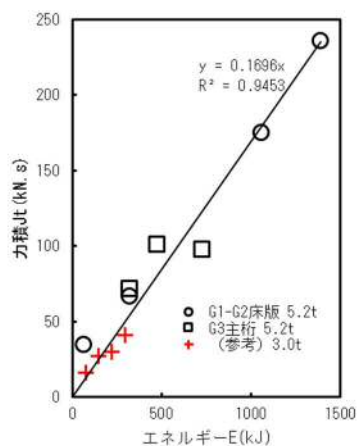


水色 : 実験前ひび割れ 赤線 : 実験後ひび割れ

図 3.3 実験後の床版上面のひび割れ分布



(a) 重錘衝撃力の力積



(b) 伝達衝撃力の力積

図 3.4 力積と入力エネルギーの関係

第4章 SRC 製ロックシェッドの動的応答解析

本研究では、非線形 3 次元動的骨組解析に着目し、適用性確認のための解析として、実験との比較検討および各種パラメータに関する検討を行った。

4.1 数値解析モデル

図 4.1 に本数値解析に用いた 3 次元骨組解析モデルを示している。要素分割長は各

部材厚の 0.5 倍程度を採用した。主桁と床版の接合部は重心高程度の剛体要素で接続している。骨組モデルは材料の非線形を考慮したファイバー要素で構成している。各断面セルは 30mm に分割している。全ての部材の質量は要素に与えているが、床版コンクリートの質量は床版支間方向の部材のみ考慮し、床版支間直角方向は剛性のみ考慮している。床版支間方向の剛性はプレキャスト床版と現場打ち床版を加えた部材剛性であり、床版支間直角方向の剛性は現場打ち床版のみの部材剛性である。なお、主桁および床版ともに外鋼板の影響を考慮した完全合成断面として仮定した。各主桁の支点は主桁断面水平軸回りの支持条件のみを自由としたピン支持である。

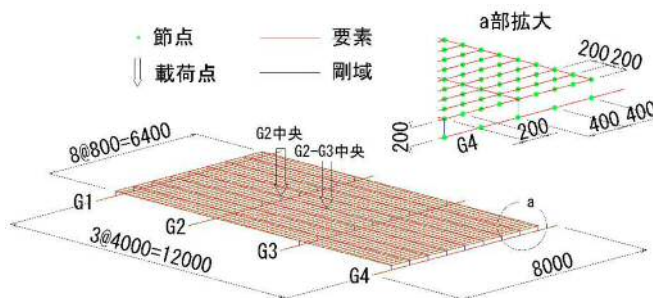


図 4.1 数値解析骨組モデル

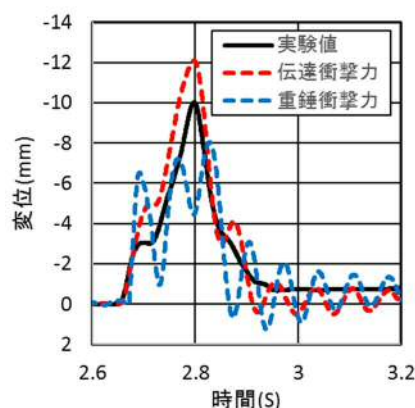


図 4.3 G2-E3160 荷点変位

4.2 各種パラメータに関する考察

入力荷重に重錘衝撃力を用いた場合と伝達衝撃力を用いた場合を比較検討した。実験ケース G2-E3160 において解析結果の対比を試みた。図 4.3 に荷点変位波形の実験結果と解析結果の対比を示す。伝達衝撃力はほぼ精度よく実験結果を再現出来ているのに対し、重錘衝撃力は再現性が低い。そのため、以降の検討の入力荷重は全て伝達衝撃力を用いることとした。また減衰定数をパラメータに解析を行い、適切な減衰定数を検討した。図 4.2 に荷点変位波形の対比を示す。減衰定数が $h=2\%$, $h=5\%$, $h=10\%$ と大きくなるに従い、実験値に近い傾向を示している。道路橋示方書の減衰定数の標準値と大きく異なるのはプレキャスト部材

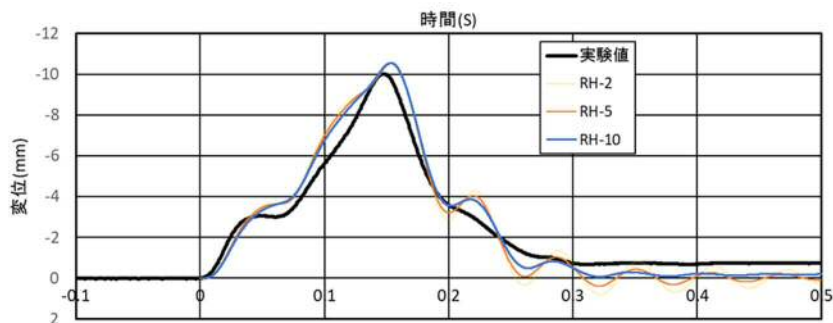


図 4.2 Rayleigh 型減衰モデル荷点変位波形 (G2-E3160)

