論文　擁壁を基礎とする落石防護柵支柱の重錘衝突実験

山澤　文雄[*1]・安中　新太郎[*2]・小室　雅人[*3]・岸　徳光[*4]

要旨：本論文では，落石防護擁壁上に設置されている落石防護柵に落石が衝突した場合の動的挙動の把握を目的に，擁壁を基礎とした鋼製支柱模型に対し支柱の変形および擁壁基礎の回転挙動に着目した基礎的な重錘衝突実験を行った。その結果，1）静力学的には，支柱は塑性変形に至る前に擁壁が回転運動する結果となるが，実験においては衝撃荷重によって支柱が塑性変形に至るとともに擁壁基礎は回転運動をすること，2）衝突による支柱の塑性変位角が 15°以内となる重錘衝突エネルギーの範囲であれば，擁壁の回転角は許容値内に収まり，擁壁基礎としての安定性は確保されること等が明らかになった。

キーワード：落石防護擁壁，落石防護柵，重錘衝突実験，回転挙動

1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線の道路沿いには，落石災害を防止するための落石防護施設が数多く設置されている。そのうち，H形鋼支柱，ひし形金網，ワイヤロープ等の部材を組み合わせた従来型落石防護柵（以下，落石防護柵，**写真－1**）は現場で広く採用されている施設である。この落石防護柵の基礎の形式は，落石防護擁壁（以下，擁壁）を兼ねるものや土中にコンクリート基礎を設けるものがある。そのうち，擁壁を基礎とするものは，支柱を無筋コンクリートの擁壁躯体内に埋設する。この支柱や基礎に関する落石防護柵の設計は，一般に落石対策便覧[1)]（以下，便覧）に基づき，落石による動的な作用を考慮せず静荷重による慣用的な方法が用いられている。そのため，擁壁を基礎とした場合の落石防護柵の安定照査には以下の様な課題[2)]が指摘されている。

1）　落石の衝突位置が落石防護柵の下方になるほど，また支柱の降伏モーメントが大きくなるほど基礎の転倒に対する安定度が低下する。

2）　荷重の入力条件が落石の衝突位置のみであり，落石の質量，衝突速度，運動エネルギーといった条件が考慮されていない。

写真－1　落石防護柵の設置状況

本研究は，擁壁を基礎とする落石防護柵に落石が衝突した場合の安定性（転倒等）に関する合理的な照査手法の確立を最終目標としている。本論文では，支柱付き擁壁基礎模型を製作し，落石を模擬した重錘が支柱に直撃する場合において，重錘の衝突位置および落下高さを変化させた実験を行い，鋼製支柱の変形や擁壁基礎の回転挙動を検証することとした。

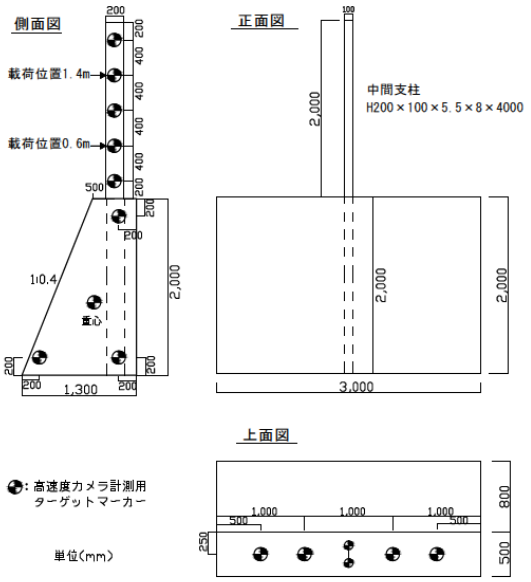
2. 実験概要

2.1 試験体概要

図－1 に試験体の形状寸法図を示す。擁壁基礎の断面形状は便覧の慣用設計法を用いた安定照査を行い決定した。**表－1** に安定照査結果と計算に用いた諸元を示す。落石防護柵の部材には使用実績の多い中間支柱およびワイヤロープを用いている。落石防護柵延長は 30 m，擁壁延長は施工打ち継ぎ目地を考慮して 10 m とした。計算の結果，本研究では，落石防護柵への衝突位置を擁壁天端から高さ 1.4 m とした場合に安定性が確保され，実構造においても使用実績のある断面を選定した（高さ H = 2.0 m，天端および基部の壁厚がそれぞれ B_1 = 0.5 m，B_2 = 1.3 m，擁壁背面（重錘衝突面）は鉛直，擁壁前面（衝突背面）は 1：0.4 の勾配）。

