ＩＳＳＮ　0386－5878
土木研究所資料第3819号

23

土 木 研 究 所 資 料

落石防護擁壁の合理的設計法の提案

平成13年３月

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

Copyright© (2001) by P.W.R.I.
All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.
この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

土 木 研 究 所 資 料
第3819号 2001年 3月

落石防護擁壁の合理的設計法の提案

耐震技術研究センター　動土質研究室　室　長　松尾　修
研究員　佐々木哲也
研究員　堤　達也*
研究員　米田　義弘**
研究員　近藤　浩市***

要　旨

落石防護擁壁は，落石が道路に到達することを防止する防護工として用いられるもので，主として道路の側近に設置されている。落石防護擁壁は一般に重力式擁壁として作られ，落石防護柵の基礎を兼用する場合もある。落石防護擁壁の設計は従来より「落石対策便覧」により行われているが，落石防護擁壁のように剛性の高い構造物に落石が衝突するような場合の設計法は，その妥当性について必ずしも検証されていない。また、最近行った落石防護工の被害実態調査によれば、設計エネルギー以上の落石が衝突しても、防護擁壁にほとんど被害が生じていないことから、従来の設計法は安全側過ぎる可能性がある。本研究では、落石防護擁壁の重錘衝突実験を行い、従来の設計法の問題点を明らかにするとともに、新たな設計法を提案するものである。

キーワード：落石防護擁壁，模型実験，安定計算，極限支持力，弾塑性設計

*現　大臣官房技術調査課
**現　北海道開発局　網走開発建設部
***現　中部地方整備局　長島ダム工事事務所

目　次

頁

1．序論 …… 1
1.1　研究の背景 …… 1
1.2　研究の目的 …… 1
1.3　研究内容 …… 1

2．旧落石対策便覧における設計法とその問題点 …… 2
2.1　旧落石対策便覧における設計法 …… 2
2.2　旧落石対策便覧における設計法の問題点 …… 7

3．落石防護擁壁の重錘衝突実験 …… 10
3.1　実験内容 …… 10
3.2　実験方法 …… 10
3.2.1　実験装置および実験方法 …… 10
3.2.2　実験条件 …… 12
3.3　実験結果および考察 …… 19
3.3.1　摩擦試験の結果 …… 19
3.3.2　平板載荷試験の結果 …… 19
3.3.3　重錘衝突実験の結果 …… 21
3.4　まとめ …… 45

4．旧落石対策便覧による安定計算 …… 46
4.1　検討方法 …… 46
4.2　検討結果 …… 46
4.2.1　擁壁の変位量の検討 …… 46
4.2.2　擁壁の安定性に関する検討 …… 46
4.3　まとめ …… 51

5．弾塑性地盤モデルによる設計法の検討 …… 52
5.1　弾塑性地盤モデルによる設計法 …… 52
5.2　擁壁に伝達する運動エネルギーおよび地盤に伝達するエネルギーの評価法の検討 …… 54
5.2.1　各エネルギーの算出方法 …… 54
5.2.2　擁壁に伝達される運動エネルギーおよび地盤に伝達するエネルギーの評価結果 …… 58
5.3　弾塑性地盤モデルの評価 …… 73

5.3.1　弾塑性地盤モデルの検討方法 ……73
5.3.2　弾塑性地盤モデルの評価結果 ……73
5.4　地盤の弾塑性変形を考慮した計法の提案および適用性の検討 ……78
5.4.1　提案手法の概要 ……78
5.4.2　旧落石対策便覧からの変更点 ……80
5.4.3　設計値と実験値の比較 ……81
5.4.4　許容変形量の検討 ……96
5.5　まとめ ……96

6．まとめと今後の課題 ……98

参考文献 ……100

付録
（付録A.1）回転中心について ……101
（付録A.2）本文式(2.11)の誘導 ……103
（付録A.3）擁壁の安定性評価手法 ……105

図表目次

表3.1　締め固めた砂基盤の物性値 ……11
表3.2　擁壁模型の形状 ……18
表3.3　重錘衝突実験ケースの概要 ……19
表3.4　重錘の衝突直前の速度 ……22
表3.5　実験条件および実験結果一覧 ……24
表4.1　安全率計算条件および結果の一覧 ……48
表5.1　重錘の衝突前後のエネルギーと擁壁に伝達したエネルギー ……60
表5.2　地盤の極限支持力時に作用する抵抗モーメント ……74
表5.3　擁壁の回転角－モーメント関係の算出結果 ……76
表5.4　旧落石対策便覧の設計法による計算結果 ……82
表5.5　旧落石対策便覧の設計法による変位量とエネルギー ……84
表5.6　旧落石対策便覧の設計計算値と実験値の比較 ……86
表5.7　新設計法(完全弾性衝突)による設計計算値 ……88
表5.8　新設計法による変位量とエネルギー ……90
表5.9　新設計法による設計計算値と実験値の比較 ……92

図2.1　モデルの置き換え ……3
図2.2　衝突位置での擁壁の水平速度Vと擁壁内任意点速度の関係図 ……4
図2.3　衝突点の変位と底面水平変位の関係図 ……6
図2.4　回転角とモーメントの関係 ……9
図3.1　摩擦係数測定装置 ……11
図3.2　平板載荷装置 ……13
図3.3　衝突装置 ……15
図3.4　重錘吊り下げ装置 ……15
図3.5　光電スイッチによる速度測定装置 ……16
図3.6　擁壁模型 ……18
図3.7　加速度計および変位計取付位置 ……18
図3.8　摩擦試験の結果 ……20
図3.9　平板載荷試験の結果 ……20
図3.10　光電スイッチの電圧データの一例 ……21
図3.11(a)　落石の衝突速度と擁壁底部の最大水平変位の関係 ……26
図3.11(b)　落石の衝突速度と擁壁底部の最大水平変位の関係 ……27
図3.12(a)　落石の衝突速度と擁壁の最大回転角度との関係 ……28

図3.12(b)　落石の衝突速度と擁壁の最大回転角度との関係……29
図3.13(a)　落石の衝突速度と擁壁底部の残留水平変位の関係……30
図3.13(b)　落石の衝突速度と擁壁底部の残留水平変位の関係……31
図3.14(a)　衝突直前の重錘運動エネルギーと擁壁の最大水平変位の関係……32
図3.14(b)　衝突直前の重錘運動エネルギーと擁壁の最大水平変位の関係……33
図3.15(a)　衝突直前の重錘運動エネルギーと擁壁の最大回転角の関係……34
図3.15(b)　衝突直前の重錘運動エネルギーと擁壁の最大回転角の関係……35
図3.16(a)　衝突直前の重錘運動エネルギーと擁壁の残留水平変位の関係……36
図3.16(b)　衝突直前の重錘運動エネルギーと擁壁の残留水平変位の関係……37
図3.17(a)　衝突前後の直前の重錘運動エネルギーの差と擁壁の最大水平変位の関係……38
図3.17(b)　衝突前後の直前の重錘運動エネルギーの差と擁壁の最大水平変位の関係……39
図3.18(a)　衝突前後の直前の重錘運動エネルギーの差と擁壁の最大回転角の関係……40
図3.18(b)　衝突前後の直前の重錘運動エネルギーの差と擁壁の最大回転角の関係……41
図3.19(a)　衝突前後の直前の重錘運動エネルギーの差と擁壁の残留水平変位の関係……42
図3.19(b)　衝突前後の直前の重錘運動エネルギーの差と擁壁の残留水平変位の関係……43
図3.20　擁壁の最大水平変位と残留変位の比と最大水平変位の関係……44
図3.21　最大変位と残留変位……44
図4.1　旧落石対策便覧による計算値と実験値の関係……47
図4.2　転倒安全率と最大回転角の関係……50
図4.3　支持力安全率と最大回転角の関係……50
図4.4　滑動安全率と最大水平変位の関係……50
図4.5　滑動安全率と残留水平変位の関係……50
図4.6　滑動安全率と残留水平変位と最大水平変位の比の関係……50
図5.1　擁壁の抵抗モーメント－回転角曲線……52
図5.2　落石防護擁壁の落石衝突時の安定に対する検討手順……53
図5.3　弾性バネに支持された落石防護擁壁のモデル……53
図5.4　水平荷重と水平変位との関係……56
図5.5　衝突後の運動エネルギーの分担比率（底版幅別）……59
図5.6　滑動変形、回転変形により消費されたエネルギーの比率（底版幅別）……59
図5.7　最大回転角と各運動エネルギーの関係（底版幅別）……62
図5.8　衝突後の運動エネルギーの分担比率（重錘質量別）……63
図5.9　滑動変形、回転変形により消費されたエネルギーの比率（重錘質量別）……63
図5.10　最大回転角と各運動エネルギーの関係（重錘質量別）……64
図5.11　衝突後の運動エネルギーの分担比率（衝突高さ別、底版幅0.35m）……65
図5.12　滑動変形、回転変形により消費されたエネルギーの比率（衝突高さ別、底版幅0.35m）……65

図5.13　衝突後の運動エネルギーの分担比率（衝突高さ別、底版幅0.20m）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・66
図5.14　滑動変形、回転変形により消費されたエネルギー（衝突高さ別、底版幅0.20m）・・・・・・・・・・・・・・・・66
図5.15　衝突後の運動エネルギーの分担比率（コンクリートと締め固めた砂地盤）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・67
図5.16　衝突後の運動エネルギーの分担比率（緩い砂と締め固めた砂地盤）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・67
図5.17　滑動変形、回転変形により消費されたエネルギーの比率（コンクリートと締め固めた砂地盤）・・・68
図5.18　滑動変形、回転変形により消費されたエネルギーの比率（緩い砂と締め固めた砂地盤）・・・・・・・・・68
図5.19　最大回転角と各運動エネルギーの関係（コンクリートと締め固めた砂地盤）・・・・・・・・・・・・・・・・・69
図5.20　最大回転角と各運動エネルギーの関係（緩い砂と締め固めた砂地盤）・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・69
図5.21　重錘衝突位置での擁壁速度の比較・・・70
図5.22　擁壁に伝達されたエネルギーの比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・71
図5.23　滑動変形、回転変形により消費されたエネルギーの比率・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・72
図5.24　偏心荷重を考慮した地盤の極限支持力算出モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・73
図5.25　支持地盤の極限支持力と擁壁自重の比と水平力の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・75
図5.26　最大回転角の実験値と設計値の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・78
図5.27　落石防護擁壁の落石衝突時の安定に対する検討手順・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・79
図5.28　荷重－変位曲線・・・79
図5.29　最大回転角の実験値と計算値の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・94
図5.30　最大水平変位の実験値と計算値の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・95
図5.31　最大回転角と塑性率の関係・・96
図A2.1　座標の定義・・103
図A3.1　計算モデル・・106
図A3.2　座標の定義・・107
図A3.3　滑動と回転に関する荷重－変位関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・110
図A3.4　合成した荷重－変位関係・・111

写真3.1　土槽・・10
写真3.2　平板載荷装置・・14
写真3.3　衝突装置・・・17

1．序論

1.1　研究の背景

落石防護擁壁は、落石が道路に到達することを防止する防護工として用いられるもので、主として道路の側近に設置されている。落石防護擁壁は一般に重力式擁壁として作られ、落石防護柵の基礎を兼用する場合もある。落石防護擁壁の設計は従来より「落石対策便覧（昭和57年版）」[1)]（以下「旧落石対策便覧」と呼ぶ）により行われてきたが、その妥当性について必ずしも検証されていないのが現状である。また、最近行った落石防護工の被害実態調査[2)]によれば、設計エネルギー以上の落石が衝突しても、防護擁壁にほとんど滑動・転倒などの被害が生じていないことが明らかになっており、旧落石対策便覧による設計法は安全側過ぎる可能性が指摘されていた。

1.2　研究の目的

本研究の目的は、落石防護擁壁の落石衝突時の挙動を調べ、「旧落石対策便覧」で示されている落石防護擁壁の設計法の問題点を把握するとともに、より合理的な設計法を提案することである。

1.3　研究内容

上記の目的のもと、本研究では以下の検討を行った。

(1)旧落石対策便覧の設計法の改善すべき点を明らかにするために、その設計法の仮定を再検討した。

(2)落石防護擁壁の落石衝突時の挙動を把握し、旧落石対策便覧の設計法の問題点を明らかにするために、落石防護擁壁の重錘衝突実験を行った。

(3)落石防護擁壁の新たな設計法を提案し、実験結果と比較することによりその妥当性を検証した。

2．旧落石対策便覧における設計法とその問題点

本章では、はじめに旧便覧における設計法を2.1でやや詳細に述べる。つぎに、その設計法の有する問題点を2.2において述べる。

2.1　旧落石対策便覧における設計法

(1)概要

旧落石対策便覧では、擁壁の安定性を以下のような手順で計算・評価するようになっている。

1) 落石衝突後の擁壁は、水平および回転地盤バネで支持された２自由度系剛体の１次固有振動モードで運動すると仮定する。
2) 落石と擁壁の間の反発係数はゼロであるとして、運動量保存則にもとづき擁壁の衝突直後の速度を、上記1)の制約の下に求める。
3) 衝突直後の擁壁および落石の運動エネルギーはすべて支持地盤の水平および回転地盤バネのひずみエネルギーに転嫁される（エネルギー保存則）として、最大変位時の水平および回転地盤反力を求める。
4) 上記3)で得られた水平および回転地盤反力を擁壁底面に作用する力と考えて、道路擁壁の方法（道路土工指針）に従って、滑動、転倒および支持力に対する安定性を評価する。

以下、設計の流れに沿って設計計算式を誘導し、説明する。

(2)落石衝突後の擁壁の初速度

1)基礎方程式

(a) 回転中心について

擁壁の２自由度系（水平および回転変位）剛体としての１次固有振動モードにおける回転中心は、**図2.1**を参照して以下のように与えられる。詳細な式の誘導については付録(A.1)を参照されたい。

$$Z_1=\frac{1}{2S}\left(S^2+e_0^2-i_0^2\right)+\sqrt{\frac{1}{4S^2}\left(S^2+e_0^2-i_0^2\right)^2+i_0^2} \tag{2.1}$$

ここに、Z_1：回転中心と擁壁の重心との距離

S：擁壁から重心までの距離

e_0：$(e_0^2=K_r/K_s)$

K_r：回転バネ係数

K_s：せん断バネ係数

i_0：回転半径$(i_0^2=I/m)$

m：擁壁有効長の質量

I：擁壁の重心に関する慣性モーメント

(b) 基礎方程式

基礎方程式は、角運動量保存則、擁壁の運動モードに関する制約条件、および反発係数の３つであり、求めるべき未知数は、落石の衝突後速度、擁壁の衝突後速度（水平方向線速度および回転速度）の３つである。

①角運動量保存則

図2.1を参照し、落石および擁壁の２剛体系に対し、衝突前後における角運動量保存則を適用する。なお、角運動量の中心を上記回転中心Z_1にとる。

（落石の衝突前角運動量）＋（擁壁の衝突前角運動量）

＝（落石の衝突後角運動量）＋（擁壁の衝突後角運動量）　(2.2)

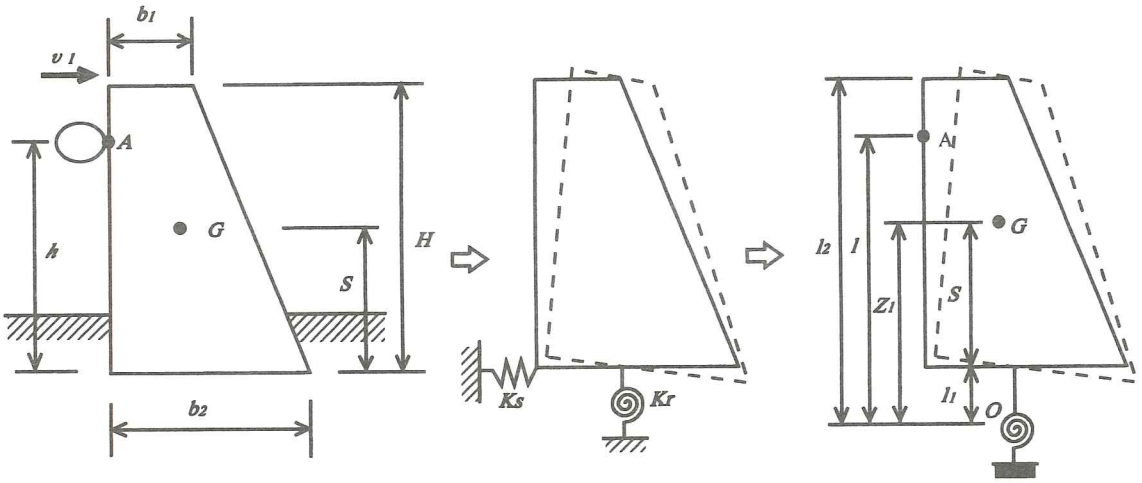


図2.1　モデルの置き換え

なお、上式において、衝突時間内の底面地盤反力の変化は無視できるという仮定を援用している（たとえば原島(1968)[3]参照）。

これより、

$$mv_1 l + 0 = mv_2 l + \int (yv_x - xv_y)dM \qquad (2.3)$$

ここに、

m　：落石の質量、

M　：擁壁の質量、

v_1　：落石の衝突前速度、

v_2　：落石の衝突後速度、

(x,y)　：擁壁内の任意の点の座標

(v_x,x_y)：擁壁内の任意の点の速度

l　：回転中心から落石衝突点までの腕の長さ、

②擁壁の運動モードに関する制約条件

擁壁が回転中心Oの周りにロッキング運動をするという制約条件は次のように表される。

すなわち、**図2. 2**において、落石衝突位置での擁壁の水平速度をV、擁壁内の任意の点の座標を$\boldsymbol{r} = (x, y)$、速度を$\boldsymbol{v} = (v_x, v_y)$とすると、擁壁の任意の地点の回転中心Oのまわりの角速度は一定であることから、幾何学的関係により

$$V/l = (v_x^2 + v_y^2)^{1/2}/(x^2+y^2)^{1/2} \tag{2.4}$$

また、$\boldsymbol{v}$と$\boldsymbol{r}$は直交することから

$$\boldsymbol{v}\cdot\boldsymbol{r} = 0 \tag{2.5}$$

以上より、

$$v_x = (V/l)y$$
$$v_y = -(V/l)x \tag{2.6}$$

③反発係数

反発係数を衝突点での相対速度の変化の比で定義すると

$$e = -(v_2 - V)/(v_1 - 0) \tag{2.7}$$

反発係数e = 0という仮定より

$$v_2 = V \tag{2.8}$$

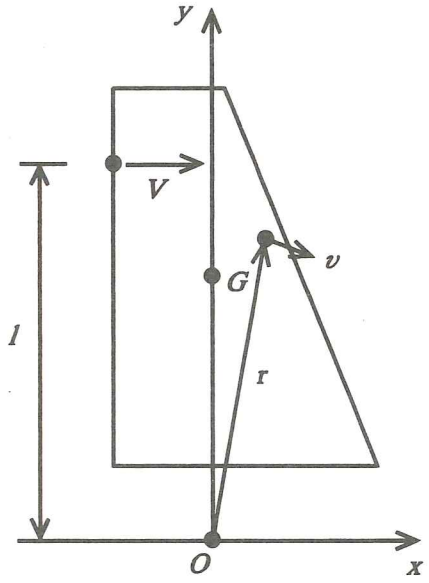


図2. 2　衝突位置での擁壁の水平速度Vと擁壁内任意点速度の関係図

2) 擁壁の初速度の計算

まず、運動量保存則による式(2.3)の右辺第２項を計算する。式(2.6)により

$$\int (yv_x - xv_y)dM = \int \{y(Vy/l) - x(-Vx/l)\}dM$$
$$= \int (x^2 + y^2)V/l \cdot dM \tag{2.9}$$

これを式(2.3)に代入すれば次式を得る。

$$mv_1 l = mv_2 l + \int (x^2 + y^2) V/l \cdot dM \tag{2.10}$$

右辺の積分計算を実行すれば最終的に次式を得る（詳細は付録(A.2)を参照）。

$$mv_1 l = mv_2 l + \frac{V}{l} \cdot \frac{2M}{(b_1 + b_2)(l_2 - l_1)} \left[\frac{l_2 - l_1}{12} \left\{ -(a_2 + a_3)(a_2^2 + a_3^2) - 4a_1^3 \right\} - \frac{b_2 - b_1}{4}(l_1 + l_2)(l_1^2 + l_2^2) + \frac{b_2 l_2 - b_1 l_1}{3}(l_1^2 + l_1 l_2 + l_2^2) \right] \tag{2.11}$$

式(2.10)に式(2.8)を代入すれば

$$mv_1 l = V\{ml + \int (x^2 + y^2)/l \cdot dM\}$$

これより

$$V = mv_1 l^2 / \{ml^2 + \int (x^2 + y^2) \cdot dM\}$$
$$= m/\{m + \int (x^2 + y^2)/l^2 \cdot dM\} \cdot v_1 \tag{2.12}$$

ここで、落石と擁壁の衝突に際して、擁壁の質量の何割かがあたかも衝突点に集中質量として存在するとしたとき、衝突後の速度が等価となるような比率を「有効質量比」と仮に呼ぶこととし、以下のように定義する。

$$\alpha = \{ \int (x^2 + y^2)/l^2 \cdot dM\}/M \tag{2.13}$$

これを式(2.12)に代入すれば次式を得る。

$$V = m/\{m + \alpha M\} \cdot v_1 \tag{2.14}$$

また、式(2.13)と式(2.11)より

$$\alpha = \frac{1}{6l^2(b_1 + b_2)H} \left[(l_2 - l_1) \left\{ -(a_2 + a_3)(a_2^2 + a_3^2) - 4a_1^3 \right\} - 3(b_2 - b_1)(l_1 + l_2)(l_1^2 + l_2^2) + 4(b_2 l_2 - b_1 l_1)(l_1^2 + l_1 l_2 + l_2^2) \right] \tag{2.15}$$

ここで、式(2.15)の右辺第１項は擁壁のy方向速度v_yに、第2、3項はx方向速度v_xにそれぞれ起因するものである。第１項はその他の項に比べて小さいとして無視すれば、旧便覧の式に一致するものである。

(3)落石衝突による擁壁の最大回転角および底面の最大水平変位量の計算

旧便覧では、上記2)で計算された初速度を持つ擁壁は、式(2.1)で規定される「回転中心」のまわりに剛体として回転変位し、擁壁および落石の運動エネルギー（擁壁および落石は一体となって運動すると仮定されている）は底面の水平・回転バネの弾性ひずみエネルギーに置き換えられると仮定して、擁壁の最大回転角および底面の最大水平変位量を求めている。

以下に具体的に示す。

まず、**図2. 3**で、点A（衝突点）を静的に力Pで押したときの変位δを求めてみる。

回転中心Oのまわりの力のモーメントのつりあい式をたてると

$$Pl - K_s \delta_b l_1 - K_r \delta / l = 0 \tag{2.16}$$

ここに、

δ_b ：底面での水平変位 （$\delta_b = (l_1/l)\,\delta$）

これより、荷重－変位関係がつぎのように求められる。

$$P = \{K_s(l_1/l)\,\delta\, l_1 + K_r\,\delta/l\}/l$$
$$= (K_s l_1^2 + K_r)/l^2 \cdot \delta$$
$$= K_s(e_0^2 + l_1^2)/l^2 \cdot \delta \qquad (2.17)$$

ここに、

$$e_0^2 = K_r/K_s$$

擁壁および落石は点Aに集中質量$(m+\alpha M)$で代表されると仮定してエネルギー保存則を適用すれば

$$1/2 \cdot (m+\alpha M)V^2 = 1/2 \cdot K_s(e_0^2 + l_1^2)/l^2 \cdot \delta_d^2 \qquad (2.18)$$

これより、

$$\delta_d = \{l^2(m+\alpha M)/K_s(e_0^2 + l_1^2) \cdot V^2\}^{1/2}$$
$$= \{l^2(m+\alpha M)/K_{r1} \cdot V^2\}^{1/2} \qquad (2.19)$$

ここに、

δ_d ：点A（衝突点）における擁壁の最大変位、

K_{r1} ：換算回転バネ係数（$K_{r1} = K_s(e_0^2 + l_1^2)$）

さらに、落石の重量mgで擁壁を静的に水平に押したときの最大水平変位をδ_sとおけば、式(2.17)より

$$\delta_s = mgl^2/K_{r1} \qquad (2.20)$$

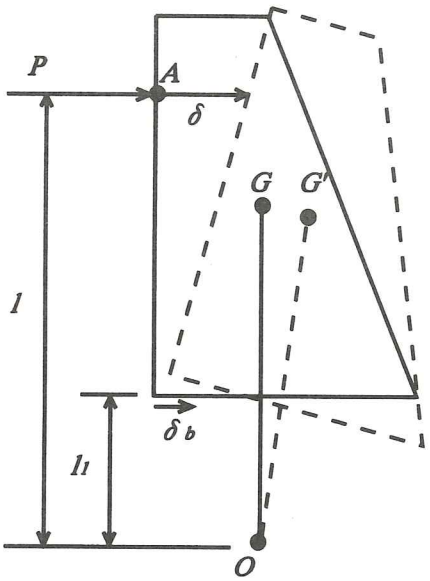


図2.3　衝突点の変位と底面水平変位の関係図

これを式(2.19)に代入すれば

$$\delta_d = \{(m + \alpha M)/mg \cdot \delta_s V^2\}^{1/2}$$

$$= \{(1 + \alpha M/m)\, \delta_s V^2/g\}^{1/2} \quad (2.21)$$

最終的に、擁壁の最大回転角 θ_dおよび底面の水平変位 δ_bが衝突点での最大水平変位 δ_dを用いて次のように得られる。

$$\theta_d = \delta_d/l \quad (2.22)$$

$$\delta_b = \delta_d(1-h/l) \quad (2.23)$$

(4)擁壁底面における最大モーメントMおよび水平力Hの計算

式(2.22)および(2.23)で与えられる最大変位を用いて次のように得られる。

$$M = K_r \theta_d \quad (2.24)$$

$$H = K_s \delta_b \quad (2.25)$$

(5)安定計算

上で求められた最大モーメントM、水平力Hおよび擁壁の自重が擁壁底面に作用するとして、道路擁壁と同様の方法で、滑動・転倒・支持力に対する安定性が照査される。

2.2 旧落石対策便覧における設計法の問題点

ここでは、はじめに前節２．１に述べた旧設計法に用いられた仮定を吟味し、改善すべき点を指摘する。

(1)仮定条件の吟味

旧便覧においては、落石衝突後の擁壁の運動およびその安定性を評価するにあたって、以下の仮定が用いられている。

(a) 落石は反発係数$e = 0$で衝突し、以後、擁壁とともに運動する。

(b) 落石の衝突後、擁壁は式(2.1)で示した回転中心のまわりに回転運動する、という束縛を受ける。

(c) 衝突直後の擁壁および落石の運動エネルギーはすべて支持地盤に弾性ひずみエネルギーとして転嫁される。

(d) 上記(c)で得られる水平および回転方向地盤反力を擁壁に静的に作用させ、擁壁の安定性を道路擁壁の方法に準じて評価する。

つぎに、これらの仮定条件を主に設計上安全側であるか危険側であるかの観点から吟味してみる。

まず、仮定(a)については、反発係数が小さいほどエネルギー消散量が大きくなり、落石から擁壁に転嫁されるエネルギーを過少評価するので、設計上は危険側と言える。

仮定(b)については、本来の運動モードとは異なるものである。擁壁の初速度は（付録A.3）に示すように、本来、落石と擁壁の衝突条件によって決まる。たとえば落石が擁壁の重心よりも下方に衝突した場合には、擁壁の初速度モードは、擁壁の重心位置よりも上方のある点を回転中心としたロッキング運動、わかりやす

