

高エネルギー吸収型ロックシェッドの実規模実験について

IMPACT TESTS ON FULL-SCALE PROTOTYPE ROCK-SHED
HAVING HIGH ENERGY ABSORPTION CAPABILITY

西田 陽一*, 藤井 智弘**, 山本 満明***, 庭野 隆****, 塩見 昌紀*****, 吉田 博*****, 前川 幸次*****
Yoichi NISHITA Tomohiro FUJII, Michiaki YAMAMOTO, Takashi NIWANO,
Masanori SHIOMI, Hiroshi YOSHIDA, Koji MAEGAWA

* (株) プロテックエンジニアリング 技術開発部設計課長 (〒950-0971 新潟市近江 155 番地 5)

** 工博 (株) エイ・シー・デイ 代表取締役 (〒939-1362 富山県砺波市太郎丸 3903 番地)

*** 工修 (株) エイ・シー・デイ 技術部技術課長 (〒939-1362 富山県砺波市太郎丸 3903 番地)

**** オリエンタル建設 (株) 東京支店 技術部副部長 (〒164-0012 東京都中野区本町 1-32-2)

***** 工博 日本ゼニスパイプ (株) 開発部部長 (〒103-0004 東京都中央区東日本橋 2-24-14)

***** 工博 (株) エイ・シー・デイ 社主 (〒939-1362 富山県砺波市太郎丸 3903 番地)

***** 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

キーワード: 落石覆工, 合成構造, 動的挙動, 靱性, エネルギー吸収
(rock-shed , composite structure , impulsive behavior , ductility , energy absorption)

1. はじめに

落石は, 規模の予測が極めて困難な自然災害である. そのため設計時に予測した規模以上の落石に対しても防護構造物が直ちに倒壊してしまうことなくエネルギーを吸収しながら変形し, 生存空間を確保することが望まれる¹⁾. しかし, これまでのロックシェッドでは, 変形能力に限界があり, 大きなエネルギー吸収性能を有するロックシェッドの開発が期待されていた. 写真.1 に示す高エネルギー吸収型ロックシェッドは, 主構にアンボンドPC鋼材を配したコンクリート充填鋼管^{2,3)}を用い, スラブを鋼・コ

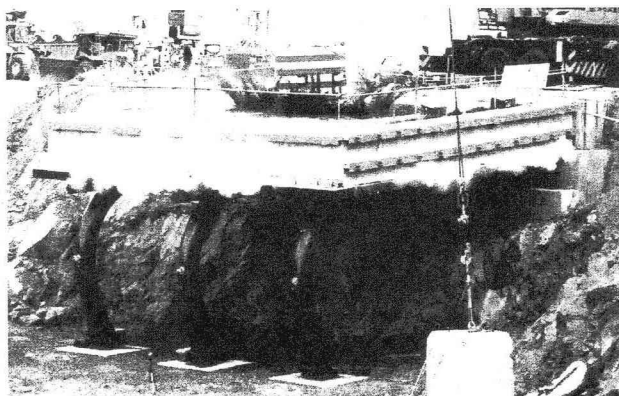


写真.1 実験供試体

ンクリート複合構造とすることで大きな変形性能を期待できる構造物である.

本研究では, 実物大モデルの高エネルギー吸収型ロックシェッドの破壊挙動を解明することを目的としており, 質量 10.4ton および 21.6ton の重錘を高さ 20m~37m の位置から, 屋根上に自由落下させることで破壊挙動を確認した. また質量 3.1ton の重錘を落下させた弾性範囲内の衝撃試験も行ったがこれについては, 稿を改めて発表する予定である.

