

小型 RC ラーメンスラブ模型の耐衝撃挙動に関する 重錘落下衝撃実験と数値解析的検討

Experimental study on impact resistant behavior of Rahmen-Slab type RC structures and its numerical simulations

川瀬 良司*, 岸 徳光**, 今野 久志***, 牛渡 裕二****, 鈴木 健太郎*****
Ryoji Kawase, Norimitsu Kishi, Hisashi Konno, Yuji Ushiwatari and Kentaro Suzuki

*博士(工学) (株) 構研エンジニアリング(〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

**工博 室蘭工業大学大学院 教授 社会基盤ユニット 暮らし環境系領域(〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

***博士(工学) 寒地土木研究所 総括主任研究員 寒地構造チーム(〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

****(株) 構研エンジニアリング 防災施設部(〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

*****修(工) (株) 構研エンジニアリング 防災施設部(〒065-8510 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

In this paper, in order to establish performance-based impact resistant design procedure for rockfall protection galleries, falling-weight impact test of small size Rahmen-slab type RC structures is conducted and these impact resistant behaviors are investigated. Also, to establish the prediction method for accumulated damage and residual load-carrying capacity of the RC structures under consecutive impact loading, 3D FE analysis method is proposed and its applicability is discussed by comparing with the experimental results. From this study, following results are obtained: (1) the Rahmen-slab type RC structures reach the ultimate state in punching shear failure mode under impact loading; and (2) the accumulated damage of the structures can be rationally evaluated by using distributions of impact force, displacement crack patterns obtained from the numerical analysis with the proposed method.

Key Words : Rahmen-Slab structure, Impact loading-test, Impact resistant behavior, Impact response analysis, Performance verification method

キーワード： ラーメンスラブ、重錘落下衝撃実験、耐衝撃挙動、
衝撃応答解析、性能照査型設計法

1. はじめに

我が国の国土は山岳地帯が大部分を占め、急峻な地形を呈していることから、海岸線や山岳部の斜面に沿って交通網が整備されている場合が多い。このような地理条件の下に道路網を整備する場合には、計画立案の段階において可能な限り安全となるルートを選定した上で、斜面災害に対する対策を講じることが必要である。道路における斜面災害対策の 1 つとして、写真-1 に示すような RC 製落石防護覆道(以後、ロックシェッド)が挙げられる。ロックシェッドは、比較的大きな落石エネルギーに対応した落石対策工であり、沿岸道路や山岳道路などに多数設置されている。

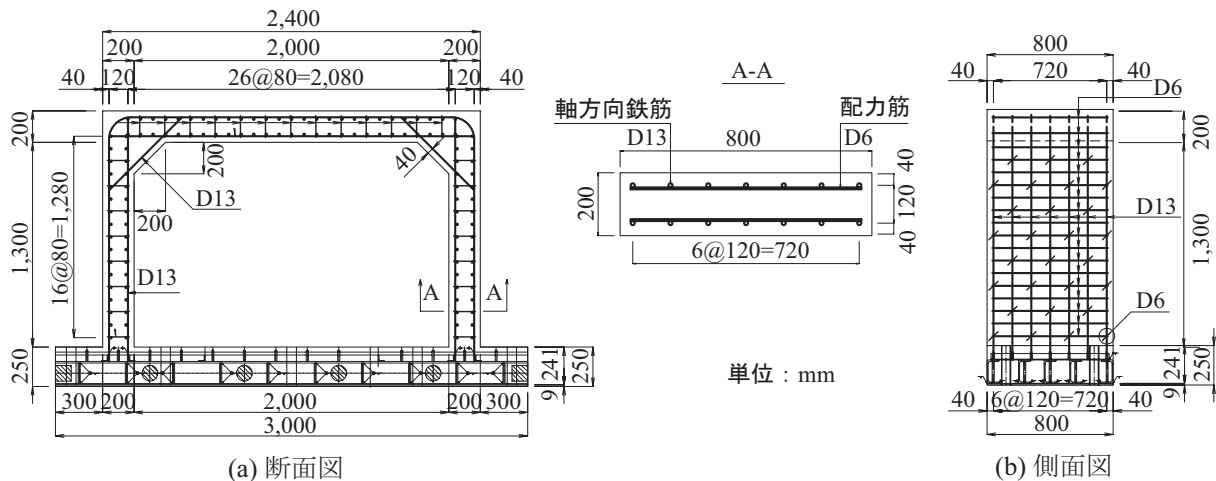
ロックシェッドの耐衝撃挙動に関しては、土木学会構造工学委員会衝撃問題研究小委員会での研究成果¹⁾がまとめられている。一方で、これらの設計は現在、落石対策便覧²⁾に即して以下の要領で行われている。すなわち、1) 対策対象となる落石の比高や斜面の状態から、落石衝突エネルギーを決定する。2) 決定された落石衝突エネルギーに対して、落石対策便覧で規定し



写真-1 RC 製落石防護覆道の一例

ている衝撃力算定式を用いることにより最大衝撃力を決定する。3) 求められた最大衝撃力を静的荷重に置き換え、骨組解析により断面力を算定する。4) 求められた断面力に対して、許容応力度法を適用し、断面設計を行う。

しかしながら、過去の被災事例の検証や数値解析的検討から、許容応力度法により設計されたロック



図－１ 形状寸法および配筋状況

シェッドは、設計入力エネルギーに対して、大きな安全余裕度を有していることが明らかとなっている³⁾。これより、ロックシェッドに対する性能照査型耐衝撃設計法を確立し、その設計法の下で設計を実施することが可能になれば、大幅な建設コストの縮減を実現することができる。すなわち、新設ロックシェッドの場合には設計の合理化によって構造のスリム化が可能となり、既設ロックシェッドの場合には補強工を合理的かつ最低限に留めることが可能になる。

一方、我が国における土木構造物の設計思想は、許容応力度法から限界状態設計法を経て、性能照査型設計法⁴⁾に移行しつつある。このような状況下において、土木学会では耐衝撃設計に関しても性能照査型設計を実現するために、その設計手法の確立に向けた検討を行っている。著者らも、重錘落下衝撃実験結果に基づき、小型 RC 梁を対象とした三次元弾塑性衝撃応答解析法の適用性⁵⁾ 検討や、その解析手法の実規模 RC 桁への適用性⁶⁾ に関する検討を行ってきた。また、実規模 RC 部材に関する簡易で合理的な衝撃挙動に関する解析法の確立を目的に、要素分割数を低減した場合においても工学的に妥当な数値解析結果を得るための方策として、破壊エネルギー等価の概念を導入する手法を提案⁷⁾ している。さらに、衝撃荷重載荷によって使用限界状態に至らずとも局所的な鉄筋の降伏や残留変位が生ずる場合には、繰返し衝撃載荷による損傷の累積および残存耐力も評価しなければならない。このような観点から、梁部材を対象として繰返し荷重載荷時の累積損傷や残存耐力評価法の確立を目的に、三次元弾塑性有限要素法に基づいた解析法を提案⁸⁾ し、実験結果との比較によってその妥当性に関する検討も行っている。

しかしながら、現状において RC 製ロックシェッドの設計に性能照査型設計法を適用するためには、各種限界状態の規定や照査方法の確立など、課題も多い。

また、ロックシェッドは一般的に箱型の断面を有しており、左右には柱と側壁、上下には頂版と底版が配置されており、剛性が全て異なる。そのため、衝撃荷重作用時の挙動は複雑なものとなる。さらに、頂版上面には緩衝材が設置されているため、落石衝突により構造物に作用する衝撃荷重も適切に評価しなければならない。