く言えば、足元をすくわれるような運動モードとなる筈である（たとえば右城ら(2000)[4]の実験結果を参照）。ただし、落石防護擁壁の安定性の観点からは、落石が擁壁の高い位置に衝突した場合ほど厳しく、設計においてもこのような設定がなされていることから、初速度モードにはさほど大きい違いはないかも知れない。また、設計計算上、落石が衝突した直後から擁壁が最大変位を生じるまでの運動モードを何らかの形で仮定する必要がある。このようなことから、仮定(b)は安全側であるか危険側であるかは判然としないが、実用上は許されるかと考えられる。

仮定(c)は安全側の設定である。

最後に、仮定(d)について考察する。まず仮定(c)において、擁壁底面支持地盤の最大反力が支持地盤が弾性体であると仮定して計算される。そして仮定(d)では、このようにして得られた最大地盤反力をあたかも静荷重のように、擁壁に外力として作用させ、擁壁の安定性を照査している。これは俗に言う許容応力度法的な照査法であり、本来非線形な荷重－変位特性を示す支持地盤を線形弾性とみなして最大の作用力を求めている。この方法は、きわめて一時的であっても支持地盤に何らの塑性変形を許容しないという照査基準に相当するものと言える。しかしながら、衝突現象に起因する擁壁の運動挙動にこのような制約を課すことは過度に安全側になるものである。これについては、地盤を弾塑性体として扱い、落石衝突直後の擁壁の運動エネルギーが支持地盤の弾塑性変形に消費されるとしたときの支持地盤あるいは擁壁の最大変位量により照査するのが適切である。

(2)地盤の硬軟と擁壁の安定性の関係

上に述べた旧便覧の設計法の抱える問題点として、地盤が固いほど擁壁の安定性が低下するという、常識とは異なる結果が導かれることがある。この問題は上述の仮定(c)および(d)に起因している。以下にその概要を説明する。

まず、式(2.22)、(2.24)より、

$$M = K_r \theta_d \qquad (2.26)$$
$$= K_r \delta_d / l$$

右辺のθ_dは式(2.19)に得られている。すなわち、

$$\delta_d = \{l^2(m+\alpha M)/K_s(e_0^2 + l_1^2)\cdot V^2\}^{1/2}$$
$$= \{l^2(m+\alpha M)/K_r\cdot e_0^2/(e_0^2 + l_1^2)\cdot V^2\}^{1/2} \qquad (2.27)$$

両式より、擁壁底面に作用する最大曲げモーメントMは地盤のバネ係数Krの平方根に比例することがわかる。このことは最大水平力Hについても同様である。すなわち、地盤が固いほどこれらの作用力M, Hが大きくなる、したがって擁壁の安定性が低下するという結果になる。このことを模式的に示すと**図2.4**のようになる。

この問題は上述したように、支持地盤を弾性体とみなして最大地盤反力を求め、許容応力度法的に照査することに起因している。地盤を弾塑性体としてモデル化してエネルギー保存則を適用すれば、擁壁の弾塑性変位量が得られ、これを許容変位量に対して照査することにすれば合理的である。なおこの場合には、地盤が固いほど、すなわち地盤バネ係数が大きいほど擁壁の弾塑性変位量は小さく計算され、擁壁はより安定と

評価されることになるはずである。

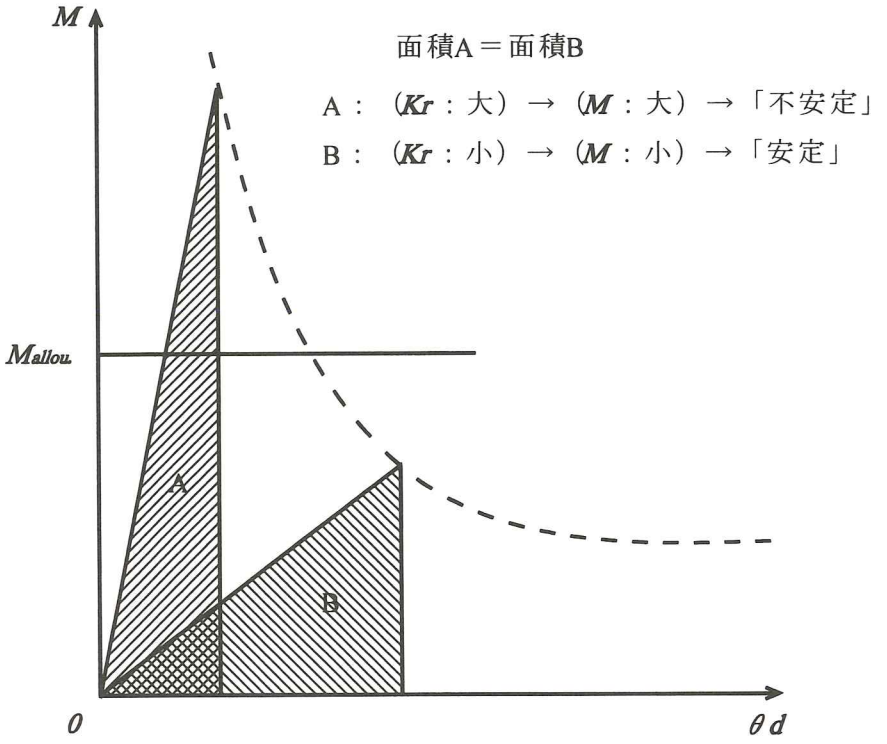


図2.4　回転角とモーメントの関係

3．落石防護擁壁の重錘衝突実験

落石衝突時の落石防護擁壁の挙動を把握し、旧落石対策便覧の設計法の問題点を明らかにするとともに、設計法改良のための基礎データを得ることを目的として、落石防護擁壁の模型を用いた重錘衝突実験を行った。

3.1　実験内容

実験は、締め固めた砂地盤の上に高さ0.5m、奥行き1mのコンクリート製の擁壁模型を設置し、球面形状のコンクリート製の落石模型を振り子運動させて擁壁に垂直に衝突させることにより行った。なお、実験に先立ち砂地盤と擁壁底面の摩擦係数を測定するための摩擦試験、および砂地盤の地盤反力を測定するための平板載荷試験を実施した。本研究で行った実験をまとめると以下のとおりである。

(1)摩擦試験

(2)平板載荷試験

(3)重錘衝突実験

3.2　実験方法

3.2.1　実験装置および実験方法

(1)実験土槽

支持地盤を1800×1800×450mmの合板製土槽の中に作成した（**写真3.1**参照）。土槽内の敷き砂層は、層厚150mm毎に一回ずつ振動プレートを用いて転圧を行い、これを3回繰り返して厚さ450mmとなるように作成した。完成後に、砂地盤最上層表面の任意の地点3箇所からサンプリングを行い、乾燥密度および含水比を測定した。**表3.1**に砂地盤の含水比および乾燥密度の測定結果を示す。

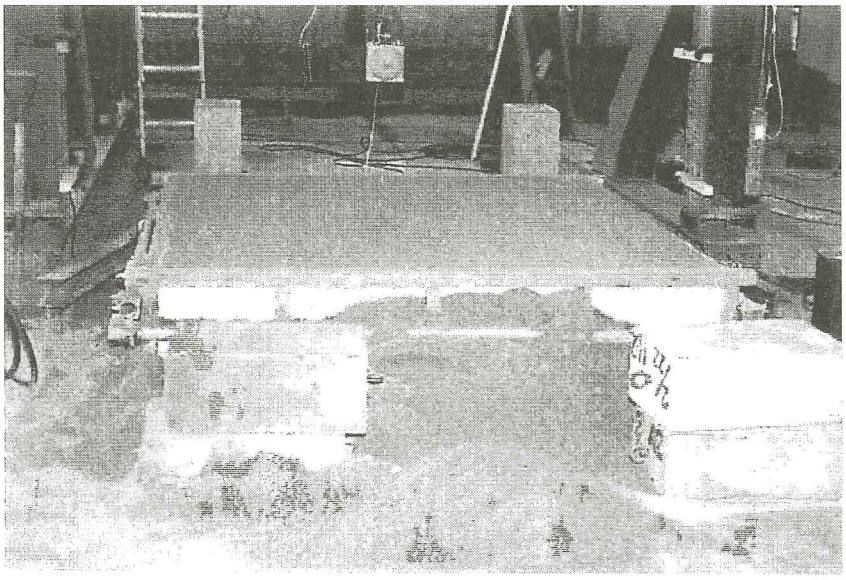


写真3.1　土槽

表3.1 締め固めた砂基盤の物性値

項目	含水比 (%)	乾燥密度 (g/cm^3)
データ幅	2.3～4.0	1.32～1.50
平均値	2.9	1.42

(2)摩擦試験

重錘衝突実験に先立ち、砂地盤と擁壁底面の摩擦係数を測定するための摩擦試験を行った。摩擦係数の測定装置を**図3.1**に示す。底版幅35cmの擁壁模型を土槽上に置き、擁壁模型の重心位置付近にアングルを取り付け、レバーブロックを用いて水平方向に引張り、その際、ロードセルにより引張荷重を、変位計により擁壁変位を測定した。実験は同一条件で２回実施した。

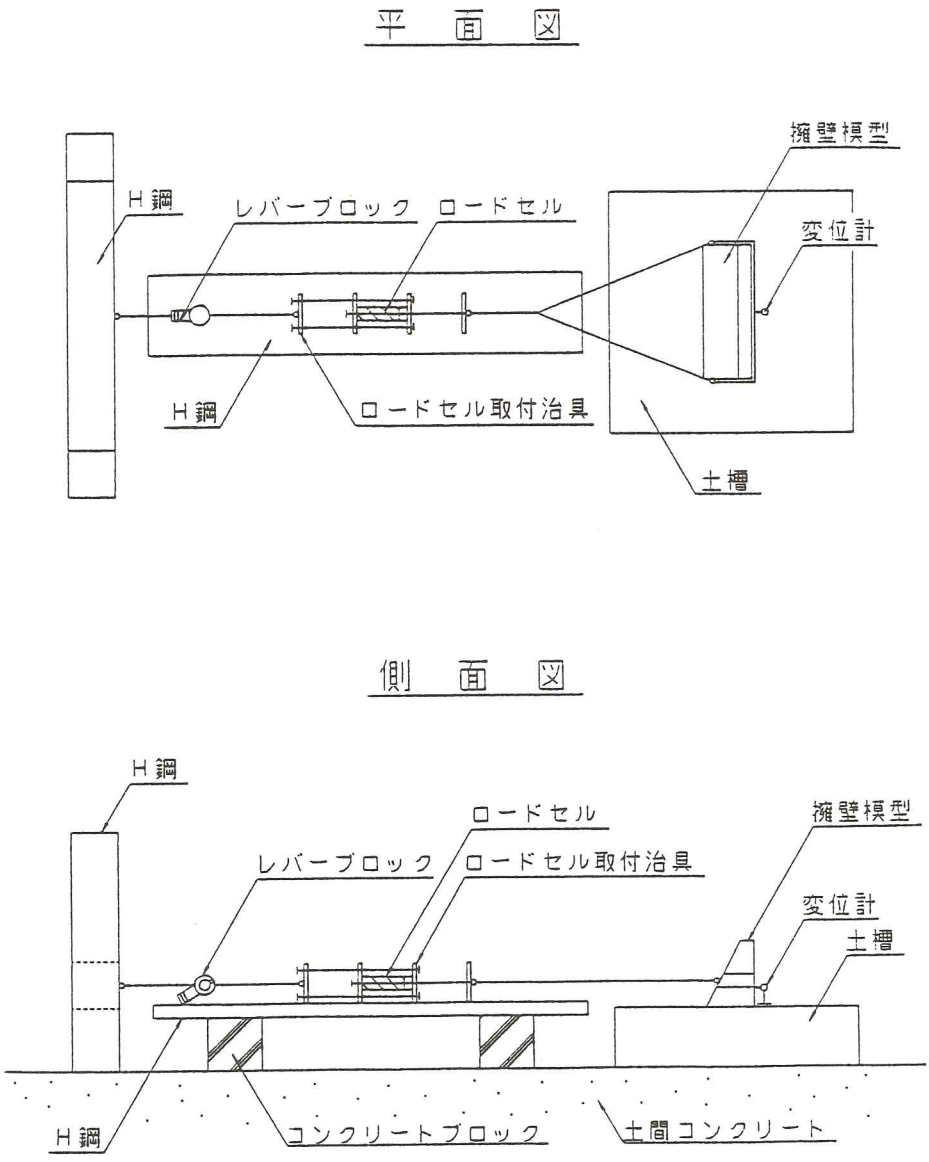


図 3.1　摩擦係数測定装置

(3)平板載荷試験

砂地盤の地盤反力を測定するための平板載荷試験を実施した。平板載荷試験装置を**図3.2**および**写真3.2**に示す。平板載荷試験は、低載荷荷重時の精度向上のため、載荷荷重1kNまでは**図3.2(a)**に示す装置を用いて行った。低載荷荷重時はウェイト（H鋼）を載荷することにより行った。使用した載荷板は、直径300mm、厚さ28mmの円形鋼板を用いた。載荷装置には載荷板の貫入量を測定するための変位計を取り付けてある。

つづいて、載荷荷重21kNまで**図3.2(b)**に示すロードセルを用いて載荷した。載荷装置は、H鋼で門形に組み立てた載荷フレームに油圧ジャッキ（容量350kN）、ロードセル、直径30cmの載荷板および載荷板の貫入量を測定するための変位計を取り付けたものである。

(4)衝突装置

落石防護擁壁模型の重錘衝突実験で使用する衝突装置を**図3.3**および**写真3.3**に示す。**図3.4**に重錘吊り下げ装置を示す。重錘が回転落下運動する間に重錘面の方向が安定するように、重錘を2本の丸鋼棒で吊っている。また、衝突後に丸鋼棒が変形するのを防ぐため、途中にシャックルを介している。また、重錘の衝突前後の速度を測定するために、**図3.5**に示す光電スイッチを設置している。

(5)擁壁模型

実験に用いた擁壁模型を**図3.6**に、形状寸法を**表3.2**にそれぞれ示す。擁壁模型はコンクリート製で、高さ0.5m、奥行き1mおよび頂部幅0.1mで、底版幅Bが0.2m、0.35mおよび0.5mの3種類を用いた。

重錘衝突実験の際には、加速度計および変位計を**図3.7**に示す位置に取り付け、衝突後の擁壁の加速度を測定するとともに、擁壁頂部の水平変位、擁壁底面の水平変位、および擁壁底面における鉛直変位を測定した。

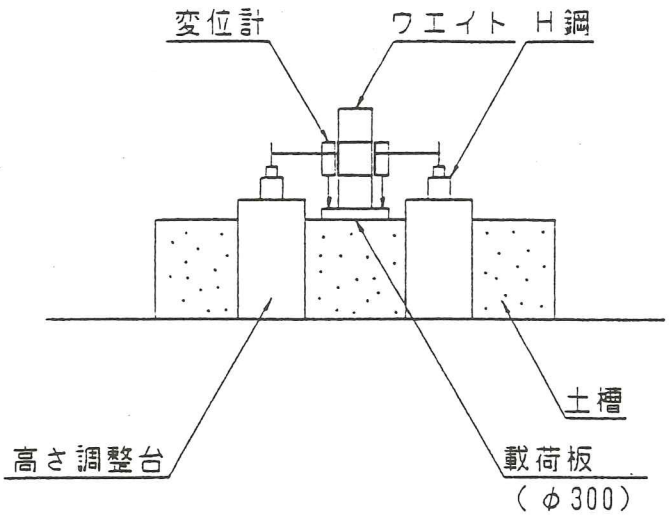
(6)重錘

実験に用いた重錘は、図3.3、3.4中に示されているが、半径7.5cmの半球部の背面に断面が15cm×15cmのコンクリート製である。質量は約3kg、5.5kgおよび11kgの3種類であり、直方体部分の長さを変えることにより調整した。ただし、実験中に重錘が割れるなどした場合、新たに重錘を作成したため、ケースにより若干質量が異なる。重錘には加速度計を取り付け、衝突前後の重錘の加速度変化を測定した。

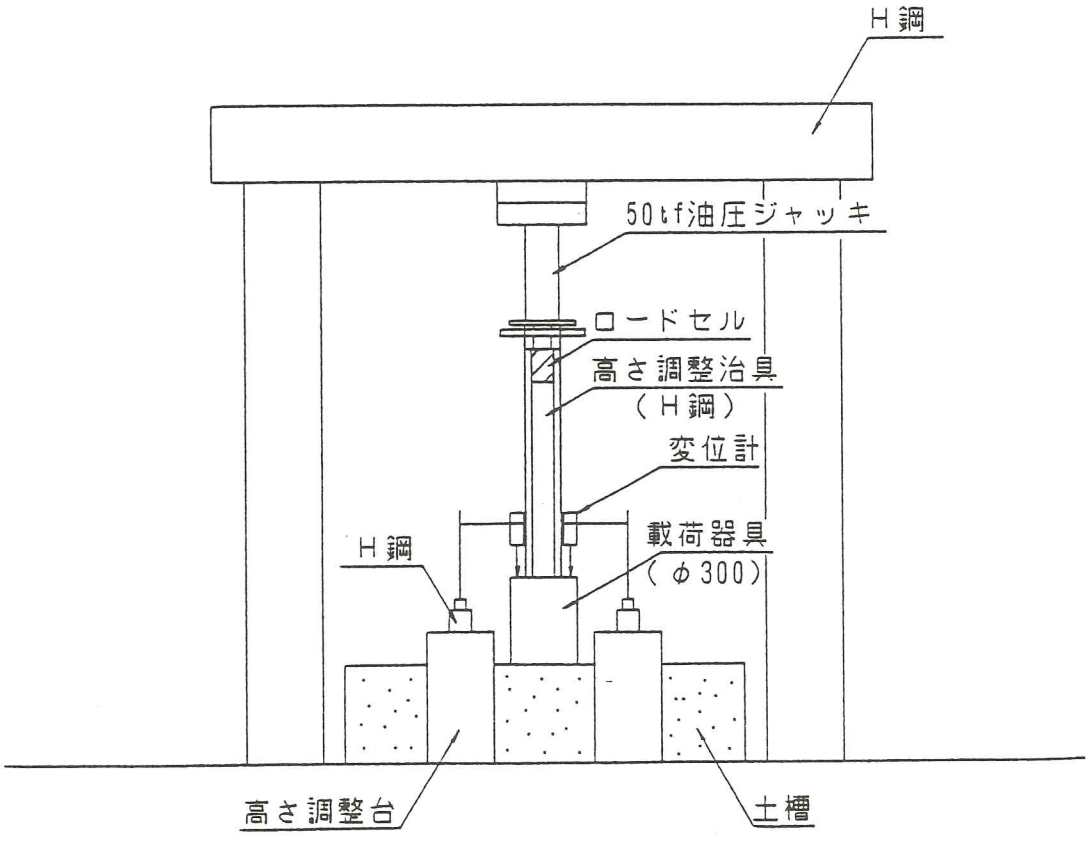
3.2.2 実験条件

実験ケースとその条件を**表3.3**に示す。実験は主に擁壁底版幅と重錘質量、重錘衝突位置、および地盤の種類を変化させて行った。

底版幅と重錘質量を変化させた実験では、締め固めた砂地盤の上に設置した底版幅B=0.20m、0.35mおよび0.50mの3種類の擁壁に対し、落石質量約3kg、5kgおよび10kgの重錘を擁壁底面より高さh=0.45mの位置に衝突させた。落石衝突位置を変化させた実験では、擁壁底版幅B=0.20mおよび0.35mの擁壁に対し、落石質量約5.5kgの重錘を擁壁底面より高さh=0.15m、0.25mおよび0.35mの位置に衝突させた。地盤を変化させた

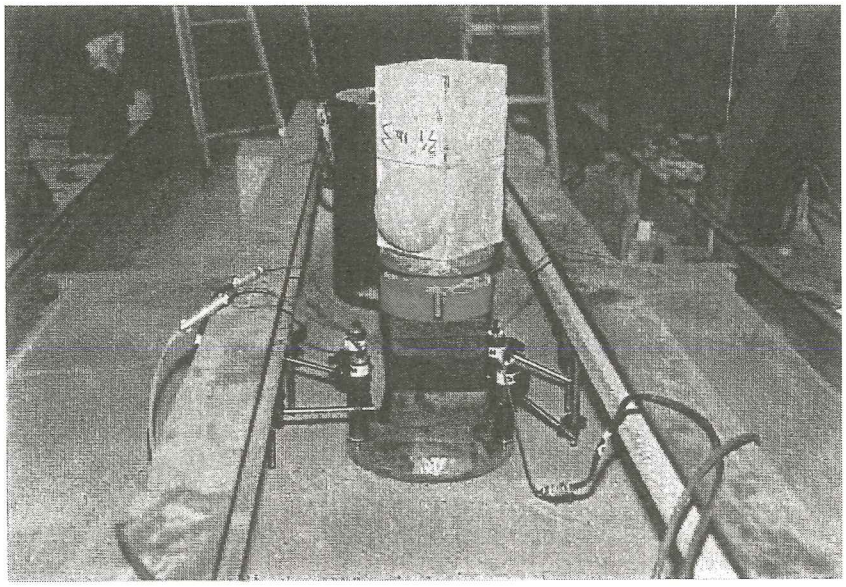


(a)　平板載荷装置（その１）

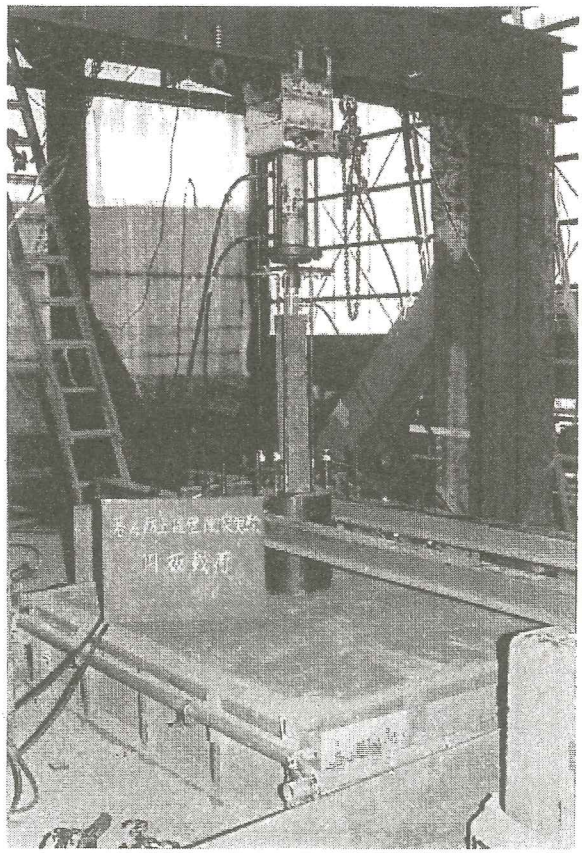


(b)　平板載荷装置（その２）

図 3.2　平板載荷装置



(a)　平板載荷装置（その１）



(b)　平板載荷装置（その２）

写真 3.2　平板載荷装置

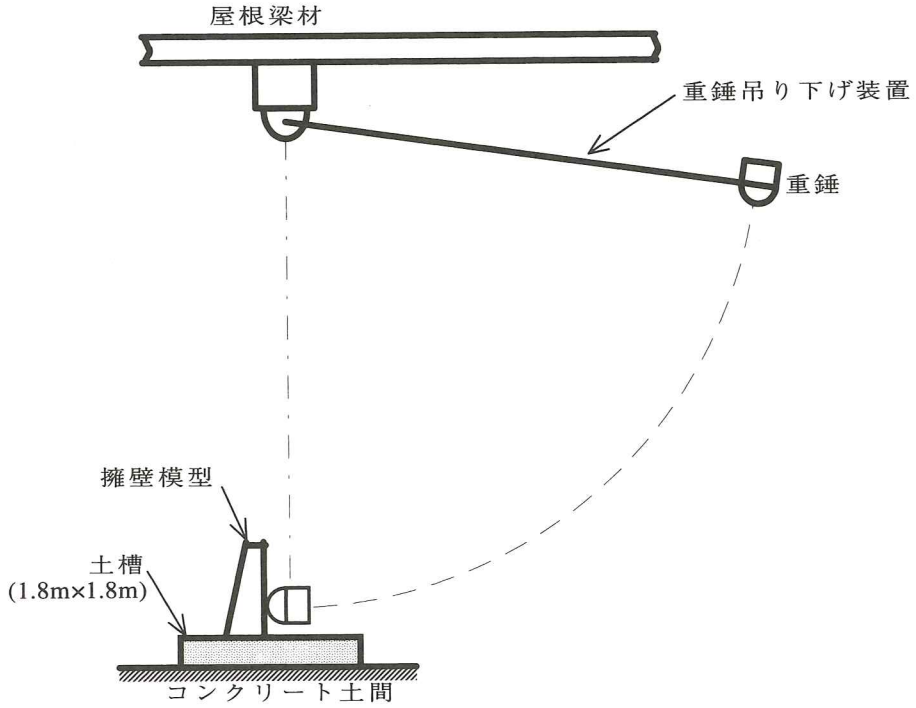
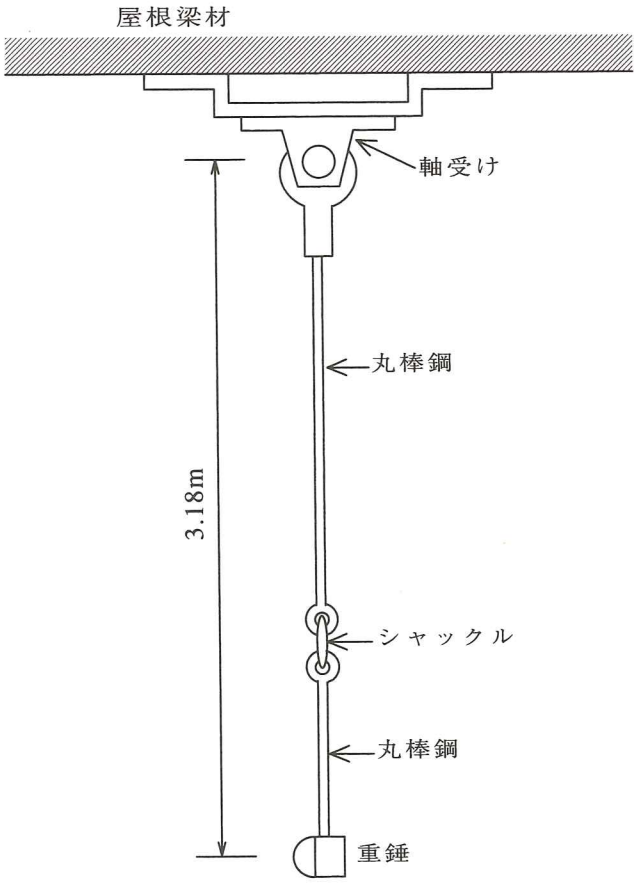
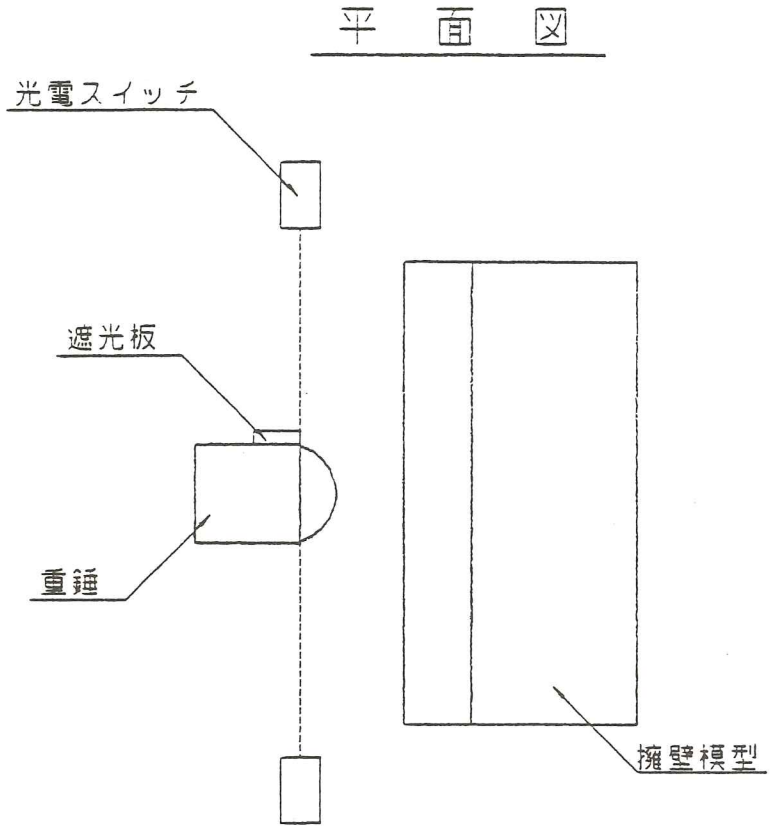


