

## (16) 重錘衝突による落石防護擁壁の動的挙動

## DYNAMIC BEHAVIOR OF ROCK KEEPING WALL UNDER IMPACT LOADING

佐藤昌志\*, 中井健司\*\*, 岸 徳光\*\*\*, 川瀬良司\*\*\*\*

Masashi SATO, Kenji NAKAI, Norimitsu KISHI and Ryoji KAWASE

\* 工博 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

\*\* 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3)

\*\*\* 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\*\*\* (株) 構研エンジニアリング (〒065-0018 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1)

キーワード：落石，衝撃，防護擁壁  
(rock falling, impact, rock keeping wall)

## 1. はじめに

山岳道路脇には小規模落石等の防災対策として、図-1のような落石防護擁壁が設置されている。落石防護擁壁には通常重力式コンクリート擁壁が用いられている。現在の設計は昭和58年度版落石対策便覧<sup>1)</sup>に基づいて行われている。しかしながら、その妥当性については必ずしも検証されていないことから一部の研究機関で実験的研究<sup>2)</sup>が行われている。

本研究では落石防護擁壁が比較的硬い地盤上に設置されることを想定し、擁壁高さを実規模程度とした落石防護擁壁の重錘衝突実験を行い、落石防護擁壁の供試体形状、重錘衝突位置、重錘重量の変化および重錘の衝突速度、位置エネルギーによる影響等について検討を行い、現行設計法の妥当性について検討することとした。また、現行設計法に基づいて設計された重力式コンクリート擁壁を対象として、重錘衝突による衝撃力を与えた場合の弾塑性衝撃応答解析を試み、同一条件で行われた擁壁の衝突実験結果との比較により、解析手法の適用性についても検討を行っている。なお、本数値解析では単純な構成則を用いることを前提としているため、塑性化によるエネルギー吸収や質量に比例する減衰効果は考慮しているが、コンクリートの歪速度効果等は無視している。また、本数値解析には非線形衝撃応答解析用汎用プログラム LS-DYNA<sup>3)</sup>を用いた。

## 2. 実験概要

## 2.1 実験方法

本実験に用いた実験装置を図-2に示す。落石防護擁壁(以下、擁壁)は、一般的に良質な支持層に根入れされていることから、転倒にのみ着目しコンクリート基礎上に設置した擁壁の滑動を鋼製のアンクルを用いて制御し実験を行った。重錘は、円柱状で載荷部が球状の鋼製重錘(1tf用:直径50cm, 0.3tf用:直径41cm)を使用した。重錘はH鋼をガイドレールとし、擁壁背面の所定の位置に滑動落下させることにより水平衝突させた。載荷方法は繰り返し載荷と単一載荷である。繰り返し載荷は重錘の衝突速度を1m/sec刻みで増加させ、擁壁コンクリートのひびわれが貫通し破壊するか、擁壁が転倒するまで実験を継続した。単一載荷実験は、同一条件で行われた繰り返し載荷実験で破壊および転倒し