これらのことから、ロックシェッドの合理的な性能照査法を確立するためには、大型のロックシェッド模型による重錘落下衝撃実験を実施して詳細に検討しなければならないものと判断される。このような観点から、著者らはその前段として、小型 RC ラーメン梁模型に対する重錘落下衝撃実験⁹⁾ を実施した。

本研究では、前述と同様にロックシェッドの合理的な性能照査法を確立することを目的に、また、今後の大型ロックシェッド模型を用いた重錘落下衝撃実験を推進する上での事前実験として、ロックシェッド構造により近い版構造形式の小型 RC ラーメンスラブ模型(以後、ラーメンスラブ模型)の重錘落下衝撃実験を行い、その耐衝撃挙動について検討を行った。また、繰返し荷重載荷時の累積損傷や残存耐力評価法の確立に向け、先に提案した三次元弾塑性有限要素法に基づいた解析法⁸⁾ を本模型実験にも適用し、実験結果との比較によってその妥当性に関する検討を行った。

なお、本実験は、室蘭工業大学における構造物耐衝撃耐荷力評価装置を用いて実施した。また、本研究の弾塑性衝撃応答解析には、非線形動的構造解析用汎用コード LS-DYNA (ver. 971)¹⁰⁾ を用いている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図－１には、本検討で実験に用いたラーメンスラブ模型の形状寸法および配筋状況を示している。ラーメ



写真-2 実験状況

ンスラブ模型は、衝撃挙動の把握が容易にできるように、ロックシェッドの一般的な箱形形式とし各部位の剛性を一律とした。すなわち、スラブ、側壁、柱とも同一断面を有する部材で構成される単純なラーメン構造とした。また、ロックシェッドと同様に版効果が発揮できる箱型断面とした。なお、ラーメンスラブ模型の大きさは、実験装置の制約から道路幅方向を実ロックシェッドの1/4程度の縮尺模型とし、道路軸方向の長さを800mmとした。すなわち、部材断面寸法は200×800mmの長方形断面とし、ラーメンスラブ模型の内空幅を2,000mm、内空高さを1,300mmとしている。

ラーメンスラブ模型の配筋は、実ロックシェッドの頂版部と同程度の鉄筋比を有するように配慮して設定した。すなわち、主（道路軸直角方向）鉄筋は、鉄筋比約1.0%程度となるようにD13を120mm間隔で配筋し、芯かぶりを40mmとして配筋した。また、配力（道路軸方向）鉄筋は、主鉄筋量の1/3以上を有するように、D6を用いて断面有効高さの1/2である80mm間隔に配筋している。

フーチング断面は、断面方向長さ3,000mm、道路軸方向長さ800mm、高さ250mmとする矩形体とした。なお、フーチングには鋼製アングル材を埋設するとともに、底面には設置面の平滑性を確保するために厚さ9mmの鋼板を配置している。

表-1 実験ケース一覧

実験ケース	载荷方法	衝突速度 V (m/s)	コンクリート 圧縮強度 (MPa)
II-V1	衝撃 (漸増繰返し)	1	24.4
II-V2		2	
II-V3		3	
II-V4		4	
II-V5		5	
IS-V5	衝撃 (単一)	5	25.1
IS-V6		6	
IS-V7		7	
IIr-V5-1	衝撃 (定速度繰返し)	5	21.5
IIr-V5-2		5	
IIr-V5-3		5	

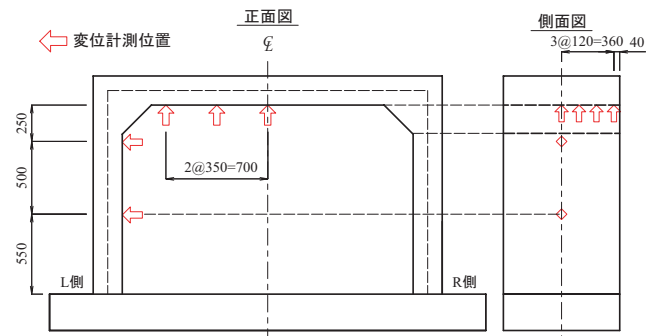


図-2 変位計測位置図

2.2 衝撃実験の概要

写真-2には、衝撃実験状況を示している。衝撃実験は、ラーメンスラブ模型のスラブ中央位置に所定の高さから鋼製重錘を自由落下させる重錘落下方式により行っている。なお、ラーメンスラブ模型のフーチング部は、跳ね上がり防止を目的として、M22ボルトを用いて実験装置の架台に固定している。

荷重载荷方法は、初速度および増分速度を1m/sに設定して、終局に至るまで重錘を繰返し落下させる漸増繰返し载荷、所定の衝突速度で一度だけ载荷する単一载荷、一定の衝突速度で繰返し载荷する定速度繰返し载荷の3方法とした。実験に用いた重錘形状は、実構造を想定して重錘径による载荷点の影響が極力自由辺まで波及しないようにするために、直径60mmの鋼製円柱とし、底部には衝突時の片当たりを防止するために高さ2mmのテーパーを施してある。また、重錘重量は、質量300kgを用いている。

表-1には実験ケースの一覧を示している。実験ケース名は、第1項目に漸増繰返し载荷、単一载荷、定速度繰返し载荷に関する指標（II：漸増繰返し载荷

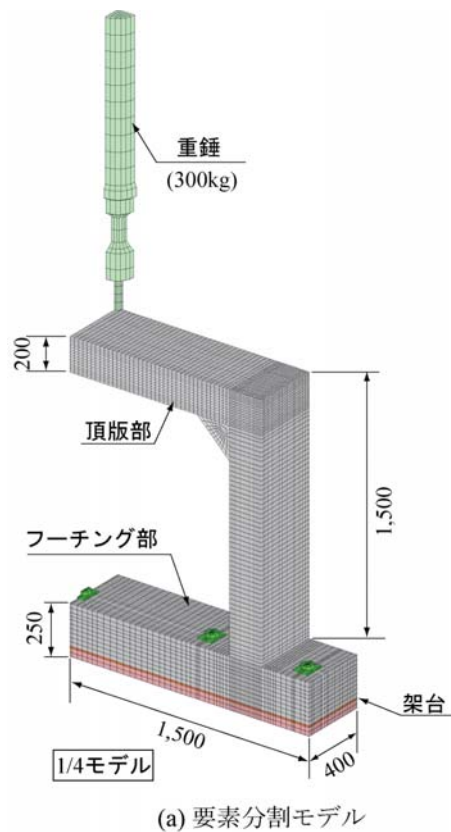


図-3 解析モデル図

実験, IS: 単一載荷実験, IIr: 定速度繰返し載荷実験)を示している。また, V の後に衝突速度 (m/s) を付し, 定速度繰返し載荷については載荷回数を示し, それらをハイフンで結んで示している。各実験ケースは, 載荷方法に関わらず終局状態に至るまで衝撃実験を継続して実施している。ここでは, 試験体が損傷し, コンクリート片が落下した時点もしくは明瞭な押し抜きせん断破壊が生じた時点を終局状態と定義している。その結果, 漸増繰返し載荷実験では, 衝突速度が 1m/s ~ 5m/s までの 5 ケースを実施している。ま

