

(39) 高靱性部材を用いた新しいロックシェットの試設計

A DESIGN OF ROCKSHED ASSEMBLED BY NEW HIGH DUCTILE MEMBERS

吉田 博^{*}・上村浩茂^{*}・測上正浩^{*}・南 和夫^{**}

Hiroshi YOSHIDA, Hiroshige KAMIMURA, Masahiro FUTIGAMI and Kazuo MINAMI

^{*}正会員 (株) エイ・シー・デイ (〒939-13 富山県砺波市豊町4-7)^{**}正会員 金森藤平商事(株) (〒933 富山県高岡市昭和町1丁目1-16)

キーワード：靱性，充填鋼管，エネルギー吸収，ロックシェット

(ductility, concrete filled tube, energy absorption, rockshed)

1. はじめに

現在，ロックシェットは，落石の衝撃力を静的な力に置き換えて，許容応力度設計法によって設計されている¹⁾。しかし，落石の発生自身不規則性の強いものであり，また，ロックシェットに作用する落石による衝撃力は，多くの因子に影響され，その変動が大きく，正確に推定することは極めて困難である。このような特性の荷重に対する構造物の設計法としては，使用限界状態に対する弾性理論に基づく許容応力度法とともに，荷重の特性を反映した塑性理論に基づいた終局強度設計法との2段階設計の方が合理的である²⁾。

すなわち，ロックシェットの耐用期間中に，比較的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なえばよく，まれに生じるような大きい落石規模に対しては，終局状態に対する安全性の照査を行なえばよい。このような2段階での照査に対する落石規模の推定は，現場技術者にとって比較的容易であろう。

これまで，プレストレストコンクリート製および鋼製ロックシェットに対する破壊実験が行なわれてきた³⁾。これらの実験では，許容応力度設計で対象とした落石規模よりはるかに大きい落石規模で破壊したことが報告されているが，その破壊のメカニズムがいまだに明確にされておらず，破壊に対する落石規模の推定が困難であった。

落石荷重の推定の困難さは，前述のとおり自然現象に起因するもののほかに，落石を受ける構造物の挙動にも影響される。すなわち，落石がたわみ性の大きい構造物に落下した場合と，剛性の大きい構造物に落下した場合では，発生する衝撃力と構造物の挙動に大きな差異が考えられる点にもある。

このようなことから，荷重に基づく設計法は合理性を欠く可能性があり，エネルギー的観点からの設計法が合理的であるとされてきた⁴⁾。

そこで，極めてたわみ性の大きく，且つ終局変形性能が優れた部材をロックシェット部材として用いるならば，エネルギー吸収能力に優れたロックシェットの設計が可能と考えられる。この部材としては，アンボンドPC鋼材を配置し，コンクリートを充填した鋼管ばりが最適と考えられる。この部材の静的および衝撃試験結果から⁵⁾，このようにして製作された鋼管ばりが極めて大きい耐力と靱性を有することが明らかとなっており，このコンクリート充填鋼管をロックシェットの部材として用いた場合，耐力が減少することなく大きいエネルギー吸収能力が期待できる。

本論文では，まず，ロックシェット部材のように一つの部材で正負の曲げモーメントを受けるコンクリート充填鋼管ばりの終局挙動についての実験結果の概要を述べ，つぎにこのような部材で構成されたロックシェットの終局挙動の推定法を示す。

最後に，実際のロックシェット部材にこのコンクリート充填鋼管部材を用いた場合の設計手法を示し，このようにして製作されたロックシェットは，極めて合理的な設計が可能であり，大きい落石荷重に対応が可能であることを述べる。

2. コンクリート充填鋼管部材の特性

2. 1 ロックシェッド部材としての適応性

アンボンドPC鋼材を緊張することなしに配置し、コンクリートを充填した鋼管ばり（以後、充填鋼管部材という。）の静的および衝撃試験結果から、このようにして製作された充填鋼管部材が極めて大きい耐力と靱性を有することが明らかとなった⁷⁾。この充填鋼管部材をロックシェッドの部材として用いる場合、以下の点が問題となる。