一方，実験では擁壁延長 3 m，擁壁の中央に 1 本の鋼製支柱（H-200×100×5.5×8，SS400）を設置した小型模型を用いた。なお，擁壁延長は実防護柵支柱が 3 m 間隔

*1　（国研）土木研究所　寒地土木研究所　寒地構造チーム　研究員　（正会員）
*2　（国研）土木研究所　寒地土木研究所　寒地構造チーム　上席研究員　（正会員）
*3　室蘭工業大学　大学院工学研究科もの創造系領域　教授　博（工）（正会員）
*4　室蘭工業大学　大学院工学研究科もの創造系領域　特任教授　工博　（正会員）



図－1　試験体の形状寸法図

に擁壁上に設置されていることから，中間支柱 1 本が分担する長さを考慮して 3 m と設定した。鋼製支柱の根入れ深さは，**図－1** に示すように貫通試験体（根入れ深さ 2.0 m）とした。また，載荷位置にはフランジの局部座屈を防止するためにスティフナーを溶接している。

2.2 実験方法及び計測項目

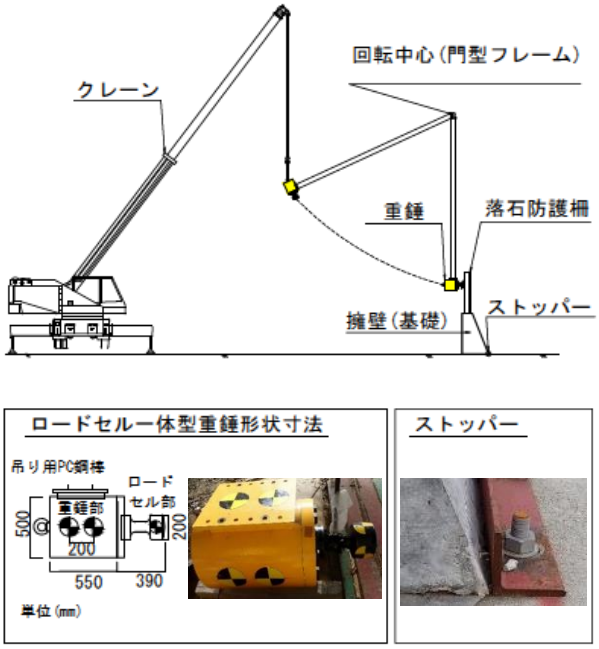
図－2 に実験概要図およびロードセル一体型重錘の形状寸法を，**写真－2** には実験風景を示す。衝撃荷重は，質量 1,000 kg のロードセル一体型重錘を高さ約 10 m の門型フレームの上部吊桁から 4 本の PC 鋼棒（φ17mm）を用いて吊り下げ，振り子運動により支柱に衝突させることによって載荷した。

擁壁は直接基礎の場合，地盤が良好な箇所か良質土等に置き換えた地盤に設置される。今回の実験では，既往の実験結果[3]において，動的挙動に対し基礎地盤による影響が認められなかったことから，擁壁をコンクリート基盤上に設置した。また，載荷による擁壁の運動を回転のみに制限するため，コンクリート基盤上に擁壁つま先部に接するストッパー（L 型アングル）（**図－2** 参照）を設けることとした。

実験は，**表－2** に示すように重錘の載荷位置，落下高さを変化させた全 10 ケースについて実施した。表中の試験体名は，第一項目目は擁壁天端からの載荷点高さ（L1.4 : 載荷位置 1.4 m，L0.6 : 載荷位置 0.6 m）を表し，第二項目目の E に続く数値は重錘衝突エネルギーを示している。また，表中には高速度カメラ画像から算定した重錘衝突速度，重錘衝突速度から算定した重錘衝突エネルギー，実験時のコンクリートの圧縮強度および使用した H 形鋼の降伏点強度を記載している。なお，載荷位置

