

ワイヤーロープ金網式落石防護柵 の重錘衝突実験

右城 猛¹・松山哲也²・上路 茂³・矢田部龍一⁴

¹正会員 博士(工学) 株式会社第一コンサルタンツ (〒781-8122 高知市高須新町三丁目1-5)

E-mail:t-ushiro@daichi-c.co.jp

²正会員 日本興業株式会社 (〒761-0821 香川県木田郡三木町鹿庭乙610)

³正会員 国土交通省四国地方整備局四国技術事務所 (〒761-0121 高松市牟礼町牟礼1545)

⁴正会員 愛媛大学大学院理工学研究科 (〒790-8577 松山市文京町3)

ワイヤーロープ金網式落石防護柵の合理的な設計法を確立する目的で、重錘衝突実験を行って防護柵および基礎の挙動を観測した。その結果、1) ワイヤーロープと端末支柱の取り付け部が構造的に弱いこと、2) 落石衝撃力は1本のワイヤーロープに集中すること、3) 金網の吸収エネルギーは拘束条件に大きく依存すること、4) 基礎は破壊しなければ全体で体が転倒に対して抵抗すること、5) 基礎のつま先を中心に剛体的に回転をすることした解析は実験結果とよくあうこと等を明らかにすることができた。

Key Words : rock fall protection fence, impact response analysis, energy absorption capacity

1. まえがき

わが国ではストンガードあるいはロックフェンスと呼ばれるワイヤーロープ金網式落石防護柵が、道路等における落石対策工として古くから利用されている。その設計には、落石対策便覧に示されている手法が一般的に用いられているが、設計手法の妥当性については検証されていない。

そこで、プレキャストコンクリートブロックを連結した基礎に市販の防護柵を設置し、それに重錘を衝突させて防護柵の変形、破壊形態および基礎の挙動を観測し、現行の設計手法における問題点を明らかにした。

2. 実験の方法

(1) 供試体

実験に用いた供試体は、図-1 に示す 3 種類である。供試体は以下のように製作した。

実験場の敷地に施工した厚さ 20cm のベースコンクリート上に、図-2 のプレキャストコンクリートブロックをタイプに応じて 3~7 個を延長方向に並べて設置し、ブロック同士をボルトで連結した。そして、中詰めコンクリート($\sigma_{ck}=30\text{MPa}$)を打設して供試体を製作した。供試体をプレキャストコンクリートブロックで製作したのは実験日数を短縮するた

めである。

プレキャストコンクリートブロック 1 個の質量は 1.07t、中詰めコンクリートを含めた全体質量は 2.10t である。

なお、ベースコンクリートの表面には、中詰めコンクリートがベースコンクリートに付着しないようにするためビニールシートを敷いた。

防護柵には朝日スチール工業(株)製のストンガード SG-N1500-5 を使用した。

(2) 実験の種類

実験は表-1 に示す 6 ケース行った。ケース 1 とケース 3、ケース 2 とケース 4 はそれぞれ同じ条件の実験である。

いずれのケースも供試体のつま先位置に、写真-1 のようなストッパーを取り付け、供試体の滑動を拘束した。

ケース 2 とケース 4 の実験では、供試体をベースコンクリートに固定した。ベースコンクリートを直径 22mm、長さ 20cm で削孔し、そこに長さ 50cm で直径 19mm の異形棒鋼(SD295A)8 本を差し込みエポキシ系樹脂を充填して固めたアンカー筋を、供試体の中詰めコンクリート内に埋め込む方法とした。

各ケースとも防護柵または基礎が破壊するまで重錘の落下高を順次増加させて繰り返し衝突させた。

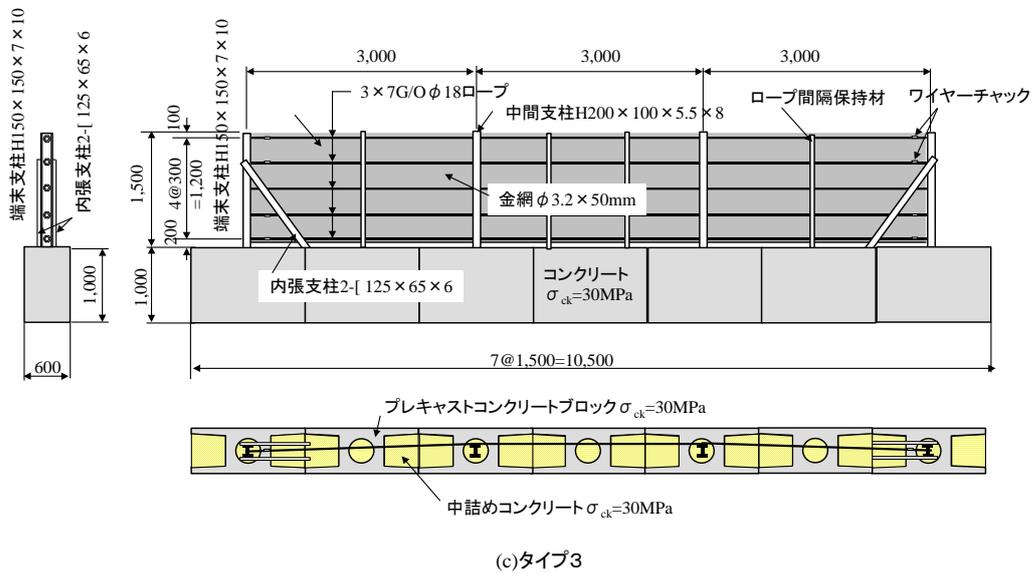
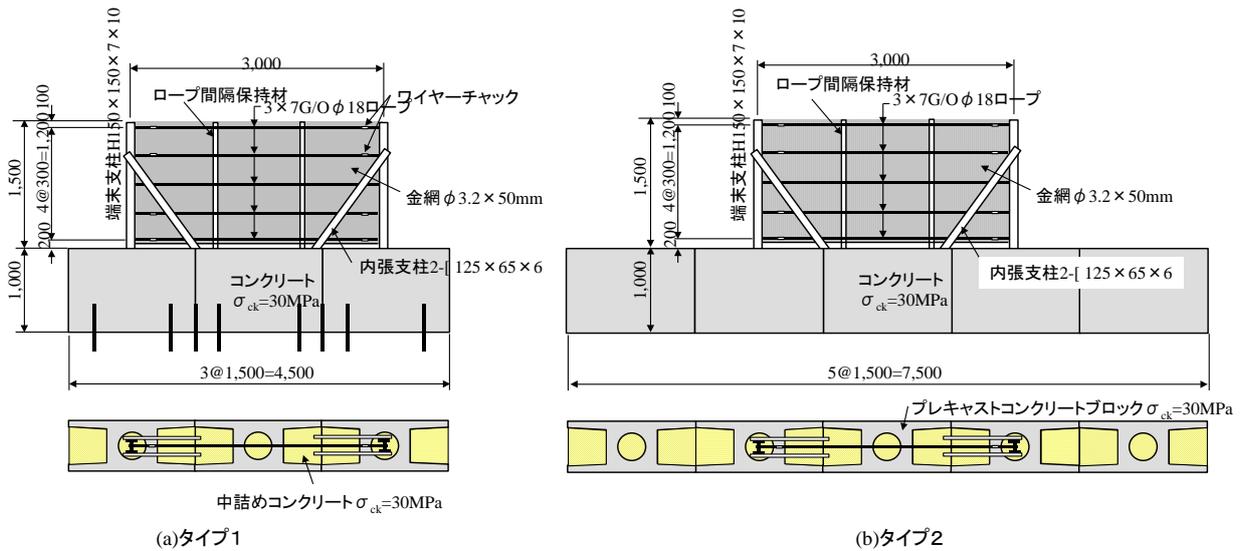