文献⁷⁾では、充填鋼管部材を単純支持して、中央1点集中荷重を作用させて実験している。すなわち、1本の部材の1方側のみには引張が発生するため、アンボンドPC鋼材が1方側にのみ配置された供試体に対する結果のみが示されている。充填鋼管部材をロックシェッドのはりおよび柱部材として使用するためには、1部材に正の曲げモーメントのみならず負の曲げモーメントも発生するため、このような部材に対して、単純支持部材と同程度の耐力と変形能力を期待できるかどうかを明確にする必要がある。

2. 2 実験

上記の問題点を明らかにするために、連続ばりを用いて実験を行なった。詳細は、稿を改めて発表予定であるが、ここでは、ロックシェッドの設計に必要な特性を明確にするために、概要のみを述べる。

(1) 供試体

図-1に示すような単純ばりと正負の曲げモーメントが1径間内で発生する2径間連続ばりを用いて実験を行なった。連続ばりでは、荷重は1方のスパン（荷重スパン）の中央に作用させ、荷重点で第1の塑性ヒンジが発生してから中央支点上に第2の塑性ヒンジが発生するまでの、第1の塑性ヒンジの回転容量の影響を調べるために、荷重スパン長を一定（160cm）とし、側スパン長を3種類に変化させた供試体を製作した。供試体の断面は文献⁷⁾と同一の断面とし、PC鋼材は図-1に示すように、部材の引張側から圧縮側に一定長さを延長して配置した。すなわち、上側のPC鋼材と下側のPC鋼材が一定長さで重複するように配置した。製作法は文献⁷⁾と同様とした。

供試体に用いた材料は、一般構造用炭素鋼管（STK400： $\phi 139.8 \times 4.2\text{mm}$ ）、PC鋼材（C種1号： $\phi 13\text{mm}$ 、アンボンド加工）、普通コンクリート（設計基準高度 500kg/cm^2 、最大粗骨材 25mm ）である。