表－1　落石防護柵の設計諸元および安定照査結果

防護柵	柵高(m)	2.0		
	支柱間隔(m)	3.0		
	柵全長(m)	30.0		
ワイヤーロープ	種類	3×7 G / O-18φ		
中間支柱	種類	H-200×100×5.5×8		
	材質	SS400		
	降伏点応力度 (N/mm^2)	235		
擁壁	高さ(m)	2.0	2.0	2.0
	天端幅(m)	0.5	0.5	0.5
	底面幅(m)	1.1	1.3	1.5
	前面勾配	0.3	0.4	0.5
	有効抵抗延長 (m)	10.0	10.0	10.0
安定照査結果	衝突位置1.4m	不合格	合格	合格
	衝突位置0.6m	不合格	不合格	不合格



図－2　実験概要および重錘形状寸法

写真－2　実験風景

は曲げが卓越する場合および曲げとせん断力が連成する場合を想定し，それぞれ実防護柵において落石が下から5本目と6本目のロープの中間部および2本目と3本目のロープの中間部に衝突する場合を設定し，擁壁天端から1.4 mおよび0.6 mの高さとした。

本実験における計測項目は，(1)上面から撮影した高速度カメラ画像に基づいて算定したH形鋼支柱の天端および擁壁天端の変位，(2) 側面から撮影した高速度カメラ画像に基づいて算定したH形鋼支柱および擁壁の変位・回転角，(3) 重錘先端部に配置したロードセルによる衝撃荷重である。なお，高速度カメラの有効画素数は1,600×1,200，フレームレートは2,000 fpsである。ロードセルから得られる荷重データは，サンプリング周波数を10 kHzとしてデジタルデータレコーダにて収録した。

3. 実験結果および考察

3.1 静的載荷条件による試算

ここでは，実験結果と比較するために，静載荷条件下の支柱の変形や擁壁回転運動に係る試算を行う。製作した支柱付き擁壁の安定性を，**図－3(a)** に示すような力のつり合い式(1)から計算すると，水平荷重によるモーメントが支柱付き擁壁の自重による抵抗モーメントを超えると回転運動を開始することになる。

$$Pl = WX_G \tag{1}$$

ここで，P：水平荷重 (kN)，l：基礎底面からの作用高さ(m)，W：支柱付き擁壁の自重(kN)，X_G：支柱付き擁壁の重心からつま先までの距離(m)である。

いま，水平荷重の載荷位置を基礎底面からそれぞれ3.4 m（擁壁天端から高さ1.4 m），2.6 m（擁壁天端から高さ0.6 m）の高さとすると，擁壁が回転を開始する荷重は，上式からそれぞれP = 29.8 kN，39.0 kNとして求まる。

また，支柱が基部で塑性ヒンジを形成する時の荷重F_yは，次式より求められる（**図－3(b)** 参照）。

$$F_y = M_0 / h_2 = \sigma_y Z / h_2 \tag{2}$$

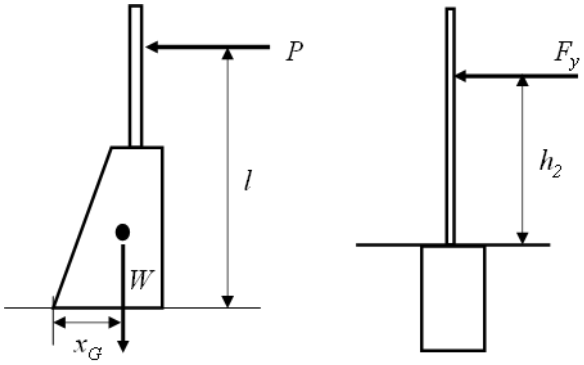
ここで，M_0：全塑性モーメント，h_2：荷重の作用高さ，σ_y：支柱H形鋼の降伏強度（SS400で235N/mm^2），Z：支柱に用いたH形鋼の塑性断面係数（205×10^3 mm^3）である。式(2)より載荷位置がそれぞれ1.4 m，0.6mの場合には，F_y = 34.4 kN，80.3 kNとして算出される。