た, 単一載荷方法では, 漸増繰返し載荷での最終衝突速度 5 m/s から終局状態に至るまで増分速度を 1 m/s に設定して, 衝突速度 $V = 5\text{m/s}$, 6m/s , 7m/s の 3 ケースを実施している。さらに, 定速度繰返し載荷方法では, 漸増繰返し載荷での最終衝突速度 5 m/s で終局状態に至るまで同速度で 3 ケース実施している。表-1 の実験ケース一覧の最終項目には, コンクリートの圧縮強度を試験体毎に示している。

計測項目は, 重錘に内蔵された起歪柱型ロードセルによる重錘衝撃力, 非接触型レーザ式変位計による内空変位, 実験終了後にはひび割れをトレースし, ひび割れ分布図を作成している。重錘衝撃力用ロードセルの容量と応答周波数は 1,470 kN, DC ~ 4.0 kHz であり, レーザ式変位計の容量と応答周波数は 500 mm, 約 1 kHz である。また, 衝撃実験時の各種応答波形は, サンプリグタイム 0.1 ms でデジタルレコーダにて一括収録を行っている。図-2 には, 変位計測位置を示している。

3. 数値解析概要

3.1 数値解析モデル

図-3 には, 本数値解析で用いた要素分割モデルおよび配筋モデルを示している。本研究では, 衝撃荷重載荷に関する全ての実験ケースに対して数値解析を実施している。その中で, 繰返し載荷に対する数値解析に関しては, RC 梁部材を対象とした数値解析法⁶⁾と同様の手法に基づき実施した。

解析モデルは, 構造および荷重条件の対称性を考慮して, 道路軸直角方向および道路軸方向に 2 等分した 1/4 モデルである。各要素において, コンクリート, 重錘およびフーチング部には 8 節点の三次元固体要素を, 鉄筋には 2 節点の梁要素を用いている。要素の積分点数は, 三次元固体要素には 1 点積分を, 鉄筋要素には 2×2 Gauss 積分を用いている。解析モデルの総節点数, 総要素数は, それぞれ 91,003, 85,753 である。

境界条件は, 実験状況を極力再現して解析を行うこととし, 固定治具をすべてモデル化し, 架台底面を完全固定とした。なお, モデルの対称境界面には全て対称条件を入力している。また, コンクリートと鉄筋の要素間は完全付着を仮定し, 重錘とコンクリート, フーチングと架台, フーチング固定用ボルト穴とボルトの要素間には, 面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。

減衰定数は, 質量比例項のみを考慮するものとし, 事前に本解析モデルを用いた固有振動解析を行い, 全体構造系の鉛直方向最低次固有振動数に対して 1.0 % と設定している。また, 衝撃荷重は載荷位置に配置した質量 300 kg の重錘に初速度を入力することにより与えている。数値解析の時間間隔は, Courant の安

表－2 鉄筋強度一覧

材料	降伏強度 (MPa)
主鉄筋 D13	380
配力鉄筋 D6	371

定条件を満足するようにコード内で自動的に設定される。

3.2 繰返し衝撃荷重载荷時の解析概要

本数値解析では、繰返し衝撃荷重载荷実験を適切に再現するために、以下の手順で数値解析を実施することとした。

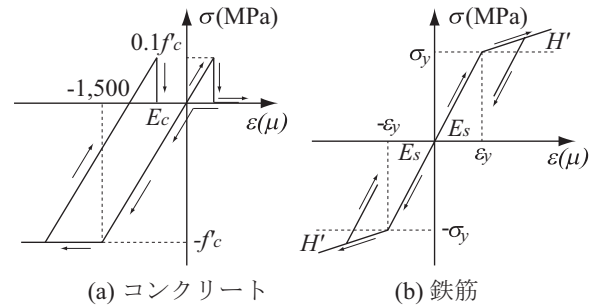
- 1) 重錘要素を繰返し载荷回数分だけ、予めスラブ上に仮想的に重複して設置する。
- 2) 一次载荷時に衝突させる重錘要素の全節点に所定の衝突速度を付加し数値解析を実施する。数値解析時間は、重錘がスラブに衝突した時点からラーメンスラブ模型がほぼ定常状態に至るまでとする。本研究の場合には予備解析を実施し 200 ms とした。なお、減衰定数は、3.1 に述べているように質量比例分のみを考慮するものとし、鉛直方向最低次固有振動数に対して 1.0 % とする。
- 3) 一次载荷時の数値解析終了後、計算を一度停止させて鉛直方向最低次固有振動数に対する臨界減衰定数を入力し、リスタート機能により計算を再開させてラーメンスラブ模型を数値解析的に静止させる。なお、静止させるための解析時間は、予備解析を実施して 200 ms とした。また、リスタート時に一次载荷時に使用した重錘要素を除去している。
- 4) 二次载荷時に衝突させる重錘要素の全節点に所定の衝突速度を付加し数値解析を実施する。数値解析時間は一次载荷時と同様に 200 ms とする。なお、減衰定数は、一次载荷時と同様の値を入力する。
- 5) 以降 n 次载荷終了まで 3), 4) の手順を繰り返す。なお、この操作は、基本的に手動で行わなければならない。

以上により、数値解析を実施している。

3.3 材料物性モデル

表－2 には、数値解析に用いた鉄筋強度を一覧にして示している。また、図－4 には、数値解析に用いた各材料の応力－ひずみ関係を示している。

図－4(a) には、コンクリートに関する相当応力－ひずみ関係を示している。圧縮側のモデルは完全弾塑性体のバイリニア型としてモデル化し、弾性係数 $E_c = 16.7 \text{ GPa}$ とし、圧縮ひずみが $1,500 \mu$ に達した段階で降伏するものとした。本研究では、強度試験から得



図－4 各材料の応力－ひずみ関係

られた圧縮強度 f'_c を降伏応力として定義することとし、この2値から弾性係数を定めるものとした。降伏の判定には、Drucker-Prager の降伏条件式を採用している。さらに、引張側に関しては、引張強度 f_t を超過した場合に、それ以降一切の引張応力を伝達しないものとするカットオフを定義している。これにより、最大主応力値が零近傍を示す要素にひび割れが発生したものとして評価し、損傷を模擬している。

図－4(b) には、鉄筋要素に関する応力－ひずみ関係を示している。鉄筋要素は、降伏後の塑性硬化係数 H' を考慮した等方弾塑性体モデルとし、バイリニア型にモデル化した。塑性硬化係数 H' は、初期弾性係数 $E_s = 206 \text{ GPa}$ の 1 % と定義している。降伏の判定は、von Mises の降伏条件に従うこととした。なお、フーチング内部の鉄筋に関しては、応答値が弾性範囲内であるものと推察されることより、弾性体と仮定した。