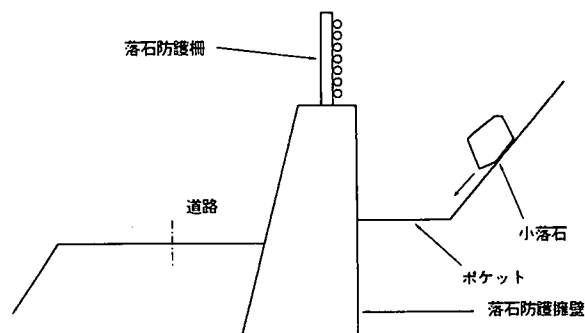


図-1 落石防護擁壁

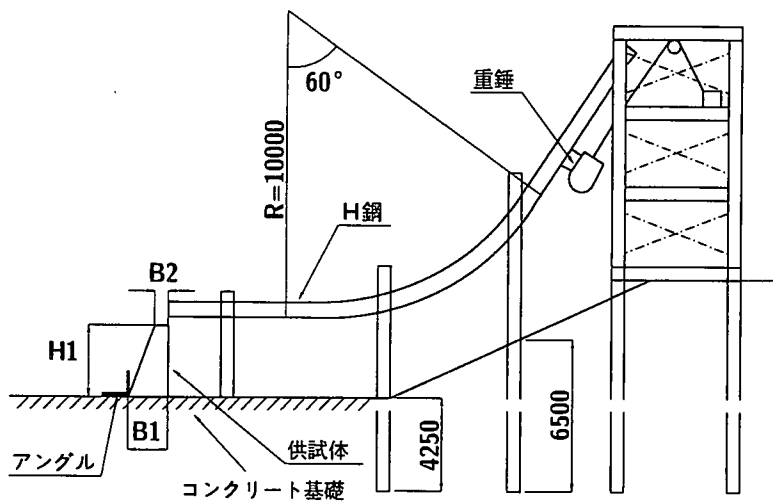


図-2 実験装置概要図

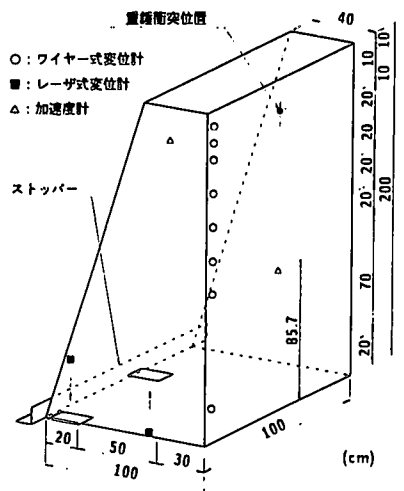


図-3 測定位置概要図

表-2 実験ケース一覧

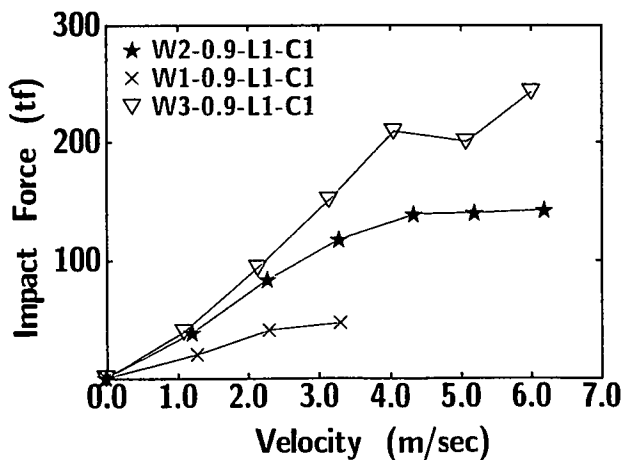
形状図	実験ケース	供試体形状寸法 (m)				衝突位置	載荷方法	重錘重量 W (tf)
		H <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	L			
	W1-0.9-L1-C1	1.00	0.50	0.20	1.00	0.9H <sub>1</sub>	繰り返し	1.0
	W2-0.9-L1-C1	2.00	1.00	0.40	1.00	0.9H <sub>1</sub>	"	1.0
	W3-0.9-L1-C1	3.00	1.50	0.60	1.00	0.9H <sub>1</sub>	"	1.0
	W2-0.7-L1-C1	2.00	1.00	0.40	1.00	0.7H <sub>1</sub>	"	1.0
	W2-0.5-L1-C1	2.00	1.00	0.40	1.00	0.5H <sub>1</sub>	"	1.0
	W2-0.9-L2-C1	2.00	1.00	0.40	2.00	0.9H <sub>1</sub>	"	1.0
	W2-0.9-L1-C0.3	2.00	1.00	0.40	1.00	0.9H <sub>1</sub>	"	0.3
	W2-0.9-L1-S1	2.00	1.00	0.40	1.00	0.9H <sub>1</sub>	単一	1.0
	W2-0.9-L1-S0.3	2.00	1.00	0.40	1.00	0.9H <sub>1</sub>	"	0.3
	W2-0.7-L1-S1	2.00	1.00	0.40	1.00	0.7H <sub>1</sub>	"	1.0
	W2-0.5-L1-S1	2.00	1.00	0.40	1.00	0.5H <sub>1</sub>	"	1.0

