

(30) 有孔鋼管・コンクリート複合はりの載荷実験と実構造物への応用

LOADING TEST ON PERFORATED STEEL TUBE-REINFORCED CONCRETE COMPOSITE BEAMS
AND APPLICATION TO THE DESIGN OF PRACTICAL CONSTRUCTION塩見昌紀^{*}, 前川幸次^{**}, 吉田 博^{***}, 淵上正浩^{****}

Masanori SHIOMI, Kouji MAEGAWA, Hiroshi YOSHIDA, Masahiro FUCHIGAMI

^{*} 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 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920-0942 金沢市小立野 2丁目)^{***} 工博 (株)エイ・シー・デイ代表取締役 (〒939-13 砺波市太郎丸 3903)^{****} (株)エイ・シー・デイ設計課長 (〒939-13 砺波市太郎丸 3903)キーワード: 鋼管, 靱性, エネルギー吸収, ロックシェッド
(steel tube, ductility, energy absorption, rockshed)

1. はじめに

現在の落石覆工は, 落石の衝撃力を静的な力に置き換え, 許容応力度法により設計されている¹⁾. しかし, 落石の発生, 落下挙動, 衝撃力の推定などに不確定要素が多いことなどから, 構造物の耐用期間内にしばしば発生する落石規模に対しては許容応力度法による使用限界状態の検討を行い, 耐用期間内に発生する確率の極めて小さい大規模の落石に対しては生存空間の確保を前提として耐力を維持したまま大きな変形を許容する終局限界状態での検討を行うのがよいとされている²⁾.

衝撃的な荷重が作用する落石防護構造物においては, このような終局限界状態に対する大きい変形を期待するためには, 十分なせん断強度と曲げに対する大きい靱性が必要である. 鉄筋コンクリートはり(以下 RC ばり)やプレストレストコンクリートはり(以下 PC ばり)が十分な変形能を示さない理由として, 終局状態での圧縮領域におけるコンクリートの圧壊と圧縮鉄筋の座屈が考えられる. 文献3)では, RC ばりおよび PC ばりの圧縮鉄筋に代えて鋼管を配置することにより, 靱性が付与されることを静的および衝撃曲げ載荷実験を行って報告している.

また, 使用限界状態における許容応力度設計では, 落石による衝撃力を静的な荷重に置換えが可能であるが, 大きい塑性変形を伴う終局限界では, 剛性の

大きい構造物に対する落石による衝撃力と, 剛性の小さい構造物のそれとは大きい差異が発生する. したがって, 終局限界状態の検討においては, 荷重による設計よりも, むしろエネルギーによるほうが合理的といえる.

本報告では, 有孔鋼管・コンクリート複合はりの載荷実験結果を単純塑性理論の観点から再検討を行い, 実構造物への適用例として, 谷側に支柱を持たない片持型 PC 落石覆工の使用限界状態での検討と, 終局限界状態に対するエネルギー吸収能に関する検討結果を述べる.

2. 有孔鋼管・コンクリート複合はり終局変形性能

有孔鋼管・コンクリート複合はり(以下, CFST ばりという)の静的および衝撃載荷実験結果については, 文献3)に示されているが, 落石覆工を対象とした実構造物の終局限界状態の検討を目的として, 実験結果の再評価を行う.

図-1に, 実験で用いられた CFST ばりと比較のために用いられた同じ曲げ耐力となるように設計された RC ばりの断面諸元および配筋を示す. 図-1(a)は, 図-1(b)の RC ばりの圧縮鉄筋の代わりに有孔鋼管が用いられている. 孔の間隔および配置は図-1(c)に示されている. 長さ 3.4m の CFST ばり

2体とRCばり2体を、スパン2.8mで単純支持し、中央1点に静的荷重したときの荷重-たわみ関係を図-2に示す。RCばりは、圧縮側のコンクリートの圧潰後、圧縮鉄筋が座屈することにより曲げ耐力を消失するのに対し、CFSTばりは鋼管による拘束効果により圧縮側コンクリートの圧潰が遅れること、鋼管内のコンクリートにより鋼管の座屈が拘束されることなどから、CFSTばりは大きい曲げ靱性を有している。これらの実験結果をまとめたものが表-1である。載荷試験におけるスパンをLとすると、靱性率に対する終局時の塑性ヒンジの回転角は、

$$\theta_P = 2 \cdot \frac{\delta_L - \delta_Y}{L/2} = 2 \cdot \frac{\delta_Y}{L/2} \left(\frac{\delta_L}{\delta_Y} - 1 \right)$$