(2) 実験方法および結果

まず、充填鋼管部材を単純支持し、そのスパン中央に1点集中荷重を作用させる実験を行い、その耐力と変形性

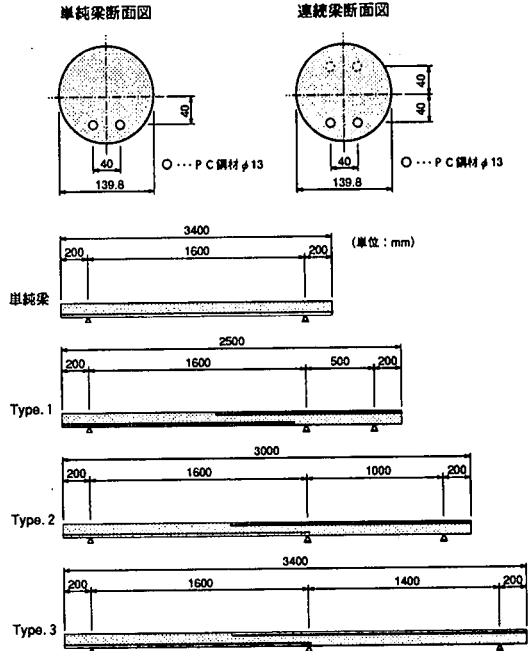


図-1 実験供試体

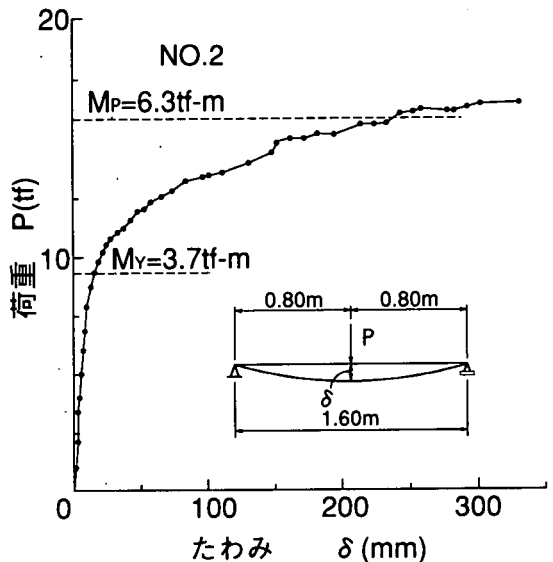


図-2 単純曲げ実験結果

能を確かめた。図-2は、荷重とたわみの関係を示している。充填鋼管部材の終局曲げ耐力は、文献①によれば断面分割法で推定可能であるとしている。

コンクリートの圧縮強度として $f_c=500\text{kgf/cm}^2$ を用いて曲げ耐力を求めると $M_p=6.25\text{tf}\cdot\text{m}$ となる。図-2の破線は、載荷点の曲げモーメントが曲げ耐力 $M_p=6.3\text{tf}\cdot\text{m}$ となる荷重 15.75tf を示している。なお、充填鋼管部材を均質な円形断面と仮定し、形状係数を 1.7 としたときの降伏モーメントは $M_y=3.7\text{tf}\cdot\text{m}$ となり、降伏荷重は 9.25tf となる。これより、曲げ耐力を適切に評価が可能であることおよび十分な変形能力を有していることがわかる。なお、実験で用いたコンクリートの圧縮強度は、平均 $f_c=497\text{kgf/cm}^2$ であった。

連続ばりの供試体は3点で支持し、荷重を載荷スパン中央に作用させ、鋼管、PC鋼材などのひずみおよび載荷点のたわみを測定した。荷重は、供試体が耐力を失うまで作用させた。

連続ばりの実験結果の1例を図-3に示す。また、写真-1はこの供試体の試験後の変形状態を示している。図-3は、載荷スパンと側スパンの比が $1:0.875$ の場合の荷重と載荷点のたわみの関係を示している。図中の破線は、降伏荷重および $M_p=6.3\text{tf}\cdot\text{m}$ として求めた単純塑性理論による崩壊荷重 $P_u=23.6\text{tf}$ は、実験結果とよく一致している。なお、載荷スパンの端支点に取付けた傾斜計による最大耐力時の充填鋼管部材のたわみ角は、 32° であった。

これらの結果より、PC鋼材を適切に配置すれば、正負の曲げモーメントを受ける部材に対しても、十分な耐力と変形能力を有しており、単純塑性理論によりその挙動を正確に推定が可能であることが明らかとなった。

3. ロックシェッドの構造および荷重

3.1 構造および設計条件

試設計の一般構造図を図-4に示す。有効幅員 8.0m 、有効高さ 4.7m 、スパン長 10.0m 、サンドクッション厚 90cm の逆L型ロックシェッドを想定する。はりと柱の接合部では塑性ヒンジの発生や座屈などの不安定現象は発生しないものとする。