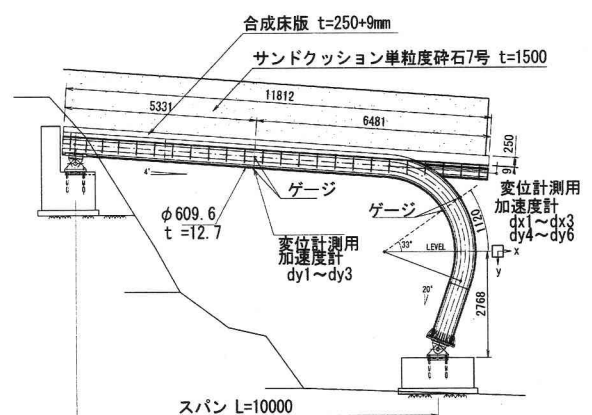


図.1 供試体形状図

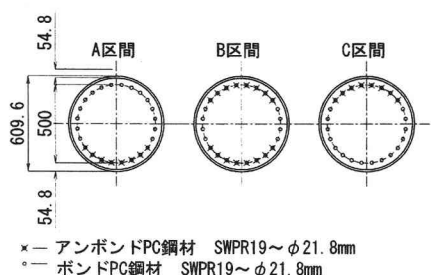
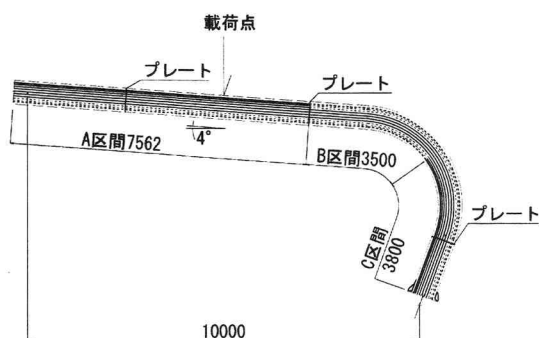


図. 2 供試体 PC 鋼材配置

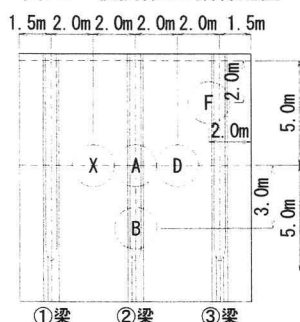


図. 3 載荷位置図

2. 実験の概要

2.1 実験供試体

供試体の形状図を図. 1 に示し、供試体の材料諸元を表. 1 に示す。

主構造は、スパン 10m、主構間隔 4.0m であり、鋼・コンクリート合成スラブによって主構を連結した。また、支持条件は、鋼製ピンを使用した 2 ヒンジ構造となっている。主構の製作は、高周波曲げ加工 ($R=2250\text{mm}$) を施した鋼管に、PC 鋼より線を配置した後、鋼管を縦にして高流動コンクリートを打設した。また PC 鋼より線は、製作の都合上全周配置とし、図. 2 に示すようなアンボンド区間とボンド区間を設けた。

一方、合成スラブは鋼板に主梁直角方向に 500mm 間隔で CT 形鋼を溶接した鋼パネルを製作し、主構と連結した後に厚さ 250mm でコンクリートを打設した。またスラブと主構の連結部および鋼パネルの連結部は、ハイテンションボルトで連結した後に片

表. 1 材料諸元

	材 料	規 格
主 梁	鋼 管	SKK400 ϕ 609.8 t=12.7mm
	PC鋼材	SWPR19 1S21.8
	コンクリート	$\sigma_{ck}=50 \text{ N/mm}^2$
スラブ	コンクリート	$\sigma_{ck}=40 \text{ N/mm}^2$
	下面鋼板	SM490A t=9mm
	CT形鋼	SM490 CT-147×200×8×12
	鉄筋	SD345 D19

表. 2 実験ケース

実験ケース	重錘質量 ton	落下高 m	入力エネルギー kJ	最大重錘衝撃力 kN	載荷位置
AH1020	10.4	20.00	2038	5784	A
AH2030	21.6	30.00	6350	10940	A
AH2037	21.6	37.00	7832	14114	A
DH1020	10.4	20.00	2038	6175	D
XH2037	21.6	37.00	7832	13857	X
BH2037	21.6	37.00	7832	12869	B
FH2037	21.6	37.00	7832	11783	F