図-1 供試体

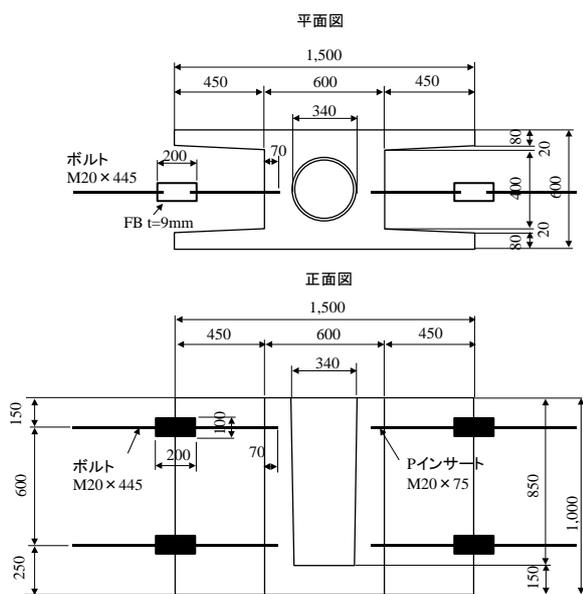


図-2 プレキャストコンクリートブロック



写真-1 供試体の前面に設置したストッパー

表-1 実験ケース

ケース	供試体	重錘落下高(m)
1	タイプ1(アンカー無)	1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0
2	タイプ1(アンカー有)	2.0, 3.0, 4.0, 5.0
3	タイプ1(アンカー無)	2.0, 2.5
4	タイプ1(アンカー有)	3.0, 4.0
5	タイプ2(アンカー無)	2.0, 3.0, 4.0, 5.0
6	タイプ3(アンカー無)	2.0, 3.0, 4.0

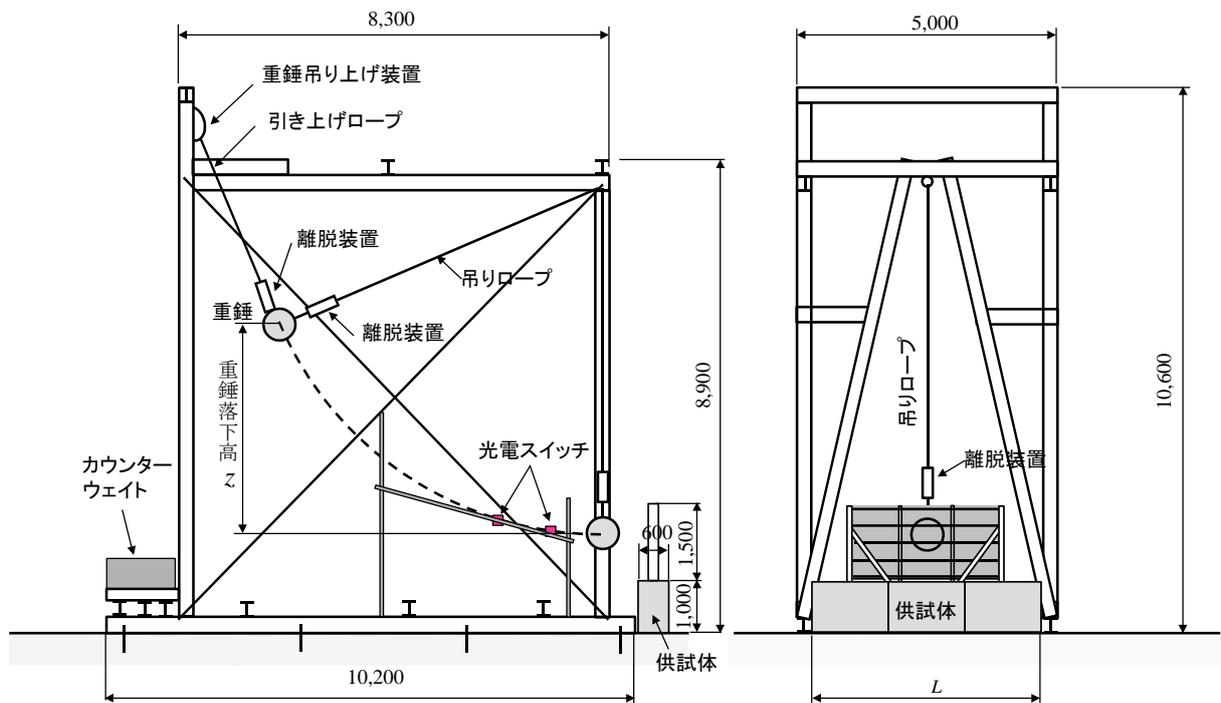


図-3 実験装置

3. 実験結果

(3) 重錘の落下方法

図-2 に示す形状の架台を製作し、その先端にロープで重錘を吊り下げた。重錘の背面には引き上げ用ロープを取り付け、架台の後方に取り付けた電動ウィンチによって重錘を所定の高さまで持ち上げることができるようにしている。それぞれのロープと重錘の取り付け部には、圧搾空気で作動する離脱装置を取り付けている。