た最終衝突速度を基に決定した。なお、ガイドレールと重錘との摩擦により、必ずしも設定どおりの衝突速度が得られないことより、本実験では光電管を設置し実測により正確な衝突速度を求めている。実験における測定項目は、歪ゲージ型加速度計による重錘および擁壁の加速度と、レーザ式およびワイヤー式変位計による擁壁の変位である。また、実験終了後にひびわれ状況を記録し、ひびわれおよび破壊性状を検討した。

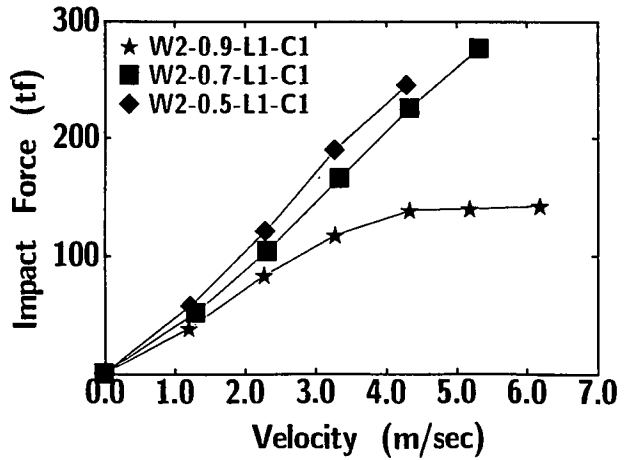
## 2.2 実験ケース

表-2に実験ケースの一覧を示す。擁壁の形状寸法は落石対策便覧の標準的な値を用いている。表中

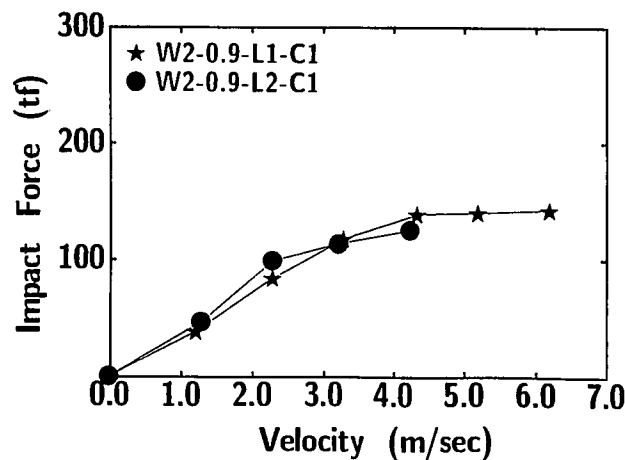
の実験ケースは擁壁高さ (m)、基部から測定した衝突位置 (擁壁高さに対する比)、擁壁の幅 (m)、載荷方法 (繰り返し載荷 C, 単一載荷 S)、重錘重量 (tf) をハイフンで結び整理している。なお、重錘載荷点部の水平方向の壁厚は W1, W2, W3でそれぞれ 0.23, 0.46, 0.69 m である。実験時のコンクリートの力学的特性は平均圧縮強度  $f_c = 215 \text{ kgf/cm}^2$ 、弾性係数  $E_c = 2.1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、ポアソン比  $\nu_c = 0.18$  である。実験ケースは W2-0.9-L1-C1 を基本とし、擁壁高さ、重錘衝突位置、擁壁延長、重錘重量を変化させた場合について繰り返し載荷実験を行った。また、重錘衝突位置、重錘重量を変化させた場合に