設計条件は以下のとおりとする。

(1) 死荷重

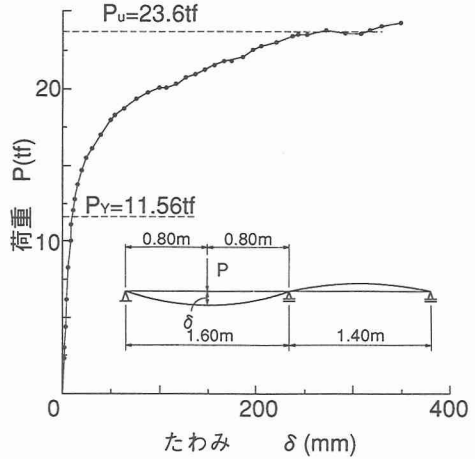


図-3 連続ばりの実験結果

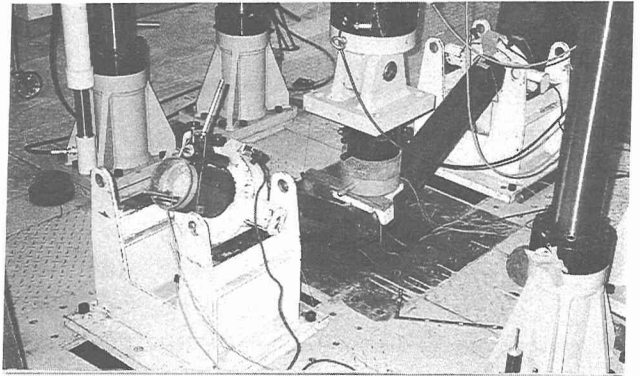


写真-1 連続ばりの実験

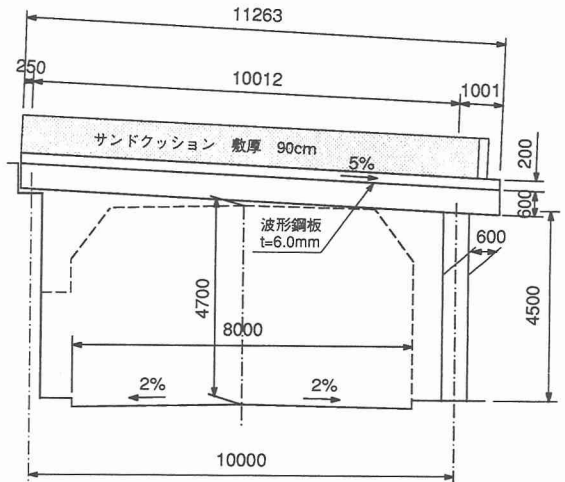


図-4 設計に用いるロックシェッドの構造

- ・コンクリートの単位体積重量 $\gamma_c = 2.35 \text{ (tf/m}^3\text{)}$
- ・鋼管の単位重量 $w_s = 0.277 \text{ (tf/m)}$
($\phi 609.6 \text{ mm}$, $t = 19.0 \text{ mm}$)
- (2) サンドクッション荷重
 - ・敷厚 $h_f = 0.90 \text{ (m)}$
 - ・単位体積重量 $\gamma_s = 1.8 \text{ (tf/m}^3\text{)}$
- (3) 落石荷重
 - ・落石重量 $W = 5.0 \text{ (tf)}$
 - ・落下高さ $H = 40.0 \text{ (m)}$
- (4) その他
 - ・主構間隔 $B = 2.0 \text{ (m)}$
 - ・屋根勾配 $i = 5 \text{ (}\% \text{)}$

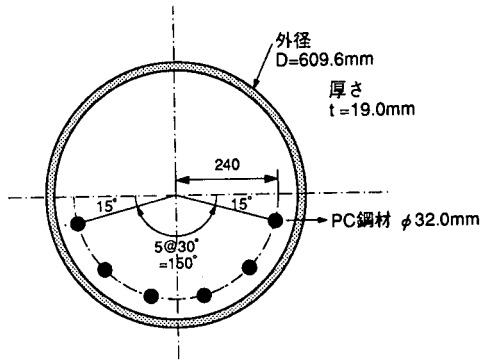


図-5 ロックシェッド用部材断面

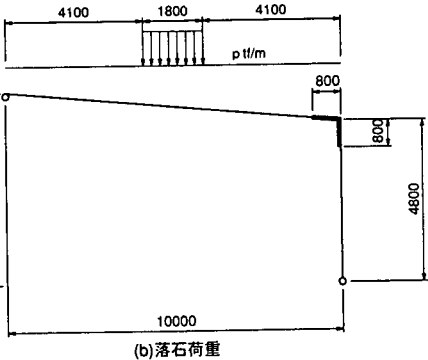
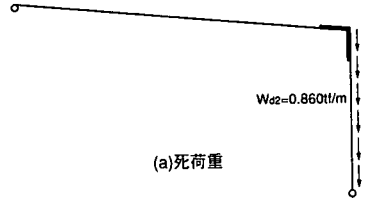
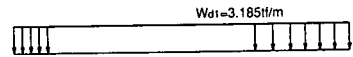


図-6 死荷重および落石荷重分布

3. 2 使用材料

- (1) 充填コンクリート $\sigma_{ck} = 500 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$
- (2) 屋根コンクリート $\sigma_{ck} = 240 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$
- (3) 鋼管 STK400
- (4) 波形鋼板 SS400

3. 3 断面

ロックシェッドのはりおよび柱部材としては、図-5に示すように $\phi 609.6 \text{ mm}$, $t = 19.0 \text{ mm}$ の鋼管にアンボンドPC鋼材 $\phi 32 \text{ mm}$ を6本配置し、コンクリートを充填したものを使用する。アンボンドPC鋼材は、部材に引張が発生する側に適切に配置するものとする。このようにして製作されたコンクリート充填鋼管部材の曲げ耐力は、断面分割法で計算でき、その値は $M_p = 408 \text{ tf-m}$ が得られる。

4. 吸収エネルギー

4. 1 破壊解析

解析は仮定に基づき単純塑性理論によるものとし、第一の塑性ヒンジははりのスパン中央付近に、第二の塑性ヒンジははりの左端で隅角部取付け点または柱の上端で隅角部の下端のいずれかとする。なお、はりと柱の取付け部は補強されており、この部分では塑性ヒンジは生成しないものとする。