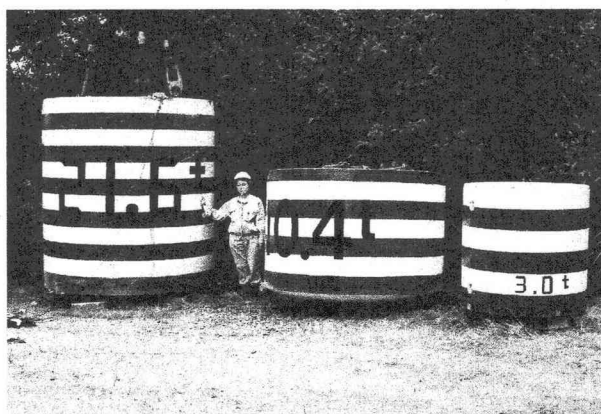


写真. 2 実験に使用した重錘

側隅肉溶接を行っている。

2.2 載荷方法

実験ケースおよび載荷諸元を表. 2 に示し、載荷位置図を図. 3 に示す。載荷は、重錘をトラッククレーンで所定の高さまで持ち上げ、エア一式離脱装置を用いて自由落下させた。また繰り返し載荷を行った載荷点 A においては、緩衝材が閉め固まらないように載荷ごとに緩衝材をほぐし、載荷を行った。なお、質量 10.4ton および 21.6ton の重錘は、それぞれ ϕ 1950mm、 ϕ 2120mm の推進用ヒューム管を型枠代わりとして内部にコンクリートを充填して製作した。実験に使用した重錘を写真. 2 に示す。

2.3 計測項目および計測方法

計測項目は、重錘加速度、スラブのひずみ、鋼管のひずみおよび主構、スラブの変位とし、センサーからのアナログ信号を増幅し 0.2msec 間隔でデジタ

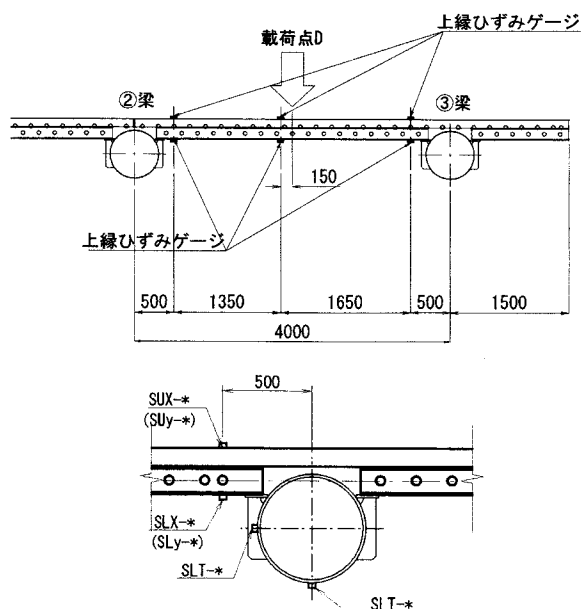


図. 4 ひずみゲージ貼り付け位置

ル量として記録した。なお変位は、各主構のスパン中央部と主構曲線部に加速度計を取付けその応答値を積分して変位とした。図. 1 および図. 4 に、計測位置の概要図を示す。

また、変形状況を確認するため高速ビデオカメラを用い毎秒 200 コマで撮影を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 重錘衝撃力

図. 5 に、重錘衝撃力の経時変化を示す。質量 10.4ton の重錘を落下高さ 20m から落下させた AH1020 と DH1020 の最大衝撃力は、約 6000kN とほぼ同じ値を示している。また、質量 21.6ton の重錘を 37m から落下させた AH2037 と XH2037 の最大衝撃力についても約 14000kN とほぼ同じ値となっており、落下位置による重錘衝撃力の大きな差異はなかった。このことから本構造においては、構造物の剛性の影響がスラブ上と主梁上でほとんど影響がなく、スラブ上に載荷した場合でも合成スラブを介して一様に主構に伝達されていることが推定できる。