以上より，擁壁が回転を開始する水平荷重Pと支柱基部に塑性ヒンジが形成される荷重F_yを比較すると，いずれの載荷位置においても，$P<F_y$となる。このことから，静力学的には，支柱が塑性ヒンジを形成せずに，擁壁は回転に至ることが明らかになった。

また，製作した支柱付き擁壁を便覧の慣用設計法に基づき安定照査した。その結果，支柱の基部に塑性ヒンジが形成される時の荷重F_yと自重との合力が作用する点の偏心量を求め，その値が底版幅Bの1/3以下であれば安定性が確保されるとしているが，安定照査結果は載荷位置に関わらず落石時の転倒に対して不合格となった。

表－2　試験体一覧

試験体名	載荷位置 (m)	落下高さ (m)	支柱の根入れ深さ (m)	実測重錘衝突速度 (m/s)	重錘衝突エネルギー (kJ)	コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)	H形鋼降伏点応力度 (N/mm^2)
L1.4-E8	1.4	0.5	2.0	3.9	7.6	33.0	350
L1.4-E13		1.0		5.2	13.4		
L1.4-E18		1.5		6.0	17.8		
L1.4-E24		2.0		7.0	24.4		
L0.6-E13	0.6	1.0		5.2	13.4		
L0.6-E24		2.0		7.0	24.3		
L0.6-E36		3.0		8.5	35.8		
L0.6-E46		4.0		9.6	46.0		



(a)水平荷重と自重　　(b)支柱への作用高さ

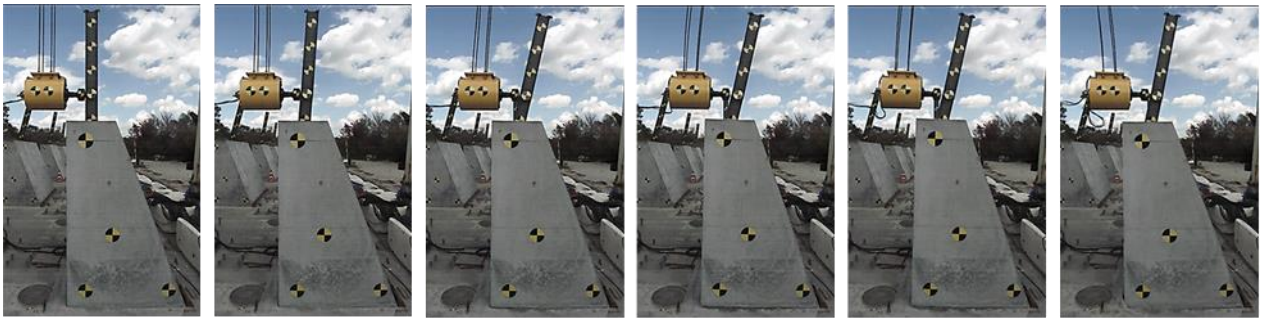
図－3　荷重と作用位置の関係

表－3　支柱の天端変位

ケース	載荷方向		載荷直角方向	
	最大変位 (mm)	残留変位 (mm)	最大変位 (mm)	残留変位 (mm)
L1.4-E8	211	162	11	8
L1.4-E13	332	275	17	8
L1.4-E18	488	415	248	146
L1.4-E24	661	587	358	246
L0.6-E13	263	215	32	23
L0.6-E24	480	411	54	20
L0.6-E36	729	629	52	9
L0.6-E46	872	758	209	136