死荷重および落石荷重の荷重状態を図-6に示す。また、設計荷重時の曲げモーメント分布および死荷重を一定とし、落石荷重を漸増させた場合の第一塑性ヒンジ生成時、崩壊時の曲げモーメント分布および塑性ヒンジ生成位置を図-7に示す。解析結果より、第一の塑性ヒンジは隅角部中央から 5.399 m (部材に沿った距離で 5.401 m) の点で発生し、第二の塑性ヒンジは柱上端で柱下端から 4.000 m の点に発生する。

第一の塑性ヒンジ生成時の落石荷重は、 137.5 tf/m であり、第二の塑性ヒンジ生成時の落石荷重は、 142.8 tf/m であった。図-8には、第一塑性ヒンジ生成時および第二の塑性ヒンジ生成時の変形状態が示されている。

4. 2 崩壊にともなうエネルギー吸収

解析の対象としているロックシェッドは、第二の塑性ヒンジの生成で機構を形成するが、その後は荷重の増加なしに、変形のみが増大する。しかしこの変形は、塑性ヒンジの許容限界回転容量によって制限される。前述の連続ばりの載荷実験から明らかになったように、充填鋼管部材を用いる限り、通常の構造物ではこの許容限界回転容量を特に意識する必要はない。

ロックシェッドの吸収エネルギーの算定には、機構形成前の弾性変形および塑性ヒンジの形成に伴うエネルギー吸収は無視することにし、機構形成後の塑性変形によるエネルギー吸収のみを考慮することにする。

ロックシェッドが機構を形成し、変形の増加にともなう2つの塑性ヒンジの回転角の間の関係は、図-9に示すように、つぎの関係がある。

$$\theta_1 = 0.552 \theta_2 \quad \delta = 0.540 \theta_1 l_1$$

ロックシェッドの限界たわみ量を、図-4を参照して

$$\delta = 80 \text{ cm}$$

と仮定すると、第一および第二の塑性ヒンジの回転角は、

$$\theta_1 = \delta / 0.540 l_1 = 0.322 \text{ rad.}, \quad \theta_2 = 0.552 \theta_1 = 0.178 \text{ rad}$$

となる。

機構形成後の塑性ヒンジの回転によるエネルギー吸収は、

$$E_p = M_p (\theta_1 + \theta_2) = 400.0 \times (0.322 + 0.178) \\ = 200.0 \text{ tf-m}$$

死荷重による仕事量は

$$E_d = 12.74 \text{ tf-m.}$$

また、ロックシェッドが吸収する全エネルギーは、

$$E_0 = E_p - E_d = 200.0 - 12.74 = 187.26 \text{ tf-m}$$

となる。

4. 3 サンドクッションの吸収エネルギー

これまでに行なわれた落石実験によれば、あるサンドクッション厚とそれに見合う落石に対しては、落石重量に関係なくほぼ一定のエネルギーをサンドクッションが吸収するとされている⁸⁾。