重錘の落下経路に光電スイッチを2箇所に設置し、重錘が最初の光電スイッチを通過すると、加速度計、歪計等の計測が開始され、2つ目の光電スイッチを通過すると吊りロープの離脱装置のロックが解除され、吊りロープが鉛直になった時点で重錘がロープから切り離されて水平方向へ飛び出すようにした。

重錘には表面を鋼板で覆った直径 72cm、質量 0.47t のコンクリート球を用いた。

(4) 計測機器

重錘の重心位置に加速度計を埋め込んだ。基礎コンクリートの前面には、加速度計を上・下端にそれぞれ3個貼り付けた。防護柵のワイヤーロープの引出棒、支柱、基礎コンクリート表面、アンカー筋には歪みゲージを貼り付けた。基礎コンクリートの前面には、基礎の変位を直接測定するためにレーザー式変位計を2段に配置した。

(1) 基礎の応答

防護柵に重錘を衝突させたときの基礎の応答をビデオカメラ(30コマ/秒)で撮影した。その結果を写真-2～写真-5に示す。

実験ケース1で重錘を高さ2.5mから落下させた場合を写真-2に示す。重錘が防護柵に衝突すると、金網とワイヤーロープがまず変形し、変形が進行した時点で基礎がつま先を中心に回転運動を始めた。重錘が柵から後方へ跳ね返ってから基礎は回転運動を継続し、重錘の衝突から約0.2～0.4秒後に回転角が最大になった。その後、逆回転して元の姿勢に戻ると、次には基礎のかかとを中心に後方へ回転を始めた。数回のロッキング運動を繰り返し、停止した。

ケース1で重錘の落下高さを3.0mにすると、重錘は跳ね返ることなく防護柵に乗りかかった状態で、基礎はゆっくり前方へ回転して写真-3に示すように転倒した。なお、実験条件が同じケース3の実験においては重錘落下高2.5mで転倒した。

実験ケース2では、落下高2mで重錘を衝突させても基礎は動かない。写真-4は落下高を3mにした場合である。ベースコンクリートとアンカーの付着が切れて基礎のかかどが3cm浮き上がった。落下高4mではかかどが8.7cm浮き上がり図-4のようになった。重錘落下高を5mにすると、写真-5

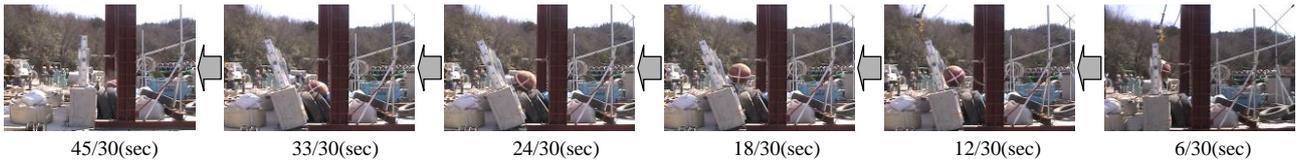


写真-2 実験ケース1, 重錘落下高 2.5m における基礎の応答

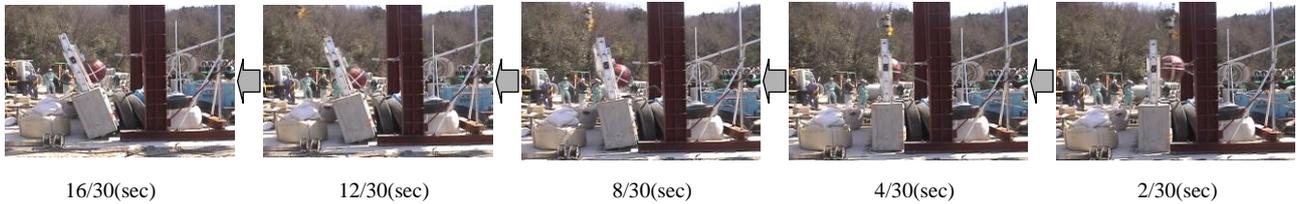


写真-3 実験ケース1, 重錘落下高 3.0m における基礎の応答



写真-4 実験ケース2, 重錘落下高 3.0m における基礎の応答

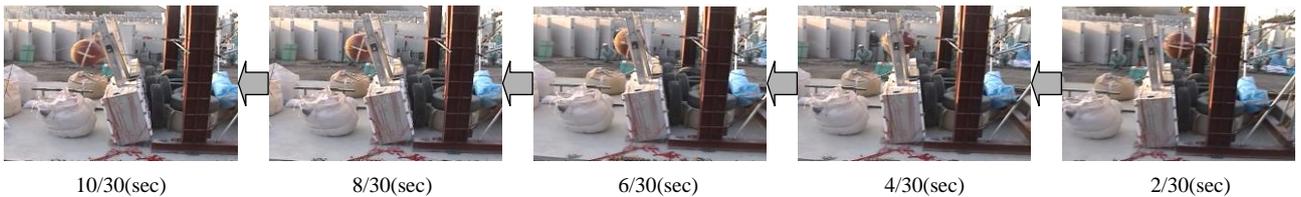


写真-5 実験ケース2, 重錘落下高 5.0m における基礎の応答

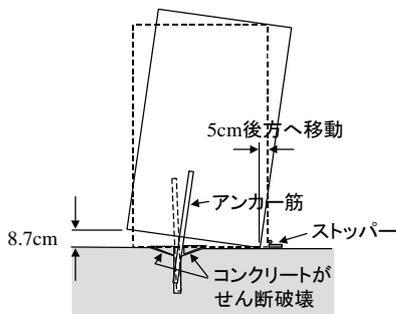


図-4 基礎の応答変位

に見られるように防護柵を突き破って重錘が前方へ飛び出した。

図-5 は、ケース 3 で重錘落下高を 2m とした場合とケース 4 で重錘落下高を 3m とした場合における基礎の水平変位をレーザー変位計で測定した結果である。アンカーがない場合は、基礎を中心に前後にロッキング運動する。その振幅、周期は経時的に減衰している。アンカーがあると振幅、周期が小さくなっている。また、アンカーの抜け出しの影響でロッキング中心が移動している。