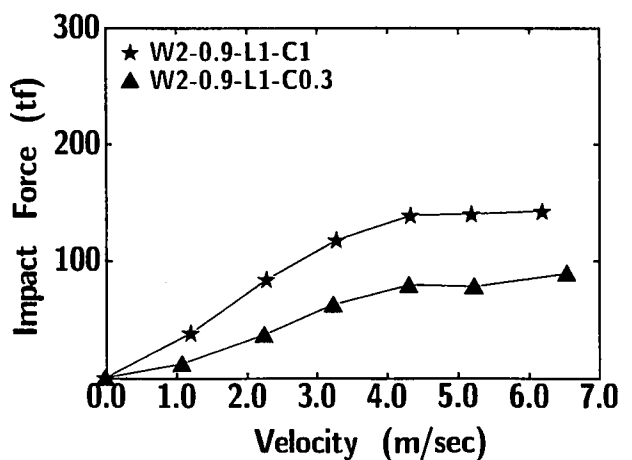
(a) 擁壁高さを変化させた場合



(b) 衝突位置を変化させた場合



(c) 擁壁幅を変化させた場合



(d) 重錘重量を変化させた場合

図-4 重錘衝撃力と重錘衝突速度の関係

については単一載荷実験も行っている。

### 3. 実験結果

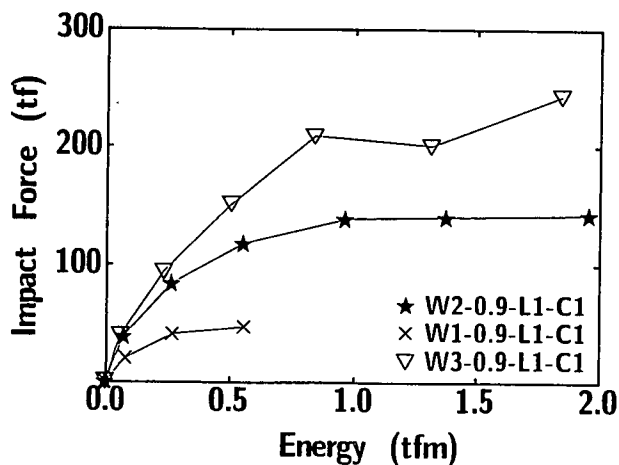
#### 3.1 重錘衝撃力と重錘衝突速度の関係

図-4は繰り返し載荷実験に関する衝突時の重錘衝撃力と重錘衝突速度の関係を示している。(a)図は擁壁高さ( $H_1$ ), (b)図は衝突位置( $H_2$ ), (c)図は擁壁幅( $L$ ), (d)図は重錘重量( $W$ )を変化させた場合について比較して示している。衝撃力は、重錘底部に取り付けた加速度計より得られる重錘加速度に重錘質量を乗じた値である。

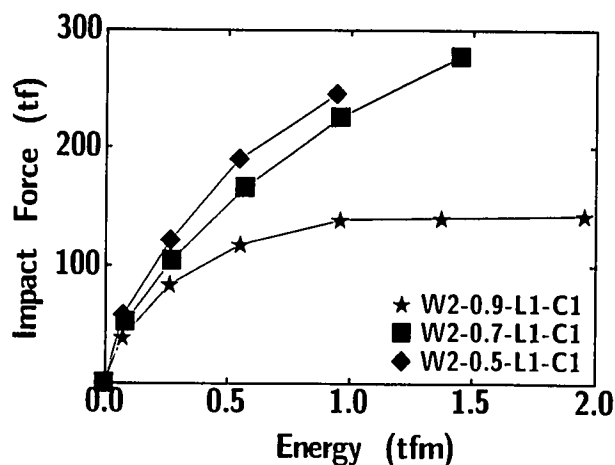
(a)図より、実験ケース W1-0.9-L1-C1, W2-0.9-L1-C1, W3-0.9-L1-C1と擁壁高さを変化させた場合には、擁壁の高さに対応して衝撃力も大きくなっている。擁壁が高くなることにより、基部厚および重錘衝突位置の擁壁厚も比例して厚くなっていることより、上述の結果は擁壁の高さとともに擁壁厚が大きくなり、従って、曲げ剛性が大きくなるためと推

