

高エネルギー吸収型ロックシェッドにおける屋根スラブの実規模実験について

IMPACT TESTS ON FULL-SCALE STEEL-CONCRETE COMPOSITE SLAB INSTALLED
IN HIGH ENERGY ABSORBING ROCK-SHED

石谷留美子*, 西田陽一**, 井上昭一***, 大森清武****, 渡辺綾子*****, 吉田博*****, 前川幸次*****

Rumiko ISHITANI, Yoichi NISHITA, Shoichi INOUE, Kiyotake OHMORI,

Ayako WATANABE, Hiroshi YOSHIDA, Koji MAEGAWA

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

** (株) プロテックエンジニアリング 技術開発部 設計課長 (〒950-1971 新潟市近江 155 番地 5)

*** 工修 (株) プロテックエンジニアリング 技術開発部長 (〒950-1971 新潟市近江 155 番地 5)

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

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

***** 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, 鋼-コンクリート複合スラブ, 合成構造, 動的挙動
(rock-shed, steel-concrete composite slab, composite structure, impulsive behavior)

1. はじめに

我が国の国土は、4 分の 3 が山地で急峻な地形と脆弱な地質であるうえ、豪雨・豪雪の環境下にもあり、また世界で有数の地震国であるという極めて厳しい自然条件下にある。最近では、平成 8 年 2 月の豊浜トンネルや平成 9 年 8 月の第 2 白糸トンネルにおける大規模な岩盤崩落、平成 10 年 8 月末の豪雨による落石災害が起きている。このような落石による災害を未然に防止するための、多種多様な落石対策工法が実施されている。

しかしながら、落石の規模の予測は極めて困難であり、防護構造物には設計当初に予測した落石規模以上の落石に対して、直ちに破壊することなく変形し、必要な空間を確保することが望まれる¹⁾。

現在、落石防護構造物として用いられている鉄筋コンクリートおよびプレストレストコンクリート構造物では、このような変形性能は期待できない。著者らは、一定の強度を保持したまま、大きい変形能力を有する部材 (アンボンド P C 鋼材を挿入したコンクリート充填鋼管, concrete-filled steel tube, 以後

CFST 部材という) の開発に成功し^{2,3)}、この CFST 部材を用いた落石覆工 (ロックシェッドともいう) を考案した。

本研究では、落石覆工の屋根部分に関する基礎的な実験データを集積・分析し、屋根スラブの耐荷力・破壊挙動等の評価から実構造への適用性についての見地を得ることを目的に、実物規模の衝撃実験を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体

屋根スラブ供試体は以下の理由から下面を鋼板で覆った鋼・コンクリート複合構造とした。

- (1) P C 部材や R C 部材に比べて靱性の高い部材となる。
- (2) 衝撃荷重により万が一、構造物が破壊に至った場合においても、コンクリート片などが道路に落下するのを防ぐことができる。
- (3) コンクリートの打設時に型枠を省略できるため、作業効率の向上およびコスト縮減を期待できる。