で与えられる。

表-1には、終局時の塑性ヒンジの回転角も示されている。

3. 落石覆工への適用

有孔鋼管・コンクリート複合ばりを落石覆工に適用し、以下に示す設計を行う。

3.1 設計条件

施工場所の山側は、約50度の斜面で、肩面に2m程度の平場がある。道路規格は3種3級であり、建築限界は有効幅員7.5m、有孔高さ4.7mを確保する必要がある。建築限界から谷側の法肩までは歩行者用通路のみであり、落石覆工の谷側支柱を構築するには、杭あるいは深礎などの杭基礎工が必要である。また、谷側の眺望の優れた場所では、観光資産として重要な位置付けとなるために、谷側に支柱を立てることは景観上好ましくない場合もある。

落石覆工設計の荷重条件のうち、死荷重として自重と厚さ90cmのサンドクッションを見込む。また、外力として、2.0mの積雪を考慮するものとする。落石条件は使用限界状態で重量0.2tfの岩石が15.0mの高さから落下するものとし、落石覆工にはサンドクッションを介して図-3のように載荷する。落石衝撃力は次式で得られる。

落石衝撃力P

$$P = 15.49W^{\frac{2}{3}} \cdot H^{\frac{3}{5}} \cdot \alpha$$

$$= 15.49 \times 0.20^{\frac{2}{3}} \times 15.00^{\frac{3}{5}} \times 1.0 = 26.898 \text{tf}$$

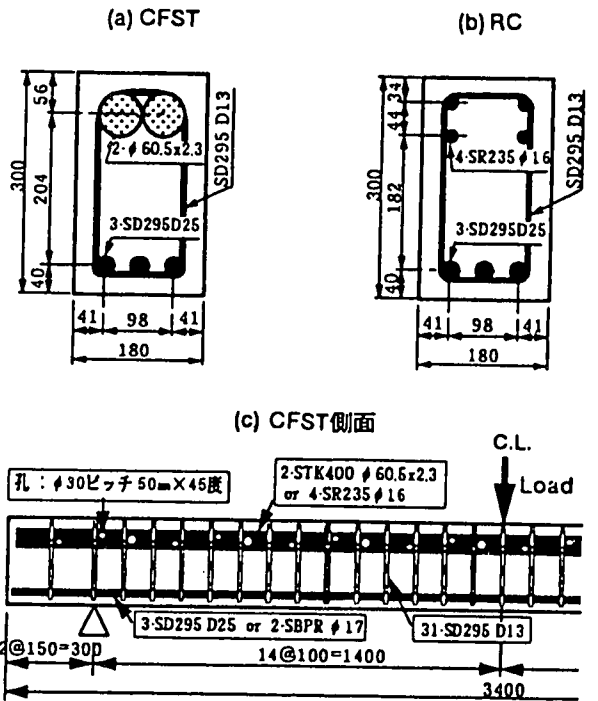


図-1 断面諸元および側面配筋図

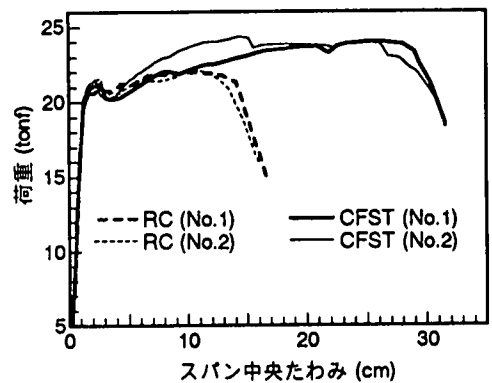


図-2 荷重-たわみ曲線

表-1 静的曲げ試験結果

供試体名称	NO.	最大荷重 P _y (tf)	降伏変位 δ _y (mm)	0.95P _u 時 変位 δ _L (mm)	靱性率 δ _L /δ _y	塑性ヒンジ 回転容量 θ _u (Rad.)
CFST	1	24.0	17.4	292	16.7	0.3903
CFST	2	24.3	15.4	278	18.1	0.3762
RC	1	22.1	18.5	143	7.7	0.1771
RC	2	22.1	15.0	132	8.8	0.1671