察される。W2, 3において、衝突速度 4 m/sec まではほぼ線形に増加している。しかしながら、その後は一定値に漸近する傾向にある。これは、繰返し載荷により、衝突部にひびわれが進行するためと推察される。

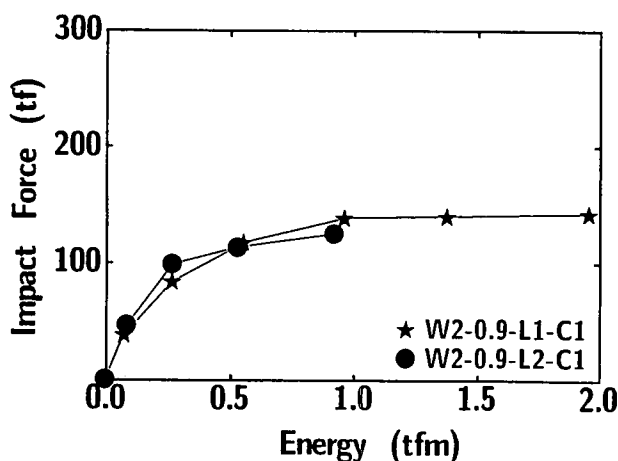
(b)図の衝突位置を変化させた場合に関して、0.7, 0.5 $H_1$  載荷点について比較すると、0.7 $H_1$  載荷点の場合が 1 m/sec だけ大きい載荷速度で終局に至っている。しかしながら、両者の衝撃力値は大差がない。一方、0.9 $H_1$  載荷点の場合には衝突速度が 6 m/sec で終局に至っているものの、4 m/sec 以降の衝撃力値はほぼ一定となっている。これは、図-8のひびわれ図からも類推されるが、破壊モードの違いによるものと考えられる。すなわち、0.9 $H_1$  載荷点の場合は載荷点が高いために曲げせん断型のひびわれを示しているのに対して、0.7, 0.5 $H_1$  載荷点の場合は載荷点近傍部に水平に純せん断型のひびわれが発生し終局に至っている。



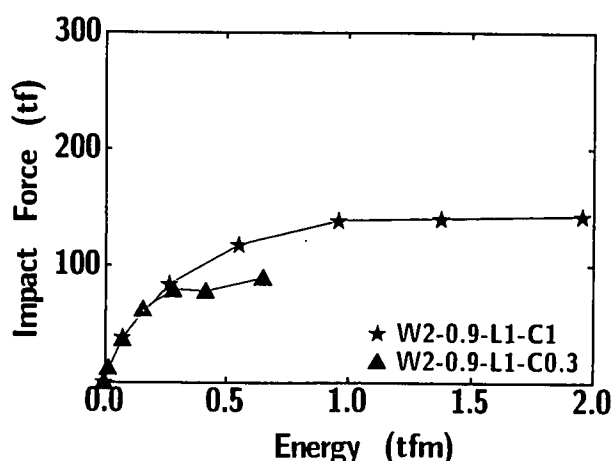
(a) 擁壁高さを変化させた場合



(b) 衝突位置を変化させた場合



(c) 擁壁幅を変化させた場合



(d) 重錘重量を変化させた場合

図-5 重錘衝撃力と重錘衝突エネルギーの関係

(c) 図の擁壁幅を変化させた場合について比較検討すると、幅 1 m, 2 m で重錘衝撃力は同様な分布を示しているが、幅 2 m の場合の終局衝突速度が幅 1 m の場合より 2 m/sec 程度小さい。これより、1) 発生衝撃力は主に擁壁の剛性に依存している。2) 本擁壁は無筋構造であることより、終局耐力は材料強度に強く依存し、有効幅は 1 m 程度であること、等が明かとなった。