図 3.3　衝突装置



注）奥行方向に幅100mmの間隔で
2本の棒鋼により重錘を支えている。

図 3.4　重錘吊り下げ装置



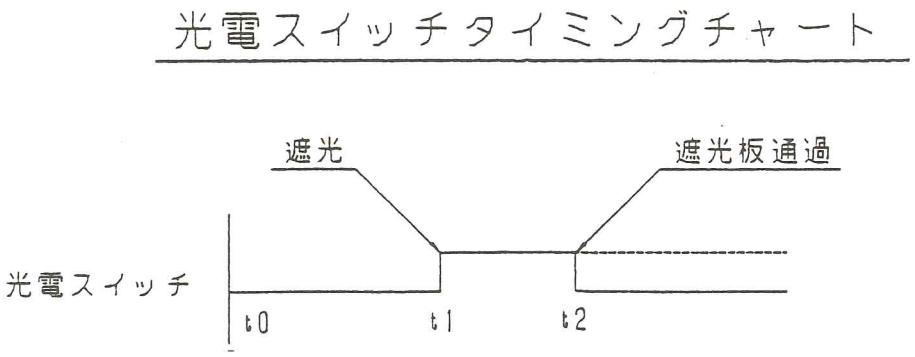
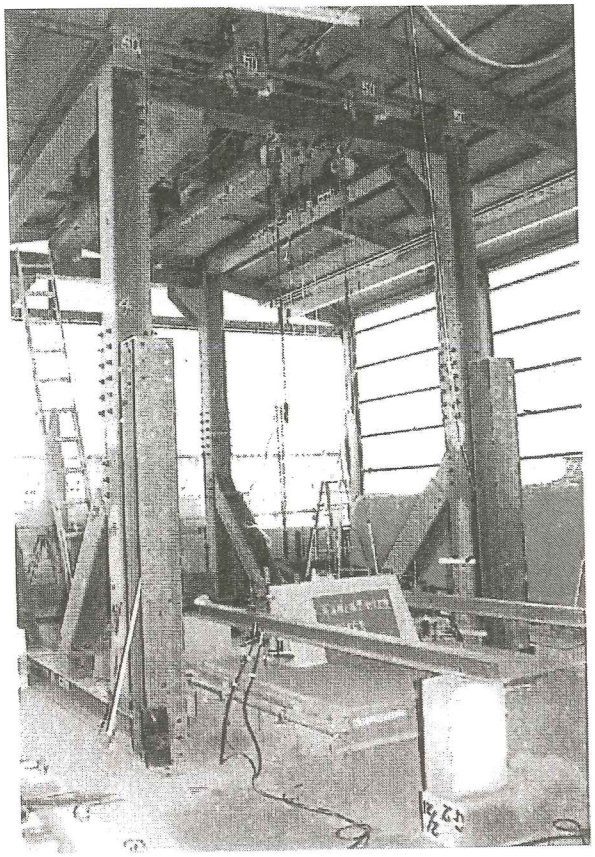
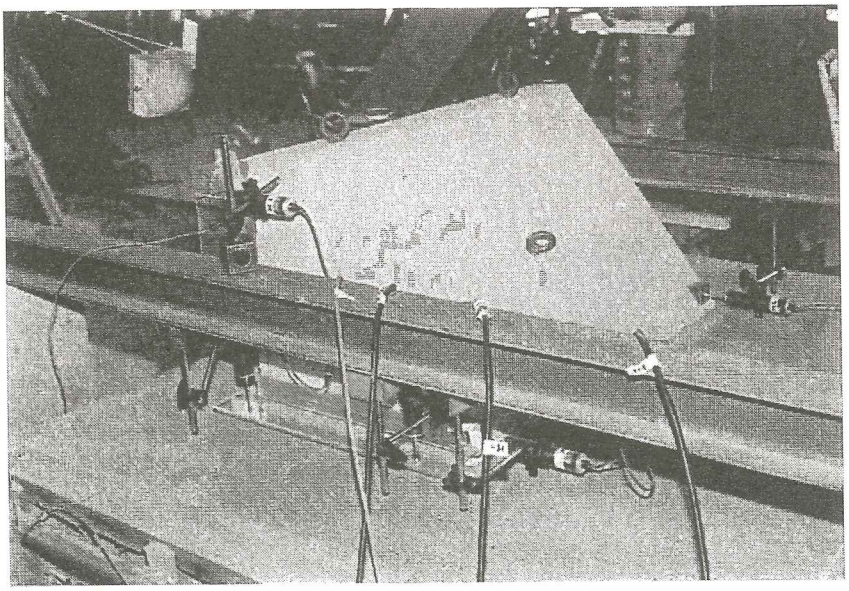


図 3.5　光電スイッチによる速度測定装置

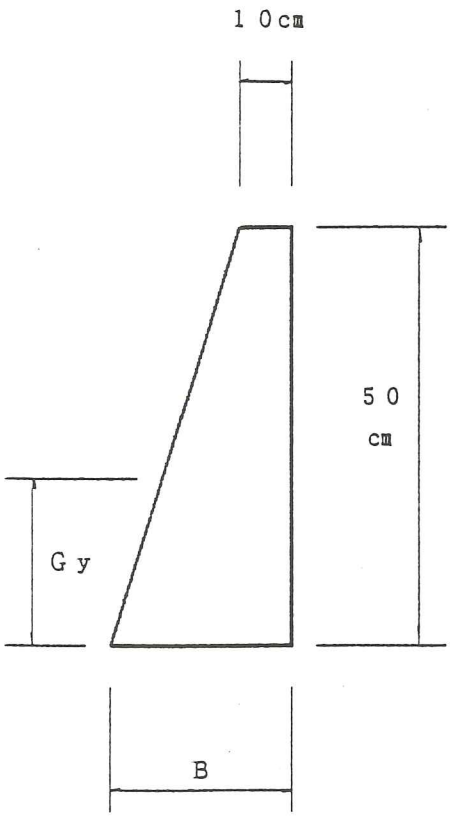


(a)　衝突装置全景



(b)　衝突装置

写真 3.3　衝突装置



擁壁の タイプ	底版幅 B(cm)	重心位置 Gy (cm)	重量 W(kgf)
ﾀｲﾌﾟ A	20	22.22	180
ﾀｲﾌﾟ B	35	20.37	280
ﾀｲﾌﾟ C	50	19.44	375

図 3.6　擁壁模型

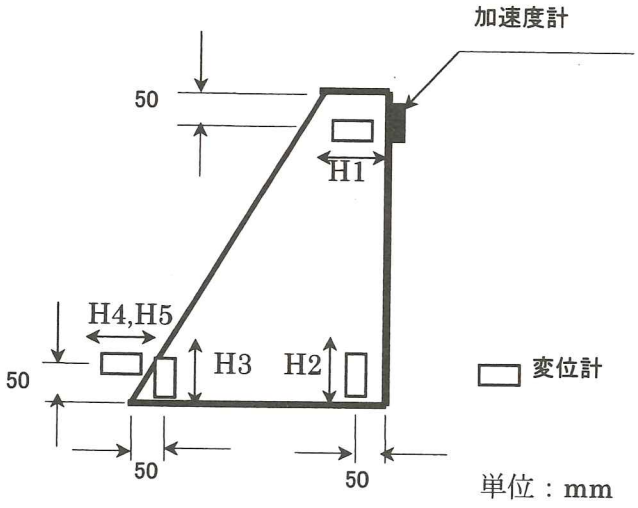


図 3.7　加速度計および変位計取付位置

表3.2 擁壁模型の形状

底版幅 (m)	天端幅 (m)	高さ (m)	図心 YG (m)	図心 XG (m)	質量 (t)	回転慣性 モーメント ($t \cdot m^2$)
0.20	0.10	0.50	0.222	0.111	0.1837	0.004022
0.35	0.10	0.50	0.204	0.180	0.2857	0.007106
0.50	0.10	0.50	0.194	0.239	0.3827	0.011782

実験では、底版幅0.35mの擁壁をコンクリート床上に設置し、質量約5kgの重錘を衝突させた実験と、底版幅0.2mの擁壁を締固めを行っていない砂地盤上に設置し、質量約5.5kgの重錘を衝突させた。

実験中は主に擁壁模型の変位量、重錘の速度を測定した。変位の測定はひずみゲージ式変位計により行い、重錘速度は、重錘に取り付けた遮光板が光電スイッチから発せられる赤外線を遮断した時間を測定する事により求めた。

表3.3　重錘衝突実験ケースの概要

case	擁壁底版幅 b2(m)	擁壁質量 m(kg)	重錘質量 m_0(kg)	落石衝突位置 h(m)	支持地盤	振り子高さ (m)
底版幅と重錘質量の変化	0.20	180	5.41	0.45	締固めた砂	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0
			11.06			
	0.35	280	2.61			0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0
			5.41			
			11.06			
	0.50	375	5.41			0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0
			5.50			
			11.06			
落石衝突位置の変化	0.20	180	5.64	0.15	締固めた砂	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0
				0.25		
				0.35		
	0.35	280	5.64	0.15		0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0
				0.25		
				0.35		
地盤の変化	0.35	280	5.64	0.45	コンクリート	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0
	0.2	180	5.64	0.45	締固めていない砂	0.1, 0.5, 1.0

3.3　実験結果および考察

3.3.1　摩擦試験の結果

締め固めた砂地盤上で実施した摩擦試験により得られた、擁壁の水平変位と引張荷重の関係を**図3.8**に示す。同図は底版幅0.3mの擁壁（質量280kg）を用いて、同一条件で２回実施した結果である。滑動中の摩擦抵抗力は1.54kN、1.41kNであった。

摩擦力は一般に以下の式で表される。

$$F = \mu \cdot N \tag{3.1}$$

ここに、

F：摩擦力

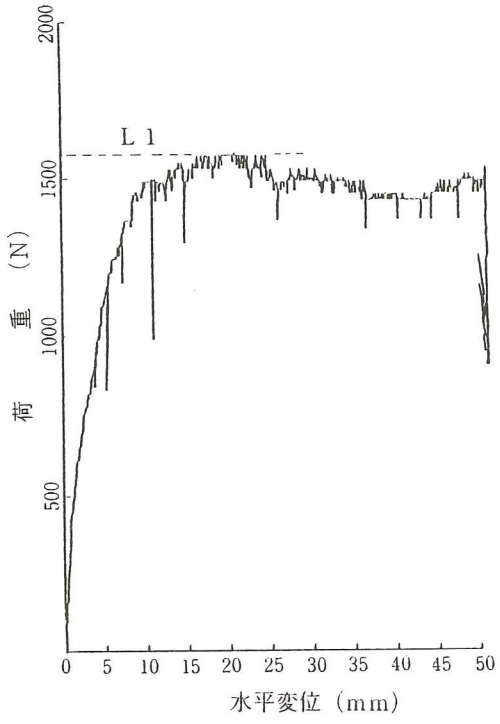
μ：摩擦係数

N：垂直荷重

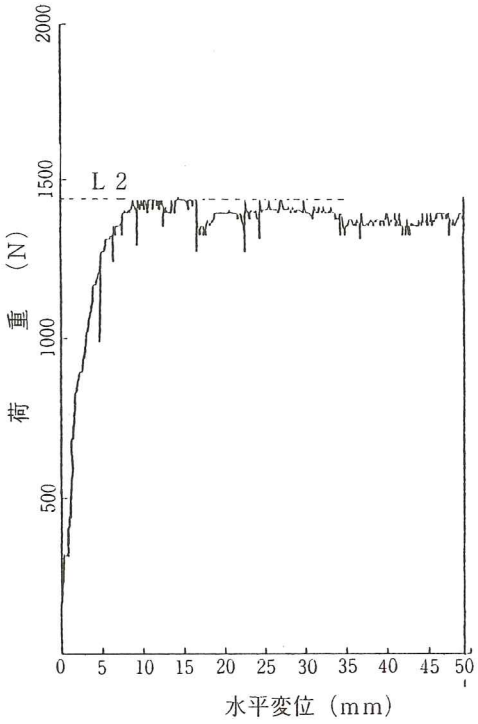
したがって、摩擦係数μはそれぞれ0.56および0.51であった。

3.3.2　平板載荷試験の結果

平板載荷試験は、同一の砂地盤上で最大荷重が1kNまではH鋼のおもりを載荷することにより行い、その

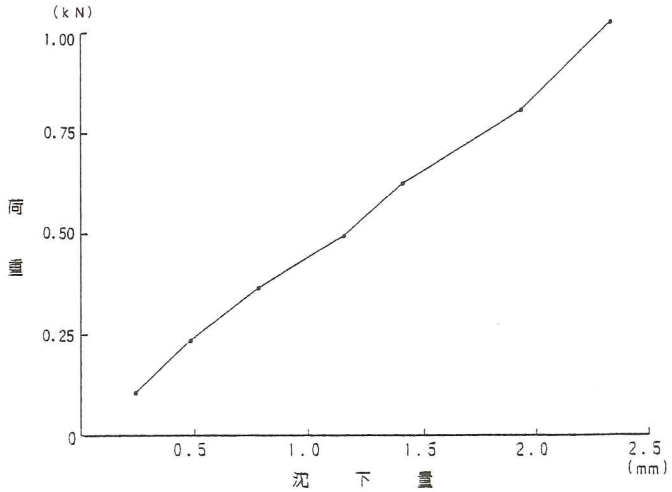


(a)　摩擦試験の結果（その１）

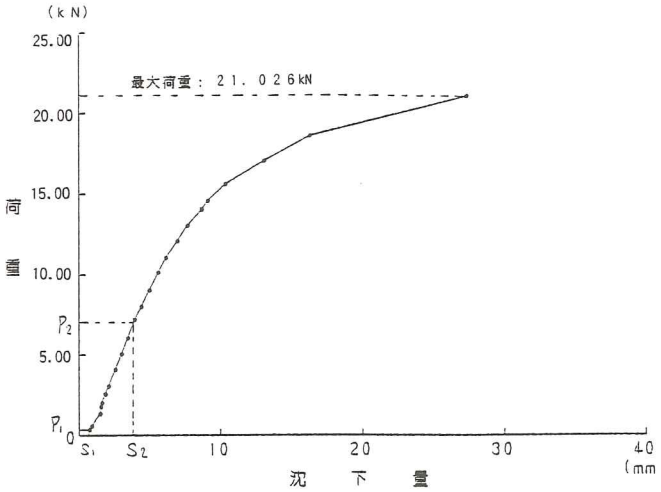


(b)　摩擦試験の結果（その２）

図 3.8　摩擦試験の結果



(a)　平板載荷試験の結果（最大荷重 21kN）



(b)　平板載荷試験の結果（最大荷重 1kN）

図 3.9　平板載荷試験の結果

後最大荷重が21kNまではロードセルにより載荷した。試験の結果得られた荷重と沈下量の関係を図3.9に示す。

ここでは、以下の式を用いて地盤反力係数を求めた[5)]。

$$k_v = \frac{p_2 - p_1}{s_2 - s_1} \tag{3.2}$$

ここに、k_v：鉛直地盤反力係数(kN/m^3)

p_2：最大荷重の1/3の時の荷重強さ(kN/m^2)

p_1：無載荷時の荷重強さ(kN/m^2)

S_2：p_2に対応する沈下量(m)

S_1：p_1に対応する沈下量(m)

式(3.2)により求めた鉛直地盤反力係数k_vは、最大荷重21kNの場合にはk_v=31MN/m^{3}であり、最大荷重1kNの場合にはk_v=6.1MN/m^{3}であった。ただし、最大荷重1kNの試験結果は、応力レベルが小さく地盤の初期の不整の影響が考えられること、および既往結果によると埋立地盤の地盤反力は88～103MN/m^{3}であり[5)]、最大荷重1kNの場合のk_v=6.1MN/m^{3}は極端に小さな値であることから、実験の分析には地盤反力係数として最大荷重21kNの結果である31MN/m^{3}を用いた。

3.3.3　重錘衝突実験の結果

(1)重錘速度

重錘速度は、重錘に取り付けた遮光板が光電スイッチから発せられる赤外線を遮断した時間を測定する事により求めた。**図3.10**に光電スイッチの電圧データの一例を示す。重錘の速度は、光電スイッチから発せられる赤外線を重錘に取り付けた遮光板が遮断した時刻(=t_1)と通過した時刻(=t_2)から、以下の式で求めた。

$$v = \frac{l}{t_2 - t_1} \tag{3.3}$$

ここに、v：重錘の速度(m/s)

l：遮光板の長さ(=0.05m)

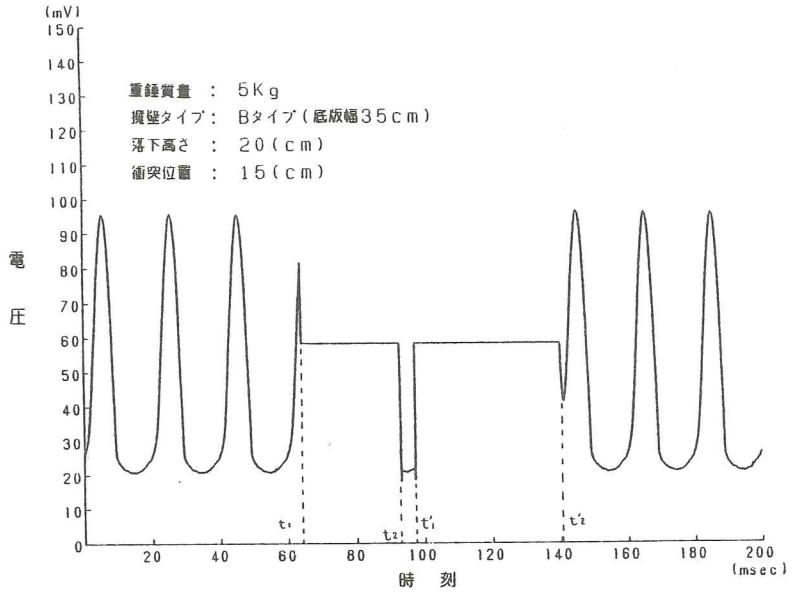


図 3.10　光電スイッチの電圧データの一例

表3.4 重錘の衝突直前の速度[振り子運動の計算値と遮光板による測定速度]

ケース番号	実験番号	遮光板長さ l(m)	①理論速度 (m/s)	落石衝突前 t1 (msec)	t2 (msec)	②速度 (m/s)	②／①
1- 1	SBA0191	0.05	1.400	423.64	461.46	1.322	94.43%
1- 1	SBA0291	0.05	1.980	292.28	321.74	1.697	85.72%
1- 1	SBA0391	0.05	2.425	318.64	318.64	2.380	98.15%
1- 1	SBA0491	0.05	2.800	355.34	355.34	2.790	99.64%
1- 1	SBA0595	0.05	3.130	279.36	279.36	3.170	101.26%
1- 1	SBA1094	0.05	4.427	335.44	335.44	4.280	96.68%
1- 1	SBA1591	0.05	5.422	233.28	233.28	5.580	102.91%
1- 1	SBA2092	0.05	6.261	389.16	389.16	6.170	98.55%
1- 4	SBD0191	0.05	1.400	533.56	572.66	1.279	91.34%
1- 4	SBD0291	0.05	1.980	384.92	413.20	1.768	89.30%
1- 4	SBD0391	0.05	2.425	276.34	299.00	2.207	91.00%
1- 4	SBD0491	0.05	2.800	344.22	363.44	2.601	92.91%
1- 4	SBD0591	0.05	3.130	302.32	319.20	2.962	94.62%
1- 4	SBD1091	0.05	4.427	268.20	280.44	4.085	92.27%
1- 4	SBD1592	0.05	5.422	209.66	219.26	5.208	96.06%
1- 4	SBD2091	0.05	6.261	177.84	185.92	6.188	98.84%
1- 2	SBB0391	0.05	2.425	250.56	271.18	2.425	100.00%
1- 2	SBB0491	0.05	2.800	332.68	350.66	2.781	99.32%
1- 2	SBB0592	0.05	3.130	308.44	324.34	3.145	100.45%
1- 2	SBB1092	0.05	4.427	280.66	291.94	4.433	100.12%
1- 2	SBB1591	0.05	5.422	218.84	228.10	5.400	99.58%
1- 2	SBB2092	0.05	6.261	271.24	279.22	6.266	100.07%
2- 1	SAA0191	0.05	1.400	448.16	485.08	1.354	96.73%
2- 1	SAA0291	0.05	1.980	351.60	377.92	1.900	95.95%
2- 1	SAA0391	0.05	2.425	318.58	340.34	2.298	94.76%
2- 1	SAA0491	0.05	2.800	248.84	267.86	2.629	93.89%
2- 1	SAA0592	0.05	3.130	257.04	274.14	2.924	93.40%
2- 1	SAA1091	0.05	4.427	245.10	256.76	4.288	96.86%
2- 1	SAA1591	0.05	5.422	342.76	352.14	5.330	98.31%
2- 1	SAA2091	0.05	6.261	397.20	405.44	6.068	96.92%
2- 2	SCA0191	0.05	1.400	380.60	415.56	1.430	102.16%
2- 2	SCA0192	0.05	1.400	299.04	332.58	1.491	106.48%
2- 2	SCA0291	0.05	1.980	337.38	360.42	2.170	109.61%
2- 2	SCA0292	0.05	1.980	290.90	313.52	2.210	111.64%
2- 2	SCA0391	0.05	2.425	295.02	313.54	2.700	111.34%
2- 2	SCA0392	0.05	2.425	282.66	300.70	2.772	114.30%
2- 2	SCA0491	0.05	2.800	253.84	270.16	3.064	109.42%
2- 2	SCA0492	0.05	2.800	315.60	331.38	3.169	113.16%
2- 2	SCA0591	0.05	3.130	283.26	297.68	3.467	110.76%
2- 2	SCA0592	0.05	3.130	280.60	293.46	3.888	124.20%
2- 2	SCA1091	0.05	4.427	273.06	282.48	5.308	119.89%
2- 2	SCA1592	0.05	5.422	268.50	278.56	4.970	91.66%
2- 2	SCA2091	0.05	6.261	375.68	383.78	6.173	98.59%
2- 2	SCB0191	0.05	1.400	398.14	435.48	1.339	95.65%
2- 2	SCB0291	0.05	1.980	225.20	251.86	1.875	94.73%
2- 2	SCB0391	0.05	2.425	403.22	424.80	2.317	95.55%
2- 2	SCB0491	0.05	2.800	287.12	305.78	2.680	95.70%
2- 2	SCB0591	0.05	3.130	310.10	327.78	2.828	90.34%
2- 2	SCB1091	0.05	4.427	269.16	269.16	4.330	97.80%
2- 2	SCB1591	0.05	5.422	386.58	397.12	4.744	87.49%
2- 2	SCB2091	0.05	6.261	338.86	347.16	6.024	96.22%
2- 2	SAB0191	0.05	1.400	182.48	219.32	1.357	96.94%
2- 2	SAB0291	0.05	1.980	182.26	208.72	1.890	95.44%
2- 2	SAB0391	0.05	2.425	247.84	269.44	2.315	95.46%
2- 2	SAB0491	0.05	2.800	212.04	230.68	2.682	95.80%
2- 2	SAB0591	0.05	3.130	443.40	462.54	2.612	83.45%
2- 2	SAB1091	0.05	4.427	212.90	224.34	4.371	98.72%
2- 2	SAB1591	0.05	5.422	302.56	311.94	5.330	98.31%
2- 2	SAB2091	0.05	6.261	169.84	178.12	6.039	96.45%
2- 4	SBA0173	0.05	1.400	202.46	238.06	1.404	100.32%
2- 4	SBA0271	0.05	1.980	346.24	372.36	1.914	96.68%
2- 4	SBA0371	0.05	2.425	311.44	332.64	2.358	97.26%
2- 4	SBA0471	0.05	2.800	302.50	320.84	2.726	97.37%
2- 4	SBA0571	0.05	3.130	269.58	286.06	3.034	96.92%
2- 4	SBA1072	0.05	4.427	194.20	205.61	4.382	98.98%
2- 4	SBA0151	0.05	1.400	401.68	438.58	1.355	96.79%
2- 4	SBA0251	0.05	1.980	373.12	399.38	1.904	96.17%
2- 4	SBA0351	0.05	2.425	406.14	427.26	2.367	97.63%
2- 4	SBA0451	0.05	2.800	367.82	386.44	2.685	95.90%
2- 4	SBA0551	0.05	3.130	346.62	363.24	3.008	96.10%
2- 4	SBA1051	0.05	4.427	409.32	421.30	4.174	94.27%
2- 4	SBA0131	0.05	1.400	232.50	268.02	1.408	100.55%
2- 4	SBA0231	0.05	1.980	410.64	435.98	1.973	99.66%
2- 4	SBA0331	0.05	2.425	329.86	350.28	2.449	100.98%
2- 4	SBA0431	0.05	2.800	285.22	302.92	2.825	100.89%
2- 4	SBA1031	0.05	4.427	420.46	431.76	4.425	99.95%
2- 3	SAA0131	0.05	1.400	302.30	337.90	1.404	100.32%
2- 3	SAA0231	0.05	1.980	245.60	270.64	1.997	100.85%
2- 3	SAA0331	0.05	2.425	324.86	345.48	2.425	100.00%
2- 3	SAA0431	0.05	2.800	285.64	303.46	2.806	100.21%
2- 3	SAA0531	0.05	3.130	285.26	301.32	3.113	99.45%
2- 3	SAA0151	0.05	1.400	329.46	364.86	1.412	100.89%
2- 3	SAA0251	0.05	1.980	269.34	294.68	1.973	99.66%
2- 3	SAA0351	0.05	2.425	267.24	287.96	2.413	99.52%
2- 3	SAA0451	0.05	2.800	278.16	296.22	2.769	98.88%
2- 3	SAA0551	0.05	3.130	328.24	344.56	3.064	97.87%
2- 3	SAA1051	0.05	4.427	214.62	226.76	4.119	93.03%
2- 3	SAA0171	0.05	1.400	263.54	299.78	1.380	98.55%
2- 3	SAA0271	0.05	1.980	253.44	279.12	1.947	98.34%
2- 3	SAA0371	0.05	2.425	278.74	299.96	2.356	97.17%
2- 3	SAA0471	0.05	2.800	238.08	256.44	2.723	97.26%
2- 3	SAA0571	0.05	3.130	300.58	317.04	3.038	97.03%
2- 3	SAA1071	0.05	4.427	178.38	190.14	4.252	96.04%
2- 5	CBA0191	0.05	1.400	221.00	259.46	1.300	92.86%
2- 5	CBA0291	0.05	1.980	225.20	251.86	1.875	94.73%
2- 5	CBA0391	0.05	2.425	188.86	210.72	2.287	94.33%
2- 5	CBA0491	0.05	2.800	201.92	220.46	2.697	96.32%
2- 5	CBA0591	0.05	3.130	231.14	247.46	3.064	97.87%
2- 5	CBA1091	0.05	4.427	272.10	283.52	4.378	98.90%
2- 5	CBA1591	0.05	5.422	215.16	224.60	5.297	97.68%
2- 5	CBA1592	0.05	5.422	272.92	282.44	5.252	96.86%
2- 5	CBA2091	0.05	6.261	191.52	199.84	6.010	95.99%
2- 6	TAA0191	0.05	1.400	171.36	205.48	1.465	104.67%
2- 6	TAA0592	0.05	3.130	219.22	235.64	3.045	97.27%
2- 6	TAA1092	0.05	4.427	259.94	271.68	4.259	96.20%
						平均値	98.77%