本ロックシェッドにおいても、サンドクッションによって約25.0 tf-mのエネルギーを吸収するものとする。

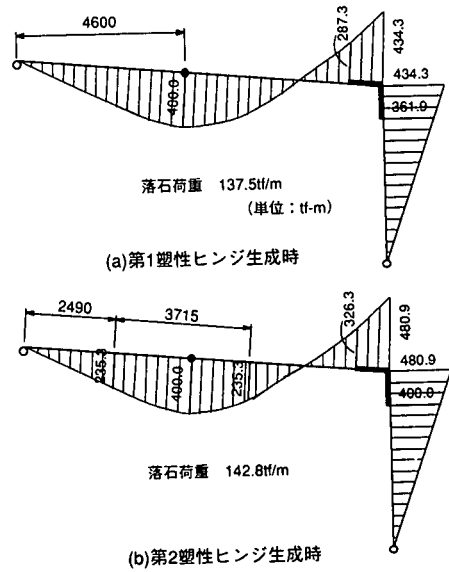


図-7 塑性ヒンジと曲げモーメント分布

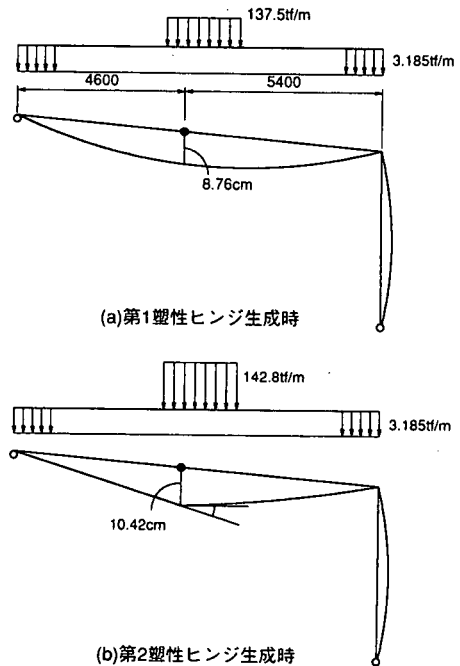


図-8 変形状態の推移

4. 4 全吸収エネルギー

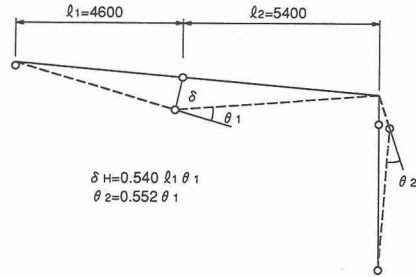
許容される塑性変形にもなうロックシェッドの全吸収エネルギーとサンドクッションが吸収できるエネルギーの和が、終局限界状態での吸収エネルギーと考えられる。

$$E = E_0 + E_S = 187.26 + 25.0 = 212.3 \text{ tf-m}$$

重量 $W=5.0\text{tf}$ の落石を想定すると、 $WH=212.3 \text{ tf-m}$ より、

$$H = \frac{212.3}{5.0} = 42.4 \text{ m}$$

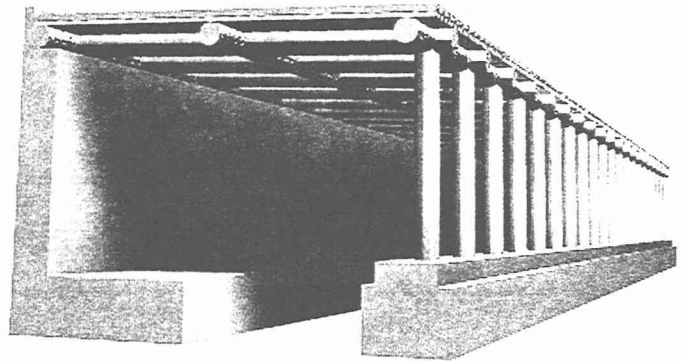
となる。すなわち、落石重量が 5.0tf の場合、終局限界状態に達する落下高さは 42.4m と推定できる。



図一 9 機構形成後の塑性ヒンジ回転角

5. あとがき

ロックシェッドの設計には、エネルギー基準による限界状態設計法が合理的であることが指摘されてきたが、具体的な設計法は未だ示されていない。これには、多くの検討すべき課題が残されているからである。しかし、本報告ではたわみ性が大きく、高耐力と十分な変形性能を有する充填鋼管部材を用いたロックシェッドの設計法を示した。この新しいロックシェッドは、軽量であり大きいエネルギー吸収能力を有していることから、今後、大落石に対応できる落石対策工の一つとして期待できる。



図一 10 充填鋼管柱を用いたロックシェッド

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，榎谷博，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年9月。
- 3) 松葉美晴，他：実物PC製シェッドの落石による破壊実験(1)，(2)，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. 241-253，1993年6月。
- 4) 横山功一，大平正人，吉田博：鋼製覆工の落石による破壊挙動に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.39A，pp.1573-1586，1993年3月。
- 5) 園田佳巨，佐藤紘志，石川信隆：エネルギー基準による落石覆工のサンドクッション厚の算定法に関する一考察，構造工学論文集，Vol.37A，pp. 1617 - 1625，1991年3月。
- 6) 園田恵一郎：落石覆工の設計法についての一提案，構造工学論文集，Vol.39A，pp.4563-1572，1993年3月。
- 7) 前川幸次，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。
- 8) 吉田博，榎谷浩，佐藤真，井原朋美：落石実験データベースの作成と落石の衝撃力の評価，構造工学論文集，Vol.33A，pp. 571-583，1987年3月。