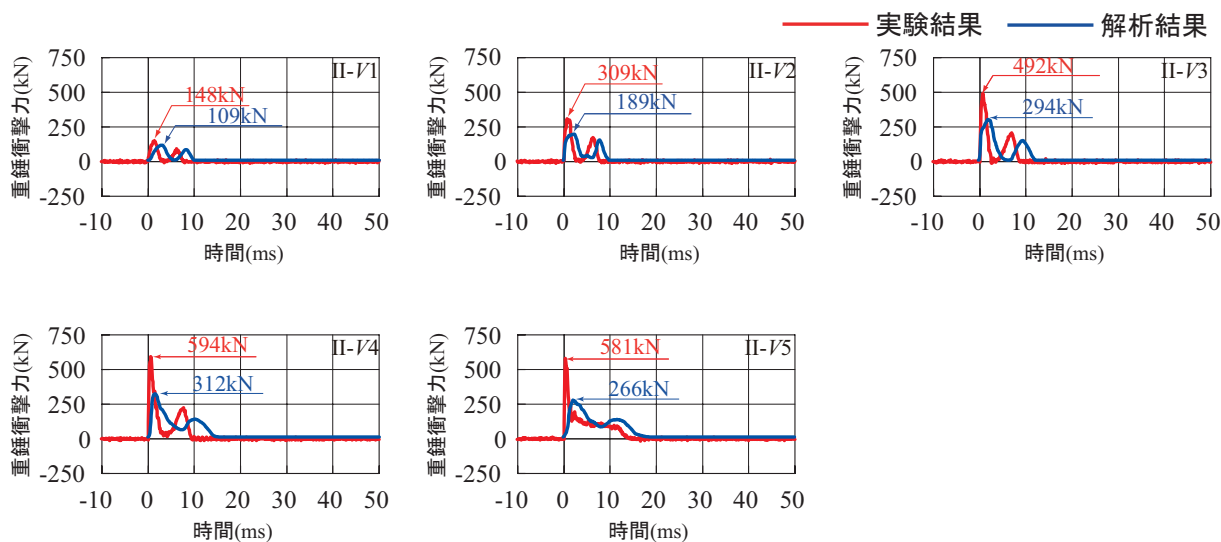
本実験の衝突速度の範囲内では、重錘の衝突速度が比較的小さいことから、ひずみ速度効果が解析結果の応答性状に与える影響は小さいものと判断し、これを考慮していない。

4. 実験結果および解析結果

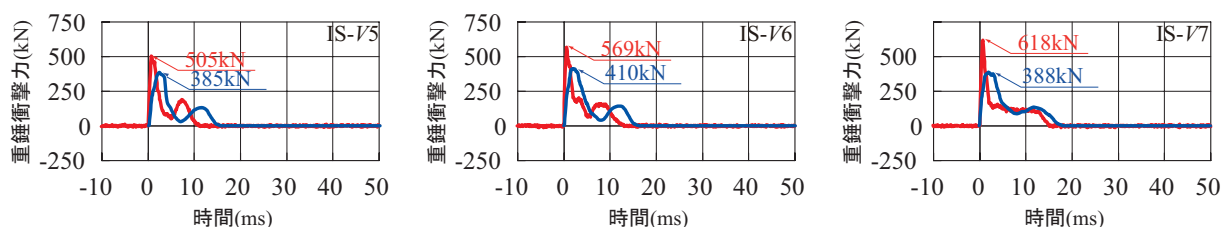
4.1 重錘衝撃力

図－5 には、実験ケース全てに関する重錘衝撃力波形を実験結果と数値解析結果を比較して示している。波形は、縦軸に重錘衝撃力を、横軸に時間を重錘衝突時点を原点に合わせて示している。重錘衝撃力の波形性状は、実験結果および解析結果ともに大小2つの卓越した波形から構成されていることが分かる。第1波目は重錘がスラブに衝突することにより発生する急激な立ち上がりの波形であり、第2波目は第1撃によってスラブが局所的に下方に変位して除荷状態に至り、重錘が再度スラブに接触することにより生ずるものと推察される。また、衝突速度の増加に伴い、波動継続時間も増加している。

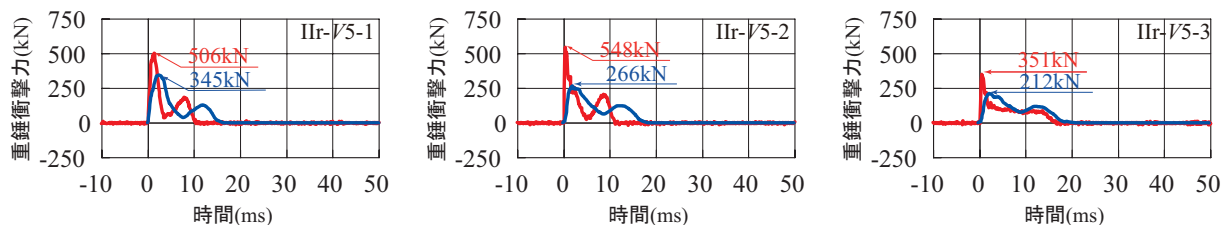
図－5(a) には、II-V1～II-V5 の漸増繰返し载荷時の重錘衝撃力波形を示している。実験結果の重錘衝撃力に着目すると、II-V1～II-V4 までは、重錘衝突速度の



(a) II-V1 ～ II-V5 試験体（漸増繰返し載荷）



(b) IS-V5 ～ IS-V7 試験体（単一載荷）



(c) IIR-V5-1 ～ IIR-V5-3 試験体（定速度繰返し載荷）

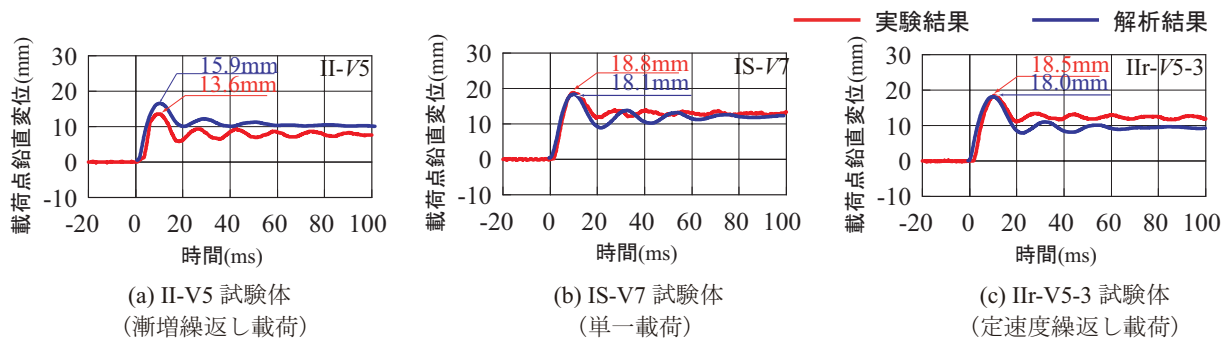
図－5 重錘衝撃力波形分布

増加に対応して、最大重錘衝撃力も増加していることが分かる。しかしながら、II-V5 の場合には、重錘衝撃力が増加せず、第2波目のピーク値も明瞭に表れていないことが分かる。これは、後述する図－10 の各試験体におけるひび割れ分布に示されるように、荷点近傍が著しく損傷し、スラブに押し抜きせん断面が形成されたことによるものと推察される。

図－5(b) には、IS-V5 ～ IS-V7 試験体の単一載荷時の重錘衝撃力波形を示している。実験結果の重錘衝撃力に着目すると、IS-V6、IS-V7 試験体では、衝突エネルギーが IS-V5 試験体に比べ 1.4 ～ 2.0 倍程度に増加しているにもかかわらず、最大重錘衝撃力は 1.1 ～ 1.2