(d) 図の重錘重量を変化させた場合の結果より、0.3 tf 重錘の場合には 1 tf 重錘の場合より小さい衝撃力が発生している。しかしながら、その値は後者の 1/2 程度であり重錘重量と比例したものとはなっていない。また終局衝突速度も両者 6 m/sec 程度であり、終局に至る入力エネルギーは必ずしも一定値にならないようである。

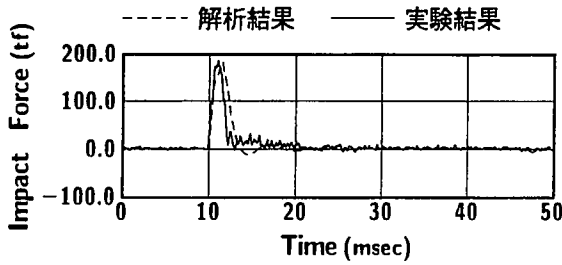
### 3.2 重錘衝撃力と重錘衝突エネルギーの関係

図-5 は繰り返し载荷実験に関する衝突時の重錘衝撃力と重錘衝突エネルギーの関係を示している。

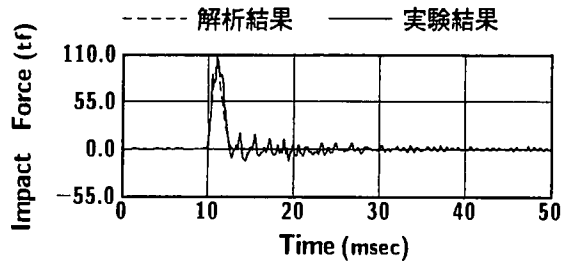
(a) 図は擁壁高さ ( $H_1$ )、(b) 図は衝突位置 ( $H_2$ )、(c) 図は擁壁延長 ( $L$ )、(d) 図は重錘重量 ( $W$ ) を変化させた場合について比較している。重錘衝突エネルギーは、重錘の衝突速度を用いて  $E = MV^2/2$  の式より求めている。(a)、(b)、(c) 図の結果は図-3 の重錘の衝突速度を横軸にとった場合と類似の性状を示していることがわかる。一方、(d) 図の重錘重量を変化させた場合の結果より、 $E = 0.25$  tfm 程度までは両者でほぼ等しい衝撃力が発生していることがわかる。これより、損傷の程度が小さい領域までは重錘重量に関わらず、入力エネルギーに対応してほぼ等しい衝撃力が発生するものと判断される。

### 3.3 実験結果と解析結果の比較

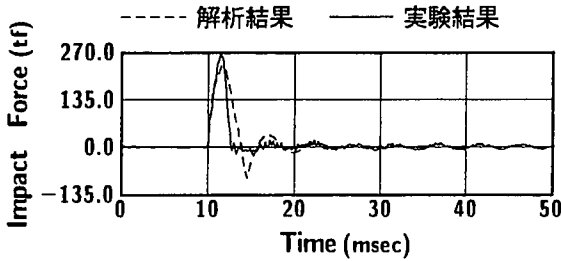
図-6 は各実験ケースにおける重錘衝撃力の応答波形に関して実験結果と解析結果を比較したものである。(a) 図は実験ケース W2-0.9-L1-S1、(b) 図は実験ケース W2-0.9-L1-S0.3、(c) 図は実験ケース W2-0.7-L1-S1、(d) 図は実験ケース W2-0.5-L1-S1 の比