$$q_1 = \frac{P}{A} = \frac{26.898}{\frac{\pi}{4} \cdot 0.90^2} = 42.281 \text{tf/m}^2$$

はり 1 本に作用する荷重

$$q = q_1 \cdot B_S = 42.281 \times 0.900 = 38.053 \text{ tf/m}$$

ここに、

W : 落石重量	0.20tf
H : 落下高さ	15.00m
α : 砂層厚による割増係数	1.00
h : サンドクッション厚さ	0.900m
B _s : 荷重載荷幅	0.900m

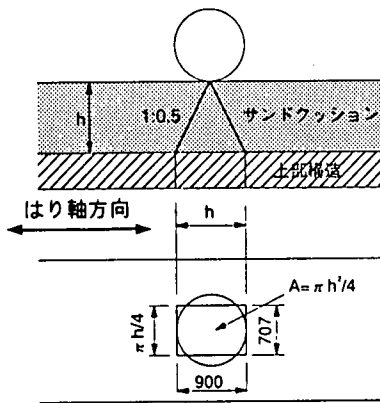


図-3 衝撃力の作用面積

3.2 落石覆工の構造

試設計の一般構造図を図-4に示す。下部工は施工場所の平場を利用して重力式受台とし、上部工は方杖を有する片持形式とする。方杖を用いることにより、主ばりへの負担を軽減している。また、主ばりと山側受台上とは2点で支持する固定方式を採用し、不静定構造とした。この落石覆工の構造は、一般の構造様式のものに比べて、谷側の支柱がない

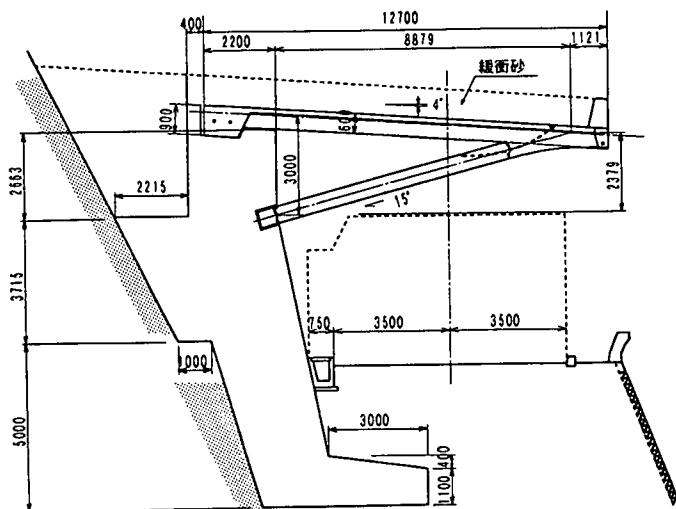


図-4 設計に用いる落石覆工の構造

ために、走行車両からの眺望に優れている。また、対岸から見ても景観を損なわない構造系である。

3.3 構造部材

主ばりおよび方杖の断面寸法は図-5の通りである。曲げモーメントは、落石時に最大となるが、落石位置での正のモーメントのほかに、受台上で負のモーメントを生じる。図-6に正の最大曲げモーメント発生時のモーメント図を示す。

主ばりは、上記のように正負の曲げを受けるために、図-6に示す3つの区間ににわけ、鋼材配置および導入プレストレスを変えた。図-7に各区間に対応する断面を示し、表-2に正負最大曲げモーメント発生時の断面力および外力応力度とプレストレスとの合成応力度をまとめる。