t_1：遮光板が赤外線を遮断した時刻(s)

t_2：遮光板が遮断した時刻(s)

上式により求めた重錘の擁壁衝突直前の速度v_0を**表3.4**に示す。なお、表中には、振り子の落下高さから求めた、擁壁直前の重錘速度も示した。光電スイッチから求めた速度は、振り子運動の落下高さより求めた速度の概ね96%であり、以後の分析では、擁壁衝突直前の重錘速度は振り子運動から求めた重錘速度の96%

とした。

また、擁壁衝突後の重錘の速度は、重錘に設置した加速度計の記録より、次式により求めた。

$$v_1 = v_0 - \int a(t)dt \tag{3.4}$$

ここに、v_0：重錘の衝突直前の速度

v_1：重錘の衝突直後の速度

$a(t)$：重錘加速度

(2)擁壁の変位量

擁壁模型の重錘衝突実験の条件と結果一覧を**表3.5**に示す。表中、重錘速度は(1)で求めたv_0およびv_1であり、重錘運動エネルギーは重錘質量および衝突前後の速度より求めた。また、擁壁の最大回転角θ_{max}は変位計の値から計算により求めた回転角の最大値、擁壁の最大水平変位δ_{max}は擁壁つま先部の変位計H4、5（**図3.7**参照）の平均の最大値、擁壁の残留変位δは変位計H4、5の残留値の平均である。

落石の衝突速度と擁壁頂部の最大水平変位の関係を**図3.11**に示す。図は、(1)重錘質量の影響、(2)擁壁底版幅の影響、(3)重錘衝突高さの影響、および(4)基礎地盤の影響について比較している。(1)、(2)および(4)より、同じ重錘速度では、落石質量が大きいほど、底版幅が狭いほど、また砂地盤が軟らかいほど変位量は大きくなっている。他方、(3)より衝突高さにより変位量に顕著な違いは見られない。(4)(a)のコンクリート基礎と締め固めた砂基礎の比較では、コンクリート基盤の最大水平変位が小さい傾向が見られた。

落石の衝突速度と擁壁の最大回転角度との関係を**図3.12**に示す。図の(1)、(2)および(4)より擁壁の回転角についても水平変位とほぼ同様に、重錘質量が大きいほど、擁壁幅が狭いほど、また砂地盤が締め固められず軟らかいほど、回転角は大きくなる傾向がみられる。落石の衝突高さについては、衝突高さが高いほど、回転角度が大きくなる傾向が見られた。また、(4)(a)のコンクリート基礎と砂基礎の違いでは、コンクリート基礎で擁壁の回転角が大きくなる傾向が見られた。ただし、コンクリート基礎の場合、コンクリート基盤の凹凸により擁壁のつま先部が引っかかり水平変位がおさえられたため、回転変位が大きくなった可能性もある。

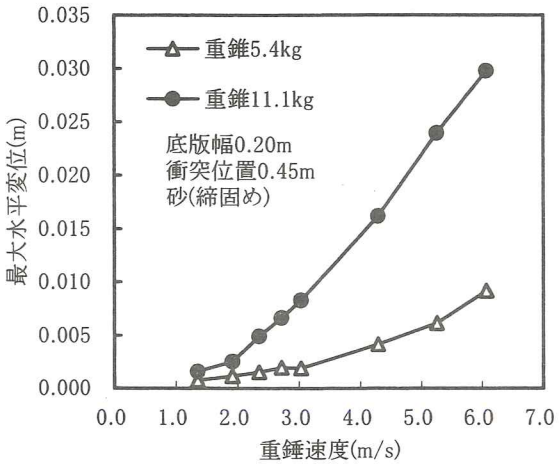
旧落石対策便覧の設計法では地盤が固いほど擁壁の安定性が低下するという結果が得られるということを２．で述べた。しかしながら、実験結果を見ると、最大水平変位量については地盤が固いコンクリート、締め固めた砂、締固めていない砂の順に変位量は大きくなっており、地盤が固いほど擁壁の変位量は小さくなっている。また、回転量についても、締固めた地盤では締め固められず軟らかいほど、回転角は大きくなっている。実験から得られた結果は、旧落石対策便覧の設計法による評価法とは矛盾する結果となっており、旧落石対策便覧の抱える問題点が実験からも明らかになったといえる。

落石の衝突速度と擁壁底部の残留水平変位の関係を**図3.13**に示す。いずれの項目についても、全般的な傾向は最大水平変位と変わらないが、重錘の速度が速くなると最大水平変位よりも急激に残留変位量が増大する傾向が見られる。これは、残留変位はあるしきい値を超えた所から急激に大きくなることを意味し、したがって、擁壁の変形挙動は弾塑性的であると考えられる。

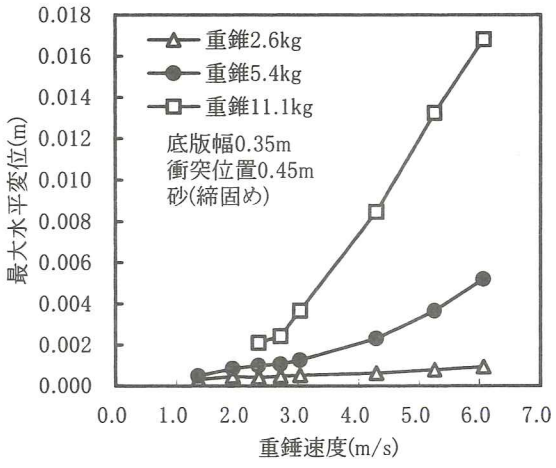
表3.5 実験条件および実験結果一覧

実験条件	ケース番号	実験番号	実験条件							実験結果						
			地盤条件		擁壁底版幅 B	擁壁質量 M	重錘質量 m	振り子高さ h_0	衝突位置 h	重錘速度		重錘運動エネルギー		擁壁変位		
			支持地盤	(砂)締固め ○or×	(m)	(t)	(t)	(m)	(m)	衝突前 v_0 (m/s)	衝突後 v_1 (m/s)	衝突前 $Er1$ (kgm^2/s^2)	衝突前後差 ΔEr (kgm^2/s^2)	最大回転角 θmax (°)	最大水平変位 δmax (m)	残留水平変位 δ (m)
底版幅0.35m 重錘5.4kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	1- 1	SBA0191	砂	○	0.35	0.28	0.0054	0.10	0.45	1.358	-0.684	4.988	3.723	0.25	0.00047	0.00005
	1- 1	SBA0291	砂	○	0.35	0.28	0.0054	0.20	0.45	1.921	-1.081	9.977	6.813	0.37	0.00084	0.00006
	1- 1	SBA0391	砂	○	0.35	0.28	0.0054	0.30	0.45	2.352	-1.206	14.965	11.032	0.46	0.00099	0.00026
	1- 1	SBA0491	砂	○	0.35	0.28	0.0054	0.40	0.45	2.716	-1.104	19.954	16.657	0.52	0.00107	0.00037
	1- 1	SBA0595	砂	○	0.35	0.28	0.0054	0.50	0.45	3.037	-1.307	24.942	20.319	0.60	0.00126	0.00051
	1- 1	SBA1094	砂	○	0.35	0.28	0.0054	1.00	0.45	4.294	-1.649	49.885	42.533	0.94	0.00232	0.00157
	1- 1	SBA1591	砂	○	0.35	0.28	0.0054	1.50	0.45	5.260	-1.785	74.827	66.203	1.16	0.00366	0.00313
	1- 1	SBA2092	砂	○	0.35	0.28	0.0054	2.00	0.45	6.073	-1.500	99.769	93.684	1.33	0.00520	0.00466
底版幅0.35m 重錘2.6kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	1- 4	SBD0191	砂	○	0.35	0.28	0.0026	0.10	0.45	1.358	-0.691	2.407	1.784	0.14	0.00030	0.00001
	1- 4	SBD0291	砂	○	0.35	0.28	0.0026	0.20	0.45	1.921	-0.714	4.813	4.147	0.18	0.00045	0.00001
	1- 4	SBD0391	砂	○	0.35	0.28	0.0026	0.30	0.45	2.352	-1.023	7.220	5.855	0.23	0.00041	0.00002
	1- 4	SBD0491	砂	○	0.35	0.28	0.0026	0.40	0.45	2.716	-1.407	9.627	7.043	0.26	0.00046	0.00002
	1- 4	SBD0591	砂	○	0.35	0.28	0.0026	0.50	0.45	3.037	-1.523	12.033	9.005	0.30	0.00050	0.00004
	1- 4	SBD1091	砂	○	0.35	0.28	0.0026	1.00	0.45	4.294	-1.219	24.066	22.128	0.43	0.00062	0.00017
	1- 4	SBD1592	砂	○	0.35	0.28	0.0026	1.50	0.45	5.260	-1.949	36.100	31.140	0.50	0.00078	0.00013
	1- 4	SBD2091	砂	○	0.35	0.28	0.0026	2.00	0.45	6.073	-2.271	48.133	41.403	0.62	0.00093	0.00017
底版幅0.35m 重錘11.1kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	1- 2	SBB0391	砂	○	0.35	0.28	0.0111	0.30	0.45	2.352	-0.886	30.595	26.255	1.14	0.00211	0.00103
	1- 2	SBB0491	砂	○	0.35	0.28	0.0111	0.40	0.45	2.716	-0.822	40.793	37.056	1.22	0.00244	0.00144
	1- 2	SBB0592	砂	○	0.35	0.28	0.0111	0.50	0.45	3.037	-1.026	50.991	45.165	1.40	0.00368	0.00289
	1- 2	SBB1092	砂	○	0.35	0.28	0.0111	1.00	0.45	4.294	-1.313	101.982	92.454	2.04	0.00847	0.00761
	1- 2	SBB1591	砂	○	0.35	0.28	0.0111	1.50	0.45	5.260	-1.462	152.973	141.145	2.68	0.01325	0.01183
	1- 2	SBB2092	砂	○	0.35	0.28	0.0111	2.00	0.45	6.073	-1.183	203.965	196.227	3.21	0.01683	0.01528
底版幅0.20m 重錘5.4kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	2- 1	SAA0191	砂	○	0.20	0.18	0.0054	0.10	0.45	1.358	-0.711	4.988	3.621	0.46	0.00073	0.00028
	2- 1	SAA0291	砂	○	0.20	0.18	0.0054	0.20	0.45	1.921	-0.911	9.977	7.730	0.69	0.00112	0.00051
	2- 1	SAA0391	砂	○	0.20	0.18	0.0054	0.30	0.45	2.352	-0.869	14.965	12.923	0.91	0.00149	0.00069
	2- 1	SAA0491	砂	○	0.20	0.18	0.0054	0.40	0.45	2.716	-1.724	19.954	11.914	1.38	0.00195	0.00110
	2- 1	SAA0592	砂	○	0.20	0.18	0.0054	0.50	0.45	3.037	-1.925	24.942	14.914	1.51	0.00187	0.00078
	2- 1	SAA1091	砂	○	0.20	0.18	0.0054	1.00	0.45	4.294	-2.027	49.885	38.775	2.36	0.00416	0.00218
	2- 1	SAA1591	砂	○	0.20	0.18	0.0054	1.50	0.45	5.260	-1.859	74.827	65.474	3.31	0.00614	0.00374
	2- 1	SAA2091	砂	○	0.20	0.18	0.0054	2.00	0.45	6.073	-1.785	99.769	91.152	4.22	0.00918	0.00619
底版幅0.50m 重錘5.5kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	2- 2	SCA0192	砂	○	0.50	0.375	0.0055	0.10	0.45	1.358	-0.579	5.071	4.150	0.22	0.00030	0.00004
	2- 2	SCA0292	砂	○	0.50	0.375	0.0055	0.20	0.45	1.921	-0.956	10.143	7.627	0.29	0.00050	0.00009
	2- 2	SCA0392	砂	○	0.50	0.375	0.0055	0.30	0.45	2.352	-1.250	15.214	10.918	0.33	0.00059	0.00016
	2- 2	SCA0492	砂	○	0.50	0.375	0.0055	0.40	0.45	2.716	-1.472	20.286	14.327	0.37	0.00070	0.00028
	2- 2	SCA0592	砂	○	0.50	0.375	0.0055	0.50	0.45	3.037	-1.613	25.357	18.199	0.38	0.00084	0.00037
	2- 2	SCA1592	砂	○	0.50	0.375	0.0055	1.50	0.45	5.260	-3.596	76.072	40.501	1.11	0.00353	0.00284
	2- 2	SCA2091	砂	○	0.50	0.375	0.0055	2.00	0.45	6.073	-3.034	101.429	76.118	0.69	0.00333	0.00311
底版幅0.50m 重錘5.4kg 衝突位置0.45m 砂(締固め) 失敗？	2- 2	SCA0191	砂	○	0.50	0.03827	0.0054	0.10	0.45	1.358	-0.987	4.979	2.349	0.12	0.00042	0.00011
	2- 2	SCA0291	砂	○	0.50	0.03827	0.0054	0.20	0.45	1.921	-1.543	9.958	3.526	0.16	0.00060	0.00028
	2- 2	SCA0391	砂	○	0.50	0.03827	0.0054	0.30	0.45	2.352	-0.952	14.938	12.491	0.19	0.00077	0.00040
	2- 2	SCA0491	砂	○	0.50	0.03827	0.0054	0.40	0.45	2.716	-2.448	19.917	3.737	0.21	0.00091	0.00049
	2- 2	SCA0591	砂	○	0.50	0.03827	0.0054	0.50	0.45	3.037	-1.421	24.896	19.441	0.20	0.00090	0.00047
	2- 2	SCA1091	砂	○	0.50	0.03827	0.0054	1.00	0.45	4.294	-2.324	49.792	35.214	0.54	0.00155	0.00117
	2- 2	SCA2091	砂	○	0.50	0.03827	0.0054	2.00	0.45	6.073	-3.034	99.585	74.734	0.69	0.00333	0.00311
底版幅0.50m 重錘11.1kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	2- 2	SCB0191	砂	○	0.50	0.375	0.0111	0.10	0.45	1.358	-0.771	10.198	6.911	0.27	0.00099	0.00056
	2- 2	SCB0291	砂	○	0.50	0.375	0.0111	0.20	0.45	1.921	-1.061	20.396	14.165	0.30	0.00150	0.00103
	2- 2	SCB0391	砂	○	0.50	0.375	0.0111	0.30	0.45	2.352	-1.225	30.595	22.298	0.38	0.00220	0.00178
	2- 2	SCB0491	砂	○	0.50	0.375	0.0111	0.40	0.45	2.716	-1.416	40.793	29.705	0.43	0.00296	0.00261
	2- 2	SCB0591	砂	○	0.50	0.375	0.0111	0.50	0.45	3.037	-1.366	50.991	40.666	0.44	0.00353	0.00321
	2- 2	SCB1091	砂	○	0.50	0.375	0.0111	1.00	0.45	4.294	-1.810	101.982	83.873	1.19	0.00788	0.00731

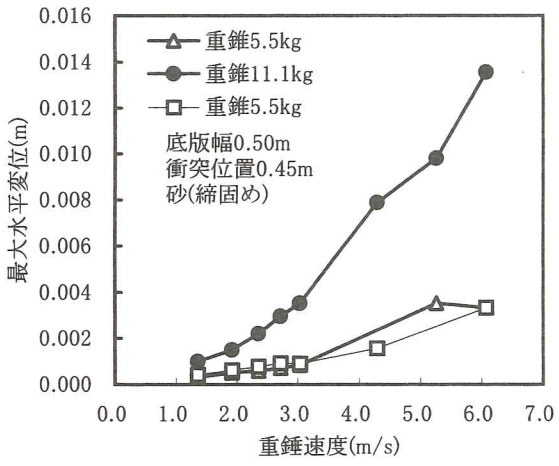
	2- 2	SCB1591	砂	○	0.50	0.375	0.0111	1.50	0.45	5.260	-2.191	152.973	126.415	1.09	0.00981	0.00939
	2- 2	SCB2091	砂	○	0.50	0.375	0.0111	2.00	0.45	6.073	-1.880	203.965	184.423	1.79	0.01357	0.01281
底版幅0.20m 重錘11.1kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	2- 2	SAB0191	砂	○	0.20	0.18	0.0111	0.10	0.45	1.358	-0.553	10.198	8.507	0.34	0.00155	0.00005
	2- 2	SAB0291	砂	○	0.20	0.18	0.0111	0.20	0.45	1.921	-0.791	20.396	16.932	1.37	0.00250	0.00034
	2- 2	SAB0391	砂	○	0.20	0.18	0.0111	0.30	0.45	2.352	-0.969	30.595	25.404	0.84	0.00492	0.00277
	2- 2	SAB0491	砂	○	0.20	0.18	0.0111	0.40	0.45	2.716	-0.923	40.793	36.082	2.70	0.00662	0.00389
	2- 2	SAB0591	砂	○	0.20	0.18	0.0111	0.50	0.45	3.037	-0.624	50.991	48.835	4.12	0.00828	0.00477
	2- 2	SAB1091	砂	○	0.20	0.18	0.0111	1.00	0.45	4.294	-1.094	101.982	95.368	7.25	0.01621	0.00911
	2- 2	SAB1591	砂	○	0.20	0.18	0.0111	1.50	0.45	5.260	-0.874	152.973	148.744	9.66	0.02392	0.01551
	2- 2	SAB2091	砂	○	0.20	0.18	0.0111	2.00	0.45	6.073	-0.510	203.965	202.527	11.31	0.02979	0.02132
底版幅0.35m 重錘5.6kg 衝突位置0.35m 砂(締固め)	2- 4	SBA0173	砂	○	0.35	0.28	0.0056	0.10	0.35	1.358	-0.917	5.201	2.829	0.20	0.00033	0.00000
	2- 4	SBA0271	砂	○	0.35	0.28	0.0056	0.20	0.35	1.921	-0.943	10.401	7.891	0.26	0.00063	0.00016
	2- 4	SBA0371	砂	○	0.35	0.28	0.0056	0.30	0.35	2.352	-1.186	15.602	11.636	0.33	0.00081	0.00026
	2- 4	SBA0471	砂	○	0.35	0.28	0.0056	0.40	0.35	2.716	-1.455	20.802	14.832	0.39	0.00089	0.00029
	2- 4	SBA0571	砂	○	0.35	0.28	0.0056	0.50	0.35	3.037	-1.601	26.003	18.771	0.44	0.00095	0.00033
	2- 4	SBA1072	砂	○	0.35	0.28	0.0056	1.00	0.35	4.294	-2.287	52.005	37.261	0.93	0.00208	0.00080
底版幅0.35m 重錘5.6kg 衝突位置0.25m 砂(締固め)	2- 4	SBA0151	砂	○	0.35	0.28	0.0056	0.10	0.25	1.358	-0.821	5.201	3.300	0.15	0.00026	-0.00001
	2- 4	SBA0251	砂	○	0.35	0.28	0.0056	0.20	0.25	1.921	-1.126	10.401	6.823	0.25	0.00043	0.00006
	2- 4	SBA0351	砂	○	0.35	0.28	0.0056	0.30	0.25	2.352	-1.349	15.602	10.471	0.31	0.00054	0.00011
	2- 4	SBA0451	砂	○	0.35	0.28	0.0056	0.40	0.25	2.716	-1.582	20.802	13.744	0.35	0.00063	0.00012
	2- 4	SBA0551	砂	○	0.35	0.28	0.0056	0.50	0.25	3.037	-1.771	26.003	17.154	0.38	0.00068	0.00015
	2- 4	SBA1051	砂	○	0.35	0.28	0.0056	1.00	0.25	4.294	-2.529	52.005	33.974	0.56	0.00131	0.00043
底版幅0.35m 重錘5.6kg 衝突位置0.15m 砂(締固め)	2- 4	SBA0131	砂	○	0.35	0.28	0.0056	0.10	0.15	1.358	-0.814	5.201	3.332	0.09	0.00026	0.00007
	2- 4	SBA0231	砂	○	0.35	0.28	0.0056	0.20	0.15	1.921	-1.107	10.401	6.942	0.14	0.00045	0.00012
	2- 4	SBA0331	砂	○	0.35	0.28	0.0056	0.30	0.15	2.352	-1.478	15.602	9.442	0.15	0.00053	0.00013
	2- 4	SBA0431	砂	○	0.35	0.28	0.0056	0.40	0.15	2.716	-1.589	20.802	13.682	0.19	0.00069	0.00020
	2- 4	SBA1031	砂	○	0.35	0.28	0.0056	1.00	0.15	4.294	-2.589	52.005	33.109	0.26	0.00181	0.00048
底版幅0.20m 重錘5.6kg 衝突位置0.15m 砂(締固め)	2- 3	SAA0131	砂	○	0.20	0.18	0.0056	0.10	0.15	1.358	-0.837	5.201	3.225	0.13	0.00060	0.00021
	2- 3	SAA0231	砂	○	0.20	0.18	0.0056	0.20	0.15	1.921	-1.087	10.401	7.066	0.18	0.00094	0.00039
	2- 3	SAA0331	砂	○	0.20	0.18	0.0056	0.30	0.15	2.352	-1.523	15.602	9.062	0.24	0.00115	0.00047
	2- 3	SAA0431	砂	○	0.20	0.18	0.0056	0.40	0.15	2.716	-1.386	20.802	15.385	0.25	0.00147	0.00054
	2- 3	SAA0531	砂	○	0.20	0.18	0.0056	0.50	0.15	3.037	-1.598	26.003	18.798	0.35	0.00155	0.00057
底版幅0.20m 重錘5.6kg 衝突位置0.25m 砂(締固め)	2- 3	SAA0151	砂	○	0.20	0.18	0.0056	0.10	0.25	1.358	-0.802	5.201	3.387	0.22	0.00048	0.00014
	2- 3	SAA0251	砂	○	0.20	0.18	0.0056	0.20	0.25	1.921	-1.170	10.401	6.538	0.33	0.00068	0.00014
	2- 3	SAA0351	砂	○	0.20	0.18	0.0056	0.30	0.25	2.352	-1.458	15.602	9.608	0.41	0.00084	0.00017
	2- 3	SAA0451	砂	○	0.20	0.18	0.0056	0.40	0.25	2.716	-2.168	20.802	7.548	0.50	0.00100	0.00018
	2- 3	SAA0551	砂	○	0.20	0.18	0.0056	0.50	0.25	3.037	-1.220	26.003	21.803	0.61	0.00118	0.00018
	2- 3	SAA1051	砂	○	0.20	0.18	0.0056	1.00	0.25	4.294	-2.554	52.005	33.616	1.07	0.00191	0.00030
底版幅0.20m 重錘5.6kg 衝突位置0.35m 砂(締固め)	2- 3	SAA0171	砂	○	0.20	0.18	0.0056	0.10	0.35	1.358	-0.772	5.201	3.520	0.25	0.00054	0.00006
	2- 3	SAA0271	砂	○	0.20	0.18	0.0056	0.20	0.35	1.921	-1.158	10.401	6.616	0.44	0.00071	0.00003
	2- 3	SAA0371	砂	○	0.20	0.18	0.0056	0.30	0.35	2.352	-1.301	15.602	10.829	0.66	0.00091	0.00004
	2- 3	SAA0471	砂	○	0.20	0.18	0.0056	0.40	0.35	2.716	-1.426	20.802	15.068	0.77	0.00110	0.00003
	2- 3	SAA0571	砂	○	0.20	0.18	0.0056	0.50	0.35	3.037	-1.641	26.003	18.405	0.97	0.00130	0.00005
	2- 3	SAA1071	砂	○	0.20	0.18	0.0056	1.00	0.35	4.294	-1.629	52.005	44.526	1.59	0.00205	0.00029
底版幅0.35m 重錘5.6kg 衝突位置0.45m コンクリート	2- 5	CBA0191	コンクリート	―	0.35	0.28	0.0056	0.10	0.45	1.358	-0.769	5.201	3.533	0.20	0.00035	0.00001
	2- 5	CBA0291	コンクリート	―	0.35	0.28	0.0056	0.20	0.45	1.921	-1.033	10.401	7.389	0.36	0.00055	-0.00001
	2- 5	CBA0391	コンクリート	―	0.35	0.28	0.0056	0.30	0.45	2.352	-2.555	15.602	-2.806	0.64	0.00089	0.00002
	2- 5	CBA0491	コンクリート	―	0.35	0.28	0.0056	0.40	0.45	2.716	-2.751	20.802	-0.540	0.82	0.00090	-0.00008
	2- 5	CBA0591	コンクリート	―	0.35	0.28	0.0056	0.50	0.45	3.037	-1.863	26.003	16.211	0.88	0.00141	0.00002
	2- 5	CBA1091	コンクリート	―	0.35	0.28	0.0056	1.00	0.45	4.294	0.492	52.005	51.322	1.32	0.00203	0.00052
	2- 5	CBA1591	コンクリート	―	0.35	0.28	0.0056	1.50	0.45	5.260	-4.624	78.008	17.700	1.78	0.00284	0.00055
	2- 5	CBA1592	コンクリート	―	0.35	0.28	0.0056	1.50	0.45	5.260	0.119	78.008	77.969	1.90	0.00287	0.00068
	2- 5	CBA2091	コンクリート	―	0.35	0.28	0.0056	2.00	0.45	6.073	-0.069	104.011	103.997	2.09	0.00474	0.00289
底版幅0.20m 重錘5.6kg 衝突位置0.45m 砂(締固めなし)	2- 6	TAA0191	砂	×	0.20	0.18	0.0056	0.10	0.45	1.358	-0.738	5.201	3.665	0.87	0.00097	0.00021
	2- 6	TAA0592	砂	×	0.20	0.18	0.0056	0.50	0.45	3.037	-1.717	26.003	17.685	2.47	0.01084	0.00862
	2- 6	TAA1092	砂	×	0.20	0.18	0.0056	1.00	0.45	4.294	-1.993	52.005	40.808	3.38	0.01349	0.01059