次に重錘衝撃力と現在一般的にロックシェッドの設計に使用されている落石対策便覧式⁴⁾ (以下便覧式) による衝撃力 ($\lambda=1000\text{kN/m}^2$) の比較を行った。

図. 6 は、横軸に便覧式による衝撃力、縦軸に最大重錘衝撃力を示したものである。なお、便覧式による衝撃力は、緩衝材の敷厚が 1.5m であったため緩衝材厚と重錘径による補正を行っている。この図より重錘衝撃力がやや理論値よりも大きい値を示して

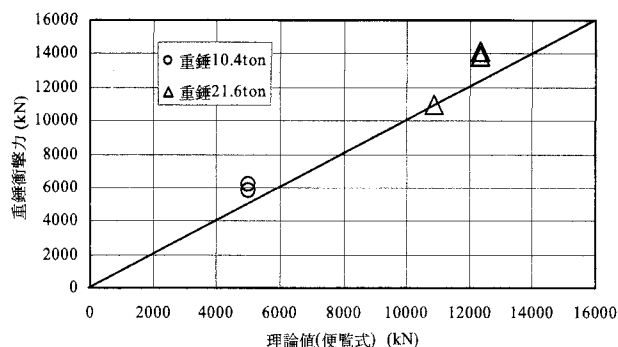


図. 6 重錘衝撃力と便覧式関係

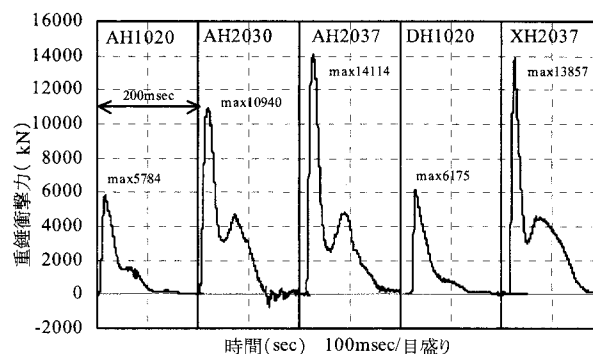


図. 5 重錘衝撃力の経時変化

いるが概ね近似しているものと判断できる。

3.2 変位

図. 7 は、載荷位置 A (②梁・スパン中央) および載荷点 D (②梁-③梁間スラブ中央・スパン中央) における各主構の変位の経時変化を示し、各主構の最大変位の合計を 1 として算出した主構の分担率を表. 3 に示す。

②梁スパン中央部に載荷した載荷梁の荷重分担率は、

表. 3 主構の荷重分担率

CASE	①梁	②梁	③梁
AH1020	0.25	0.56	0.19
AH2030	0.20	0.61	0.19
AH2037	0.19	0.66	0.15
DH1020	0.11	0.42	0.47