倍程度となっている。また、第2波目のピーク値も同様に明瞭に表われていないことが分かる。このことから、IS-V5 試験体では荷点近傍が損傷を受ける程度であるが、IS-V6 試験体ではスラブに押し抜きせん断面が形成され、IS-V7 試験体ではさらにスラブに脆性的な押し抜きせん断破壊が生じ終局に至るものと推察される。

図－5(c) には、IIR-V5-1 ～ IIR-V5-3 試験体の定速度繰返し載荷における重錘衝撃力波形を示している。実験結果に着目すると、IIR-V5-3 では、最大重錘衝撃力が減少し、第2波目も明確なピーク値が表れていないことが分かる。このことは、衝突速度 $v = 5 \text{ m/s}$ で定



図－6 載荷点鉛直変位波形分布

速度繰返し載荷を実施した場合には、3回目でスラブに押し抜きせん断面が形成され終局に至ることが推察される。

実験結果と数値解析結果を比較すると、全ての実験ケースにおいて実験結果の最大重錘衝撃力は、解析結果に比べ1.3～2.2倍程度大きな値を示している。これは、実験の場合には繰返し載荷によって載荷面が密実となり、見かけ上剛性が増加したことによるものと推察される。また、実験結果が解析結果に比べ第1波目、第2波目の最大応答が早期に発生している。数値解析結果は、各実験ケースにおける最大重錘衝撃力の分布性状を大略再現していることが分かる。これらのことから、本数値解析によって、スラブの載荷点近傍における損傷の程度や押し抜きせん断面の発生に関する損傷をある程度評価可能であるものと推察される。

4.2 衝撃応答変位

図－6には、それぞれ漸増繰返し載荷実験における最終衝突速度 II-V5、単一載荷実験における最終衝突速度 IS-V7、定速度繰返し載荷実験における最終衝突回数 IIR-V5-3における載荷点鉛直方向変位（以後、単に変位）波形について実験結果と解析結果を比較して示している。波形は、重錘衝突時の時刻を原点として整理している。

応答変位の波形性状は、全ての実験ケースにおいて重錘衝突より若干遅れて励起し緩やかに最大応答に至った後、残留変位成分を含む減衰自由振動状態に移行している。実験結果の最大変位に着目すると、II-V5は約14mm、IS-V7およびIIR-V5-3は約19mmを示している。また、実験結果の残留変位に着目すると、終局に至った試験体は、全て約10mm程度以上を示している。実験結果と数値解析値を比較すると、多少周期に違いが見受けられるものの、II-V5、IS-V7およびIIR-V5-3の最大変位量、自由振動性状および残留変位量は精度良く対応していることが分かる。このことから、本解析手法は、漸増繰返し載荷、単一載荷、定速度繰返し載荷の各種載荷条件の変化にも対応して、実験結果を精度良く再現可能であるものと考えられる。

4.3 各種応答値と衝突エネルギーの関係

図－7には、各種応答値と衝突エネルギーの関係を全ての実験ケースに関して実験結果と解析結果を比較して示している。なお、衝突エネルギーに関しては、漸増繰返し載荷および定速度繰返し載荷を実施していることから、各衝突エネルギーの累積値として表している。

図－7(a)は、最大重錘衝撃力－累積衝突エネルギー関係を示している。図より、解析結果の最大重錘衝撃力は実験結果の1/2倍程度の値を示している。このことは、前述のように載荷面部の剛性が見かけ上増加したことによるものと推察される。しかしながら、解析結果および実験結果には相関性が見られ同様な傾向を示している。また、実験結果の最大重錘衝撃力に着目すると、最大重錘衝撃力が600kN前後に達した後は衝突エネルギーが増加しても衝撃力が増加しないことから、この時点で押し抜きせん断面が形成され終局に至るものと考えられる。

図－7(b)は、最大変位－累積衝突エネルギー関係を示している。図より、最大変位と衝突エネルギーに高い相関関係があることが分かる。すなわち、いずれの実験結果も衝突エネルギーの増加に対応して最大変位が線形的に増加する傾向を示している。また、解析結果と実験結果は同程度の値を示していることから、本解析手法を用いることにより、漸増繰返し載荷、単一載荷、定速度繰返し載荷のいずれの載荷条件に対しても、最大変位を適切に評価可能であるものと判断される。

図－7(c)は、残留変位－累積衝突エネルギー関係を示している。図より、漸増繰返し載荷および定速度繰返し載荷に関しては、それぞれ特定の衝突エネルギーにおいて残留変位が急激に増加する傾向が示されている。これは、図－7(a)の最大重錘衝撃力の増加割合が減少する場合の衝突エネルギーに対応していることから、押し抜きせん断破壊により大きな残留変位が生じたことによるものと推察される。実験結果と解析結果を比較すると、解析結果は実験結果に対して若干過大評価を与えるものの、実験結果と類似の傾向を示して

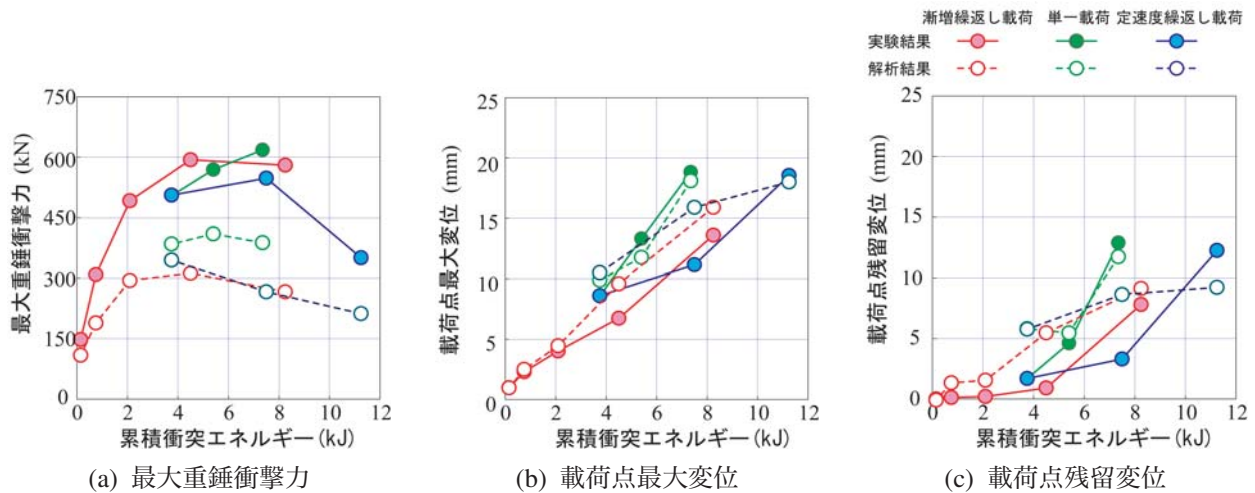


図-7 各種応答値と累積衝突エネルギーの関係

いる。しかしながら、両者で局所的に著しく異なる場合も見受けられる。これは、実験結果では載荷点を中心とした対称な押し抜きせん断面とはならないこと、変位計測点周辺においてもひび割れが発生することから、残留変位にはある程度の誤差を含んでしまうこと等によるものと推察される。また、数値解析では実験結果に表れるような押し抜きせん断面とスラブとの段差を適切に評価することが困難であることも要因の1つと考えられる。このようなことから、本解析手法を用いることにより、漸増繰返し載荷、単一載荷、定速度繰返し載荷の各種載荷条件に対しても、著しく損傷した場合を除き、ある程度評価可能であるものと考えられる。