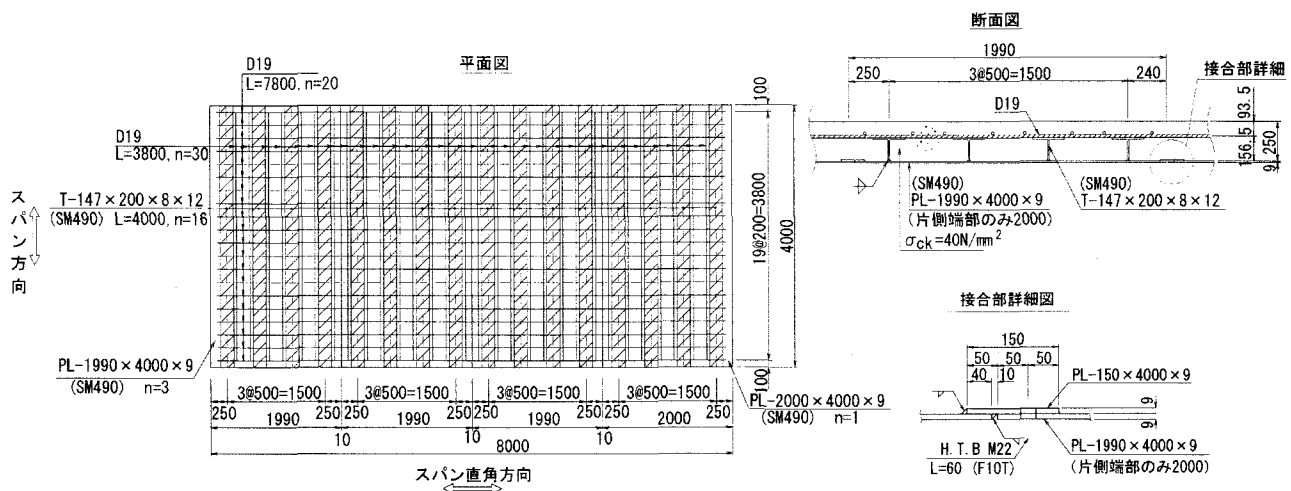


図-1 供試体の形状

表-1 材料特性

品名・寸法	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
鋼板(t=9mm,6mm) (SM490)	325	490~610	17 以上
CT 形鋼(147×200 ×8×12,L=4000) (SM490)	325	490~610	17 以上
鉄筋 D19 (SD295)	295	440~600	16 以上
コンクリート	$\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$		

図-1 に供試体の形状を、表-1 に供試体に使用した材料の特性値を示す。

供試体は、2m×4m の鋼板 (t=9mm) をハイテンションボルト(M22)により4枚連結して4m×8mとし、小口部に幅250mmの鋼板(t=6mm)を溶接したものに、厚さ250mmでコンクリートを打設して製作した。鋼板にはCT形鋼をスパン直角方向に500mm間隔で溶接し、CT形鋼のウェブ中心にはコンクリートとの合成効果および打設性を高めるために、200mm間隔でφ50mmの穴加工を行った。また、スラブ全体に鉄筋D19をスパン直角方向に200mm間隔、スパン方向に200~30mm間隔で配置した。なお設計衝撃力は2500kNである。

この供試体をH型鋼とボックスカルバートを用いた実験架台にスパン3.6m(スパン直角方向8.0m)で支持し、衝撃荷重作用時の浮き上がり防止のため架台のH鋼と供試体を全ねじボルトで固定した。

3. 落錐式衝撃載荷試験

3.1 実験方法

実験は、屋根スラブを4m×4mに2分し、片側で弾性的な挙動の照査を目的とした漸増載荷を、もう一方で破壊時の挙動の照査を目的とした一発載荷を行った。いずれのケースもスラブ上に土槽を設け、緩衝材として単粒度砕石7号を敷き詰めた。表-2に各ケースの落下条件を示す。

表-2 衝撃載荷試験 落下条件

実験 NO.	重錘質量	落下高	緩衝材厚
RS1003	9.8t	3 m	1.5m
RS1006		6 m	
RS1010		10 m	
OS1041		41 m	0.9m

実験に用いた重錘は、下水道推進工法用管(内径1200mm,肉厚115mm,長さ2430mm)に設計基準強度 $\sigma_{ck}=21\text{N/mm}^2$ 以上のコンクリートを充填したものであり、底面を高さ30cm程度の球底形状となるよう仕上げた。この重錘を油圧式160tクレーンによって所定の落下高まで吊り上げ、屋根スラブの4m×4mの中心に自由落下させた。図-2に重錘の形状を示す。

測定項目は重錘加速度、緩衝材底面の衝撃圧、支点反力、載荷点および支点変位、スラブ上下面のひずみとした。なお、OS1041は破壊を目的としているため支点反力、緩衝材底面の衝撃圧を計測する荷重計、載荷点変位計は設置しなかった。