AH1020 で 0.56, AH2030 で 0.61, AH2037 では 0.66 となっている。

一方、スラブ中央部に載荷した DH1020 では、②梁で 0.42, ③梁で 0.48, ①梁で 0.11 となっている。

これらから、中央主構に載荷した場合、部材が塑性化した後においても、分担率として約 0.6~0.7 程度見込めるとものと推定できる。

またスラブ中央部に載荷した場合では、スラブを支持する主構への分担率は、連続している主構側に約 0.4 程度、端主構側に約 0.5 程度であると推定できる。

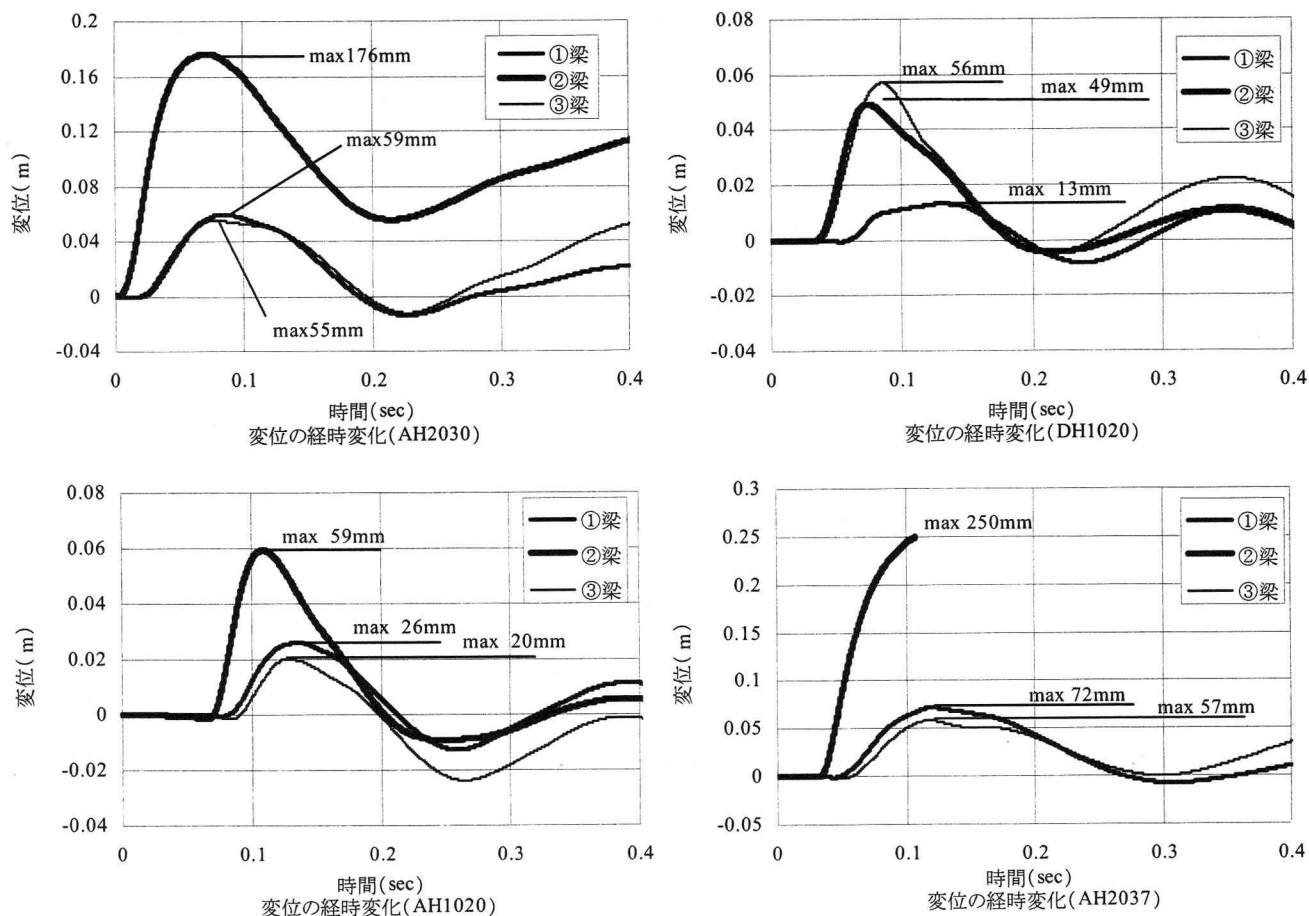


図. 7 スパン中央部変位の経時変化

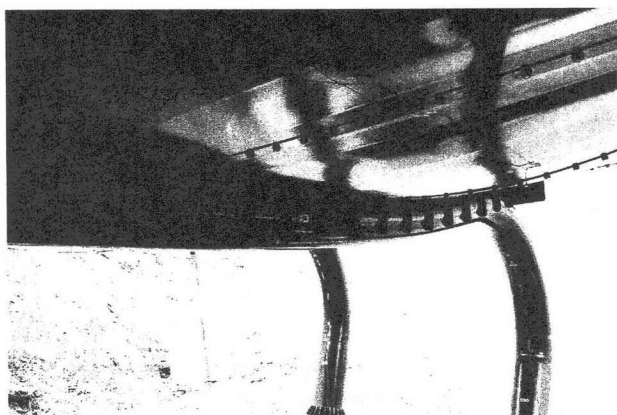


写真. 3 ②梁履歴載荷完了後の変形状況

②梁への履歴載荷終了後の変形状況を写真. 3 に示す。

②梁の履歴載荷終了後の残留変位は、199mm であり、載荷完了後の最終残留変位は、399mm であった。

約 7800kJ の載荷エネルギーを数回与えても、供試体内の生存空間は保たれていることから、本構造物の目的から考えれば耐落石エネルギーとして 7800kJ 以上の性能があると言える。