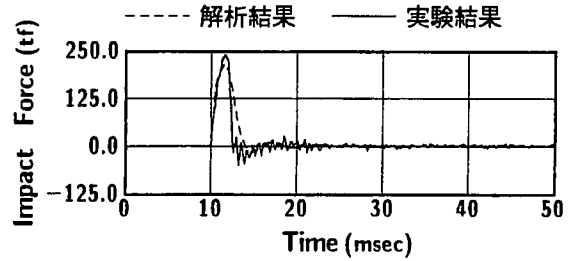
(a) 実験ケース W2-0.9-L1-S1



(b) 実験ケース W2-0.9-L1-S0.3



(c) 実験ケース W2-0.7-L1-S1



(d) 実験ケース W2-0.5-L1-S1

図-6 重錘衝撃力の応答波形に関する比較図

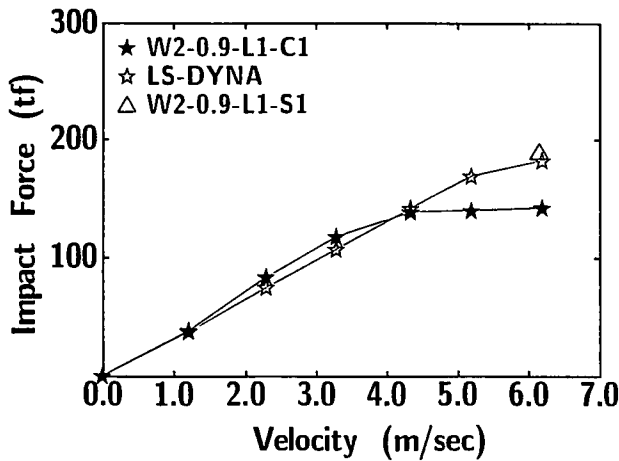
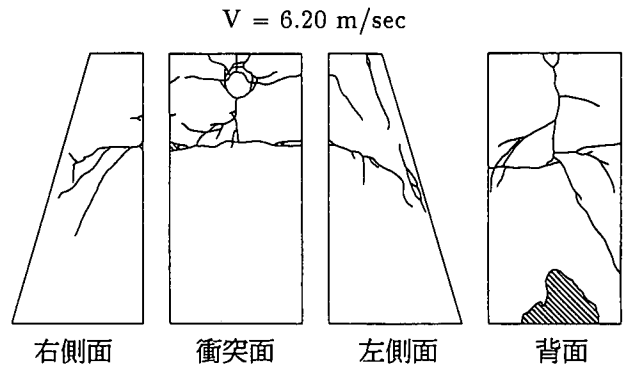


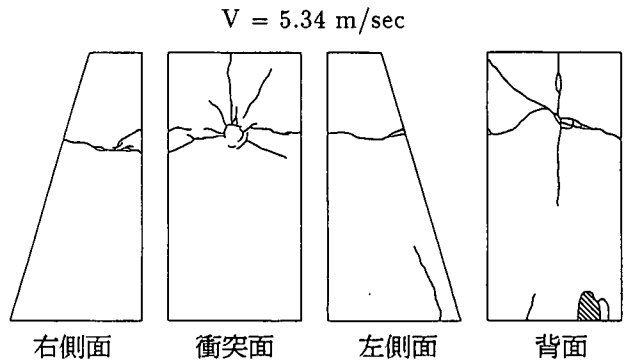
図-7 実験ケース W2-0.9-L1-C1 に関する比較図

較図である。解析結果の重錘衝撃力は、試験体に実験と同一条件で重錘を衝突させた場合のものであり、実験時の加速度計設置位置と同一箇所より得られる重錘加速度に重錘質量を乗じた値である。図より、実験ケース W2-0.7-L1-S1、W2-0.5-L1-S1 の解析結果は、実験結果より最大値が若干小さく評価されている。しかしながら、その誤差も 1 割程度と小さいことから各実験ケースの応答波形は、大略実験結果と対応しているものと推察される。以上より、本解析手法により重錘衝撃力の評価が十分可能であるものと判断される。