図-3 に実験装置の概要を、図-4 に各測定項目の測定箇所を示す。

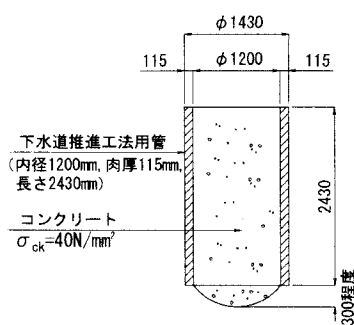


図-2 重錘の形状

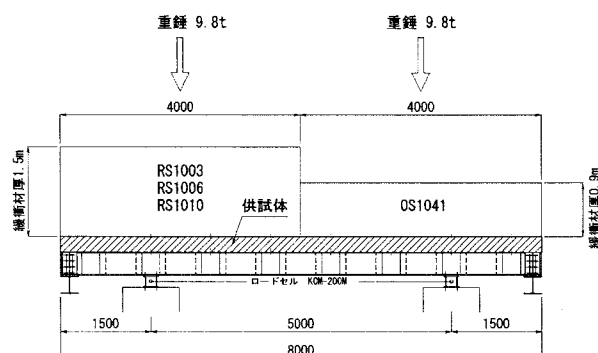


図-3 実験装置の概要

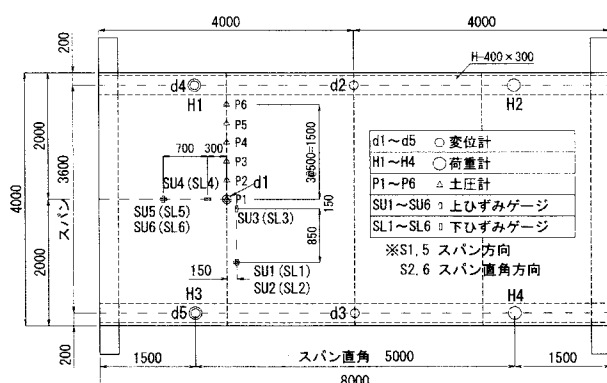


図-4 測定箇所

計測値は、アナログ信号を増幅し 0.1msec 間隔でデジタル値としてデータレコーダーに記録した。また、供試体の挙動を確認するために高速度カメラを用い、毎秒 200 コマで 8 秒間撮影した。

また、重錘落下後は、重錘の緩衝材への貫入量、屋根スラブの破壊形状を測定記録した。

3.2 実験結果と考察

弾性範囲内の漸増載荷試験である RS1003～RS1010 載荷後の合成スラブはほぼ健全な状態であったが、破壊時の挙動照査を目的とした OS1041 に

おいてはスラブ鋼板接合部のハイテンションボルトが水平せん断で破断し、引張縁側の抵抗力を失い破壊に至った。

以下に、各測定値および測定値から計算された値について、実験結果を述べ考察を行う。

(1) 各衝撃力の比較

図-5 は、重錘質量に重錘加速度を乗じた重錘衝撃力、緩衝材底面の各位置の衝撃圧を積分した伝達衝撃力、および支点反力合計の経時変化をケースごとに示したものである (OS1041 は破壊を目的としており荷重計を設置しなかったため重錘衝撃力のみである。).