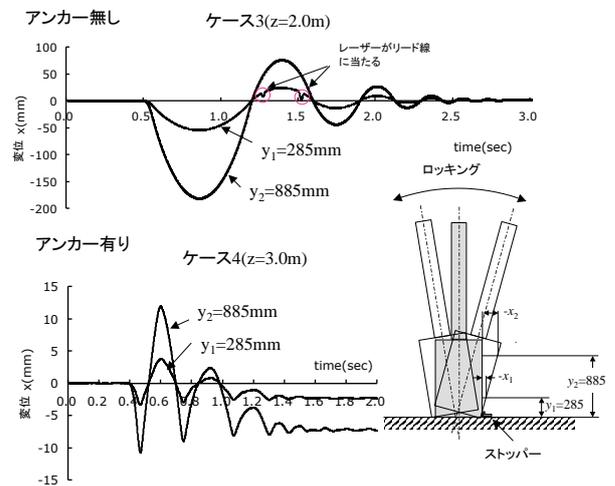


図-5 基礎の応答変位(ケース 3 とケース 4)

(2) 防護柵の破損

a) 端末支柱

端末支柱には H 形鋼(H-150×150×7×10)が使用されている。



写真-6 端末支柱と金網の破損状態。

重錘を柵に衝突させるとワイヤーロープに張力が作用し、ロープ取付部の端末支柱のウェブプレートが変形する。case-1の実験で重錘を落下高2.5mで衝突させたとき、下から3段目のロープ取付部の座金が大きく変形してウェブプレートに亀裂が入った。このため、以後の実験では座金を厚さ12mmの鋼板に取り替えて行った。写真-6(左)はその様子を示したものである。

b) 金網

金網には菱形金網(φ3.2×50mm)が使用されている。今回の実験ではいずれのケースにおいても重錘落下高 $z=3\text{m}$ で金網を構成する鉄線の一部が破断して穴が開いた(写真-6(上))。そのときの重錘のエネルギーは $0.47t \times 9.8\text{m/s}^2 \times 3\text{m} = 14\text{kJ}$ である。

ケース2とケース5では、重錘落下高4mでワイヤーロープが破損し、落下高5mで金網を重錘が突き破った(写真-6(下))。このときの重錘のエネルギーは23kJである。

金網で吸収可能なエネルギーは、落石対策便覧に示されている25kJよりも以下の理由ではるかに小さいと思われる。

鉄道総合技術研究所の実験によれば、スパン3mで張られた菱形金網が25kJのエネルギーを吸収するには金網が1.2m程度孕み出さなければならない。ところが実験に用いた防護柵は、ワイヤーロープが上下方向に0.3m間隔で張られているため、金網は変形が拘束されており、30cm程度しか孕み出すことができないからである。

金網の吸収エネルギーは拘束条件によって変わるので、一律に同じと見なすことはできない。

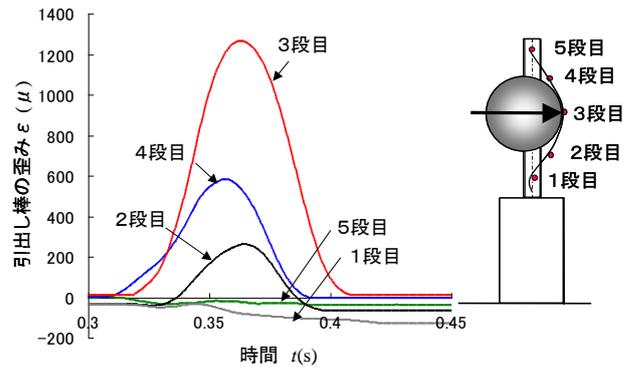


図-6 引出棒の歪み(ケース6, $z=4\text{m}$)

c) ワイヤロープ

実験に用いた防護柵には、ワイヤーロープ(3×7G/0 φ18)が5段に張られている。ワイヤーロープに歪みゲージを貼ることができないので、端部の引出棒(φ25×500)にゲージを貼って歪みを測定した。ケース6で重錘落下高を4mとしたときの測定結果を図-6に示す。

1段目(最下段)と5段目(最上段)の引出棒には、歪みはほとんど発生していない。重錘の中心付近が接触する3段目の引出棒の歪みが最も大きくなっている。他のケースにおいても同様の傾向が見られた。

防護柵には、ロープ間隔が上下に拡がって落石が抜け出すのを防止するために間隔保持材が取り付けられているが、実際には間隔保持材が十分機能を発揮しなかった。重錘の衝突時に2段目と4段目のロープが上下に広がり、3段目のロープに荷重が集中した。

実験で測定された3段目の引出棒の最大歪みは、ケース5で $z=4\text{m}$ のときに 1719μ であった。ロープが破断した $z=5\text{m}$ のときの歪みは 1408μ であった。引出棒のヤング係数を $E=2 \times 10^5\text{MPa}$ 、降伏強度240MPaとすると、測定値は降伏歪み 1200μ を超えるので、引出棒に作用した最大張力は $T=240 \times 0.491=198\text{kN}$ と推定される。

防護柵の設計で用いるワイヤーロープの破壊荷重は $T_b=157\text{kN}$ であるが、これを超える張力が作用して破断したものと推測される。

落石防護柵の設計では、一般に落石を2本のワイヤーロープで均等に支持するものと仮定しているが、このような仮定は適切でない。

d) 重錘のエネルギーと防護柵の損傷

重錘のエネルギーと防護柵の損傷の関係を整理すると図-7となる。なお、重錘のエネルギーは、 $E=0.47 \times 9.8 \times z$ として算出した。