4.4 変位分布

図-8には、それぞれ漸増繰返し載荷時のII-V5試験体、単一載荷時のIS-V7試験体、定速度繰返し載荷時のIIr-V5-3試験体における断面方向内空変位について、各載荷方法における最終衝突速度時の時系列分布を変形倍率50倍にして実験結果と解析結果を比較して示している。図は、片側の内空変位計測結果を対称に展開して表現し、2ms毎に40msまで示している。図より、いずれの試験体も、衝突初期には載荷点近傍に変位が集中し、その後、スラブは逆三角形形状の変位分布を示し、10ms前後で載荷点で最大変位に達している。その後、逆三角形形状の変位分布を呈しながら変位が減少し、やがて残留する傾向を示している。解析結果は実験結果の分布性状を大略再現していることが分かる。しかしながら、単一載荷のIS-V7試験体の場合には、最大変位発生後変位が残留する過程において、実験結果は載荷点周辺で大きな変位が生じ半円形状の変位分布を呈しているのに対して、解析結果は実験結果と対応していない。これは、数値解析では大き

く段差が生じるような押し抜きせん断破壊型の変位分布を精度良く表現できないことを暗示している。

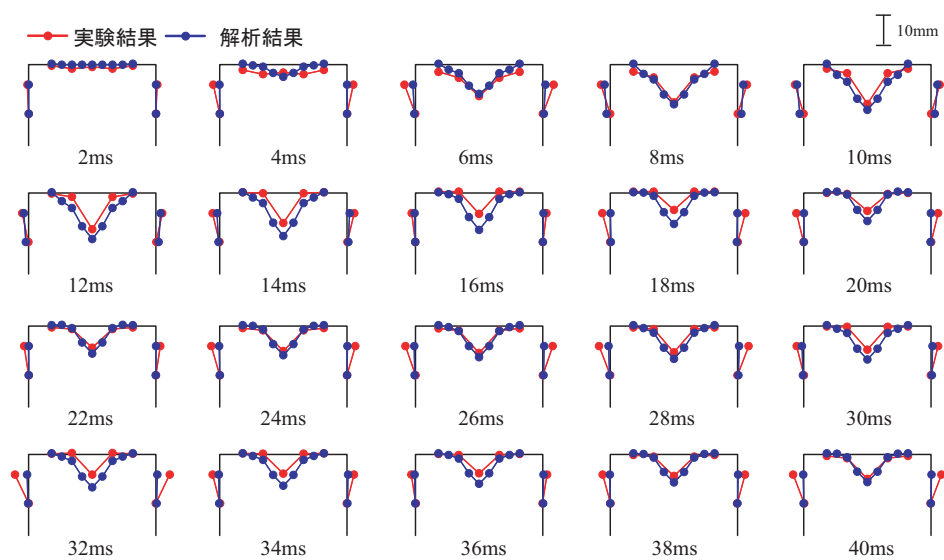
図-9には、スラブの載荷点を通る道路軸方向変位について、各載荷方法の各実験ケース毎に最大変位時と残留変位の分布を、変形倍率20倍にして解析結果と併せて示している。

図-9(a)には、漸増繰返し載荷のII-V1～II-V5を示している。図より、II-V1～II-V4までは、最大変位分布、残留変位分布ともに軸方向の変位差が小さく、スラブが一方向的に挙動していることがうかがえる。

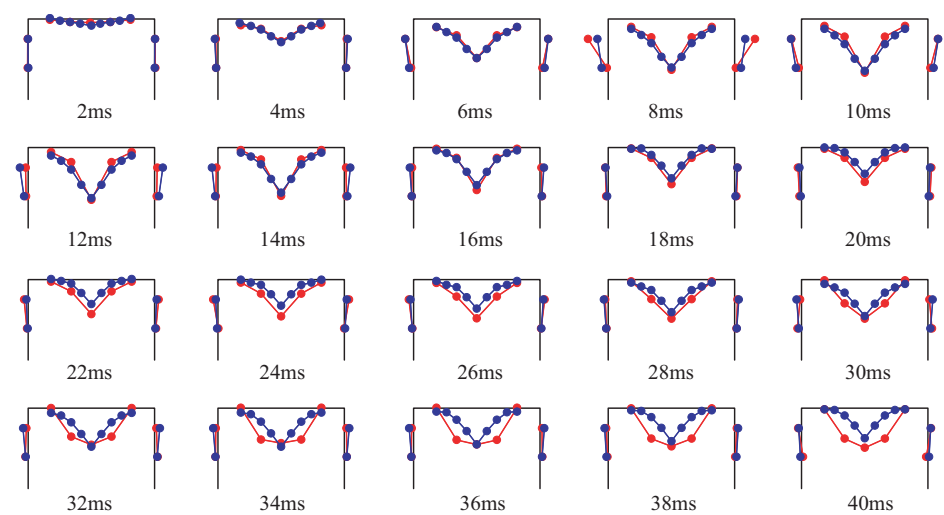
また、II-V5試験体では、実験結果、解析結果とも半円形状の挙動を示している。これは、押し抜きせん断破壊により終局に至っていることを示唆している。

図-9(b)には、単一載荷のIS-V5～IS-V7試験体の結果を示している。図より、IS-V5、IS-V6試験体では、最大変位時分布、残留変位分布ともに軸方向に若干変位差が生じていることから、載荷点近傍が多少損傷しているものと推察される。また、IS-V7試験体では、実験結果、解析結果とも漸増繰返し載荷のII-V5試験体と同様に下部半円形の挙動を示していることから、押し抜きせん断破壊により終局に至っているものと推察される。

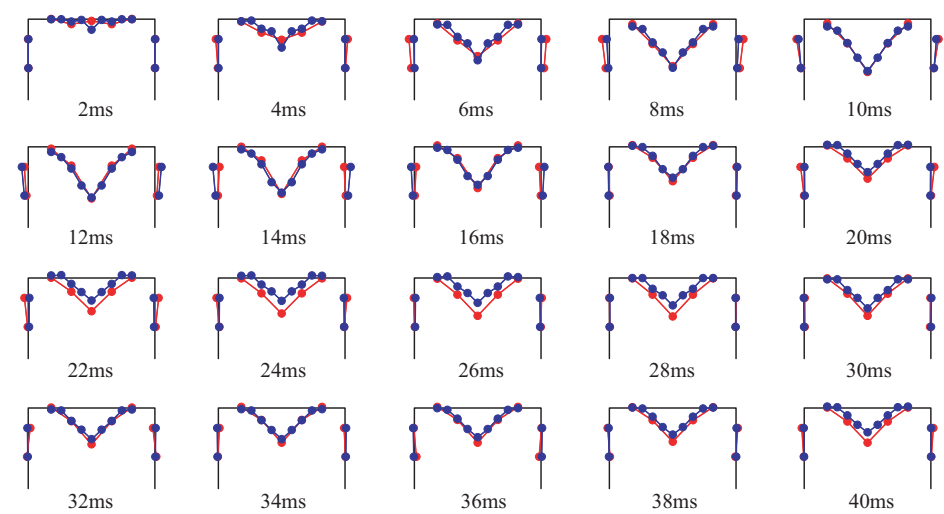
図-9(c)には、定速度繰返し載荷時のIIr-V5-1～IIr-V5-3について示している。図より、IIr-V5-1の場合には、最大変位分布、残留変位分布と共に載荷点直下で小さな変位差が生じていることから、載荷点近傍に多少損傷が生じているものと推察される。IIr-V5-2では、変位量は小さいが下部半円形の変位分布を示し、押し抜きせん断破壊面が形成されていることを示唆している。IIr-V5-3では、漸増繰返しII-V5試験体と同程度の変位量の下部半円形の変位分布性状を示しており、押し抜きせん断破壊により終局に至っているものと推察される。