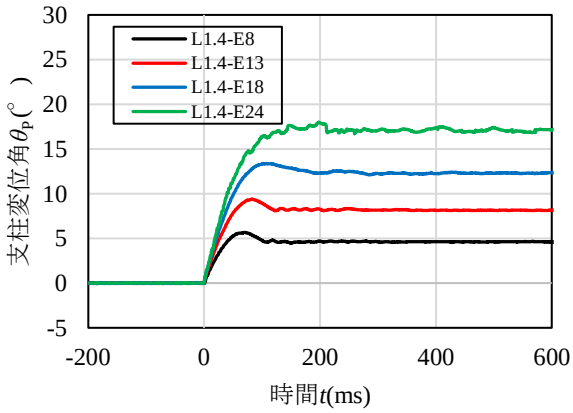
3.2 重錘衝突時における支柱の動的挙動

写真－3 は側面に設置した高速度カメラから撮影したケースL0.6-E24の衝突時から300 ms後までの画像である。**表－3** には，擁壁の真上に設置した高速度カメラ画像より算定した支柱天端における最大変位と残留変位を示している。上述の静載荷条件下での試算では，支柱は塑性変形に至らずに擁壁が回転する結果となっている。

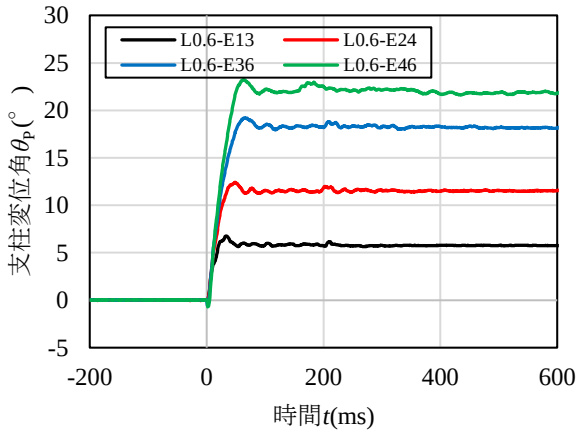


t=0ms　t=10ms　t=50ms　t=100ms　t=150ms　t=300ms

写真－3　高速度カメラ画像（L0.6-E24）

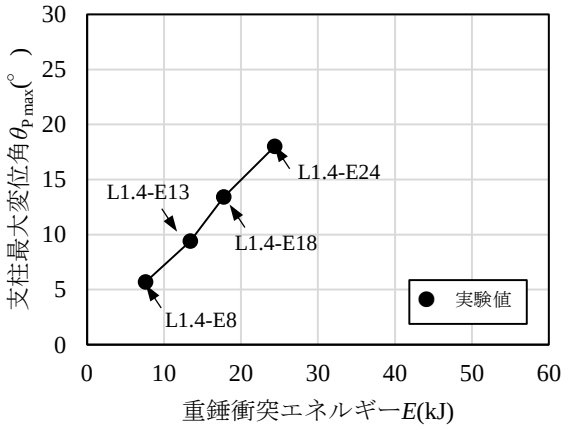


(a)載荷位置　擁壁天端から 1.4m

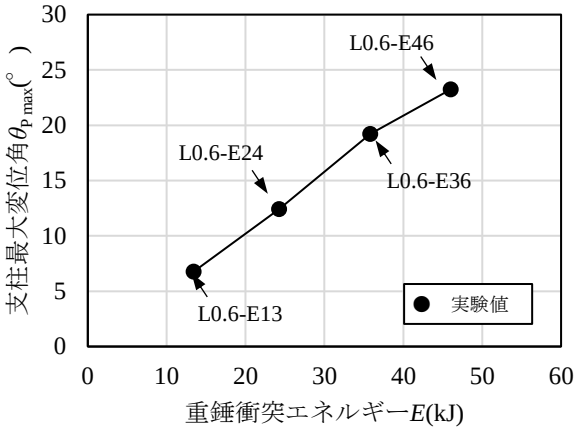


(b)載荷位置　擁壁天端から 0.6m

図－4　支柱変位角の時刻歴波形



(a)載荷位置　擁壁天端から 1.4m



(b)載荷位置　擁壁天端から 0.6m

図－5　衝突エネルギーと支柱最大変位角の関係

しかしながら，実験結果は，全ケースにおいて支柱が塑性変形に至る結果となった。また，後述するように支柱の塑性変形とともに擁壁も回転（浮き上がり）していることも明らかになった。L1.4-E18，L1.4-E24，L0.6-E46 の場合には，支柱の載荷方向と直角方向の変位が大きく示されている。これは，載荷時における若干の偏心等不完全性によって，支柱の弱軸方向にも変形が生じたことによるものと推察される。