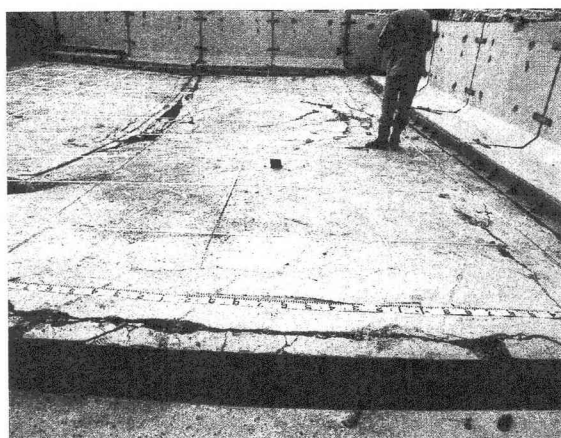


写真. 4 実験完了後のスラブコンクリートの状況

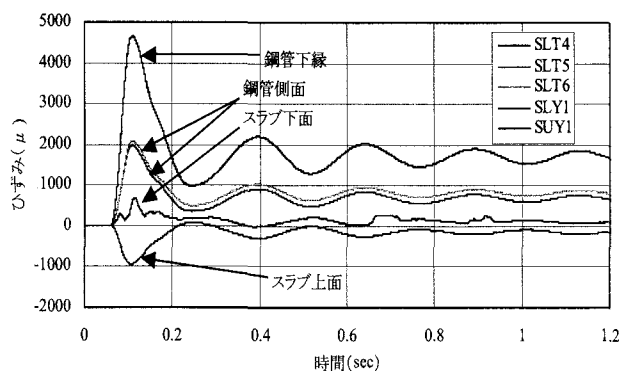
3.3 ひずみ

(1) 主梁軸方向の主構のひずみ

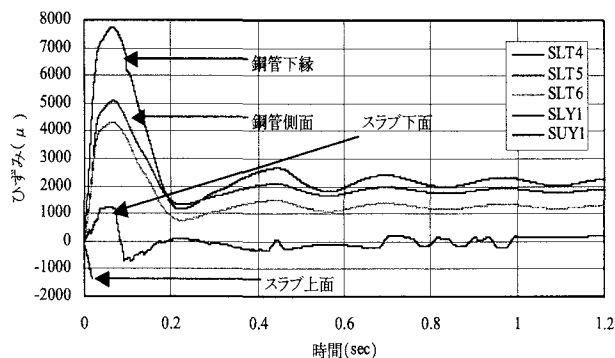
図. 8 は、AH1020 および AH2030 における載荷梁のひずみの経時変化を示している。

重錘質量 10.4ton を落下させた AH1020 のひずみは、立ち上がりから約 0.04sec でピーク値を示した後に、約 0.25sec の周期で緩やかに振動している。

重錘質量 21.6ton を使用した AH2030 のひずみは、立ち上がりから約 0.08sec でピーク値を示し AH1020 同様、約 0.25sec の周期で振動している。また、本