(a)底版幅0.20m

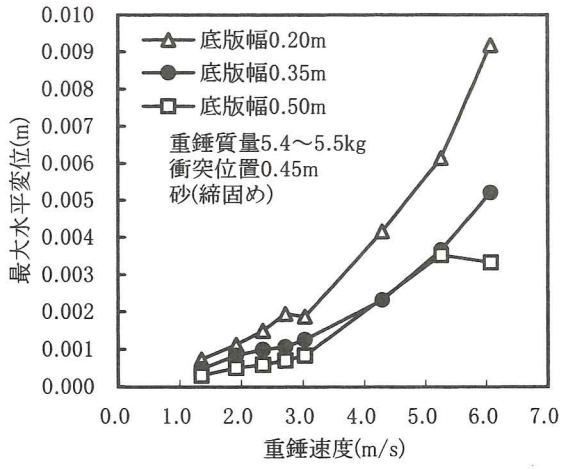


(b)底版幅0.35m

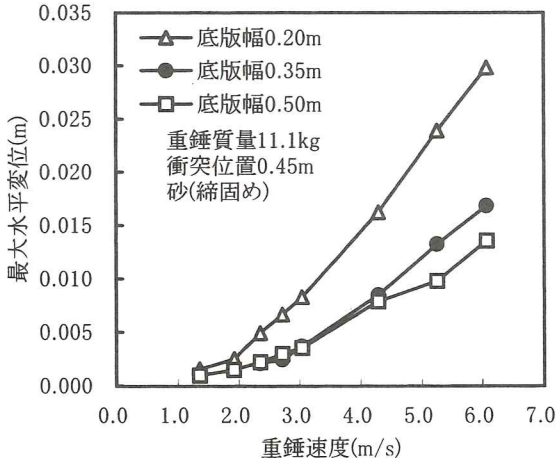


(c)底版幅0.50m

(1) 重錘質量の影響



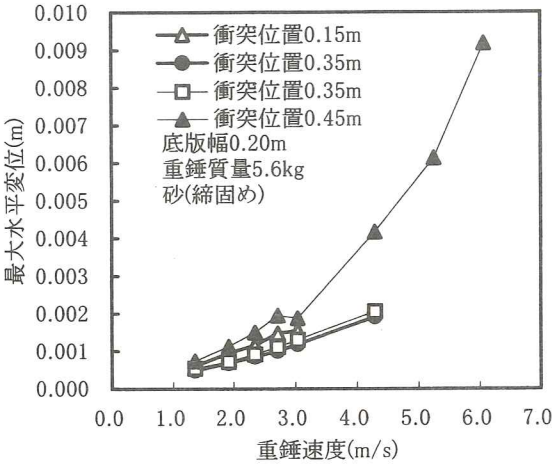
(a)重錘質量5.4～5.5kg



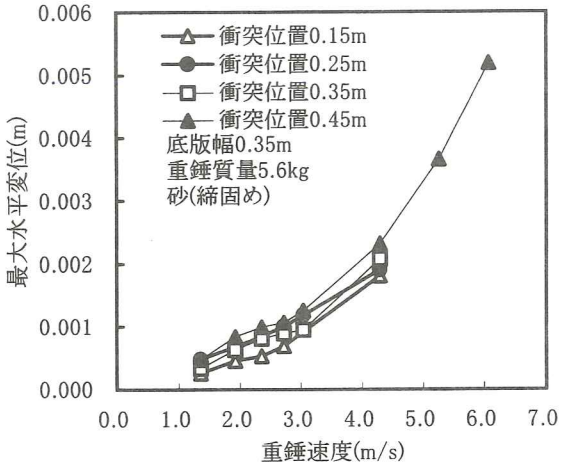
(b)重錘質量11.3kg

(2) 擁壁底版幅の影響

図3.11(a)　落石の衝突速度と擁壁底部の最大水平変位の関係

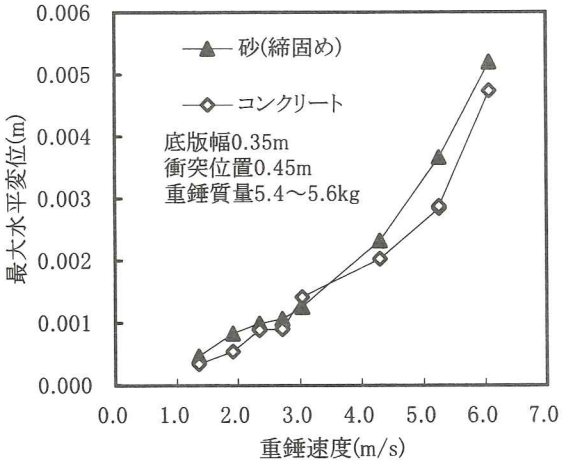


(a)底版幅0.20m

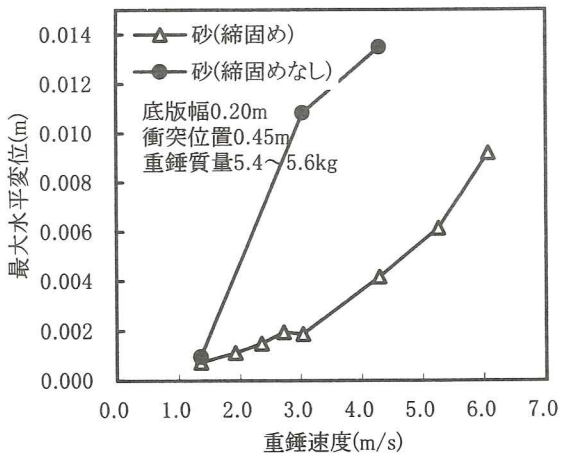


(b)底版幅0.35m

(3) 重錘衝突高さの影響



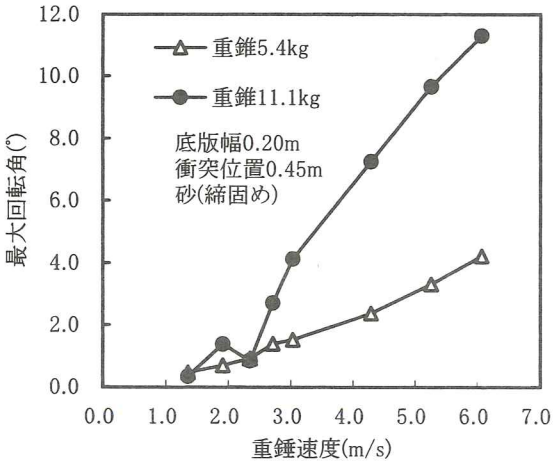
(a)砂とコンクリートの比較



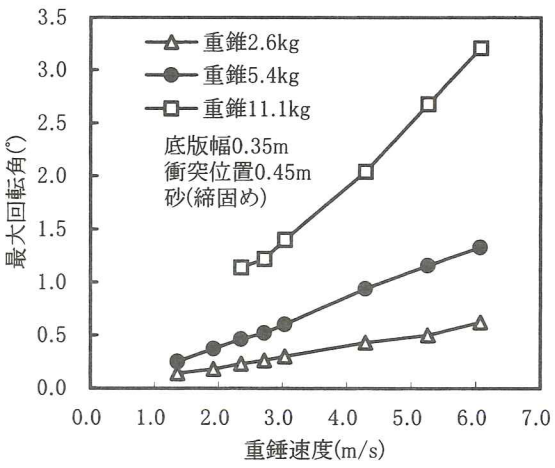
(b)締固め有無の比較

(4) 基礎地盤の影響

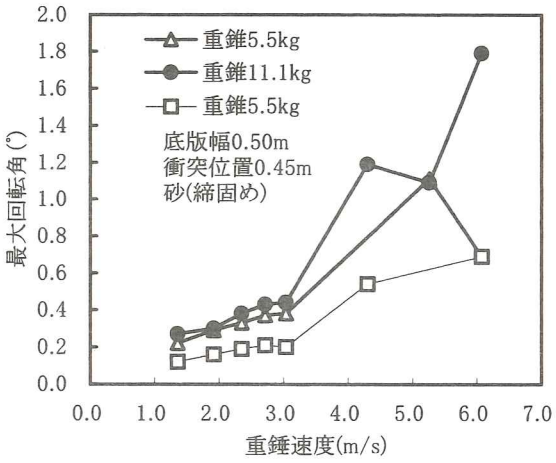
図3.11(b)　落石の衝突速度と擁壁底部の最大水平変位の関係



(a)底版幅0.20m

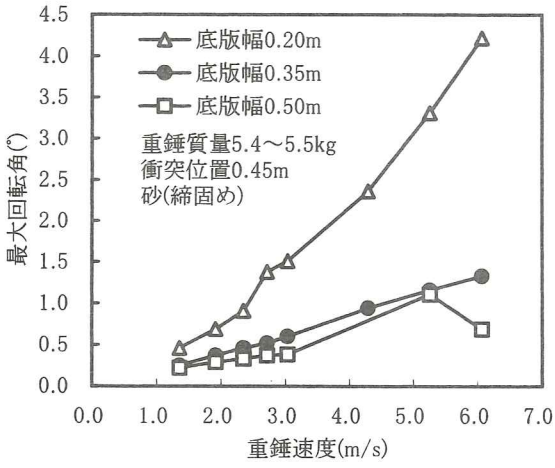


(b)底版幅0.35m

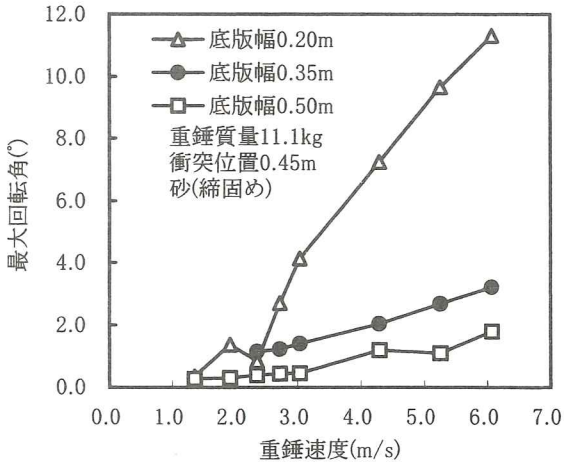


(c)底版幅0.50m

(1) 重錘質量の影響



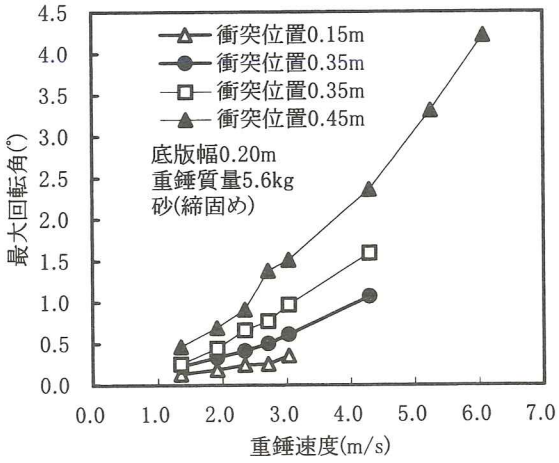
(a)重錘質量5.4～5.5kg



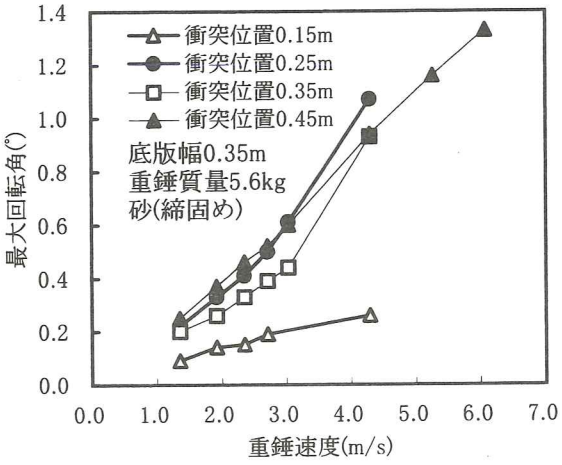
(b)重錘質量11.3kg

(2) 擁壁底版幅の影響

図3.12(a)　落石の衝突速度と擁壁の最大回転角度との関係

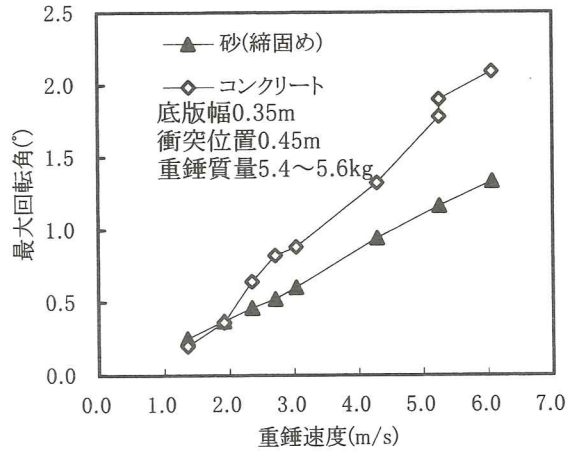


(a)底版幅0.20m

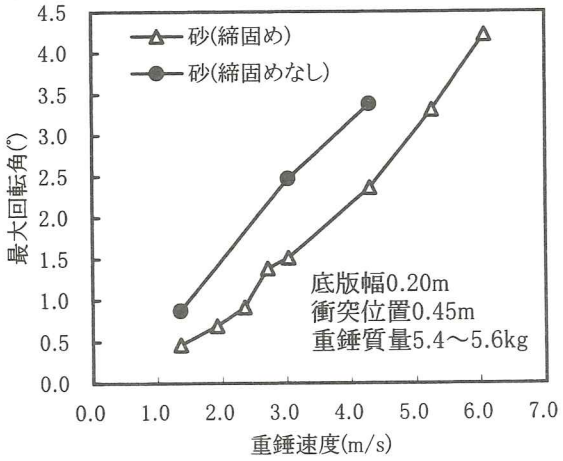


(b)底版幅0.35m

(3) 重錘衝突高さの影響



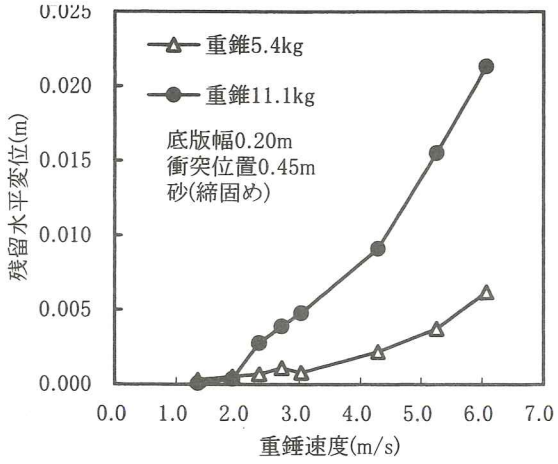
(a)砂とコンクリートの比較



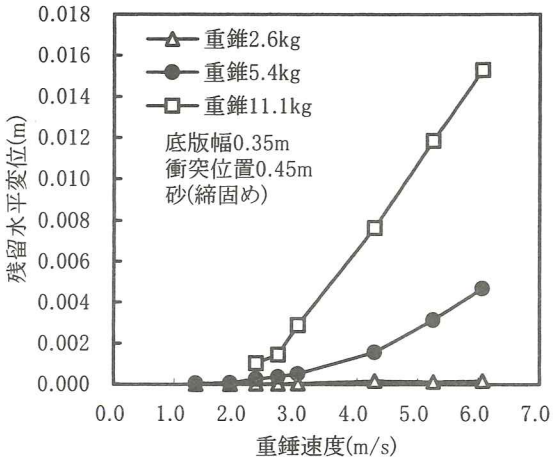
(b)締固め有無の比較

(4) 基礎地盤の影響

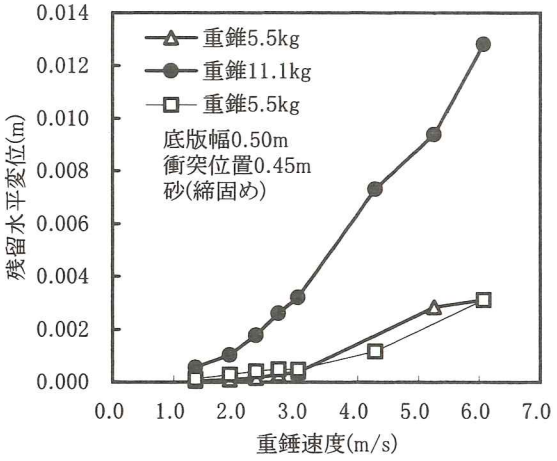
図3.12(b)　落石の衝突速度と擁壁の最大回転角度との関係



(a)底版幅0.20m

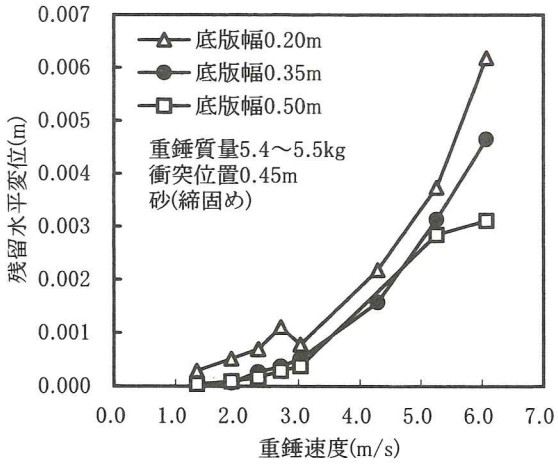


(b)底版幅0.35m

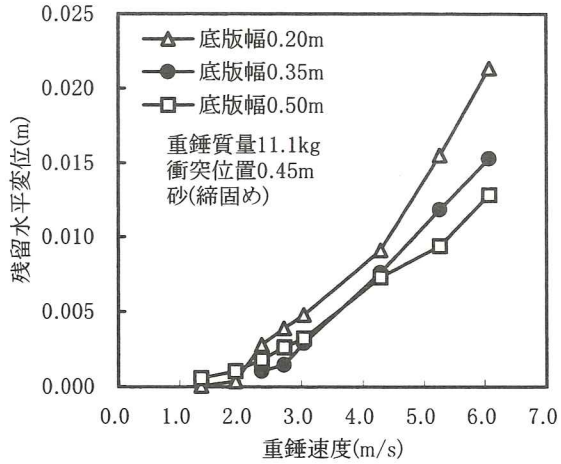


(c)底版幅0.50m

(1) 重錘質量の影響



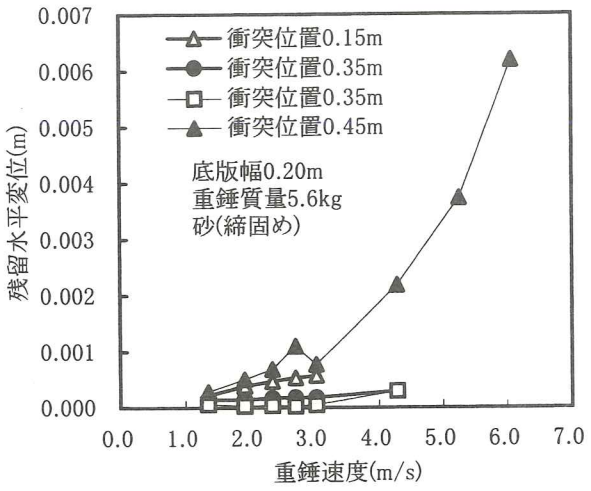
(a)重錘質量5.4～5.5kg



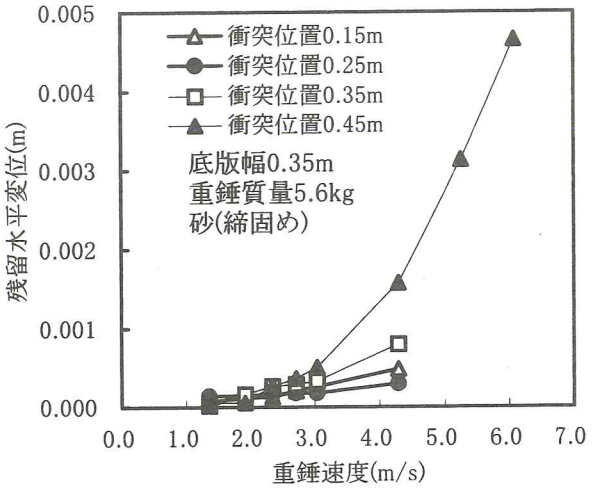
(b)重錘質量11.3kg

(2) 擁壁底版幅の影響

図3.13(a)　落石の衝突速度と擁壁底部の残留水平変位の関係

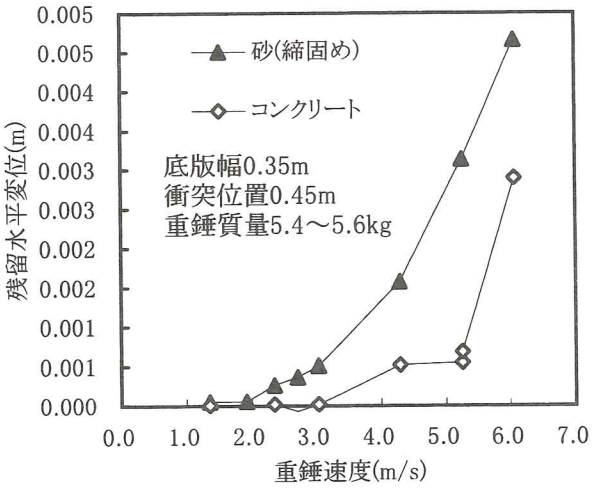


(a)底版幅0.20m

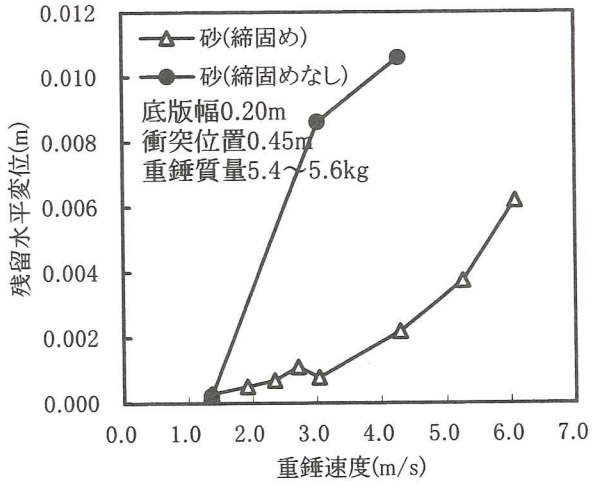


(b)底版幅0.35m

(3) 重錘衝突高さの影響



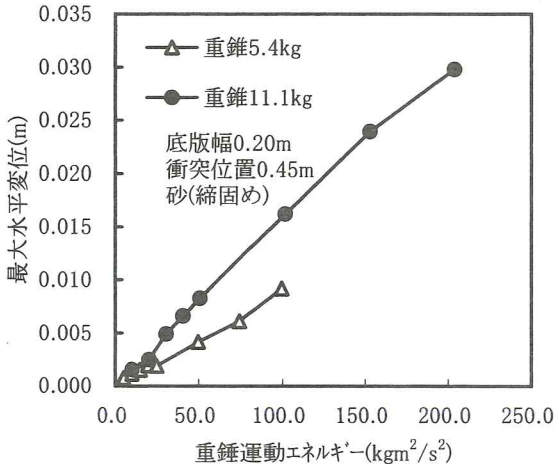
(a)砂とコンクリートの比較



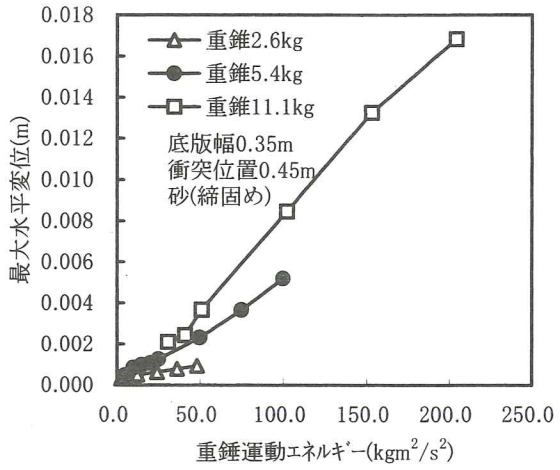
(b)締固め有無の比較

(4) 基礎地盤の影響

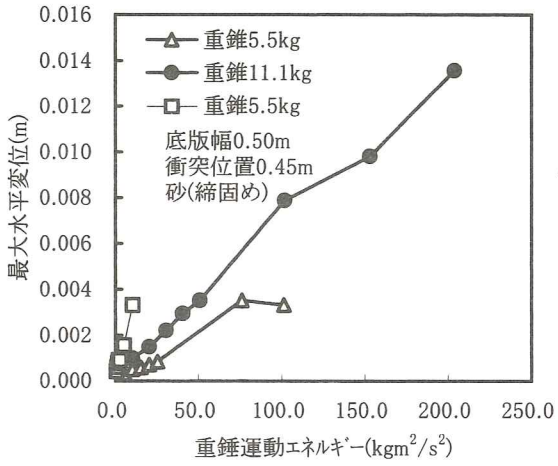
図3.13(b) 落石の衝突速度と擁壁底部の残留水平変位の関係



(a)底版幅0.20m

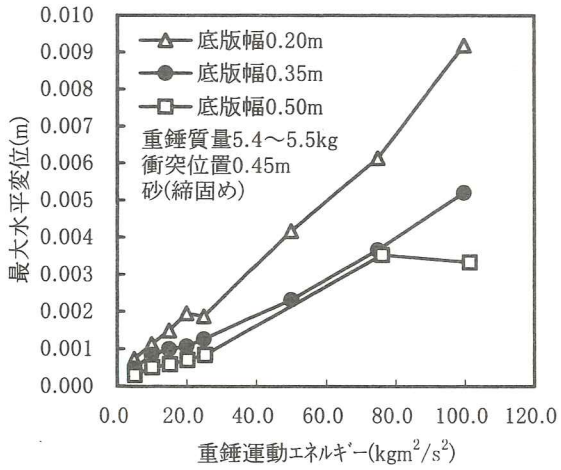


(b)底版幅0.35m