を多く組み合わせており、特に床版と桁の接触部などで多く減衰が生じるためではないかと考えられる。以上から、減衰定数は $h=10\%$ を採用することとした。

4.3 複合緩衝材実験結果（弾性域実験）と解析結果の比較および考察

本研究で扱った複合緩衝材はその荷重伝達範囲が明らかではない。そのため、解析モデルへの載荷方法が課題である。数ケースの荷重分散範囲を設定し解析ケースを設けた。今回の解析では、1) 載荷点への集中荷重、2) 分散範囲は重錘直径程度と等価な面積を有する正方形への等分布荷重と仮定し、正方形範囲内の節点に伝達衝撃力の総和が等しくなるよう載荷（以降、分散荷重-a）、3) 荷重分散効果を出せるだけ評価できるように、円錐と等価な正方形分布荷重とするため円錐と重心が一致する直方体に置き換えた等分布荷重（以降、分散荷重-b）、の以上3ケースについて検証した。

図 4.4 に3ケースの載荷点変位を対比した。変位波形形状は概ね再現出来ているが、集中荷重の場合は分散荷重の場合と比べやや過大な解析値となっている。一方、分散荷重-b の場合は比較的精度よく実験値の最大変位や荷重継続時間などを再現出来ていると考える。分散荷重-a の場合はやや安全側の評価となる。

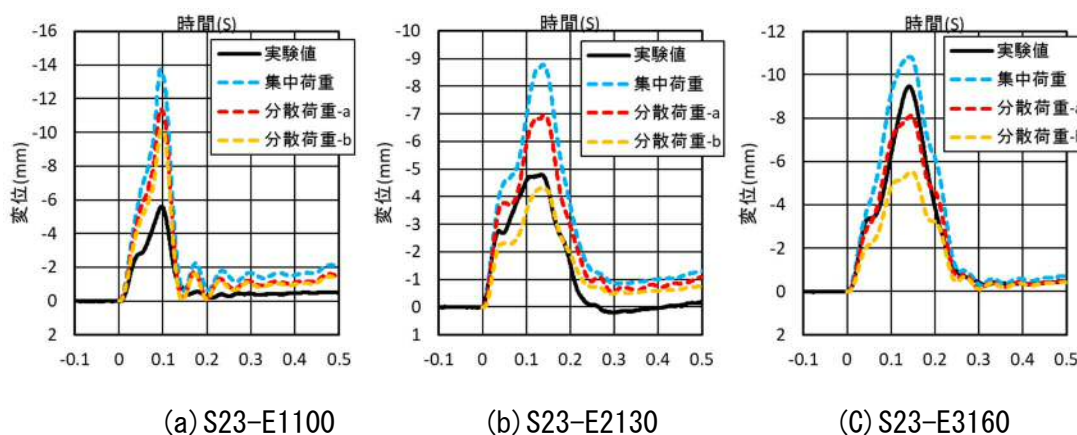


図 4.4 載荷点変位

4.4 敷砂緩衝材実験結果（塑性域実験）と解析結果の比較および考察

解析手法の一例として、弾性領域設計までは完全合成と仮定し、塑性領域設計からは外鋼板を無視して解析することを試みた。伝達衝撃力が得られた実験ケースのうち、G3-E730 の解析を行ったものである。外鋼板を考慮した断面と無視した断面の2ケースを解析し、載荷点変位について実験値と解析値の対比を行った。図 4.5 に載荷点変位波形を示す。最大変位や残留変位は外鋼板を無視した

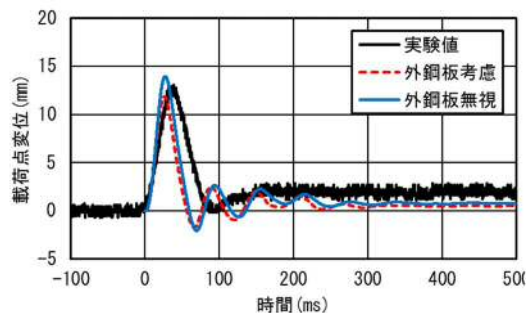


図 4.5 載荷点変位波形 (G2-E730)

ものの再現性が高い。

一方，伝達衝撃力は何かしらのモデルが用いられるべきである．試算事例として，本実験で落石エネルギーの最も大きい実験ケース S34-E4390 および G2-E4390 において伝達衝撃力波形のモデル化と解析を試みた．伝達衝撃力波形の最大値は振動便覧式の衝撃力と仮定し，伝達衝撃力の力積の算出には式(3.2)を用いた．荷重の増加時間 $T1=10\text{ms}$ および最大荷重ピーク時間 $T2=10\text{ms}$ とし，図 4.6 を得た．このように仮定した伝達衝撃力波形を用いた解析から得られた载荷点変位波形を実験値とともに図 4.7 (a),(b)に示す．ケース G2-E4390 では非常に良く一致しており，ケース S34-E4390 では解析値の最大変位が実験値より大きめに出ているものの，残留変位などは比較的良好に再現されていると言える．伝達衝撃力波形モデルの仮定条件は概ね良好だったと言える．