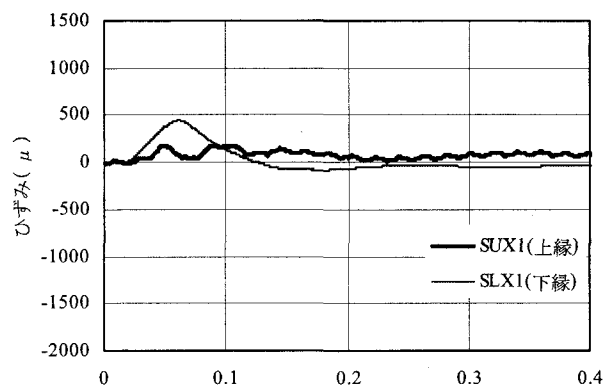


鋼管②中央ひずみの経時変化(AH1020)

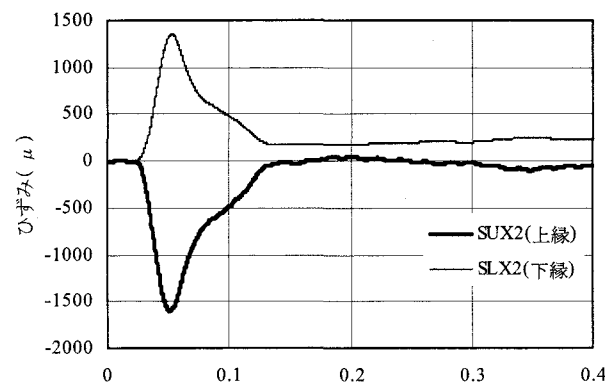


鋼管②中央ひずみの経時変化(AH2030)

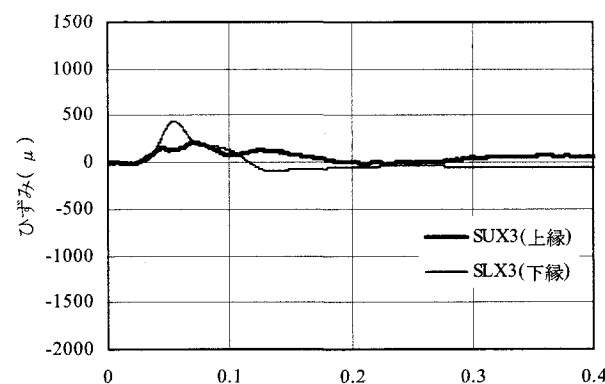
図. 8 ②梁スパン中央部ひずみの経時変化



スラブひずみ(鋼管②側)の経時変化(DH1020)



スラブひずみ(鋼管②③中央)の経時変化(DH1020)



スラブひずみ(鋼管③側)の経時変化(DH1020)

図. 10 主梁直角方向スラブひずみの経時変化

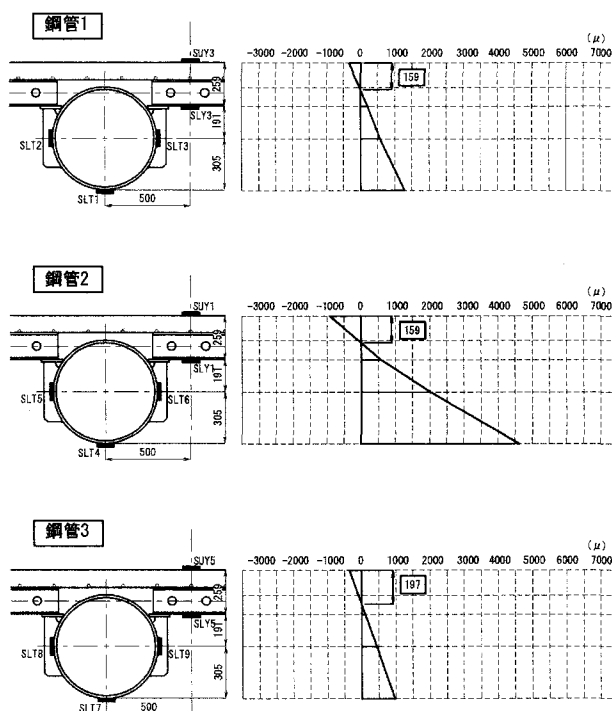


図. 9 最大ひずみ分布図(AH1020)