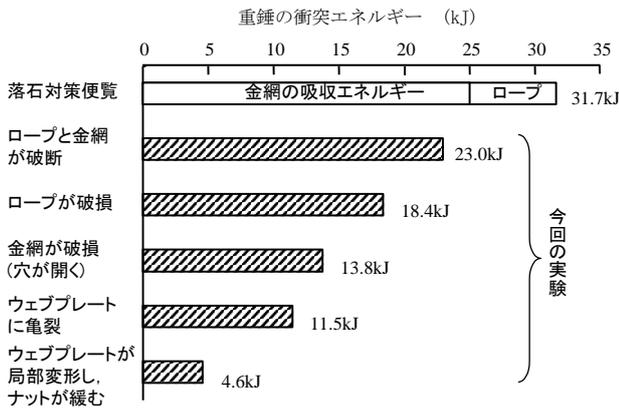


図-7 重錘のエネルギーと防護柵の損傷

タイプ1の防護柵の吸収エネルギーを落石対策便覧に準拠して算定すると31.7kJとなる。内訳は金網が25kJ、ワイヤーロープが6.7kJである。ところが、実験から推定される吸収エネルギーは23kJと少ない。

3. 基礎の有効抵抗長さ

落石に対して基礎が有効に抵抗する長さは明らかにされていない。

そこで、タイプ2の供試体(L=7.5m)に重錘を落下高さ z=2m, 3m, 4m でそれぞれ衝突させたときの基礎工の加速度波形を調べてみた。その結果を図-8に示す。基礎の前面上部の中央、右端、左端のそれぞれの加速度計で測定された波形の第1波目に着目すると、波形は概ね等しい。基礎は剛体的に運動しており、全長を有効と見なすことができるといえる。

図-9は、ケース3~ケース6の実験で得られたもので、重錘の落下高さ z と基礎の最大角速度 ω の関係を示している。なお、角速度は後述の式(9)で求めた。

基礎長が長いほど角速度は小さくなっている。基礎全長が転倒に対して有効に抵抗しているためといえる。アンカーがあると、付着が切れても角速度を抑える効果が見られる。

落石対策便覧では、有効抵抗長さを壁高の4倍と決めているが、基礎が破壊されない限り基礎全長が有効に抵抗する。

4. 基礎の角速度と回転角

(1) 剛体力学による運動方程式

図-8に示すように、質量 M の剛体の基礎に衝撃力 P(t) が高さ y_P(t) の位置に作用したときの運動方程式は式(1)で表される。

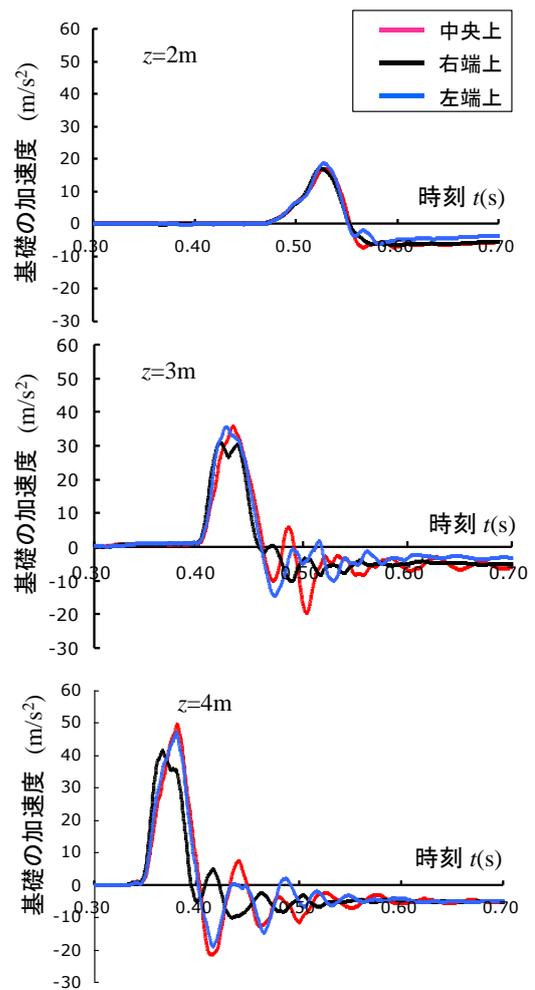


図-8 基礎の加速度波形(ケース5)

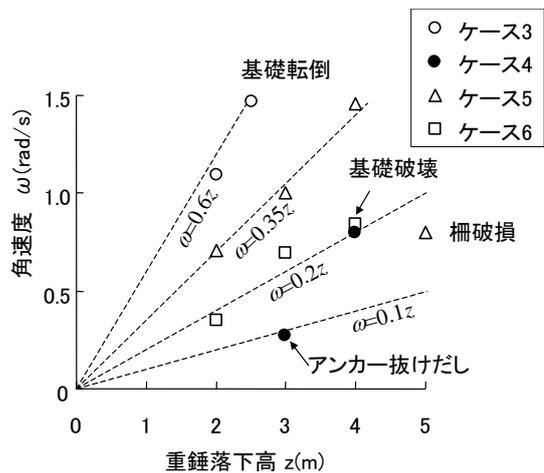


図-9 重錘落下高と基礎の角速度の関係

$$\left. \begin{aligned}
 M\dot{V}_x(t) &= P(t) - R_x(t) \\
 M\dot{V}_y(t) &= R_y(t) - Mg \\
 I\dot{\omega}(t) &= P(t)y_P(t)\cos\theta(t) + R_x(t)rcos(\beta - \theta(t)) \\
 &\quad - R_y(t)r\sin(\beta - \theta(t))
 \end{aligned} \right\} (1)$$