図－4 には，支柱の変位角の時刻歴応答波形を示している。ここで支柱の変位角は載荷方向を正としている。図より，支柱が最大変位角に至る時間は，重錘衝突エネルギーが大きいほど長くなる傾向にある。また，重錘衝突エネルギーが同じケース同士では，最大変位角に至る時間は載荷位置が低い場合が短い。

図－5 には，重錘衝突エネルギーと支柱の最大変位角の関係を示している。支柱の最大変位角は，重錘衝突エネルギーの増加に応じて増加する傾向を示しており，支柱の弱軸方向への変形の影響は少ないものと推察される。また，支柱の最大変位角は重錘衝突エネルギーが同じ場合には載荷位置が低いほど小さくなることが分かる。

3.3 重錘衝突時における擁壁の動的挙動

本実験では，擁壁の回転挙動が確認された。しかしながら，擁壁本体の損傷は天端の支柱フランジ端部近傍に深さの浅いひび割れや剥離が発生する程度であり，擁壁本体構造に影響を及ぼすものではなかったことから，擁壁の動的挙動に限定して検討を行うこととする。

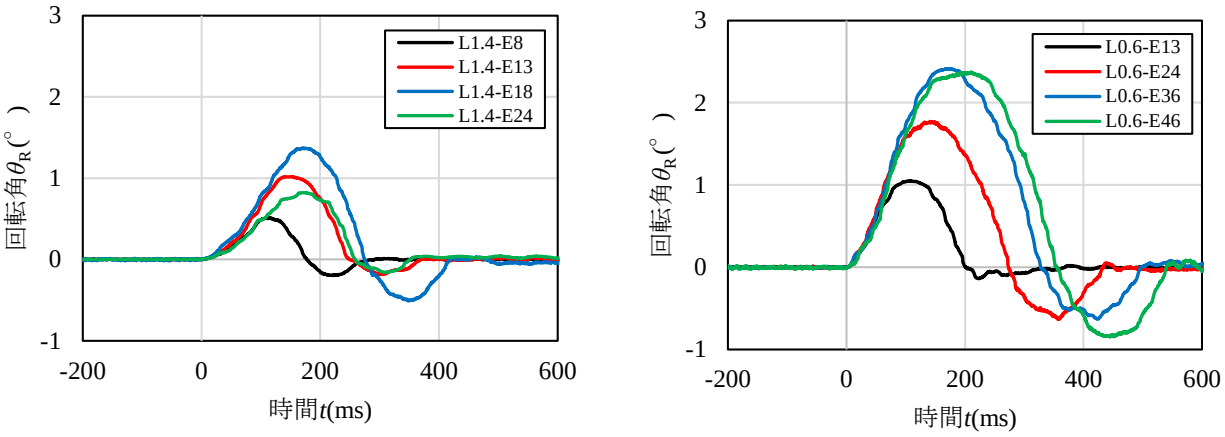
図－6 には，擁壁の回転角の時刻歴波形を示している。回転角は入力エネルギーが大きくなると概ね大きくなる傾向にあるが，落下高さの高い L1.4-E24，L0.6-E46 の場合は対応していない。これは，入力エネルギーが支柱の弱軸方向の変形（**表－3** 参照）に費やされたことも要因の一つと推察される。また，同じ入力エネルギーである L1.4-E13 と L0.6-E13 の場合で比較すると，載荷位置の低い場合が最大回転角に到達する時間が短くなる傾向が見られるが，最大回転角は同程度となっている。L1.4-E24 と L0.6-E24 の場合には，最大回転角は弱軸方向の変形が大きい L1.4-E24 が L0.6-E24 より小さくなっている。

図－7 には入力エネルギーと擁壁の最大回転角の関係を示している。図中には便覧の落石防護擁壁の安定に対する慣用設計法を用いて算定した擁壁の回転角を破線で示している。本来であれば，柵に落石が衝突した状態に対して擁壁の回転角を算定しなければならない。しかしながら，ここでは便覧に即して擁壁の天端（地盤から高さ 2m）に落石が直接衝突したものとして試算を試みる。その条件としては，コンクリート地盤の N 値を N=100[4] とし，反発係数を e=1（完全弾性衝突）および e=0（完全非弾性衝突）とする場合について図示した。