また、図-7で、圧縮側に配置した鋼管は、φ89.1mm 厚さ 4.2mm で複数の孔を設けて、コンクリートとの付着を高めている。

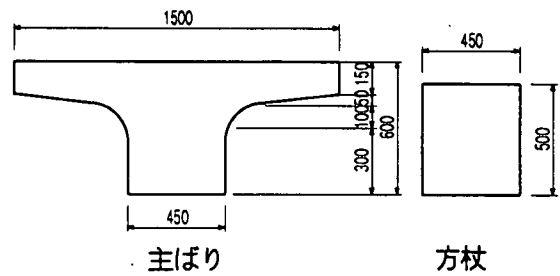


図-5 部材断面

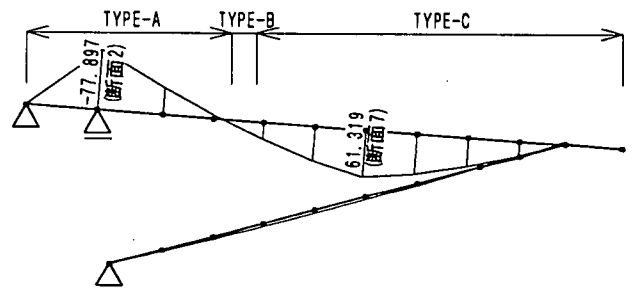


図-6 曲げモーメント図

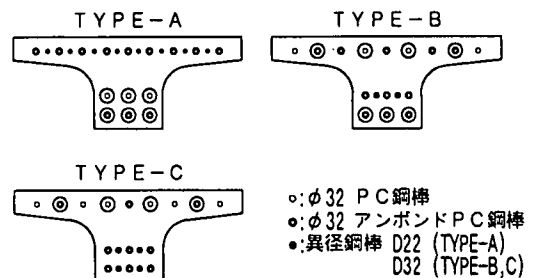


図-7 主ばり各断面の鋼棒配置

表-2 最大曲げモーメント発生時の合成応力度

断面	断面力		合成応力度(kgf/cm ²)		判定
	モーメント(tf・m)	軸力(tf)	上縁	下縁	
断面2	-80.663	-91.743	-15.94	265.24	○
断面7	61.319	-98.958	95.5	-16.53	○

3.4 フランジ付け根部のせん断応力

主ばり上に落石が落下した場合、はり断面に対する応力照査のほかに、T形断面フランジに対する直応力およびせん断に対する照査が必要である。ここでは3次元固体要素を用いた3次元有限要素法により応力解析を行い、曲げおよびせん断に対しての有効幅を求める。落石荷重は3.1設計条件で示したように90cmのサンドクッション厚に対し、70.7cm×90cmの長方形断面に等分布荷重として載荷し、さらに着目している部材に不利となるよう設定する。

(1) 解析モデル

解析の対象はT形断面のフランジ部とした。断面は対称性を考慮して右側2分の1を、また、はりの長さは6mとし、対称性を考慮して長さ3mを要素分割した。断面は高さ方向に12分割、幅方向にはフランジ付け根部を細かくして17分割した。また、長さ方向には20分割する。要素として8接点3次元固体要素を用いる。解析モデルを図-8に示す。

(2) 検討ケース

つぎの2通りのはりの支持状態について検討する。
CASE-1: はり端の鉛直方向変位を拘束するとともに、はりの長さ方向、断面中央ウェブ下端の鉛直変位も拘束する。このような支持状態では荷重によるはりのたわみの影響は無視される。

CASE-2: はり端の鉛直方向変位のみを拘束する。このような支持状態では荷重によるはりのたわみの影響が考慮される。

(3) 解析

落石の衝撃力は10tfとし、等分布荷重強度として1.5716kgf/cm²を用いる。この等分布荷重をフランジ上面の節点に集中外力として作用させる。

解析結果として、各節点の3次元変位成分、3次元応力成分が出力される。

(4) 解析結果

解析結果のうち、フランジ付け根の応力照査に必

要な直応力およびせん断応力に関し、図-8に示すフランジ付け根の断面SECTION-1およびSECTION-2の等応力線図を描いた。また同様に、はり軸横断方向断面についても直応力およびせん断応力に関する等応力線図を描いた。図-9に、はり軸方向の等応力線図を示したが、SECTION-1とSECTION-2を比較すると、SECTION-1について照査すれば十分であることがわかる。はり軸横断方向の等応力線図についても同様の傾向が確認された。