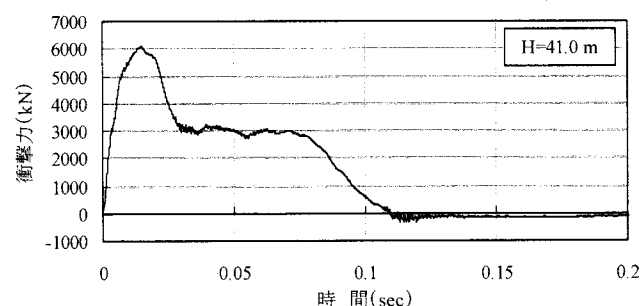
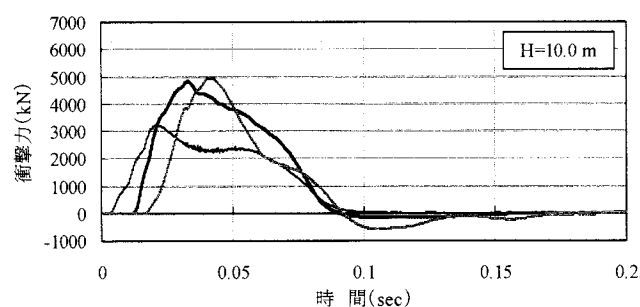
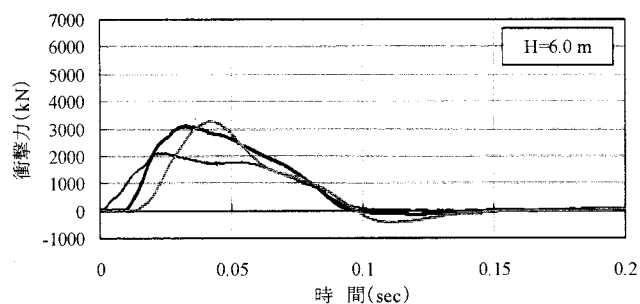
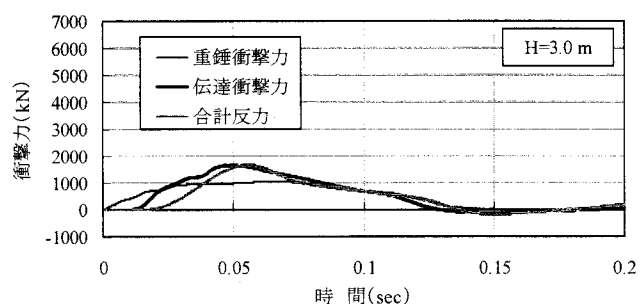


図-5 各ケースにおける衝撃力の経時変化

これらの図より、次のことがいえる。

- 1) 荷重の立ち上がり順序は、全てのケースにおいて、最初に重錘衝撃力、順次伝達衝撃力、支点反力の順序で立ち上がっている。このことは、力の伝達する順序をうまく表現している。また、どの衝撃力も重錘の落下速度に比例して立ち上がりから最大値に至るまでの時刻が早くなり、逆に反応時間は速度に反比例して短くなっているのが分かる。
- 2) 伝達衝撃力の波形と支点反力合計の波形は、非常によく似た波形を示しており、最大値もRS1003において1660kN、1670kN、RS1006において3100kN、3260kN、RS1010において4810kN、4930kNと近似した値となっている。
- 3) 伝達衝撃力と重錘衝撃力の最大値は、RS1003において1660kN、1060kN、RS1006において3100kN、2120kN、RS1010において4810kN、3250kNとなっており、全てのケースにおいて伝達衝撃力が重錘衝撃力の最大値の約1.5倍程度となっていることが分かる。

(2) 変位

図-6 に各ケースの支点沈下を差し引いた載荷点中央変位の経時変化を示す。

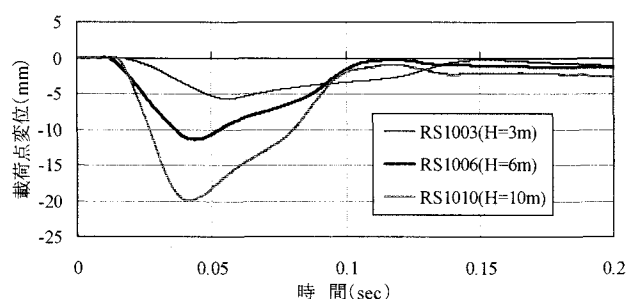


図-6 各ケースにおける載荷点変位の経時変化

この図より、次のことがいえる。

- 1) RS1003 においては、立ち上がりから約 0.05sec で最大値約 5.7mm となっており、その後約 0.1sec 間に緩やかに減少している。残留変位は約 1.1mm であった。
- 2) RS1006 においては、立ち上がりから約 0.03sec で最大値約 11.4mm となっている。その後約 0.1sec 間に緩やかに減少し、残留変位は約 1.6mm であった。
- 3) RS1010 においては、立ち上がりから約 0.03sec で最大値約 20.0mm となっている。その後約