ケースでは、スラブ上縁コンクリートにクラックが発生したためスラブ上縁ひずみが計測不能となった。

図. 9 は、AH1020 の最大ひずみ時におけるスパン中央部でのひずみ分布を示している。

ひずみ分布は、各断面とも直線となっていること

から、鋼管と合成スラブは、スラブコンクリートが圧壊するまでは概ね合成された挙動を示しているものと推測できる。また、上縁コンクリートひずみに着目すると AH1020 では、約 1000μ 程度の応答となっておりスラブコンクリートのヤング係数 $3.3E+4N/mm^2$ ($\sigma_{ck}=40N/mm^2$) を乗じると約 $33N/mm^2$ の圧縮応力が作用していることとなる。

このことから上縁コンクリートの圧縮応力度が設計基準強度に達した状態を使用限界状態と考えた場合、入力エネルギーとして約 $2000kJ$ (AH1020) 程

度の載荷状態が使用限界状態であると考えられる。

写真. 4に実験完了後の、スラブコンクリートのクラックの状況を示す。

(2) 主梁軸直角方向のスラブのひずみ

図. 10 は、DH1020 における主梁軸直角方向のスラブひずみの経時変化を示している。

スラブのひずみは、載荷点下縁のピーク時で約 1300μ 、上縁で -1600μ となっている。一方、②梁主構側および③主構側では、下縁、上縁とも引張ひずみとなっており曲げの影響をあまり受けていないことがわかる。

このことからスラブの支持条件は、主梁に支持されたヒンジ支点として挙動していることが推測できる。

4. まとめ

アンボンド PC 鋼材を鋼管内部に配し、コンクリートを充填した主構をもつ高エネルギー吸収型ロックシェッドの破壊挙動の確認を目的として質量 10.4ton および 21.6ton の重錘を落下高さ $20\text{m}\sim 37\text{m}$ から落下させたが、主構は、生存空間を侵すような破壊をすることなく衝撃力を吸収することができ、各計測項目から次のことが確認された。

(1) 重錘衝撃力は、落下位置によることなく、概ね同じ値を示していることから衝撃力は、合成スラブを介して一様に主構に伝達されていることが推定できる。またその衝撃力は、便覧式で計算された衝撃力とほぼ同じであった。

(2) スパン中央部に取付けた加速度計を積分して得られた変位から主構上のスパン中央部に載荷した場合、載荷梁の荷重分担率は約 $0.6\sim 0.7$ 程度、スラブ中央部に載荷した場合で連続する主構側に約 0.4 程度、端主構側に約 0.5 程度であると推定できる。

(3) 鋼管とボルトおよび溶接によって結合された合成スラブは、主梁軸方向のひずみ分布が断面内で直線となっていることからスラブコンクリートが圧壊するまではスラブと鋼管は、一体として挙動していると推定できる。

(4) スラブ上縁コンクリートの圧縮ひずみから、スラブコンクリートの圧縮応力度が設計基準強度に達した状態を使用限界状態と考えた場合、本構造物の使用限界状態の耐落石エネルギーは、約 2000kJ 程度と考えられる。

また実験完了後の変形状態は、生存空間を十分保持しており終局状態の耐落石エネルギーは、約 7800kJ 以上はあると考えられ、使用限界状態の約 4 倍であった。

(5) 合成スラブの主梁直角方向の支持条件は、主梁側のひずみ分布が曲げの影響をあまり受けていないことから主梁直角方向では、主梁に支持されたヒンジ支点として挙動していることが推測できる。

今後これらの実験の逆解析を実施し、本構造物の弾性域から塑性域までの設計手法を確立する予定である。

参考文献

- 1) 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) 前川幸二, 吉田博：コンクリート充填鋼管はりの静的および重錘衝撃実験, 土木学会論文集, No.513/I-31 pp.117-127,1995 年 4 月
- 3) 石谷留美子, 藤井智弘, 西田陽一, 吉田博, 大森清武, 前川幸二：コンクリート充填鋼はりの静的および動的挙動について, 第 5 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集 pp285-290
- 4) 日本道路協会：落石対策便覧,2000.6