(a) II-V5 試験体（漸増繰返し载荷）

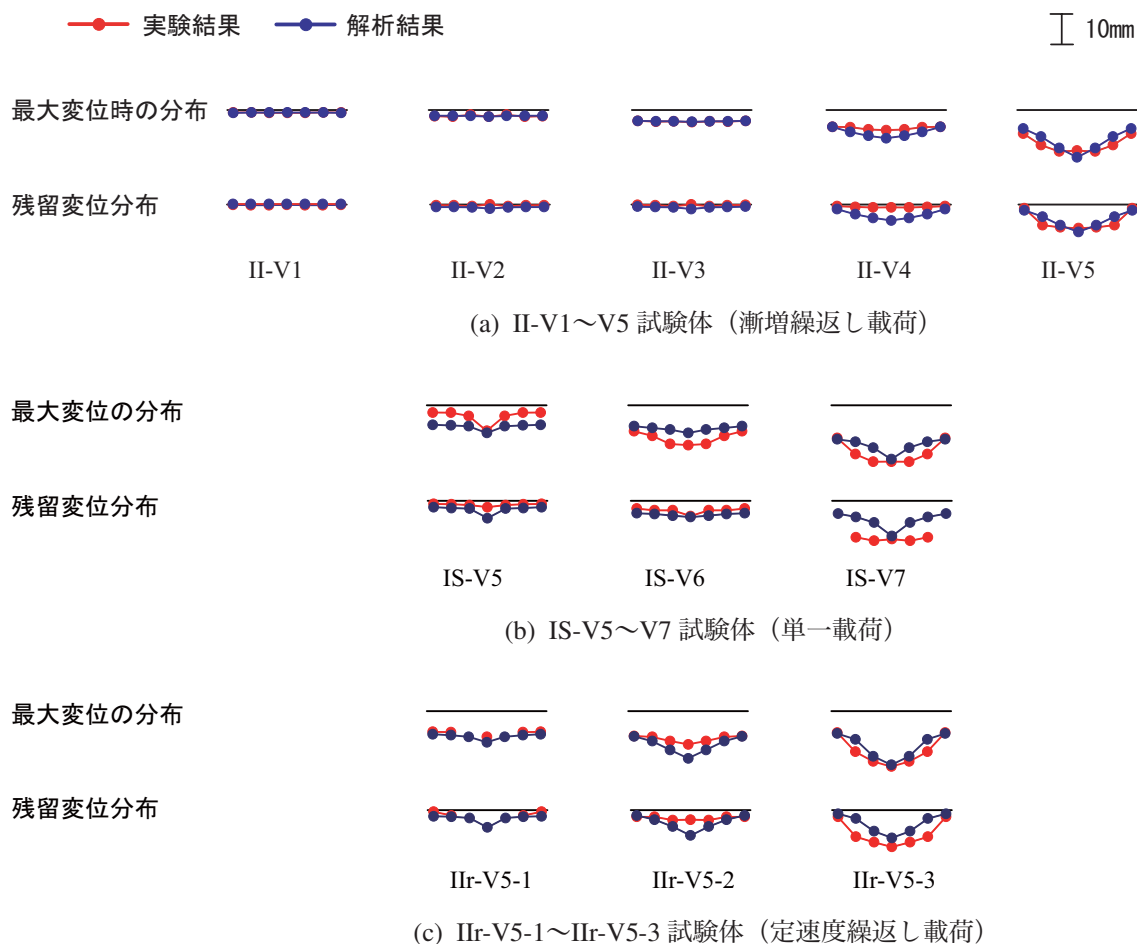


(b) IS-V7 試験体（単一载荷）



(c) IIr-V5-3 試験体（定速度繰返し载荷）

図-8 断面方向変位分布



図－9 軸方向変位分布

数値解析結果は、全ての実験結果における変位波形分布性状を大略精度良く再現しているものと考えられる。しかしながら、衝突エネルギーの大きい単一載荷の IS-V7 試験体では、解析結果の最大変位時分布、残留変位分布はともに逆三角形分布を示しているのに対して、実験結果は半円形状の変位分布性状を示している。このことは、本数値解析では衝突エネルギーが大きく、段差が生じる程度の大きな押し抜きせん断破壊を再現するまでに至っていないものと考えられる。