0.1sec 間に緩やかに減少し、残留変位は約 3.0mm であった。

- 4) これらの最大値の時刻は、図-4 で示した支点反力合計の最大値の時刻とも一致していることが分かる。

図-7 に伝達衝撃力と載荷点中央変位との関係を示す。この図より、両者の関係がほぼ直線で表されることから、RS1003～RS1010 においてスラブは弾性的な挙動を示しているといえる。

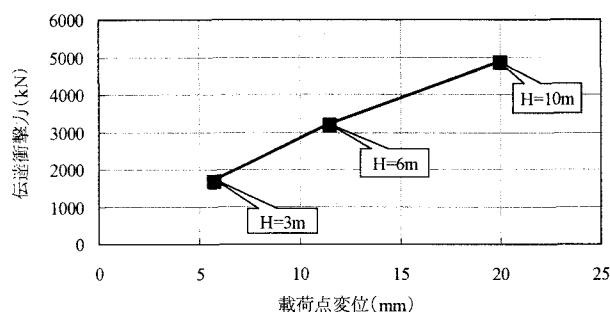
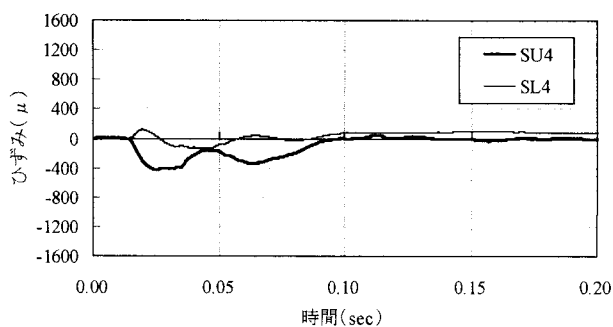


図-7 衝撃力と載荷点変位の関係

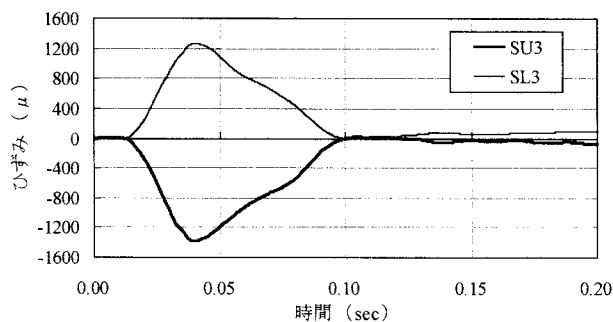
(3) 屋根スラブひずみ

図-8 はRS1010 におけるSU3,SL3 (Uは上縁側コンクリートひずみ、Lは下縁側鋼板ひずみ)とSU4,SL4 のひずみの経時変化を示す。まずスパン方向のSU3, SL3 であるが、ともに立ち上がりから約 0.03sec でそれぞれ最大値約 1390 μ 、1260 μ となっており約 0.06sec 後に消滅している。両者の波形はほぼ対称となっており、中立軸が図心軸とほぼ一致していると考えられるため、弾性的な挙動を示しているものと考えられる。次にスパン直角方向のSU4, SL4 であるが、S3 とは異なった複雑な挙動を示しているのが分かる。これは、貼り付け箇所が鋼板接合部であり、その影響を受けたためと思われる。その他の計測箇所のひずみは、S3 同様上下面で対称な波形であった。