図-10に、はり軸中央での横断面における直応力とせん断応力の等応力線図を示す。

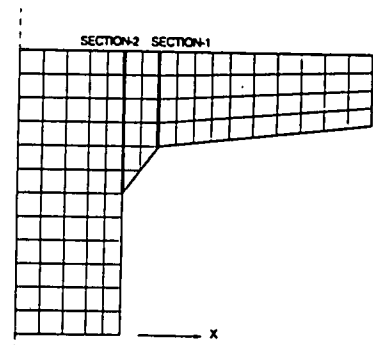


図-8 フランジ付け根検討位置

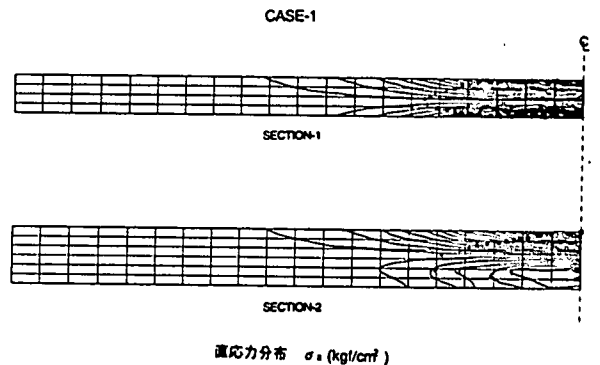
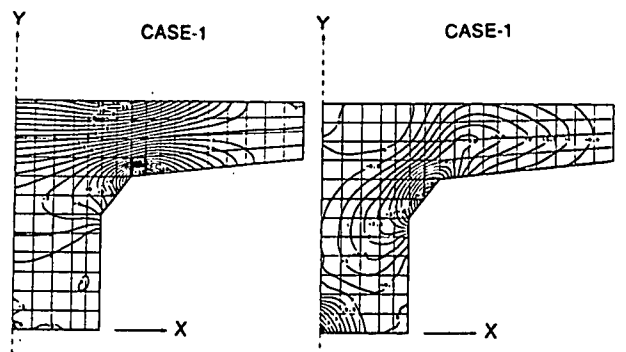


図-9 はり軸方向の等応力線図



(a)直応力分布 (b)せん断応力分布

図-10 はり軸横断方向の等応力線図

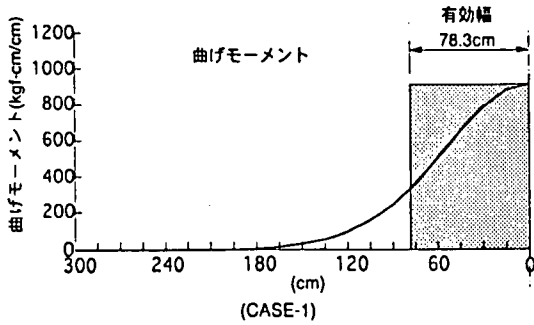


図-11 フランジ付け根の曲げモーメント

さらに、鉄筋コンクリート断面の照査においては断面力を求める必要があるため、SECTION-1の直応力分布から、曲げモーメントを算出した。図-11に、はり軸方向のモーメント分布状態を示す。

最大曲げモーメントははりの中央で発生するが、落石荷重によるモーメントと等価になるフランジ有効幅の2分の1はCASE-1およびCASE-2に対して78.3cmおよび83.8cmとなる。

SECTION-1に発生する最大せん断応力度はフランジ下面で発生し、CASE-1およびCASE-2に対して、5.96kgf/c²および5.31kgf/c²であり、上面で最小となっている。せん断応力分布がフランジ厚さ方向に放物線分布と仮定すると平均せん断応力度は、

$$\tau_m = \frac{2\tau}{3} = \frac{S}{b_w d}$$

で与えられる。ここに、 S はせん断力、 d はフランジ厚さ、 b_w は幅である。これより、せん断に対する有効幅は、

$$b_e = \frac{S}{\tau_m d}$$

より得られる。

検討している落石荷重の有効幅は、CASE-1およびCASE-2に対し、それぞれ125.9cmおよび141.3cmとなる。したがって、載荷幅90cmに対して、曲げモーメントおよびせん断力の有効幅はCASE-1において小さくなり、それぞれ156.6cmおよび125.9cmを得た。