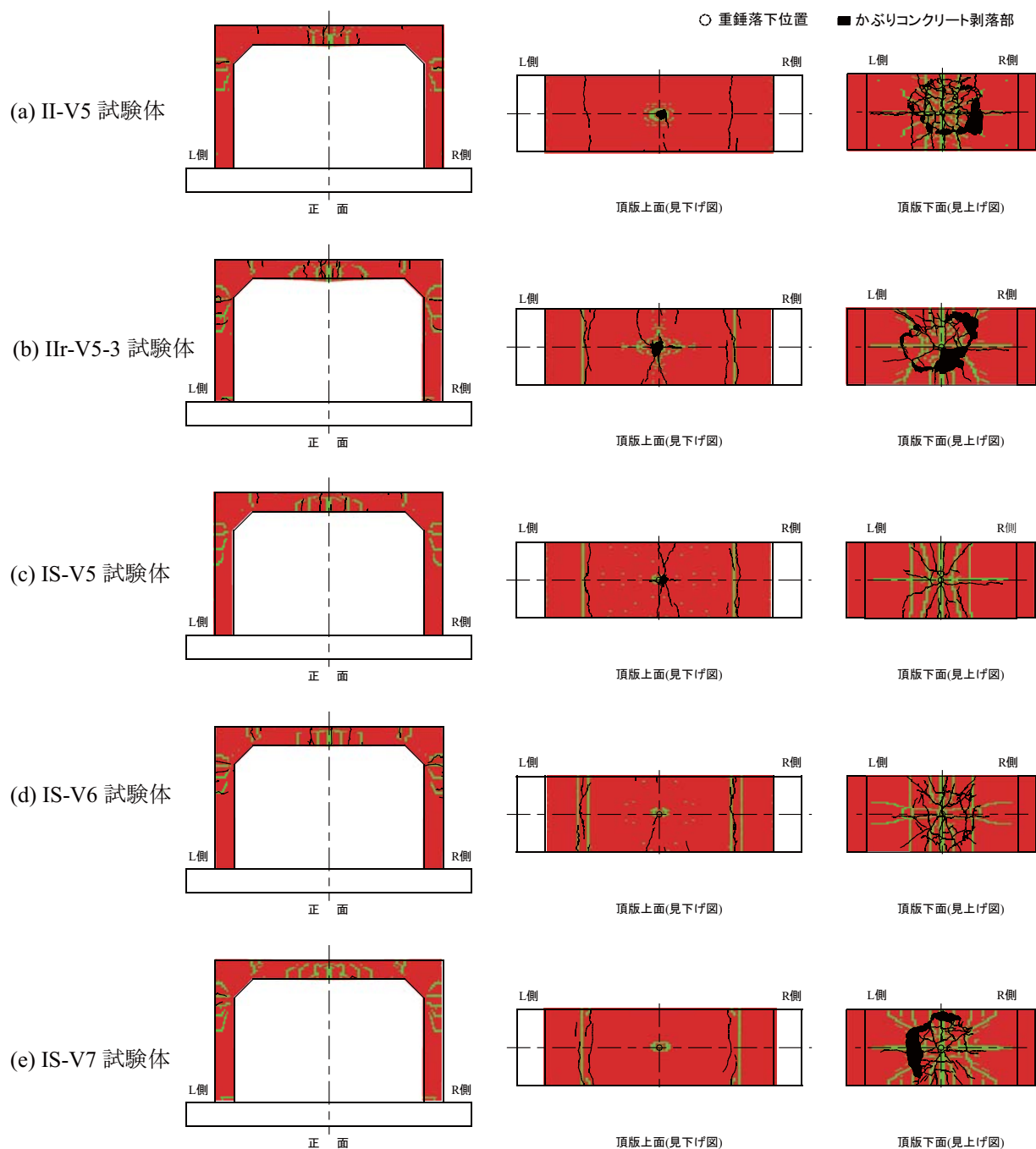
4.5 ひび割れ分布性状

図－10 には、実験終了時のひび割れ分布に数値解析結果を重ねて示している。数値解析において、図－4(a) に示したコンクリートの応力－ひずみ関係に従うと、図中の緑色で示された領域（コンクリート要素の第一主応力が $-0.001 \sim 0.001$ MPa の範囲）はひび割れが発生して除荷状態になっているか、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。従って、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なっているものとして評価可能である。

図－10(a)(b) の漸増および定速度繰返し載荷の場合

には、側壁外縁上部に負曲げによるひび割れが発生している状況が確認できる。また、スラブ下面では、押し抜きせん断面が確認でき、一部コンクリートが剥落し終局を迎えていることが分かる。しかしながら、定速度繰返し載荷の場合には、漸増繰返し載荷の場合よりもひび割れが多く発生し、押し抜きせん断面の範囲も大きく発生している。これは、漸増繰返し載荷の場合より定速度繰返し載荷の場合の方が累積衝突エネルギーが 1.4 倍程度大きいことによるものと考えられる。

図－10(c)～(e) の単一載荷の場合には、IS-V5 試験体では、隅角部近傍においては負曲げによる外縁での曲げひび割れが発生しているのが確認でき、スラブ下面では、載荷点近傍に放射状のひび割れは発生している。しかしながら、明瞭な押し抜きせん断によるひび割れは発生していない。IS-V6 試験体では、IS-V5 試験体より 1.4 倍程度衝突エネルギーが増加していることから、全体的にひび割れが多く発生している。また、スラブ下面では、明瞭な押し抜きせん断によるひび割れが形成されている。IS-V7 試験体では、IS-V5 試験体より 2.0 倍程度衝突エネルギーが大きいことにより、IS-V6 試験体に比べさらに多くのひび割れが発



図－10 各試験体におけるひび割れ分布

生している。また、スラブ下面では、脆性的な押し抜きせん破壊が生じコンクリートが剥落し終局を迎えている。

解析結果と実験結果を比較すると、側壁やスラブに発生する曲げひび割れは、実験結果を精度よく再現していることが確認できる。また、押し抜きせん断破壊に起因するひび割れが発生しているスラブ下面では、衝突エネルギーの増加に対応してせん断コーンに対応する領域で放射状のひび割れが多く発生し、押し抜きせん断破壊の傾向を示している。しかしながら、明瞭な円形の押し抜きせん断のひび割れを再現するまでには

至っていない。これらのことから、本解析手法を用いることにより、押し抜きせん断破壊が卓越する場合でも重錘衝撃力、変位分布およびひび割れ分布等を総合的に分析することにより、ロックシェットの損傷をある程度評価可能であると判断される。

5. まとめ

本研究では、ロックシェットの性能照査法の確立を目的として、また、今後の大型ロックシェット模型の重錘落下衝撃実験を推進する上での事前の実験とし

て、小型 RC ラーメンスラブ模型の重錘落下衝撃実験を行い、その耐衝撃挙動について検討を行った。また、繰返し荷重載荷時の累積損傷や残存耐力評価法の確立に向け、三次元弾塑性有限要素法に基づいた解析法をラーメンスラブ模型にも適用し、実験結果との比較によってその妥当性に関する検討を行った。

実験結果の検討により、以下の事項が明らかとなった。

- (1) ラーメンスラブ模型は、漸増繰返し載荷、単一載荷、定速度繰返し載荷による衝撃載荷実験に関わらず、押し抜きせん断破壊により終局に至る。
- (2) 衝突エネルギーの増加に対応し最大重錘衝撃力も増加するが、押し抜きせん断面が形成される場合には増加しない傾向にある。
- (3) 衝突エネルギーの増加に対応し、載荷点の最大変位は線形的に増加するものの、残留変位は押し抜きせん断面が形成される状態で急増する傾向にある。

解析結果の検討により、以下の事項が明らかとなった。

- (1) 本数値解析手法を適用することにより、載荷条件や衝突速度の変化に関わらず重錘衝撃力および載荷点変位の波形性状を大略精度良く再現可能である。
- (2) 変位分布性状については、段差が生じる程度の押し抜きせん断面が形成される場合の局所的な変形性状を再現するまでには至っていないものの、道路軸直角方向および道路軸方向分布共に大略再現可能である。
- (3) 本解析手法を用いることにより、押し抜きせん断破壊が卓越する場合でも重錘衝撃力、変位分布およびひび割れ分布等を総合的に分析することにより、ロックシェッドの損傷を評価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、室蘭工業大学建築社会基盤系専攻構造力学研究室の花岡健治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) 土木学会：構造工学シリーズ 8, ロックシェッドの耐衝撃設計, 1998.11.
- 2) (社) 日本道路協会：落石対策便覧, 2000.6
- 3) 熊谷守晃：ルランベツ覆道における落石災害に関する報告, 第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.286-290, 1993.6
- 4) (社) 土木学会：コンクリート標準示方書 (構造性能照査編), 2002.3
- 5) 岸 徳光, 三上 浩, 松岡健一, 安藤智啓：静載荷時に曲げ破壊が卓越する RC 梁の弾塑性衝撃応答解析, 土木学会論文集, No.619/I-47, pp.215-233, 1999.4
- 6) 岸 徳光, A.Q.Bhatti, 今野久志, 岡田慎哉：重錘落下衝撃荷重載荷時の大型 RC 桁に関する衝撃応答解析法の適用性検討, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.1261-1272, 2006.3
- 7) 岸 徳光, A.Q.Bhatti, 三上 浩, 岡田慎哉：破壊エネルギー等価の概念を用いた大型 RC 桁に関する衝撃応答解析手法の妥当性検討, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.1227-1238, 2007.3
- 8) 岸 徳光, 今野久志, 三上 浩：RC 梁の繰返し重錘落下衝撃挙動に関する数値シミュレーション, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1225-1237, 2009.3
- 9) 岡田真哉, 岸 徳光, 西 弘明, 今野久志：RC ラーメン構造の体衝撃挙動に関する実験的検討および数値解析手法の妥当性検討, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1388-1398, 2009.3
- 10) John O.Hallquist：LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2000.6

(2009 年 9 月 24 日受付)