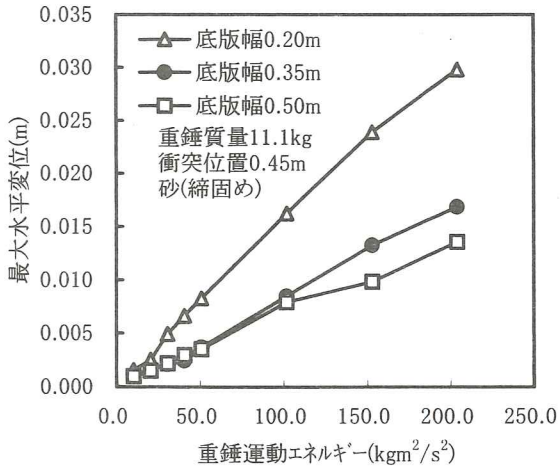


(c)底版幅0.50m

(1) 重錘質量の影響



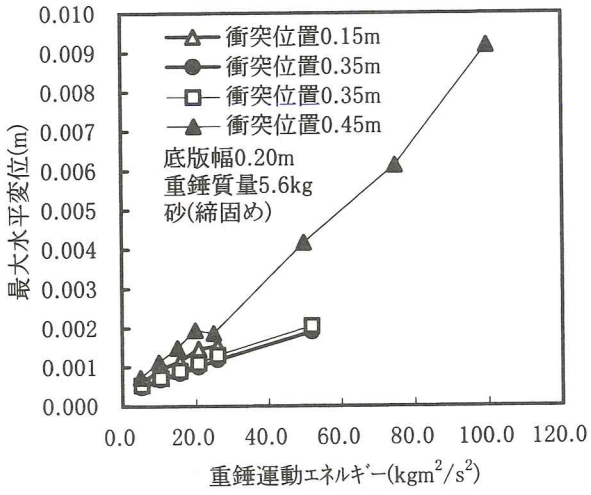
(a)重錘質量5.4～5.5kg



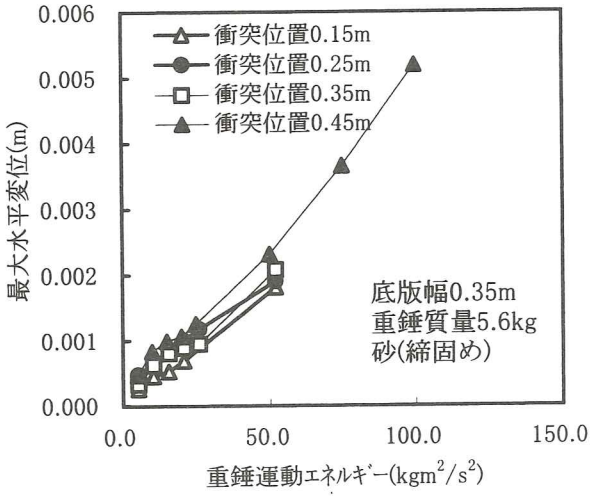
(b)重錘質量11.3kg

(2) 擁壁底版幅の影響

図3.14(a) 衝突直前の重錘運動エネルギーと擁壁の最大水平変位の関係

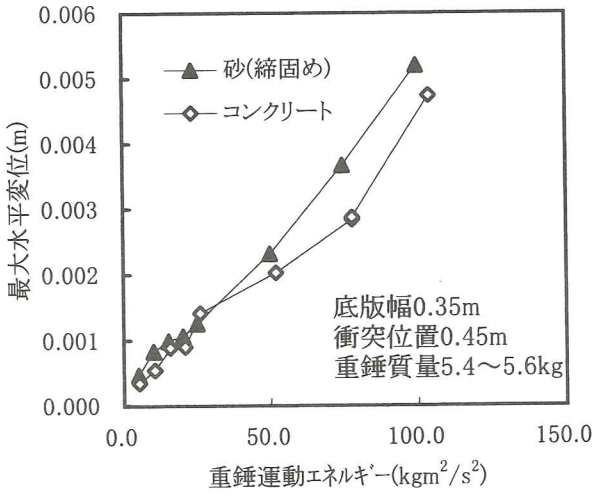


(a)底版幅0.20m

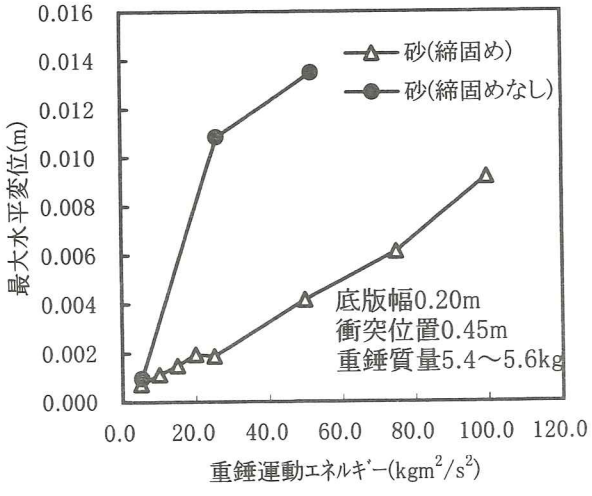


(b)底版幅0.35m

(3) 重錘衝突高さの影響



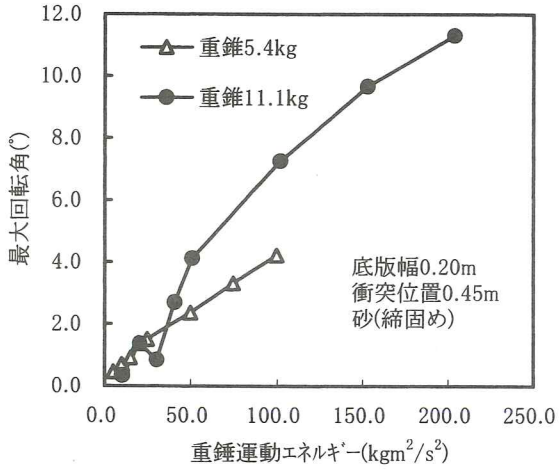
(a)砂とコンクリートの比較



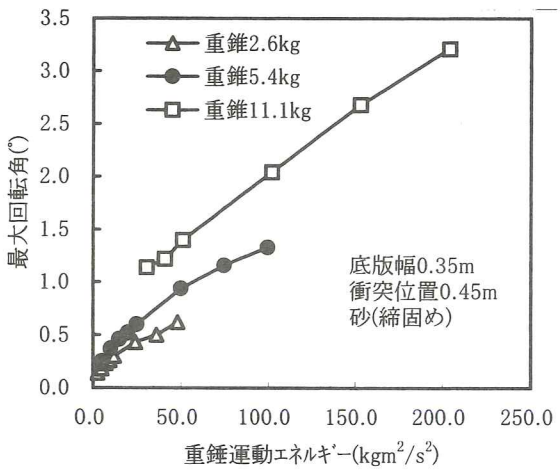
(b)締固め有無の比較

(4) 基礎地盤の影響

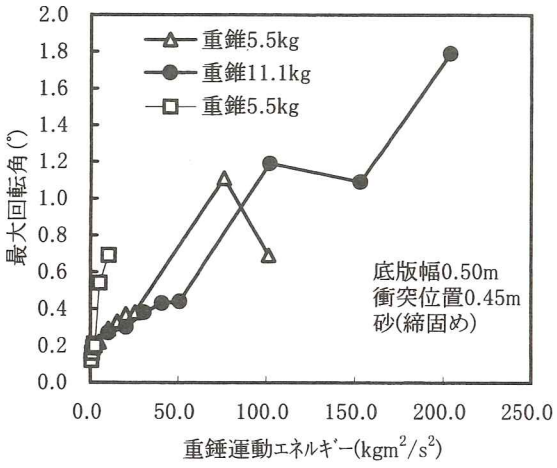
図3.14(b) 衝突直前の重錘運動エネルギーと擁壁の最大水平変位の関係



(a)底版幅0.20m

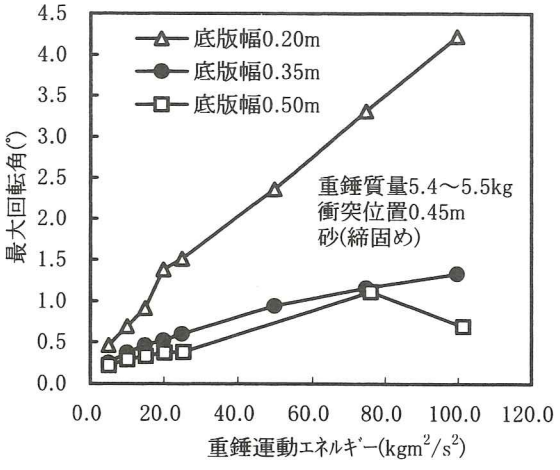


(b)底版幅0.35m

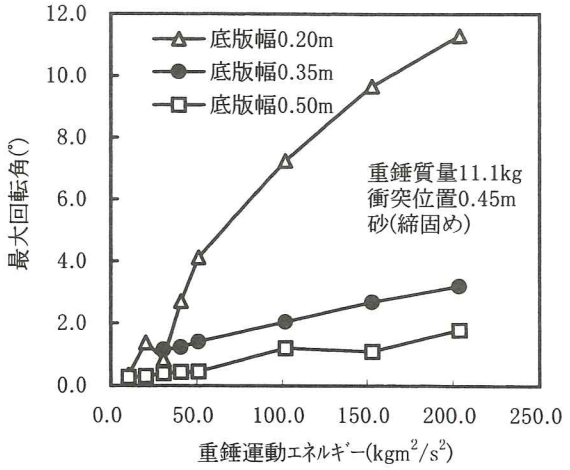


(c)底版幅0.50m

(1) 重錘質量の影響



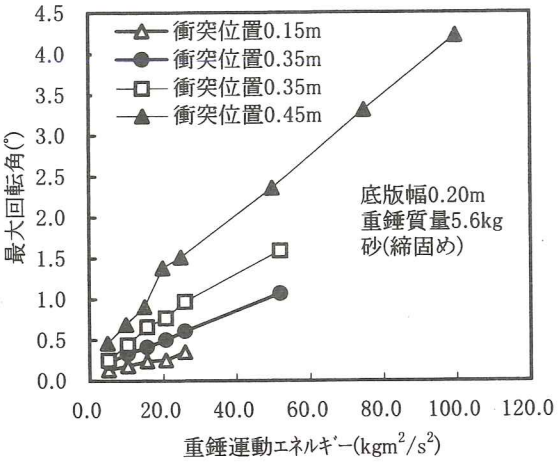
(a)重錘質量5.4～5.5kg



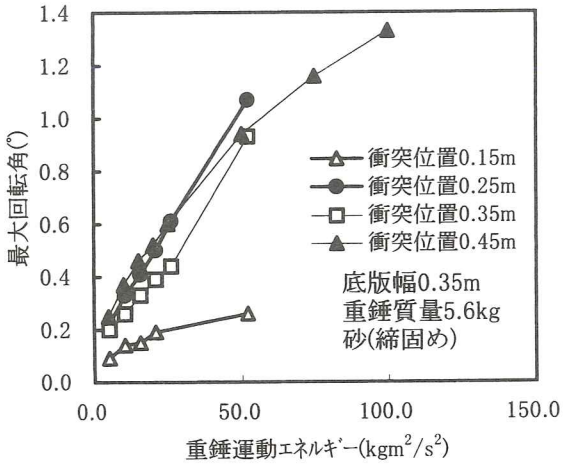
(b)重錘質量11.3kg

(2) 擁壁底版幅の影響

図3.15(a)　衝突直前の重錘運動エネルギーと擁壁の最大回転角の関係

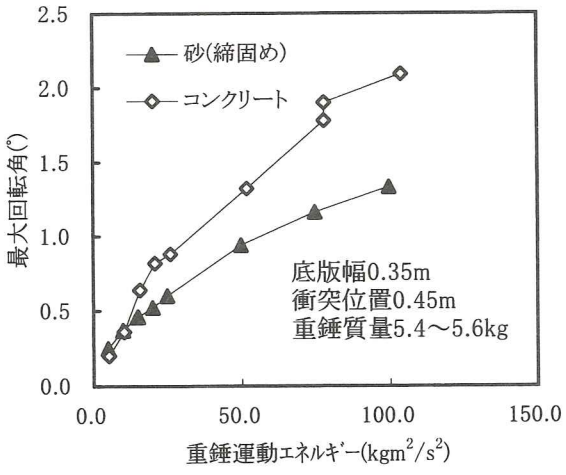


(a)底版幅0.20m

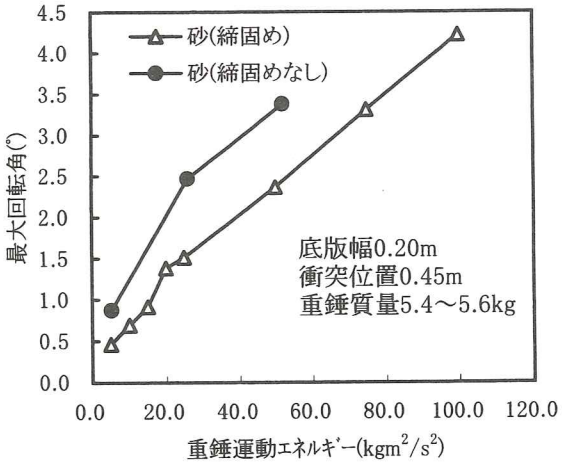


(b)底版幅0.35m

(3) 重錘衝突高さの影響



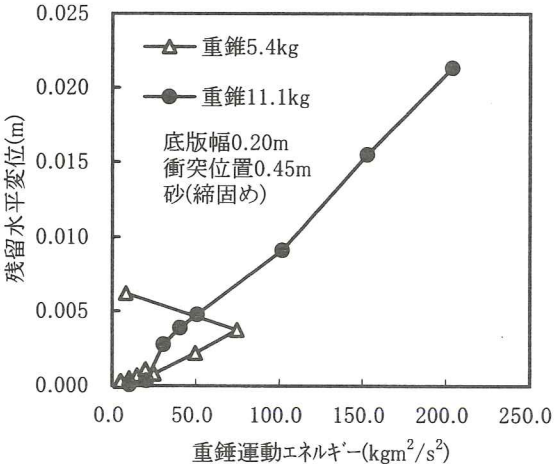
(a)砂とコンクリートの比較



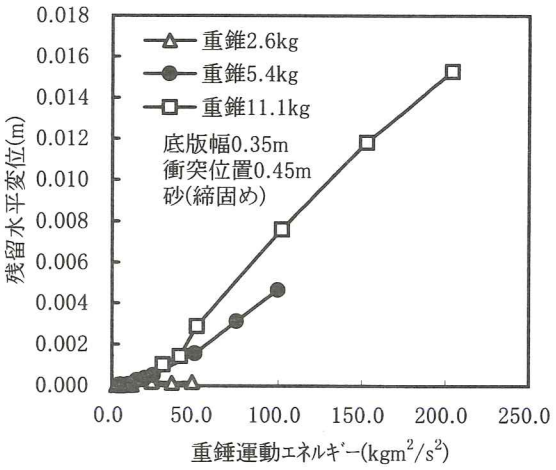
(b)締固め有無の比較

(4) 基礎地盤の影響

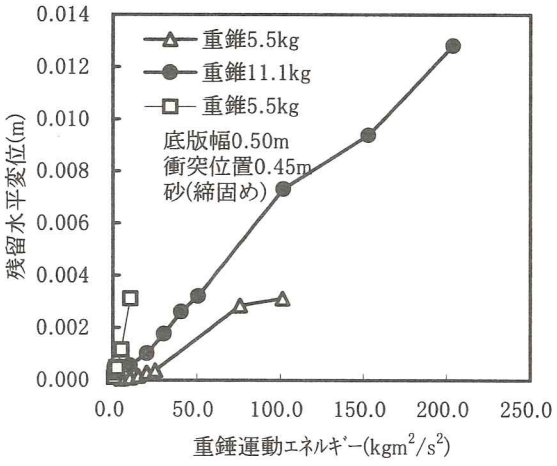
図3.15(b) 衝突直前の重錘運動エネルギーと擁壁の最大回転角の関係



(a)底版幅0.20m

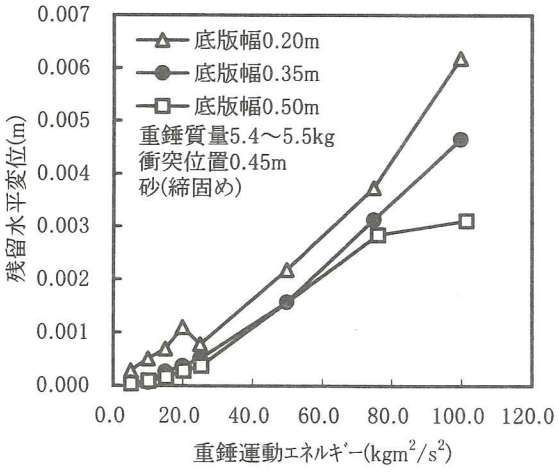


(b)底版幅0.35m

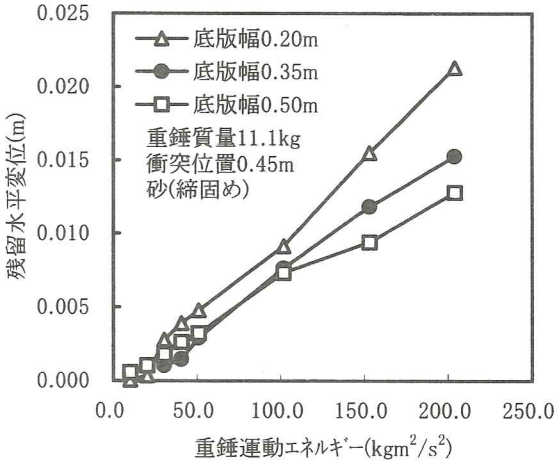


(c)底版幅0.50m

(1) 重錘質量の影響



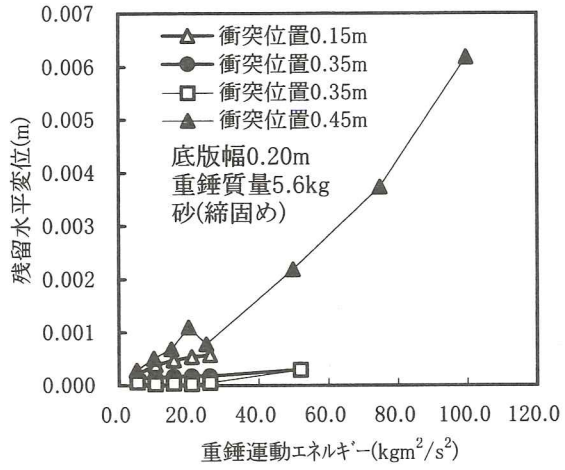
(a)重錘質量5.4～5.5kg



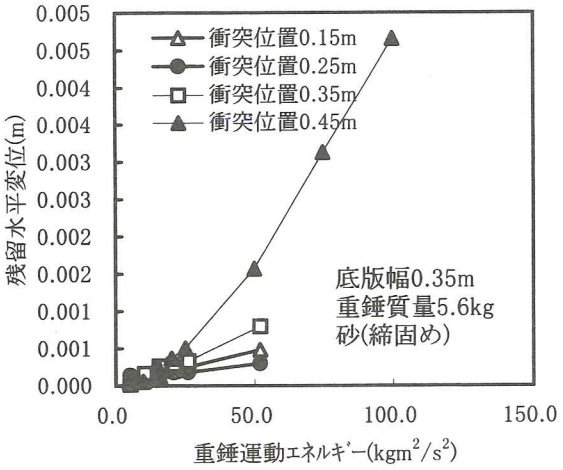
(b)重錘質量11.3kg

(2) 擁壁底版幅の影響

図3.16(a) 衝突直前の重錘運動エネルギーと擁壁の残留水平変位の関係

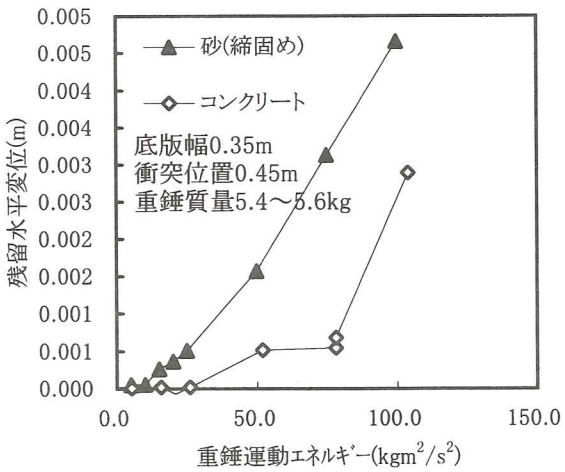


(a)底版幅0.20m

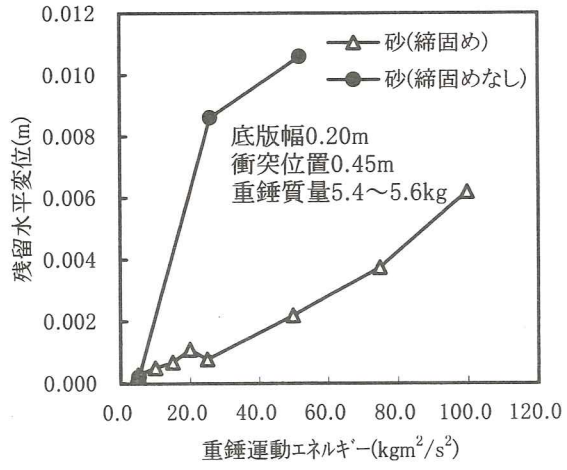


(b)底版幅0.35m

(3) 重錘衝突高さの影響



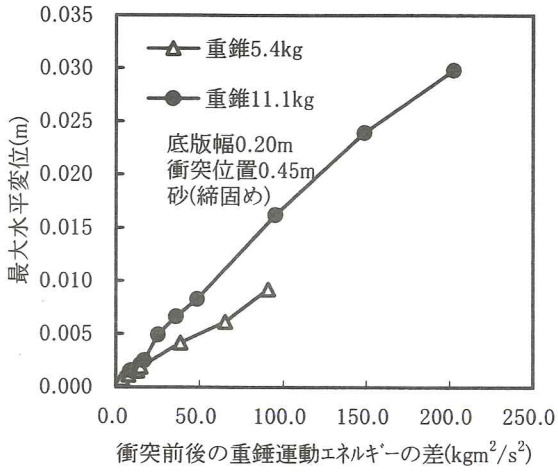
(a)砂とコンクリートの比較



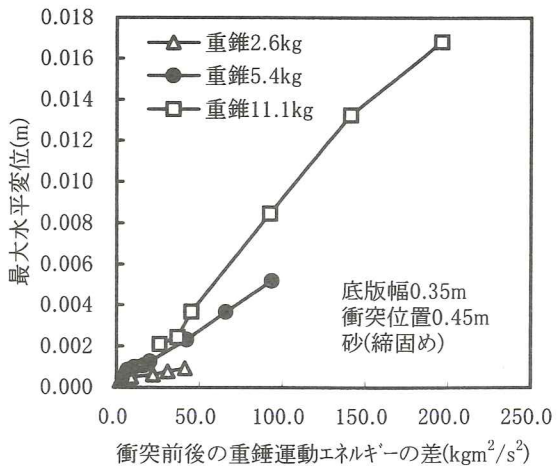
(b)締固め有無の比較

(4) 基礎地盤の影響

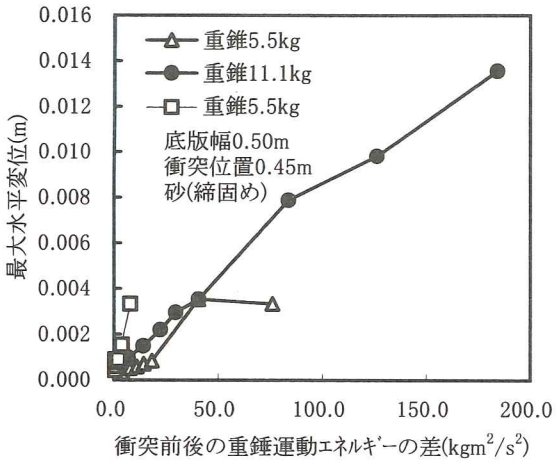
図3.16(b) 衝突直前の重錘運動エネルギーと擁壁の残留水平変位の関係



(a)底版幅0.20m

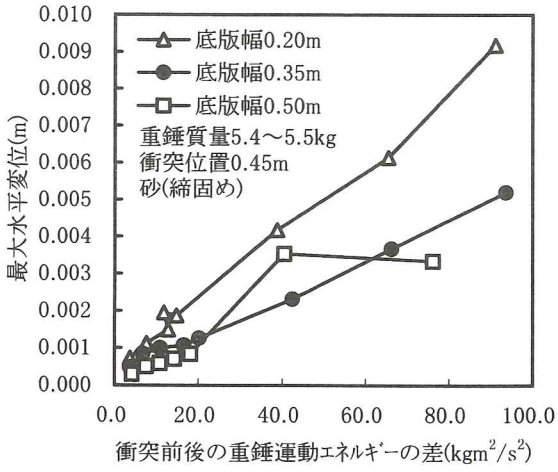


(b)底版幅0.35m

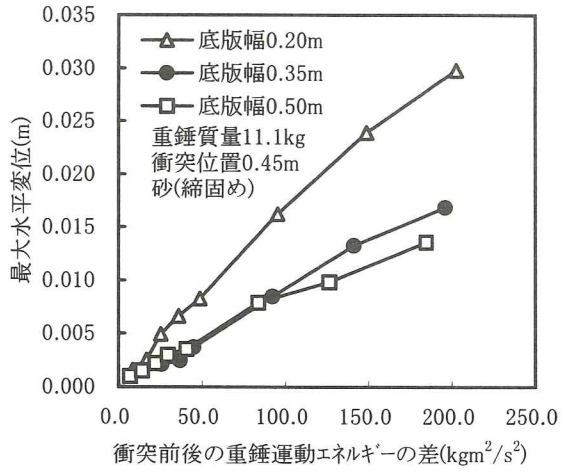