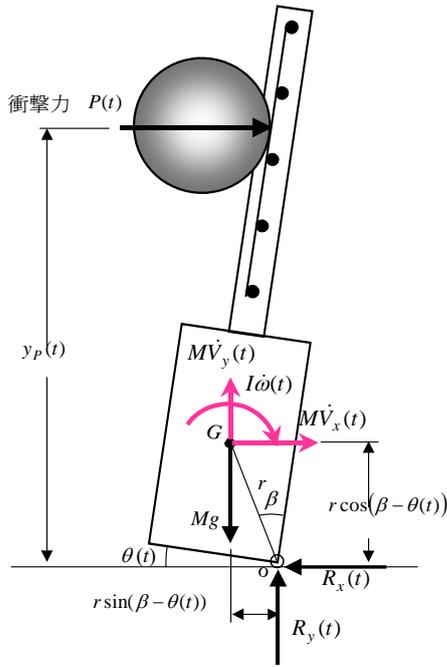


図-10 記号の説明

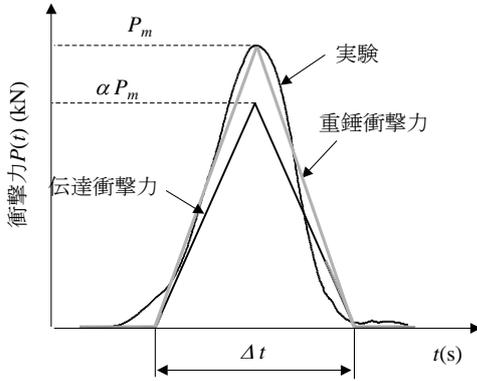


図-11 重錘衝撃力と伝達衝撃力

I は基礎の重心に関する慣性モーメントである。基礎が滑らない場合は式(2)、式(3)の条件式がたてられる。

$$V_x(t) = r \cos(\beta - \theta(t)) \omega(t) \quad (2)$$

$$V_y(t) = r \sin(\beta - \theta(t)) \omega(t) \quad (3)$$

式(1)～式(3)を連立させて解けば、任意時刻 t における基礎の角速度 $\omega(t)$ と回転角 $\theta(t)$ が次のように求められる。

$$\omega(t) = \int \frac{P(t)y_P(t)\cos\theta(t) - Mgr\sin(\beta - \theta(t))}{I + M \cdot r^2} dt \quad (4)$$

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt \quad (5)$$

基礎に伝達される重錘の衝撃力波形を図-11 のように最大伝達衝撃力が αP_m 、作用時間が Δt の三角形と仮定すれば、基礎に伝達される任意時刻 t の

衝撃力 $P(t)$ は、式(6)で表される。

$$\left. \begin{aligned} t \leq \frac{\Delta t}{2}: P(t) &= 2\alpha P_m \frac{t}{\Delta t} \\ t > \frac{\Delta t}{2}: P(t) &= 2\alpha P_m \left(1 - \frac{t}{\Delta t}\right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ただし、

$$P_m = m \cdot a_{\max} \quad (7)$$

$$\Delta t = \frac{2m(v_1 - v_2)}{P_m} \quad (8)$$

ここに、 P_m は重錘の最大衝撃力、 a_{\max} は重錘の最大加速度、 m は重錘の質量、 v_1 は重錘の衝突直前の速度、 v_2 は重錘の衝突直後の速度、 α は基礎への衝撃伝達率である。

(2) 実験による角速度と回転角

任意時刻 t_i における基礎の角速度 $\omega(t_i)$ と回転角 $\theta(t_i)$ は、基礎に貼り付けた加速度計の測定データより式(9)～式(12)で求められる。

$$\omega(t_i) = \frac{v_u(t_i) - v_l(t_i)}{\Delta h} \quad (9)$$

$$\theta(t_i) = \theta(t_{i-1}) + \frac{1}{2} \{ \omega(t_{i-1}) + \omega(t_i) \} (t_i - t_{i-1}) \quad (10)$$

ただし、

$$v_u(t_i) = v_u(t_{i-1}) + \frac{1}{2} \{ a_u(t_{i-1}) + a_u(t_i) \} (t_i - t_{i-1}) \quad (11)$$

$$v_l(t_i) = v_l(t_{i-1}) + \frac{1}{2} \{ a_l(t_{i-1}) + a_l(t_i) \} (t_i - t_{i-1}) \quad (12)$$

ここに、 Δh は基礎前面の上下端に貼り付けた加速度計の鉛直間隔。 $a_u(t_i)$ 、 $a_l(t_i)$ は任意時刻 t_i における基礎上端と下端の加速度である。

(3) 解析結果と実験値の比較

ケース 3、ケース 5、ケース 6 の実験について、基礎の角速度を式(4)で、回転角を式(5)で算定した。図-12～図-17 に「解析」と表示して描いている曲線がその計算結果である。また、測定された基礎の加速度から式(9)、式(10)を用いて求めた角速度と回転角は「実験」と表示して描いている。

アンカーを付けたケース 4 については、解析法を検討中であるので掲載を割愛した。

衝撃伝達率については、解析結果が実験値と概ね一致する値を試行錯誤的に決定した。衝撃伝達率を適切に設定すれば実験とほぼ同じ結果を得ることができる。ちなみに、今回の実験の衝撃伝達率は $\alpha = 0.8 \sim 0.98$ となった

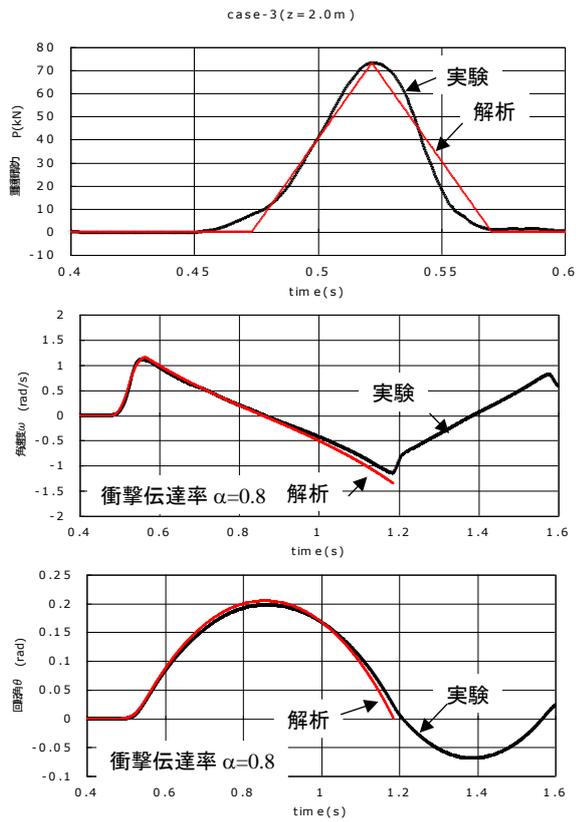


図-12 ケース 3(z=2.0m)