この有効幅を用いて、落石覆工に作用する衝撃力から、モーメントおよびせん断力を算定し照査することにより安全性が確認される。したがって、落石覆工の主ばりは、地震に対しての横締めは行うものの、主ばり1本に落石が生じた場合にもフランジ付け根部は安全である。

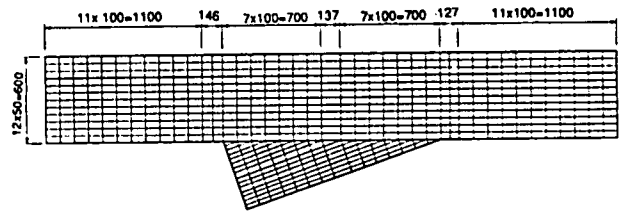
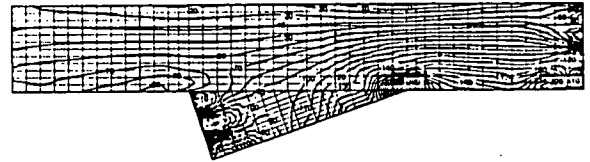


図-12 要素分割



(単位: kgf/cm²)

図-13 σ_x 等応力線図(落石時-2)

3.5 方杖取付け部の応力分布

方杖式片持型ロックシェッドでは、方杖取付け部において応力状態が複雑になるため、直応力およびせん断応力に対する照査を、2次元有限要素法を用いて解析する。

(1)解析モデル

解析対象は支柱取付け部であるので、部分的に取り出して行った。図-12に要素分割を示す。要素として4節点2次元平面要素を用いる。

(2)検討ケース

次の4通りの荷重状態を検討した。

CASE-1: PC鋼棒緊張状態。

CASE-2: 積雪時荷重状態。

CASE-3: 方杖取付位置近傍の主ばり断面に最大の曲げモーメントが作用する荷重状態。

CASE-4: 方杖に最大の軸方向力が作用する荷重状態。

(3)解析結果

図-13にCASE-4の σ_x 等応力線図を示すが、すべてのケースについて応力状態に特に問題となる点は認められなかった。

3.6 終局限界耐力とエネルギー吸収能

許容応力度の範囲内で落石覆工が吸収するエネルギーは、弾性限界後の塑性変形により吸収エネルギーに比較して微小であるので、ここでは塑性変形のみによるエネルギー吸収能について検討する。

2. で述べたように実験に用いた長方形断面の有孔鋼管・コンクリート複合ばりは、極めて大きい韌

性を有している。落石覆工に適用した T 型断面に対しても、適切な有孔鋼管と鉄筋の組合せにより長方形断面の場合と同様の靱性が期待できるものとする。すなわち、表-1 に示した CFST はりの許容塑性ヒンジ回転容量（平均値 $0.383\text{Rad}=21.9^\circ$ ）を保持するものとする。

本形式の片持覆工では、落石荷重の増大とともに各断面での曲げモーメントと軸方向力（引張力）が変化する。図-14 は、断面-2（受台上の塑性ヒンジ断面）と断面-7（落石位置での塑性ヒンジ断面）の軸方向力が変化した場合の終局曲げモーメントの変化、すなわち、軸方向力と終局曲げモーメントの相関関係を示している。計算した軸方向力の範囲では、軸方向力の変化による終局曲げモーメントの変化はわずかである。図中、 $\alpha=1.0$ は設計断面力の相関図上での位置を示しており、 $\alpha=4.85$ の位置は、設計落石荷重の 4.85 倍で断面-2 が終局耐力に到達し塑性ヒンジを生成した点を示している。