図-9 に漸増載荷試験における伝達衝撃力とスパン方向ひずみの関係を示す。まず貼り付け箇所で計測値を比較してみると、S3 と S3 からスパン直角方向に 1m 離れた S5 は上下面ともに近似値となっているが、S3 からスパン方向に 1m 離れた S1 は、S3 の約半分の値となっている。これは S1 が支点に近いためであり、単純梁と考えた場合の S3 と S1 のモーメントの関係とほぼ一致している。また、衝撃力とひずみの関係がほぼ直線で表されることからスラブは弾性的な挙動を示しているといえる。



スパン直角方向ひずみの経時変化 (S 4)



スパン方向ひずみの経時変化 (S 3)

図-8 スラブひずみの経時変化 (RS1010)

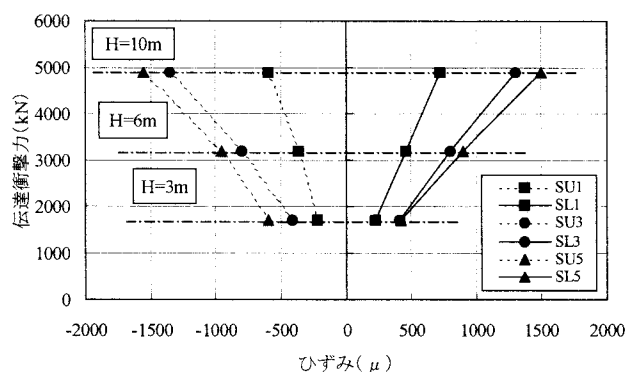


図-9 衝撃力とスパン方向ひずみの関係

OS1041 においては、供試体が破壊に至ったため、ほとんどのゲージが測定不能となった。図-10 に載荷点スパン方向ひずみ SU3,SL3 の経時変化を示す。

この図より、ひずみは立ち上がりから約 0.01sec までは、ほぼ対称な波形を示し、SL3 のひずみが約 0.01sec 間継続した後、約 25000 μ まで急増している。これは、上面コンクリートひずみが終局ひずみに達し、コンクリートが圧壊したためと考えられる。また、SL3 は、ピークに達した後、12000 μ 程度まで急減し、その後は、緩やかに減少している。これは、下面鋼板を接続していたボルトが切断されたためと考えられる。

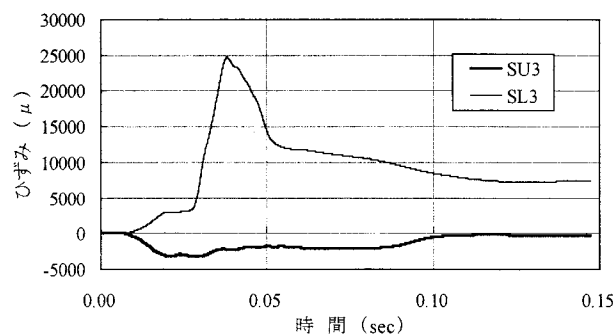


図-10 載荷点スパン方向ひずみの経時変化 (OS1041)

(4) 緩衝材への貫入量

図-11 は、各ケースで測定したスパン方向の緩衝材への貫入量を示したものである。なお OS1041 はスラブが破壊し、緩衝材がスラブ下面からこぼれたため計測はできなかった。

この図からサンドクッションの貫入量は、RS1003 が約 470mm、RS1006 が約 410mm、RS1010 が約 490mm であり、落下高が変わっても大きな差が見られないことが分かる。これは図-2 の重錘形状からも分かるように重錘底面の推進管部分が平らであったため、抵抗を受けて貫入しなかったからではないかと思われる。また、RS1006 は RS1003 より貫入量が少ないが、これは RS1003 の载荷によって緩衝材の空隙が埋まり、RS1003 载荷前より締まった土となっていたためではないかと考えられる。