図から，弱軸方向への変形の大きい L1.4-E24, L0.6-E46 のケース以外は，便覧を用いた計算値（e=0）に近い値となっていることが分かる。これは，**写真－3** に示されているように支柱に衝突した重錘が擁壁と一体となって回転運動をしていることによるものと推察される。

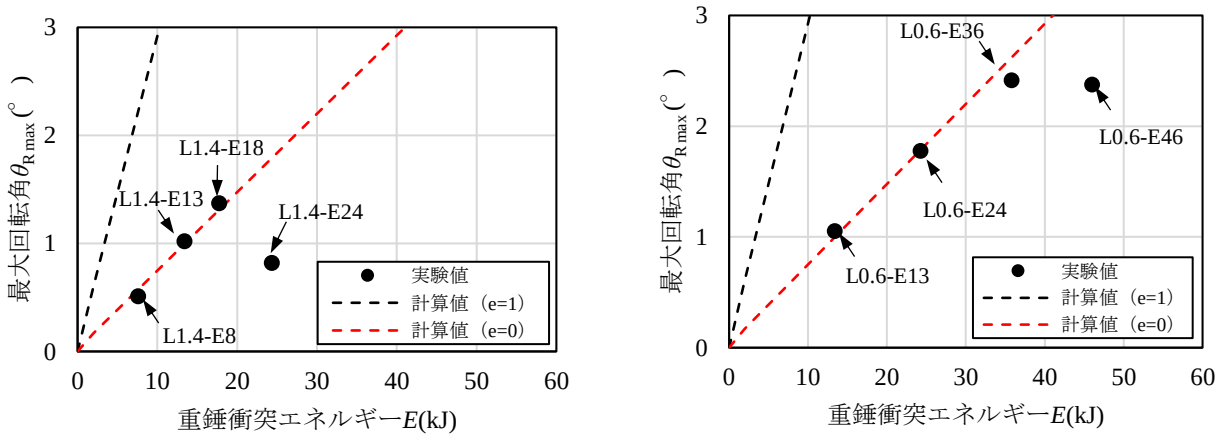
次に便覧中の支柱の許容最大変位角 15 度を生ずる重錘衝突エネルギーが引き起こす擁壁の回転運動量が，便覧に示される安定性の範囲に収まるかを試算した。

図－5 において，実験での支柱の許容最大変位角に対



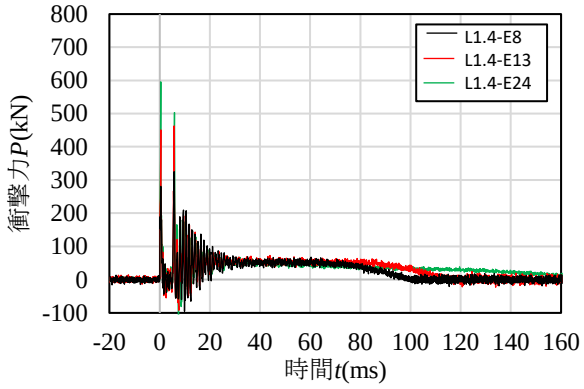
(a)載荷位置　擁壁天端から 1.4m　　(b)載荷位置　擁壁天端から 0.6m