同様に、 $\alpha=5.04$ は設計落石荷重の 5.04 倍で断面-7 に塑性ヒンジを生成し、機構を形成したことを示している。崩壊機構形成後は、荷重の増加なしに塑性ヒンジの回転角がその許容回転容量に達するまで変形が増大する。図-15 は、崩壊機構形成後の片持覆工の変形状態を示している。 R_1 、 R_2 および R_3 は、塑性ヒンジにより分離された部分の部材回転角を示しており、それらの間にはつぎの関係がある。

$$R_2 = -0.819R_1, \quad R_3 = 0.188R_1$$

塑性ヒンジの回転角は断面-7 で最大となるので、これを塑性ヒンジの最大回転容量

$$R_1 - R_2 = \theta_{\max} = 21.9^\circ \quad \text{とおくと、}$$

$$R_1 = 12.1^\circ, \quad R_2 = -9.8^\circ, \quad R_3 = 2.3^\circ \quad \text{が得られる。}$$

このときの断面-7 の鉛直変形量は約 86cm であり、崩壊時の生存空間の確保は可能であろう。

塑性ヒンジの回転に伴うエネルギー吸収量は、

$$\begin{aligned} E_P &= 241.0 \times \frac{12.1}{180.0} \times 3.14 + 206.3 \times \frac{21.9}{180.0} \times 3.14 \\ &= 129.7\text{tf} \cdot \text{m} \end{aligned}$$

となる。ここに、断面-2 および断面-7 での機構形成時の曲げモーメントを、それぞれ、241.0tf-m および 206.3tf-m とおいた。自重および敷砂などの死荷重による仕事量 12.3tf-m を差引くと、落石に

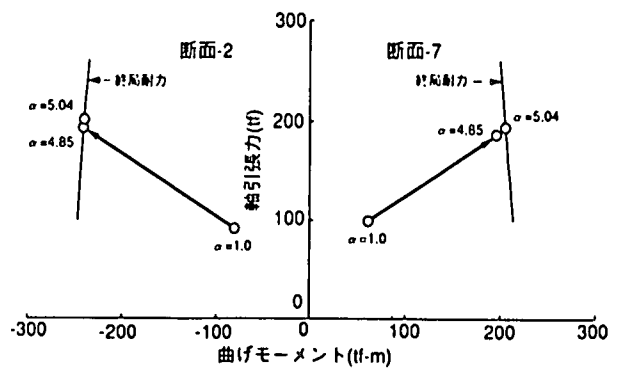


図-14 終局耐力相関関係

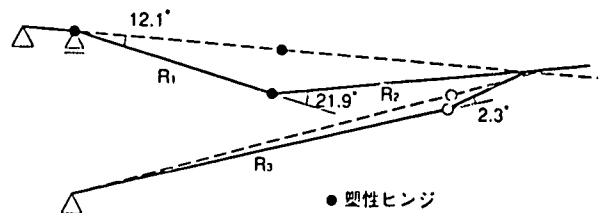


図-15 終局限界時の塑性ヒンジ回転角

より吸収可能なエネルギー量は、117.4tf-m となる。これは、質量 5t の落石が高さ約 23m から落下したときのエネルギーに相当する。

4. おわりに

本文では、CFST はりの使用例として、片持型 PC 落石覆工に用いる、はり部材への適用を検討した。このように、終局限界での挙動が重要視される構造物では、高い靱性が望まれることから、CFST はりの有効な使用方法の一つと考えられる。

また、単純塑性解析を用いて、エネルギー吸収能についても検討を行った結果から、落石覆工としては、実績の少ない片持型の構造様式においても応用が可能であり、安全性を高めることが示唆された。今後、施工場所の条件によっては合理的な落石対策工の一つとして期待できる。

参考文献

- 1) 日本道路協会:落石対策便覧, 昭和 58 年 7 月。
- 2) 吉田博, 榎谷浩, 右城猛, 柴田健次:落石覆工の設計の現状と合理的設計へのアプローチ, 土木学会論文集, 第 421 号, pp. 213-222, 1990。
- 3) 前川幸次, 吉田博, 塩見昌紀:鋼管・コンクリート複合はりの静的および衝撃載荷実験, 構造工学論文集, vol.43A, pp.1481-1488, 1997.3。