第5章 結論

本研究では，耐衝撃性能に優れる SRC 製ロックシェッドを開発し，その解析手法についての考察を行った．曲げ試験では最大荷重後も急激に耐力低下することなく，十分に靱性のある構造体であることが明らかになった．また FEM 解析から現在のスタッドの本数でも十分な変形性能が得られることがわかった．

また重錘落下試験から重錘衝撃力の力積または伝達衝撃力の力積と入力エネルギーとの関係には，重錘質量や落下位置に関わらず線形関係がある傾向を示した．

非線形 3 次元骨組解析を用いた適用性の確認では，複合緩衝材を用いた実験解析において，分散荷重-a を用いることで安全側に設計を行うことが十分可能であることがわかった．残留変位が生じるような領域においては，最大変位や残留変位はやや外鋼板を無視したものの再現性が高いことがわかった．また伝達衝撃力波形のモデル化を試みたが，その結果，残留変位などは比較的良好に再現することができた．

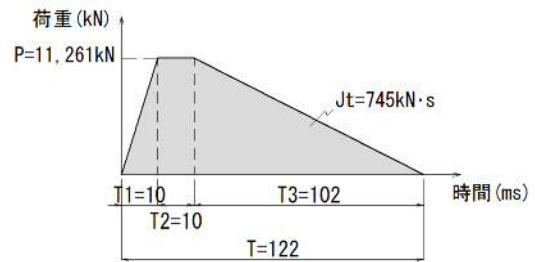
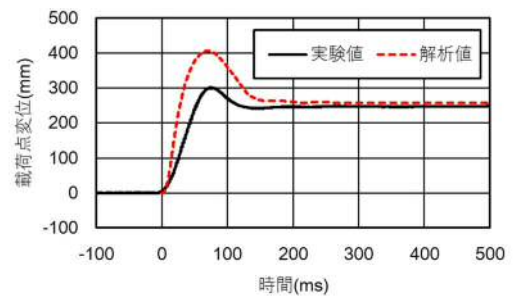
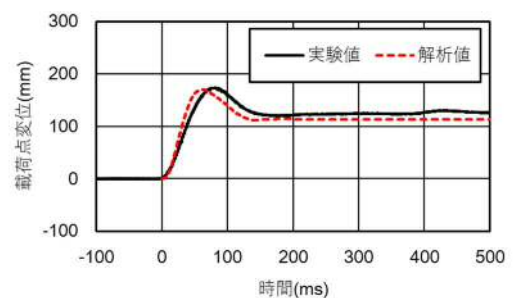


図 4.6 伝達衝撃力波形モデル



(a) S23-E4390



(b) G2-E4390

図 4.7 载荷点変位波形

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目

SRC 製落石覆道の耐衝撃性能実験と解析手法に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所 属 環境デザイン学専攻

(2) 氏 名 ^{ふり} ^{がな} ^{きたじま} ^{みきお}
北島 幹士

3. 審査結果の要旨 (600～650 字)

同人の学位申請論文に対して、平成30年2月2日 10:30～12:00 に開催した第1回学位論文審査委員会において口頭試問による研究内容・能力の審査を行った。さらに、同日 14:30～16:00 に開催した公聴会での質疑応答を踏まえて第2回学位論文審査委員会(同日 16:00～16:30)で審議を行った結果、以下のように判定する。

現行の落石覆道は許容応力度法により設計されており、性能設計に移行しつつある設計指針に対応することが求められる。落石覆道においては想定外の落石荷重に対しても粘り強く落石を受け止めることのできる塑性変形性能が必要で、本論文は SRC 構造部材のその性能に着目した研究を行っている。まず SRC 製主桁と SRC 製床版の静的曲げ試験による曲げ強度と変形性能の確認を行い、3次元 FEM 解析による再現解析から少数スタッドやアングルジベルによる鋼材とコンクリートのすべり止め効果を明らかにした。次にそれらの SRC 製部材で構成された実規模の落石覆道屋根部を製作し、重錘落下試験により衝撃力波形と耐衝撃性能についての考察を行っている。さらに重錘落下試験の再現解析に 3次元骨組解析を適用し、実用的な構造モデルおよび衝撃力波形モデルの提案を行っている。

本論文は落石覆道の耐衝撃性能を向上できる SRC 部材を用いた新規性のある研究であり、その成果は工学的に高く評価できる。また、同人は研究能力および国際会議での発表・応答経験と能力もある。よって博士（工学）の授与に値するものと判定する。

4. 審査結果 (1) 判 定 (いずれかに○印) 合格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博士（工学）