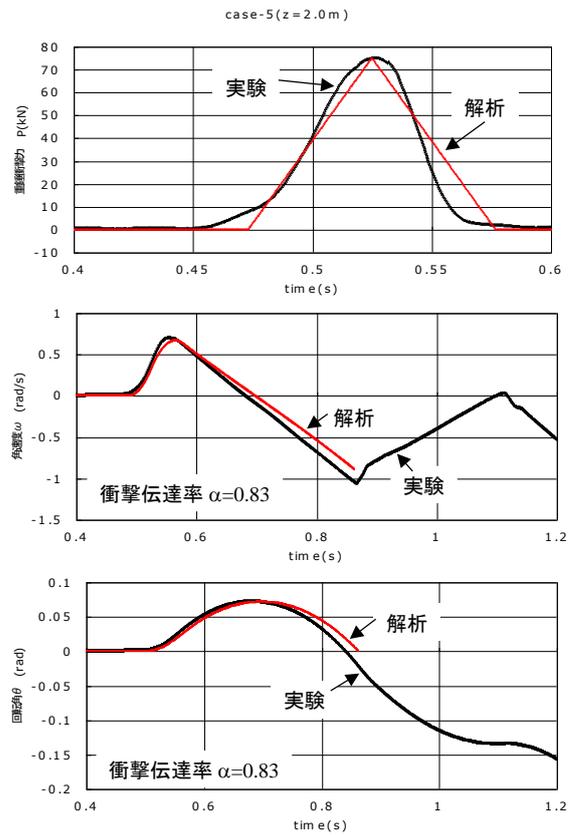


図-14 ケース 5(z=2.0m)

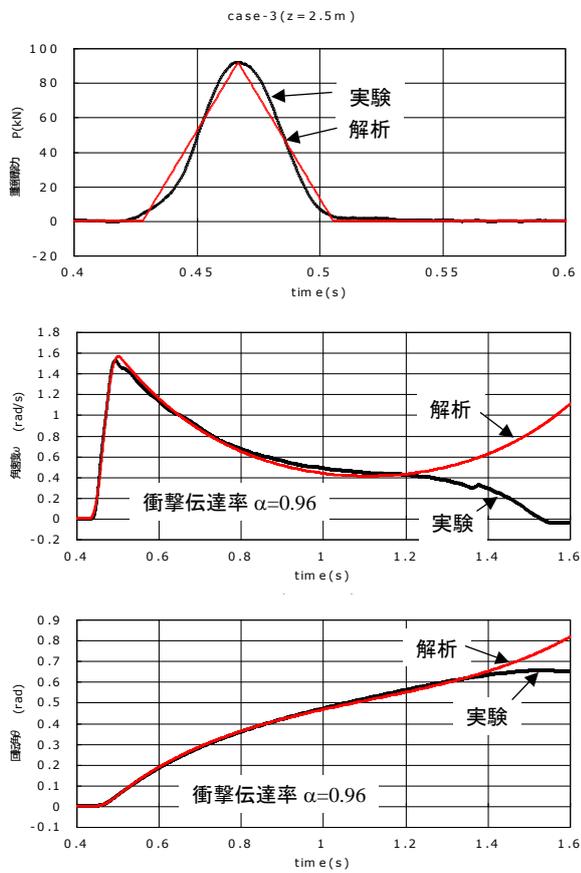


図-13 ケース 3(z=2.5m)

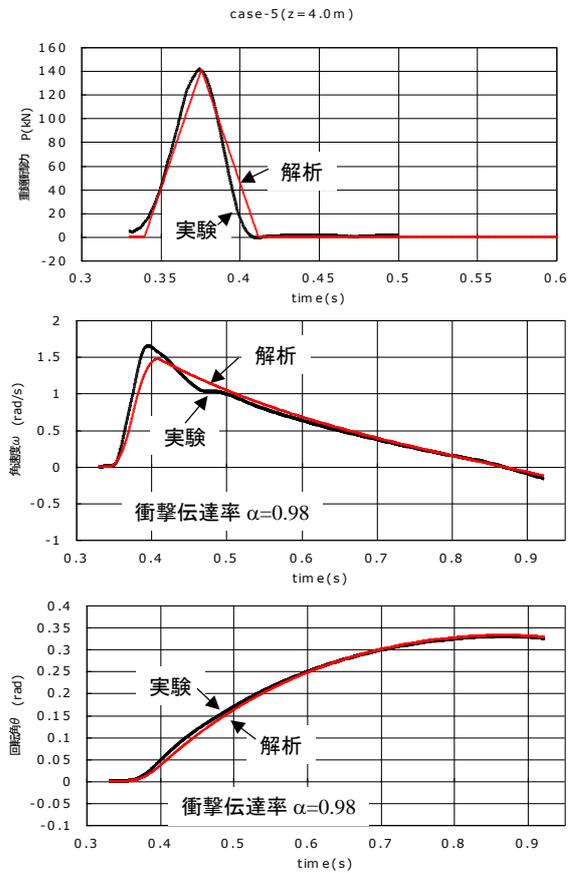


図-15 ケース 5(z=4.0m)

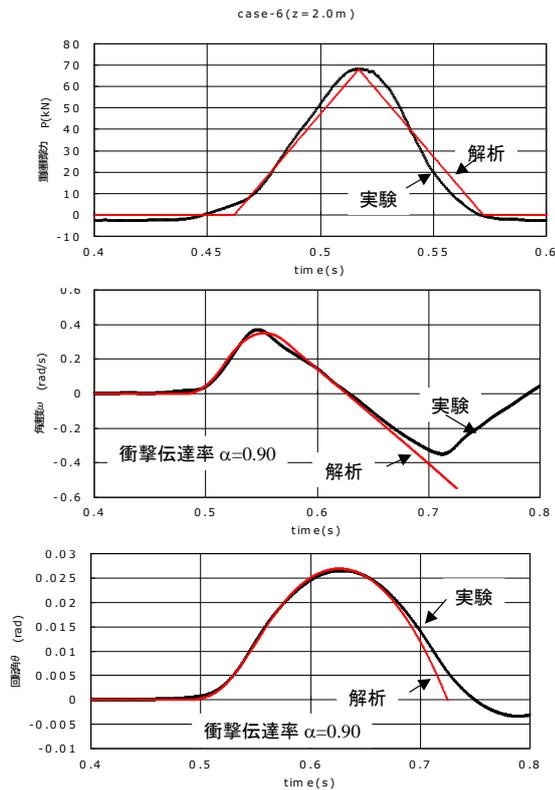


図-16 ケース 6(z=2.0m)