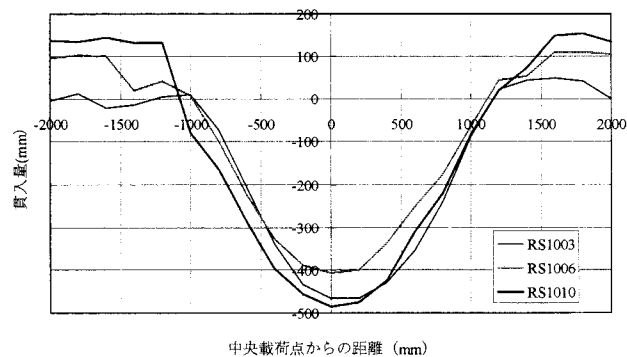


図-11 緩衝材の貫入量

(5) 屋根スラブ破壊形状

図-12 は、OS1041 で破壊した屋根スラブ上面のクラック状況をスケッチしたものである。

図のようにクラックは載荷点を中心とした同心円状に入っており、最大変位は中央部で約 40cm であった。

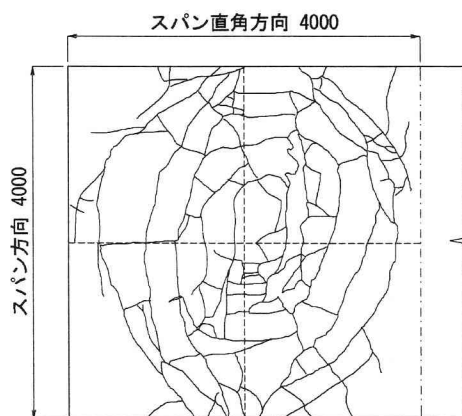


図-12 スラブ上面のクラック図

写真-1 にスラブ下面の破壊状況を示す。この写真から、スラブ下面の鋼板を連結していたボルトがせん断力によって切断され、鋼板と鋼板の間が完全に開いていることが分かる。隙間から見える中のコンクリートも完全に圧壊していた。

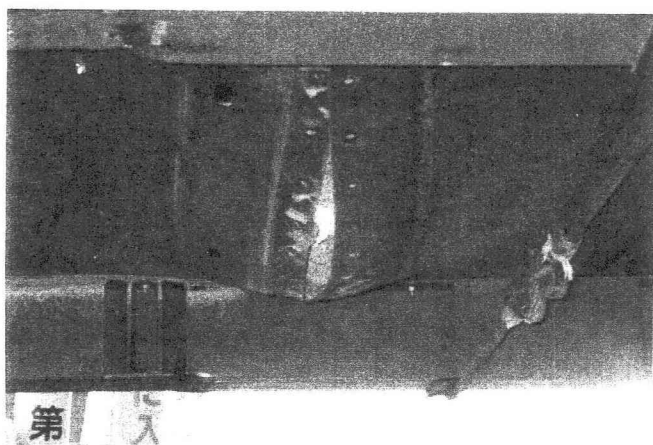


写真-1 スラブ下面の破壊状況

破壊形態から判断すると、スラブの最終破壊形態は、コンクリートの圧壊と下面のボルトがせん断力

により切断されたことによる押し抜きせん断破壊型であったと言える。

4. まとめ

屋根スラブ緩衝材に単粒度碎石 7 号(厚さ 150cm)を敷設し落錘式衝撃試験を行った結果、設計衝撃力 2500kN で設計された屋根スラブは、衝撃力約 5000kN をうけても弾性的な挙動を示し、CFST 部材を用いたロックシェッドの弱点とならないことが確認された。

本実験で得られたことを下記に示す。

- (1) 弾性挙動の確認では、衝撃力 5000kN においても十分な耐力が確認された。
- (2) 破壊を目的として行った、砂厚を 90cm、重錘質量 9.8kN、重錘落下高さ 41m の衝撃実験では、屋根スラブ下面のボルトがせん断力により切断され、スラブは押し抜きせん断破壊した。このことから、鋼板接合部が弱点となることが予想されるため、接合方法については今後検討を進めていきたい。

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管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