(c)底版幅0.50m

(1) 重錘質量の影響



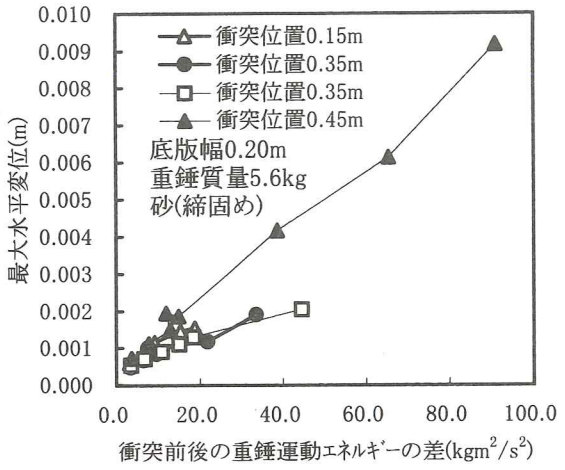
(a)重錘質量5.4～5.5kg



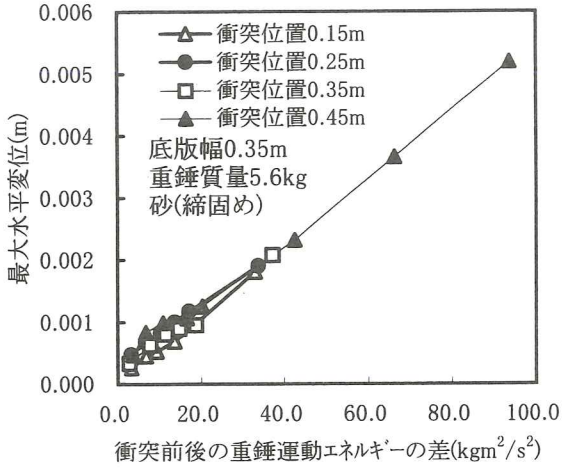
(b)重錘質量11.3kg

(2) 擁壁底版幅の影響

図3.17(a) 衝突前後の直前の重錘運動エネルギーの差と擁壁の最大水平変位の関係

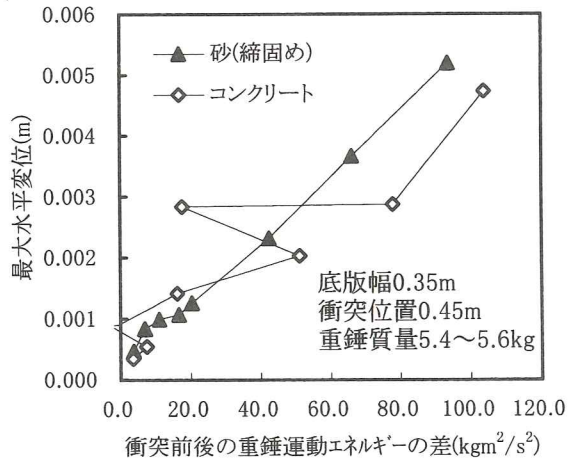


(a)底版幅0.20m

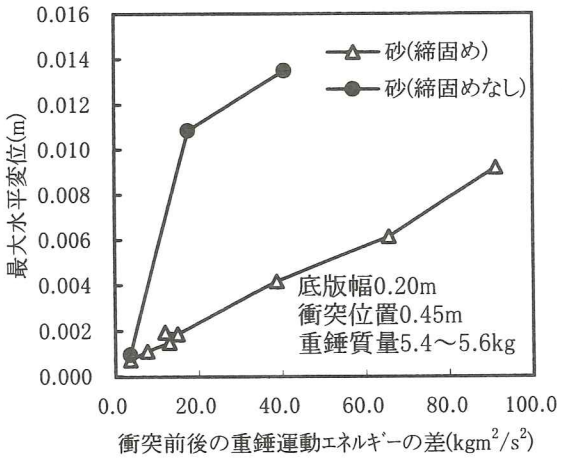


(b)底版幅0.35m

(3) 重錘衝突高さの影響



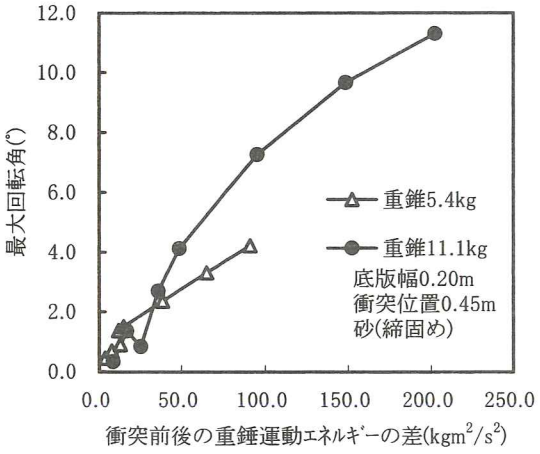
(a)砂とコンクリートの比較



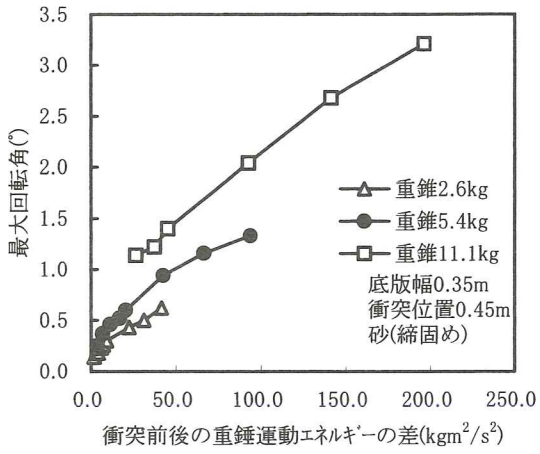
(b)締固め有無の比較

(4) 基礎地盤の影響

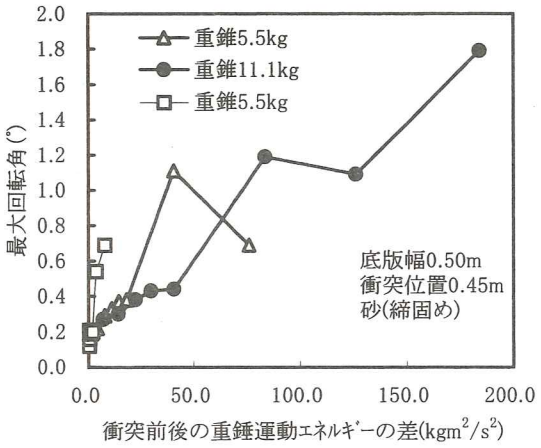
図3.17(b) 衝突前後の直前の重錘運動エネルギーの差と擁壁の最大水平変位の関係



(a)底版幅0.20m

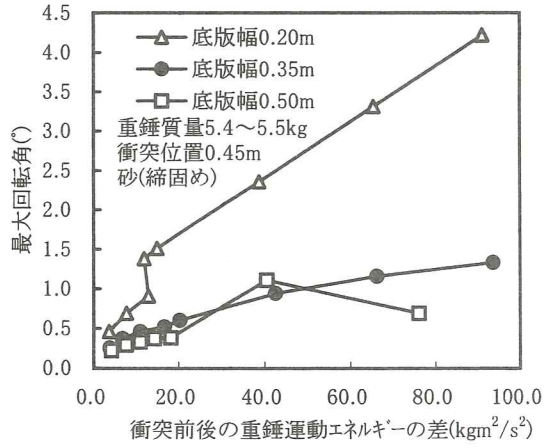


(b)底版幅0.35m

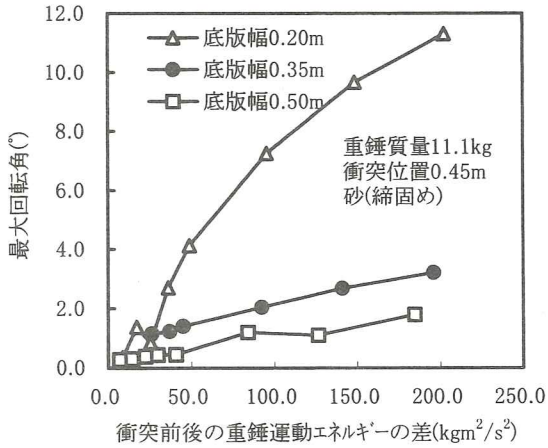


(c)底版幅0.50m

(1) 重錘質量の影響



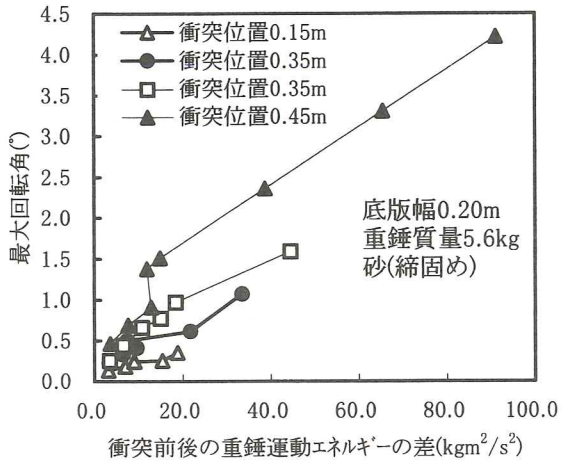
(a)重錘質量5.4～5.5kg



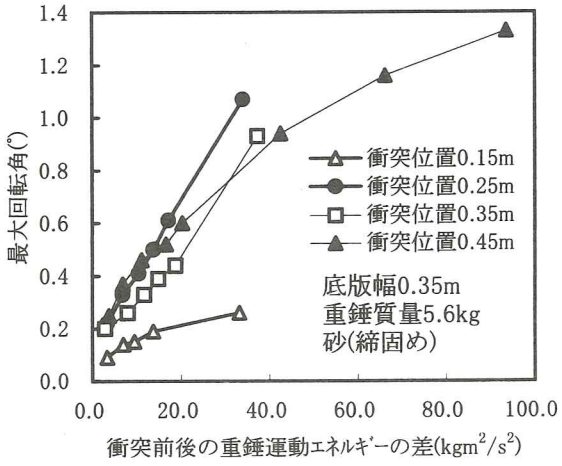
(b)重錘質量11.3kg

(2) 擁壁底版幅の影響

図3.18(a)　衝突前後の直前の重錘運動エネルギーの差と擁壁の最大回転角の関係

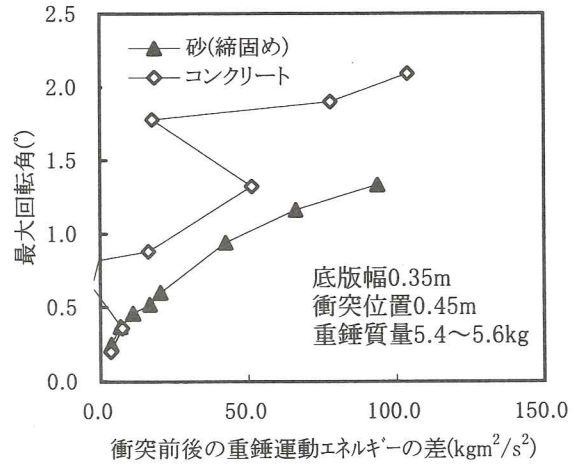


(a)底版幅0.20m

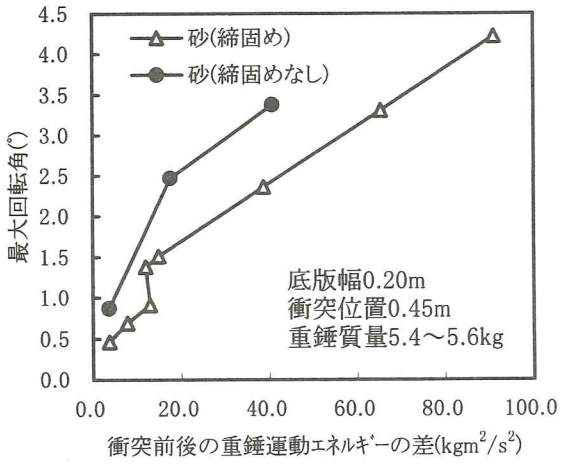


(b)底版幅0.35m

(3) 重錘衝突高さの影響



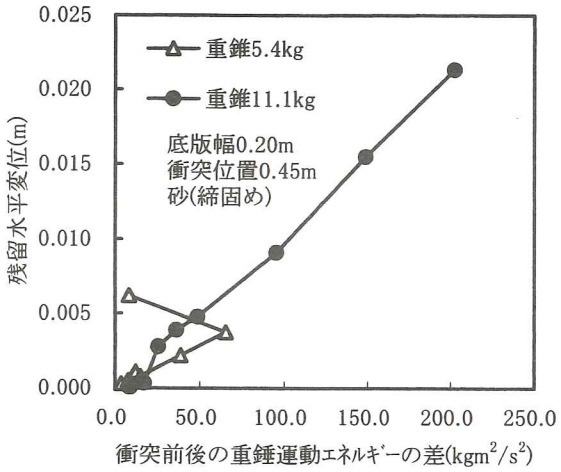
(a)砂とコンクリートの比較



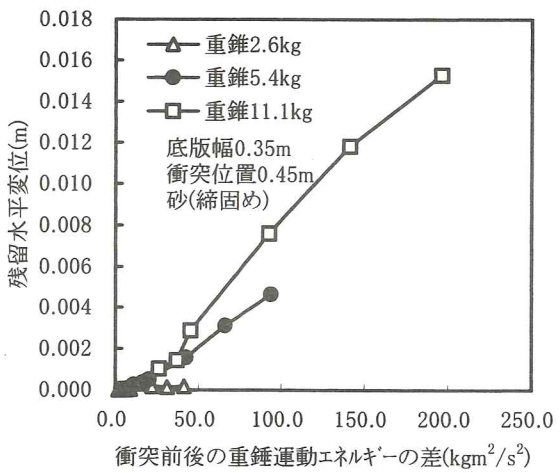
(b)締固め有無の比較

(4) 基礎地盤の影響

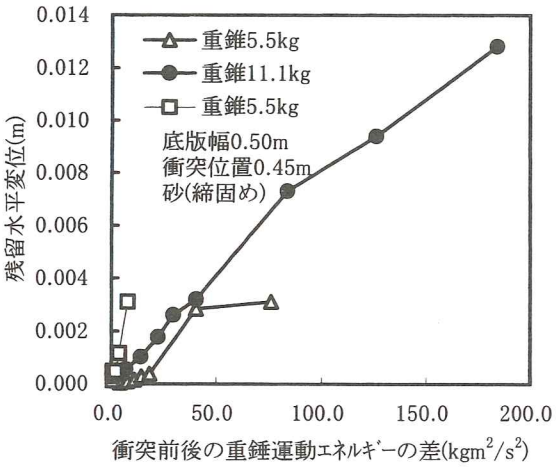
図3.18(b) 衝突前後の直前の重錘運動エネルギーの差と擁壁の最大回転角の関係



(a)底版幅0.20m

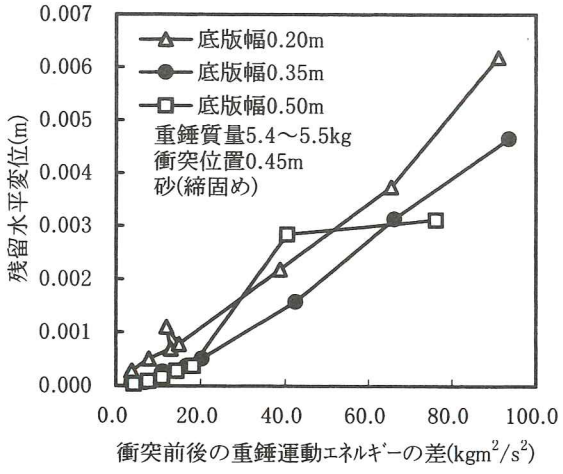


(b)底版幅0.35m

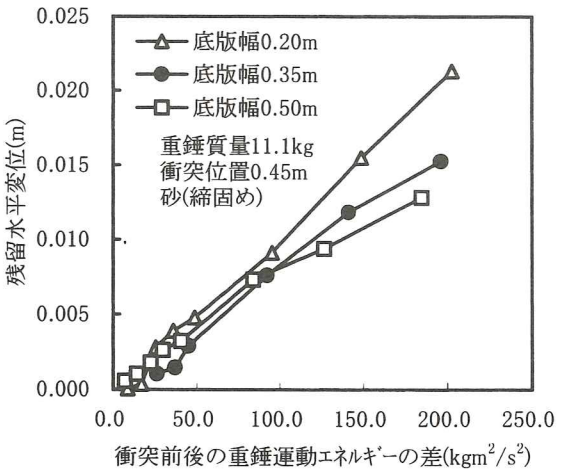


(c)底版幅0.50m

(1) 重錘質量の影響



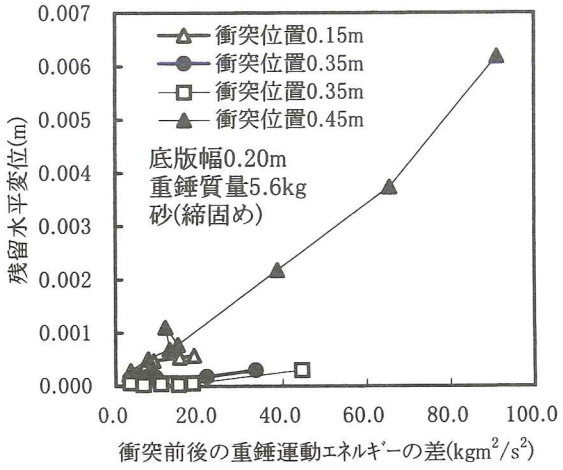
(a)重錘質量5.4～5.5kg



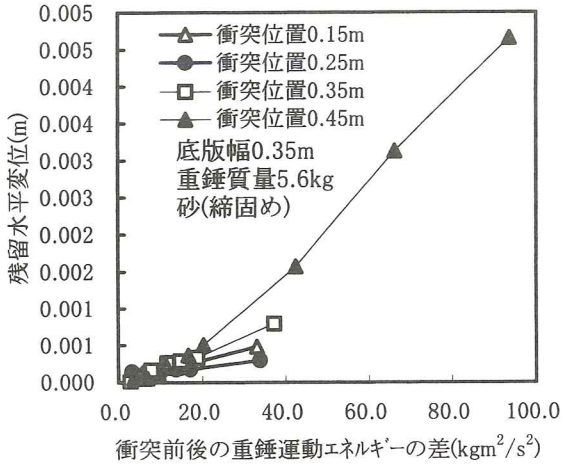
(b)重錘質量11.3kg

(2) 擁壁底版幅の影響

図3.19(a) 衝突前後の直前の重錘運動エネルギーの差と擁壁の残留水平変位の関係

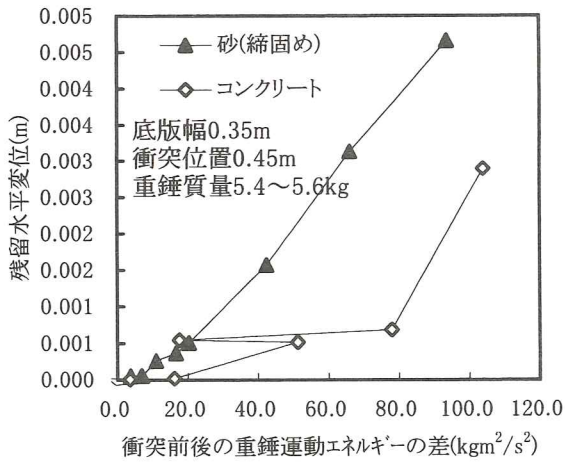


(a)底版幅0.20m

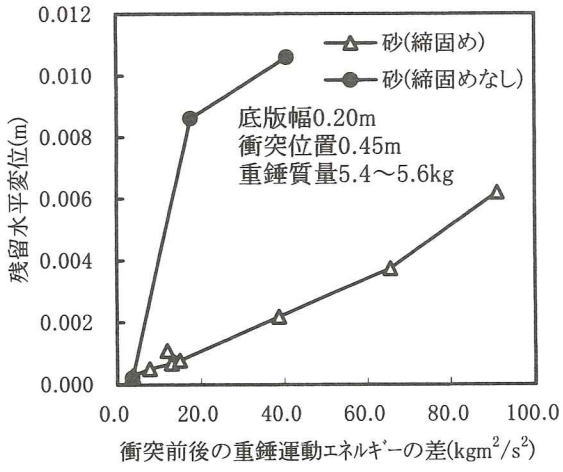


(b)底版幅0.35m

(3) 重錘衝突高さの影響



(a)砂とコンクリートの比較



(b)締固め有無の比較

(4) 基礎地盤の影響

図3.19(b) 衝突前後の直前の重錘運動エネルギーの差と擁壁の残留水平変位の関係

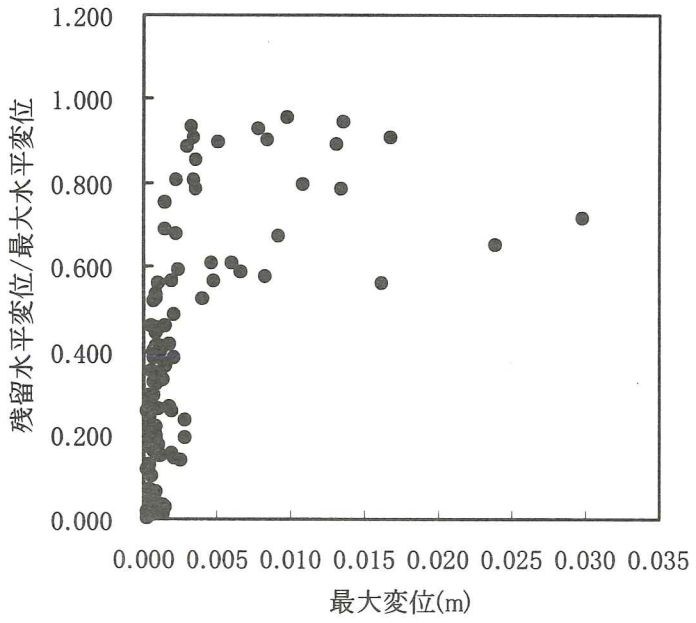


図 3.20　擁壁の最大水平変位と残留変位の比と最大水平変位の関係

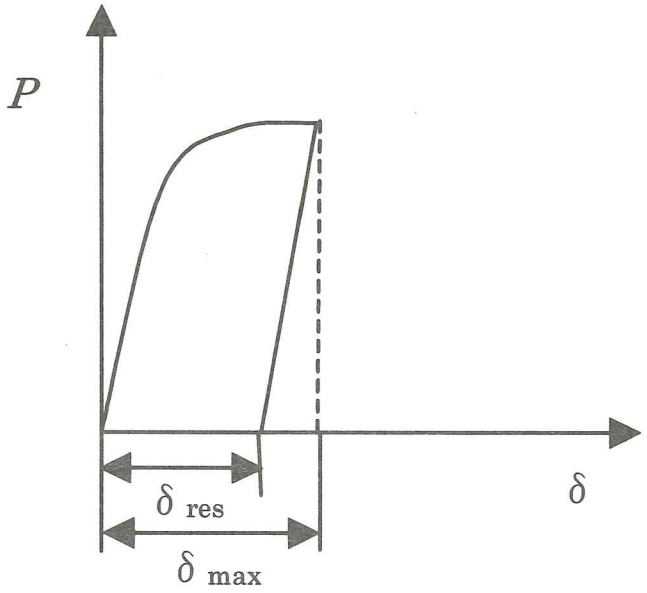


図 3.21　最大変位と残留変位

全般的に最大水平変位、回転変位、残留水平変位とも重錘の衝突速度の２乗に概ね比例しているように見える。これは、擁壁の変位が重錘の運動エネルギー（$\propto v^2$）に比例することを意味する。