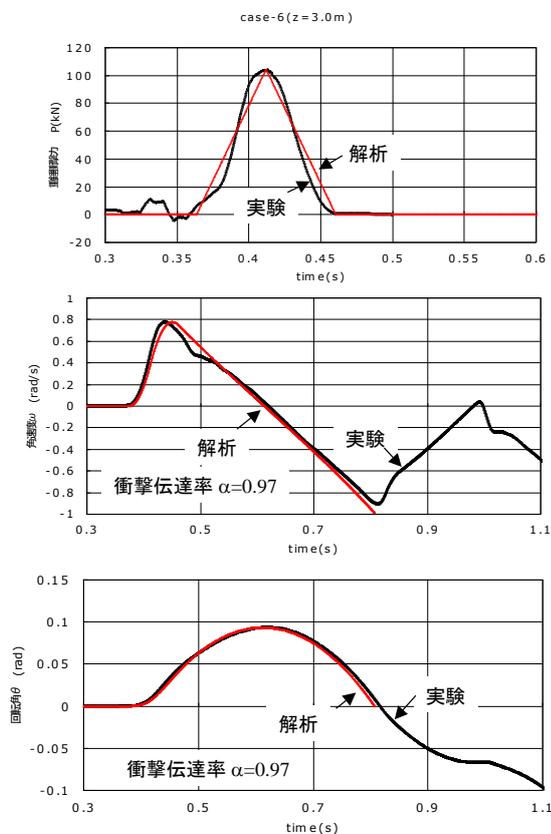


図-17 ケース 6(z=3.0m)

6. まとめ

プレキャストコンクリートブロックで製作した基礎に高さ1.5mの市販の防護柵(ストンガード)を設置し、重さ0.47tの重錘を衝突させて、防護柵および基礎の挙動を観測した。また、剛体運動力学に基づいて、衝撃力が作用したときの基礎の応答解析法を提案した。その結果、下記の知見が得られた。

- ①ワイヤーロープと端末支柱(H形鋼)の取り付け部が構造的に弱い。12kJ程度の重錘エネルギーで支柱のウェブに亀裂が入った。
- ②重錘が衝突するとワイヤーロープの間隔が上下に広がる。衝撃力は重錘が直撃した1本のワイヤーロープに集中する傾向がある。
- ③ワイヤーロープの伸びは、中間支柱や間隔保持材で拘束されるため、歪みは様にならず重錘の衝突点付近に集中する。
- ④金網の吸収エネルギーは、設計では一般に25kJが用いられているが、8kJ程度であった。ワイヤーロープで上下方向に30cm間隔に拘束されているためと考えられる。
- ⑤基礎の破壊形態は、転倒または横方向連結部の破壊のいずれかであった。
- ⑥衝撃力による転倒モーメントが防護柵の自重による抵抗モーメントより大きくなると基礎は回転運動をするが、回転によって基礎の重心がつま先より前に出なければロッキング運動して元の姿勢に戻る。
- ⑦基礎が破壊しなければ転倒に対して基礎全長が有効に抵抗する。
- ⑧重錘衝撃加速度の基礎への伝達率を適切に決めれば、解析結果は実験値と概ね一致させることができる。今回の実験における衝撃伝達率は0.8~0.98であった。

謝辞

本研究は、国土交通省四国地方整備局四国技術事務所の「平成14年度落石防護柵の設計手法検討業務委託」において実施したものである。技術検討会(委員長：矢田部龍一)を通じて、金沢大学名誉教授の吉田博先生、高知工科大学の島弘教授、高松工業高等専門学校の長友克寛教授、国土交通省国土技術政策総合研究所の松尾修氏から貴重なご助言を賜った。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧,2000.
- 2) 佐溝昌彦, 村石尚, 杉山友康, 安藤和幸：簡易落石防護柵を構成する金網の特性評価, 鉄道総研報告, 第16巻, 第8号, 2002.8.
- 3) 村石尚, 杉山友康, 佐溝昌彦, 安藤和幸：静的荷重下における落石防護ネットの変形特性, 土木学会論文集, No.693/VI-53, 95-103, 2001.12
- 4) 神戸大学工学部土木工学科, ㈱神戸製鋼所：神鋼型落石防止柵実地試験報告書, 1967.
- 5) 国土交通省土木研究所耐震技術研究センター動土質研究室：落石防護擁壁の合理的設計法の提案, 土木研究所資料第3819号, 平成13年3月
- 6) 川瀬良司, 今野久志, 岸徳光, 松岡健一：落石防護擁壁の重錘衝突実験と数値シミュレーション, 第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 2000.
- 7) 岸徳光, 佐藤昌志, 今野久志, 松岡健一：落石防護擁壁模型の重錘衝突実験と数値解析的検討, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.45A, 1999.
- 8) 川瀬良司, 岸徳光, 今野久志, 池田憲二：RC製落石防護擁壁の耐衝撃性向上効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, 2001.
- 9) 川瀬良司, 池田憲二, 今野久志, 岸徳光：落石防護擁壁の耐衝撃向上工法に関する実験的研究, 土木学会, 第6回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 2002.
- 10) 右城猛：落石防止擁壁の合理的な設計法の開発, 平成10年度建設事業の技術開発に関する助成事業成果報告書, 社団法人四国建設弘済会, 平成12年6月.
- 11) 右城猛, 筒井秀樹, 水田勝也, 森伸一郎：落石防止擁壁の設計法に関する提案, 第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 2000.
- 12) 右城猛, 津野道彦, 水田勝也, 尾崎勝彦：落石防護擁壁の設計法に関する研究, 土木技術, Vol.55, No.9, 2000.
- 13) 河瀬久, 宮前武雄, 大石明徳：落石防護柵基礎の合理的な設計法の開発, 建設マネジメント技術,

(2008. 3. 10 受付)