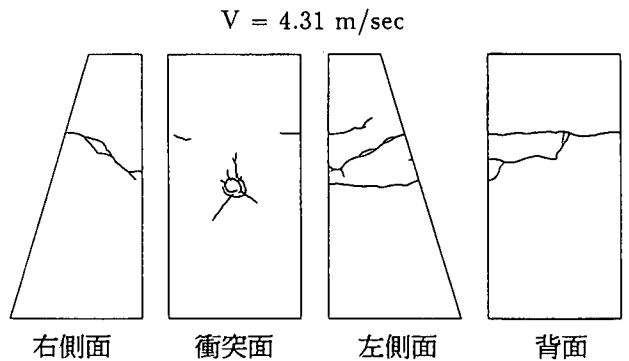
図-7 は実験ケース W2-0.9-L1-C1、W2-0.9-L1-S1 の実験結果および同一条件の試験体に、繰り返し載荷時の各衝突速度を単一載荷させた解析結果を示している。図より、1) 単一載荷と衝突速度 6.16 m/sec 時の解析結果の値がほぼ一致している。2) 衝突速度



(a) 実験ケース W2-0.9-L1-C1



(b) 実験ケース W2-0.7-L1-C1



(c) 実験ケース W2-0.5-L1-C1

図-8 ひびわれ状況図

4 m/secまでは W2-0.9-L1-C1 と解析結果が両者類似の値を示していることが分かる。これより、1) 損傷の小さい場合については数値解析によって衝撃力が推定可能であること、2) ひびわれ発生後は損傷の累積により、繰返し載荷実験による衝撃力は単一載荷のこれより小さなものとなることが明らかとなった。

### 3.4 ひびわれ状況

擁壁コンクリートのひびわれ状況は、実験終了後に記録したものである。図-8は、重量1tfの鋼製重錘を繰返し衝突させた場合のひびわれ状況図である。(a)図は実験ケース W2-0.9-L1-C1、(b)図は実験ケース W2-0.7-L1-C1、(c)図は実験ケース W2-0.5-L1-C1 である。図中に示されている数値は、各実験ケースでの最終衝突速度である。図より、(a)図の載荷点位置が  $0.9H_1$  の場合には重錘衝突位置より40cm程度下方に曲げせん断型のひびわれが発生して背面の上部には上下に走るひびわれが発生している。後者のひびわれは幅方向の曲げによるもので、上部の曲げ剛性が小さいことに起因しているものと考えられる。

(b)、(c)図の載荷点位置が  $0.7$ 、 $0.5H_1$  の場合には両者類似の載荷点を通る水平な貫通するせん断ひびわれが発生している。これは、載荷点が低いことにより載荷点部の曲げ剛性および曲げ耐力が大きくなり、純せん断型で破壊したものと推定される。

### 4. まとめ

本実験では、落石防護擁壁の現行設計法の妥当性について検討することを目的とし、擁壁の供試体形

状、重錘衝突位置、重錘重量の変化および重錘の衝突速度、重錘衝突エネルギーによる影響に着目して、落石防護擁壁の重錘衝突実験を行った。また、同一条件で行った衝撃応答解析用汎用プログラム LS-DYNA を用いた弾塑性衝撃応答解析による数値解析結果との比較を行った。本研究で得られた結果を要約すると、

- (1) 重錘衝突位置によって、コンクリート擁壁に与える重錘衝撃力が異なり、破壊形式も変化する。すなわち、載荷点位置が  $0.9H_1$  の場合は曲げせん断型、 $0.7$ 、 $0.5H_1$  の場合は純せん断型のものである。
- (2) 本実験の場合には有効幅が1m程度であり、擁壁幅を2mにした場合でも擁壁の耐力は向上しない。
- (3) 本解析手法を用いることで、単一載荷時のコンクリート擁壁に与える重錘衝撃力を評価することが可能である。

### 参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，日本道路協会，1983.7.
- 2) 松尾 修，堤 達也，近藤浩市：落石防護擁壁の安定計算法に関する実験的検討，土木技術資料 38-6，1996.
- 3) John O.Hallquist：LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 1997.9.