図－6　擁壁回転角の時刻歴波形

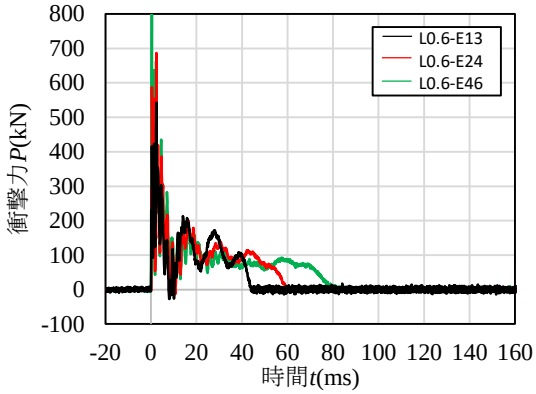


(a)載荷位置　擁壁天端から 1.4m　　(b)載荷位置　擁壁天端から 0.6m

図－7　衝突エネルギーと最大回転角の関係



(a)載荷位置　擁壁天端から 1.4m



(b)載荷位置　擁壁天端から 0.6m

図－8　重錘衝撃力の時刻歴波形

する重錘衝突エネルギーは，載荷位置が擁壁天端から高さ 1.4 m，0.6 m でそれぞれ約 20 kJ，28 kJ となる。これらの値に対する擁壁の最大回転角は，**図－7** の計算値（e = 0）から載荷位置が擁壁天端から高さ 1.4m，0.6m の場合でそれぞれ約 1.5°，2°となり，便覧における落石が擁壁に衝突する場合の許容回転角 2～3° 以下の範囲に収まっていることが確認できた。

3.4 重錘衝突時における衝撃力

図－8 には，重錘衝撃力の時刻歴応答波形の一例を示している。載荷位置が擁壁天端から高さ 1.4 m の場合には，重錘衝撃力波形はいずれのケースに対しても高周波成分以外の周期性は見られず載荷初期から 30 ms 程度までは，重錘衝撃力は高い値を示したあと，おおよそ 30～80 ms の間，低い値を保っている。この値は，鋼材のひずみ硬化を無視し完全弾塑性体と仮定した場合の全塑性荷重 P_P = 51.3 kN に近く，約 50 ms の間に塑性変形が継続していたものと推察される。

載荷位置が擁壁天端から高さ 0.6 m の場合には，大略三角形状の波形，若しくは周期が 10 ms 程度の正弦波成分が合成された波形性状を示している。振動の継続時間は，いずれのケースに対しても載荷位置が擁壁天端から高さ 1.4 m の場合の 1/2 程度の時間となっている。また，載荷位置 1.4 m の場合と同様に完全弾塑性体と仮定する場合の全塑性荷重は P_P = 119.6 kN となる。L0.6-E46 では載荷時間 20~60ms でやや低い値を示しているものの，いずれのケースでも衝撃力は P_P を挟みながら変化しており，一様ではないが塑性変形が継続しているものと推察される。

4. まとめ

本研究では，落石が支柱に直撃した場合を想定し，重錘の衝突位置および落下高さを変化させた場合の鋼製支柱の変形および擁壁の回転挙動に着目した基礎的な検討を行った。本実験の範囲内で明らかになった事項を整理すると，以下の通りである。

(1) 製作した支柱付き擁壁において，静力学に基づくと支柱は塑性変形に至らずに擁壁が回転する結果となる。しかしながら，実験においては衝撃荷重によって支柱が塑性変形に至るとともに，擁壁基礎は回転運動をする。

(2) 実験においては，衝突による支柱の塑性変位角が 15° 以内となる重錘衝突エネルギーの範囲であれば，擁壁の最大回転角は便覧の許容回転角 2～3° 以下に収まり，擁壁基礎としての安定性は確保される。

(3) 支柱の変位角は重錘衝突エネルギーが増加するほど増加する傾向にある。また，衝突エネルギーが同じ場合には載荷位置が低いほど小さくなる傾向にある。

(4) 擁壁基礎の最大回転角は，便覧を用いて落石が擁壁上部に直接衝突すると仮定した場合の算出結果（反発係数 e = 0）に概ね対応する。

(5) H 形鋼支柱が塑性化するときの衝撃力は，全塑性荷重に近い値となり，塑性変形が載荷中に継続することを確認できた。

参考文献

1) （公社）日本道路協会：落石対策便覧, 2017.12.

2) （公社）地盤工学会：落石対策工の設計法と計算例, pp.215-217, 2014.12.

3) 山澤文雄，今野久志，小室雅人，岸徳光：基礎地盤が異なる落石防護擁壁の耐衝撃挙動，コンクリート工学年次論文集, Vol. 39, No. 2, pp.649-654,2017.7

4) （社）地盤工学会四国支部：落石対策 Q&A, pp.181, 2009.12.