そこで、重錘の運動エネルギーと変位量との関係を調べた。**図3.14～図3.16**に衝突直前の重錘運動エネルギーと擁壁の最大水平変位、回転角、残留水平変位の関係を示す。また、**図3.17～図3.19**に衝突直前と直後の重錘運動エネルギーの差と擁壁の最大水平変位、回転角、残留水平変位を示す。いずれの図も、(1)重錘質量の影響、(2)擁壁底版幅の影響、(3)重錘衝突高さの影響、および(4)基礎地盤の影響について比較している。これらより、擁壁の変位が小さい部分においては、重錘運動エネルギーおよび衝突前後の重錘運動エネルギーの差と最大水平変位、最大回転角の間に、直線的な関係は見られない。しかし、変位が大きくなると、重錘運動エネルギーおよび衝突前後の重錘運動エネルギーの差と最大水平変位、最大回転角は、ほぼ直線的な関係にあるといえる。残留変位については、変位量の小さい部分も含めて、重錘運動エネルギーおよび衝突前後の重錘運動エネルギーの差とほぼ比例関係にあるといえる。

したがって、擁壁の変位は地盤の弾性バネの変形として生じたものではなく、滑動等による地盤の塑性変形の結果生じたものであることが推測される。

図3.20に擁壁の最大水平変位と残留変位の比と最大水平変位の関係を示す。わずかな水平変位量で残留変位と最大変位の比が１に近づく傾向が見られ、最大変位量が少しでも大きくなると残留変位が残ることがわかる。これは、最大摩擦力を超えると擁壁と砂地盤の間に滑動が生じるため、2～3mm以上の最大変位のほとんどは、滑動の結果生じたものであると推測される（**図3.21**参照）。

3.4　まとめ

擁壁の重錘衝突実験の結果以下のことがわかった。

同じ重錘速度では、擁壁底面の水平変位、回転変位とも、落石質量が大きいほど、底版幅が狭いほど、また砂地盤が軟らかいほど変位量は大きくなっている。衝突高さの違いについては、水平変位量に顕著な違いは見られなかった。回転角についても、水平変位とほぼ同様な関係が見られたが、衝突高さが高いほど回転角が大きくなる傾向が見られた。また、コンクリート基礎と砂基礎の違いでは、コンクリート基礎で擁壁の回転角が大きくなる傾向が見られた。ただし、コンクリート基礎の場合、コンクリート基盤の凹凸により擁壁のつま先部が引っかかり水平変位がおさえられたため、回転変位が大きくなった可能性がある。

最大水平変位量については地盤が固いほど擁壁の変位量は小さくなっている。また、回転量についても、締固めた地盤では締め固められず軟らかいほど、回転角は大きくなっている。これは、旧落石対策便覧の設計法で地盤が固いほど擁壁の安定性が低下するという結果とは矛盾する結果となった。

擁壁の水平および回転角は重錘の運動エネルギーに概ね比例しており、また、擁壁の最大水平変位が少しでも大きくなると残留変位と同程度となることから、擁壁の変形は地盤の塑性変形の結果として生じたものであることが推測された。

4．旧落石対策便覧による安定計算

旧落石対策便覧では落石防護擁壁を弾性地盤に支持された剛体と仮定し、落石衝突時の落石の持つ運動エネルギーが地盤バネの変形エネルギーと等しくなるまで水平変位および回転が生じるものとし、この変位量及び回転角度に地盤反力係数を乗じたものを擁壁底面に作用する力と考えて、安定計算を行うこととしている。設計法の詳細については、2.1を参照されたい。

本章では、実験模型を対象に旧落石対策便覧の設計法による安定計算を行い、その結果と実験結果と比較し、旧落石対策便覧の設計法の問題点を検討した。

4.1　検討方法

重錘衝突実験に用いた擁壁を対象に、旧落石対策便覧の手法にもとづき変位量および滑動、転倒に関する安定計算を行った。

安定計算を行ったケース、および安定計算を行う上での計算条件および計算結果の一覧を**表4.1**に示す。重錘、擁壁模型は実験で用いたものを用い、設計に用いる地盤反力係数、摩擦係数は平板載荷試験および摩擦試験の結果得られた値を採用した。

4.2　検討結果

旧落石対策便覧による計算結果の一覧は**表4.1**に示している。なお、表中の擁壁変位（実験値）の値は、「３．落石防護擁壁の重錘衝突実験」における実験での変位計の値から求めたものである。

4.2.1　擁壁の変位量の検討

実験における擁壁の回転角、ならびに擁壁底面および擁壁頂部の最大水平変位と計算値と比較した。**図4.1**に結果を示す。回転角、擁壁頂部の水平変位および擁壁底面の水平変位とも、変位が大きくなると大きく異なっていることが分かる。また、回転角、擁壁頂部および底面の水平変位のいずれも、実験値が計算値の２次関数に近い分布をしている。これは、実験値が衝突速度の２乗に比例するのに対し、計算では落石の運動エネルギー（$\propto v^2$）=地盤バネの変形エネルギー($\propto \theta$ 又はx^2)として変位を求めるため、変位量は速度の１乗に比例する事によると考えられる。つまり、計算では、重錘の運動エネルギーが擁壁の弾性バネのひずみエネルギーに置き換わることによる。このことは、実験結果の変形量が重錘の運動エネルギーにほぼ比例していたことと対応する。したがって、実現象では、変位が大きくなると重錘の運動エネルギーは地盤のバネによる弾性エネルギーとして蓄えられるのではなく、塑性変形エネルギーとして消費されることが推測される。

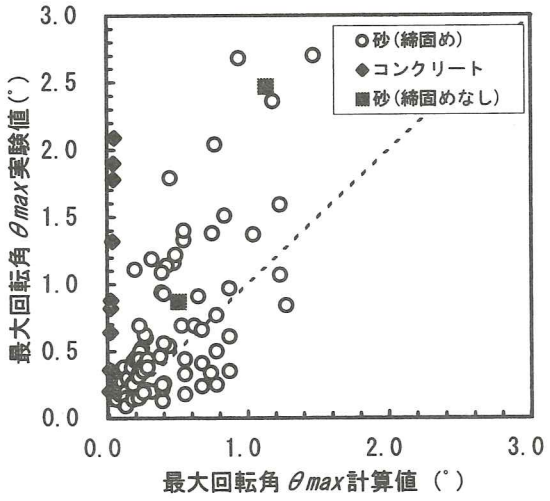
4.2.2　擁壁の安定性に関する検討

次に、旧落石対策便覧に基づき算定した滑動、転倒および支持力に関する安全率と、実験における擁壁の変位量の関係を検討した。なお、旧落石対策便覧では落石衝突時の転倒に対する安定性は、合力作用点の偏心量eが擁壁幅Bの1/3になるように規定しているが、ここでは便宜上安全率を擁壁つま先回りの抵抗モーメ

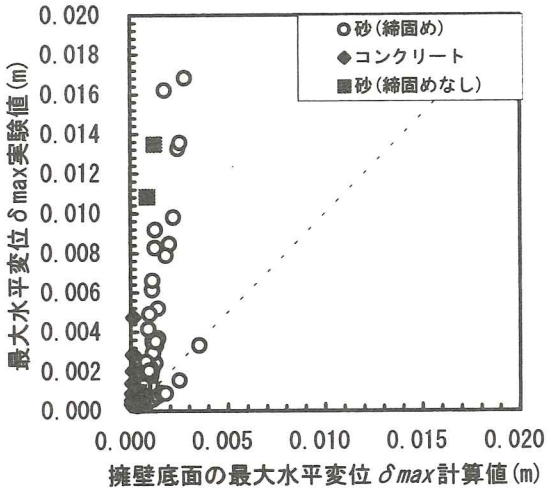
ントと転倒モーメントの比として算出した。

図4.2に転倒安全率と最大回転角の実験値との関係を示す。図より、砂地盤のケースでは、転倒安全率が１以下になると回転角度が増大する傾向が見られる。これは、安全率が１に近づくと、弾性変形ではなく滑動による変位が大きくなるためであると考えられる。しかし、基礎地盤の種類により同じ安全率でも最大回転角の大きさは異なり、基礎地盤が固くなるほど最大回転角は小さくなっている。特に、コンクリート基盤の場合、回転角がほとんど生じていないケースも含め、全てのケースで安全率は大きく１を下回っている。このことは、旧落石対策便覧の設計法の評価では固くて良い地盤ほど擁壁が不安定となるという問題点が現れた結果である。また、安全率が１以下となるときの回転角度は最大で２°程度であり、この程度の回転角では擁壁は転倒には至らない。

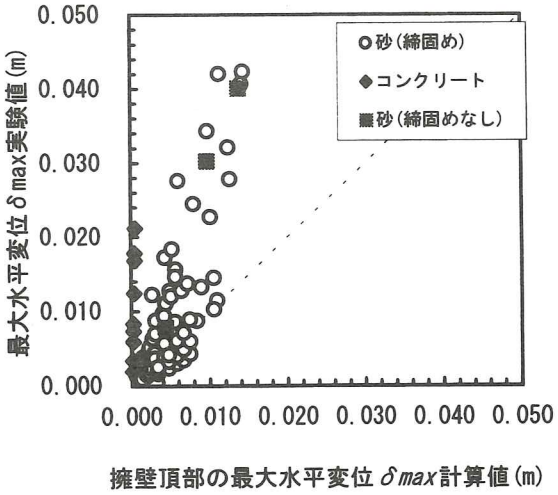
図4.3に支持力安全率と最大回転角の実験値との関係を示す。支持力安全率についても転倒安全率と同様に、支持力安全率が１以下になると回転角度が増大する傾向が見られるが、同じ安全率でも基礎地盤が固くなるほど最大回転角は小さい。特に、コンクリート基盤のケースでは、ほとんどのケースで安全率は大きく



(1)回転角



(2)底面水平変位



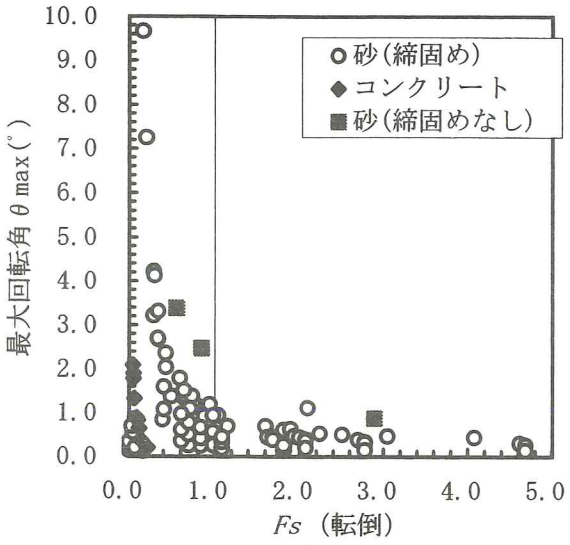
(3)頂部水平変位

図4.1　旧落石対策便覧による計算値と実験値の関係

表-4.1　安全率計算条件および結果の一覧

実験条件			重錘条件			擁壁条件					安全率										擁壁変位(計算値)		擁壁変位(実験値)			
	ケース	実験番号	落石質量	落下高さ	落石速度	底版幅	天端幅	高さ	有効抵抗長	質量	転倒			滑動		支持力					最大回転角	最大変位	最大回転角	最大変位	残留変位	δ / δ max
	番号	実験番号	M0 (t)	h0 (m)	V0 (m/s)	B (m)	b (m)	h (m)	D (m)	M (t)	e (m)	Fs B/3/e		Fs		qmax (kN/m2)	qu (kN/m2)	Fs qu/qmax			θ max (°)	δ max (m)	θ max (°)	δ max (m)	δ (m)	
底版幅0.35m 重錘5.5kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	1- 1	SBA0191	0.00541	0.1	1.358	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.001	208.55	○	2.69	○	7.92	170.84	21.56	○		0.1217	0.00031				
	1- 1	SBA0291	0.00541	0.2	1.920502	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.022	5.33	○	1.90	○	10.79	152.93	14.17	○		0.1722	0.00044	0.37	0.00084	0.00006	0.06587
	1- 1	SBA0391	0.00541	0.3	2.352125	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.038	3.05	○	1.55	○	12.99	138.62	10.67	○		0.2109	0.00054	0.46	0.00099	0.00026	0.26263
	1- 1	SBA0491	0.00541	0.4	2.716	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.052	2.24	○	1.35	○	14.85	126.18	8.50	○		0.2435	0.00063	0.52	0.00107	0.00037	0.34272
	1- 1	SBA0595	0.00541	0.5	3.0365803	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.064	1.82	○	1.20	×	49.58	114.93	2.32	○		0.2722	0.00070	0.60	0.00126	0.00051	0.40239
	1- 1	SBA1094	0.00541	1	4.2943731	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.112	1.04	○	0.85	×	87.04	68.21	0.78	×		0.3850	0.00099	0.94	0.00232	0.00157	0.67819
	1- 1	SBA1591	0.00541	1.5	5.2595114	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.148	0.79	×	0.69	×	207.12	29.55	0.14	×		0.4715	0.00122	1.16	0.00366	0.00313	0.85519
	1- 1	SBA2092	0.00541	2	6.0731606	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.179	0.65	×	0.60	×	-	0.00	0.00	×		0.5444	0.00141	1.33	0.00520	0.00466	0.89605
底版幅0.35m 重錘2.7kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	1- 4	SBD0191	0.00261	0.1	1.358	0.35	0.1	0.50	1	0.28	-0.026	0.00	○	5.51	○	4.38	191.82	43.80	○		0.0594	0.00015	0.14	0.00030	0.00001	0.01667
	1- 4	SBD0291	0.00261	0.2	1.920502	0.35	0.1	0.50	1	0.28	-0.015	0.00	○	3.90	○	5.78	183.68	31.78	○		0.0841	0.00022	0.18	0.00045	0.00001	0.01124
	1- 4	SBD0391	0.00261	0.3	2.352125	0.35	0.1	0.50	1	0.28	-0.007	0.00	○	3.18	○	6.86	177.30	25.86	○		0.1030	0.00027	0.23	0.00041	0.00002	0.03704
	1- 4	SBD0491	0.00261	0.4	2.716	0.35	0.1	0.50	1	0.28	-0.001	0.00	○	2.76	○	7.76	171.82	22.14	○		0.1189	0.00031	0.26	0.00046	0.00002	0.03297
	1- 4	SBD0591	0.00261	0.5	3.0365803	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.005	22.05	○	2.46	○	8.56	166.93	19.50	○		0.1329	0.00034	0.30	0.00050	0.00004	0.07000
	1- 4	SBD1091	0.00261	1	4.2943731	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.029	4.08	○	1.74	○	11.69	147.13	12.58	○		0.1880	0.00049	0.43	0.00062	0.00017	0.26829
	1- 4	SBD1592	0.00261	1.5	5.2595114	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.046	2.51	○	1.42	○	14.10	131.27	9.31	○		0.2302	0.00059	0.50	0.00078	0.00013	0.16026
	1- 4	SBD2091	0.00261	2	6.0731606	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.062	1.90	○	1.23	×	48.41	117.44	2.43	○		0.2659	0.00069	0.62	0.00093	0.00017	0.17742
底版幅0.35m 重錘11.3kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	1- 2	SBB0391	0.01106	0.3	2.352125	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.127	0.92	×	0.78	×	114.76	52.40	0.46	×		0.4210	0.00109	1.14	0.00211	0.00103	0.48578
	1- 2	SBB0491	0.01106	0.4	2.716	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.155	0.75	×	0.67	×	270.27	22.76	0.08	×		0.4862	0.00126	1.22	0.00244	0.00144	0.59138
	1- 2	SBB0592	0.01106	0.5	3.0365803	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.179	0.65	×	0.60	×	-	0.00	0.00	×		0.5435	0.00140	1.40	0.00368	0.00289	0.78503
	1- 2	SBB1092	0.01106	1	4.2943731	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.274	0.43	×	0.43	×	-	0.00	0.00	×		0.7687	0.00199	2.04	0.00847	0.00761	0.89900
	1- 2	SBB1591	0.01106	1.5	5.2595114	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.347	0.34	×	0.35	×	-	0.00	0.00	×		0.9414	0.00243	2.68	0.01325	0.01183	0.89283
	1- 2	SBB2092	0.01106	2	6.0731606	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.409	0.29	×	0.30	×	-	0.00	0.00	×		1.0871	0.00281	3.21	0.01683	0.01528	0.90788
底版幅0.20m 重錘5.5kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	2- 1	SAA0191	0.00541	0.1	1.358	0.20	0.1	0.50	1	0.18	0.034	1.94	○	2.72	○	53.83	70.75	1.31	×		0.3739	0.00028	0.46	0.00073	0.00028	0.38514
	2- 1	SAA0291	0.00541	0.2	1.920502	0.20	0.1	0.50	1	0.18	0.058	1.15	○	1.92	○	83.79	46.36	0.55	×		0.5288	0.00040	0.69	0.00112	0.00051	0.45089
	2- 1	SAA0391	0.00541	0.3	2.352125	0.20	0.1	0.50	1	0.18	0.076	0.88	×	1.57	○	146.21	26.96	0.18	×		0.6477	0.00049	0.91	0.00149	0.00069	0.45973
	2- 1	SAA0491	0.00541	0.4	2.716	0.20	0.1	0.50	1	0.18	0.091	0.73	×	1.36	○	393.11	10.15	0.03	×		0.7479	0.00057	1.38	0.00195	0.00110	0.56555
	2- 1	SAA0592	0.00541	0.5	3.0365803	0.20	0.1	0.50	1	0.18	0.104	0.64	×	1.22	×	-	0.00	0.00	×		0.8362	0.00064	1.51	0.00187	0.00078	0.41444
	2- 1	SAA1091	0.00541	1	4.2943731	0.20	0.1	0.50	1	0.18	0.157	0.43	×	0.86	×	-	0.00	0.00	×		1.1825	0.00090	2.36	0.00416	0.00218	0.52404
	2- 1	SAA1591	0.00541	1.5	5.2595114	0.20	0.1	0.50	1	0.18	0.197	0.34	×	0.70	×	-	0.00	0.00	×		1.4483	0.00110	3.31	0.00614	0.00374	0.60880
	2- 1	SAA2091	0.00541	2	6.0731606	0.20	0.1	0.50	1	0.18	0.231	0.29	×	0.61	×	-	0.00	0.00	×		1.6723	0.00127	4.22	0.00918	0.00619	0.67375
底版幅0.50m 重錘5.6kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	2- 2	SCA0192	0.0055	0.1	1.358	0.50	0.1	0.50	1	0.375	-0.037	0.00	○	3.15	○	4.08	251.75	61.73	○		0.0505	0.00029	0.22	0.00030	0.00004	0.11667
	2- 2	SCA0292	0.0055	0.2	1.920502	0.50	0.1	0.50	1	0.375	-0.020	0.00	○	2.23	○	5.56	241.13	43.33	○		0.0714	0.00041	0.29	0.00050	0.00009	0.17000
	2- 2	SCA0392	0.0055	0.3	2.352125	0.50	0.1	0.50	1	0.375	-0.007	0.00	○	1.82	○	6.70	232.64	34.70	○		0.0874	0.00050	0.33	0.00059	0.00016	0.26496
	2- 2	SCA0492	0.0055	0.4	2.716	0.50	0.1	0.50	1	0.375	0.003	47.66	○	1.57	○	7.67	225.24	29.38	○		0.1009	0.00058	0.37	0.00070	0.00028	0.40000
	2- 2	SCA0592	0.0055	0.5	3.0365803	0.50	0.1	0.50	1	0.375	0.013	12.73	○	1.41	○	8.51	218.54	25.67	○		0.1128	0.00064	0.38	0.00084	0.00037	0.44311
	2- 2	SCA1592	0.0055	1.5	5.2595114	0.50	0.1	0.50	1	0.375	0.080	2.09	○	0.81	×	14.39	167.50	11.64	○		0.1954	0.00112	1.11	0.00353	0.00284	0.80567
	2- 2	SCA2091	0.0055	2	6.0731606	0.50	0.1	0.50	1	0.375	0.104	1.60	○	0.70	×	50.38	146.80	2.91	○		0.2257	0.00129	0.69	0.00333	0.00311	0.93534
底版幅0.50m 重錘5.5kg 衝突位置0.45m 砂(締固め) 失敗？	2- 2	SCA0191	0.00541	0.1	1.358	0.50	0.1	0.50	1	0.03827	1.016	0.16	×	0.12	×	-	0.00	0.00	×		0.1386	0.00079	0.12	0.00042	0.00011	0.26506
	2- 2	SCA0291	0.00541	0.2	1.920502	0.50	0.1	0.50	1	0.03827	1.470	0.11	×	0.08	×	-	0.00	0.00	×		0.1960	0.00112	0.16	0.00060	0.00028	0.45833
	2- 2	SCA0391	0.00541	0.3	2.352125	0.50	0.1	0.50	1	0.03827	1.817	0.09	×	0.07	×	-	0.00	0.00	×		0.2401	0.00137	0.19	0.00077	0.00040	0.51948
	2- 2	SCA0491	0.00541	0.4	2.716	0.50	0.1	0.50	1	0.03827	2.110	0.08	×	0.06	×	-	0.00	0.00	×		0.2773	0.00158	0.21	0.00091	0.00049	0.53297
	2- 2	SCA0591	0.00541	0.5	3.0365803	0.50	0.1	0.50	1	0.03827	2.369	0.07	×	0.05	×	-	0.00	0.00	×		0.3100	0.00177	0.20	0.00090	0.00047	0.52222
	2- 2	SCA1091	0.00541	1	4.2943731	0.50	0.1	0.50	1	0.03827	3.382	0.05	×	0.04	×	-	0.00	0.00	×		0.4384	0.00250	0.54	0.00155	0.00117	0.75161
	2- 2	SCA2091	0.00541	2	6.0731606	0.50	0.1	0.50	1	0.03827	4.815	0.03	×	0.03	×	-	0.00	0.00	×		0.6200	0.00354	0.69	0.00333	0.00311	0.93534
底版幅0.50m 重錘11.3kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	2- 2	SCB0191	0.01106	0.1	1.358	0.50	0.1	0.50	1	0.375	0.003	60.78	○	1.59	○	7.60	225.76	29.71	○		0.1000	0.00057	0.27	0.00099	0.00056	0.56061
	2- 2	SCB0291	0.01106	0.2	1.920502	0.50	0.1	0.50	1	0.375	0.036	4.62	○	1.12	×	10.54	201.80	19.14	○		0.1414	0.00081	0.30	0.00150	0.00103	0.68896
	2- 2	SCB0391	0.01106	0.3	2.352125	0.50	0.1	0.50	1	0.375	0.062	2.70	○	0.92	×	12.80	182.05	14.22	○		0.1732	0.00099	0.38	0.00220	0.00178	0.80682
	2- 2	SCB0491	0.01106	0.4	2.716	0.50	0.1	0.50	1	0.375	0.083	2.00	○	0.79	×	14.71	164.46	11.18	○		0.2000	0.00114	0.43	0.00296	0.00261	0.88325
	2- 2	SCB0591	0.01106	0.5	3.0365803	0.50	0.1	0.50	1	0.375	0.102	1.63	○	0.71	×	49.80	148.27	2.98	○		0.2236	0.00128	0.44	0.00353	0.00321	0.90922
	2- 2	SCB1091	0.01106	1	4.2943731	0.50	0.1	0.50	1	0.375	0.177	0.94	×	0.50	×	100.58	78.39	0.78	×		0.3162	0.00181	1.19	0.00788	0.00731	0.92766
	2- 2	SCB1591	0.01106	1.5	5.2595114	0.50	0.1	0.50	1	0.375	0.234	0.71	×	0.41	×	462.02	17.89	0.04	×		0.3872	0.00221	1.09	0.00981	0.00939	0.95716
	2- 2	SCB2091	0.01106	2	6.0731606	0.50	0.1	0.50	1	0.375	0.282	0.59	×	0.36	×	-	0.00	0.00	×		0.4471	0.00255	1.79	0.01357	0.01281	0.94434
底版幅0.20m 重錘11.3kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	2- 2	SAB0191	0.01106	0.1	1.358	0.20	0.1	0.50	1	0.18	0.089	0.75	×	1.38	○	328.86	12.12	0.04	×		0.7363	0.00056	0.34	0.00155	0.00005	0.02913
	2- 2	SAB0291	0.01106	0.2	1.920502	0.20	0.1	0.50	1	0.18	0.135	0.49	×	0.98	×	-	0.00	0.00	×		1.0413	0.00079	1.37	0.00250	0.00034	0.13600
	2- 2	SAB0391	0.01106	0.3	2.352125	0.20	0.1	0.50	1	0.18	0.171	0.39	×	0.80	×	-	0.00	0.00	×		1.2753	0.00097	0.84	0.00492	0.00277	0.56358
	2- 2	SAB0491	0.01106	0.4	2.716	0.20	0.1	0.50	1	0.18	0.201	0.33	×	0.69	×	-	0.00	0.00	×		1.4726	0.00112	2.70	0.00662	0.00389	0.58686
	2- 2	SAB0591	0.01106	0.5	3.0365803	0.20	0.1	0.50	1	0.18	0.227	0.29	×	0.62	×	-	0.00	0.00	×		1.6464	0.00125	4.12	0.00828	0.00477	0.57644
	2- 2	SAB1091	0.01106	1	4.2943731	0.20	0.1	0.50	1	0.18	0.330	0.20	×	0.44	×	-	0.00	0.00	×		2.3284	0.00177	7.25	0.01621	0.00911	0.56200

	2- 2	SAB1591	0.01106	1.5	5.2595114	0.20	0.1	0.50	1	0.18	0.410	0.16	×	0.36	×	-		0.00	0.00	×	2.8516	0.00217	9.66	0.02392	0.01551	0.64841
	2- 2	SAB2091	0.01106	2	6.0731606	0.20	0.1	0.50	1	0.18	0.476	0.14	×	0.31	×	-		0.00	0.00	×	3.2928	0.00250	11.31	0.02979	0.02132	0.71568
底版幅0.35m	2- 4	SBA0173	0.00564	0.1	1.358	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.003	43.28	○	2.58	○	8.21		169.08	20.59	○	0.1268	0.00033	0.20	0.00033	0.00000	0.00000
重錘5.8kg	2- 4	SBA0271	0.00564	0.2	1.920502	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.025	4.68	○	1.83	○	11.20		150.32	13.42	○	0.1793	0.00046	0.26	0.00063	0.00016	0.25600
衝突位置0.35m	2- 4	SBA0371	0.00564	0.3	2.352125	0.35	0.1	0.50	1	0.28	0.042	2.78	○	1.49	○	13.49		135.32	10.03	○	0.2196	0.00057	0.33	0.00081	0.00026	0.32298
砂(締固め)	2- 4	SBA0471	0.00564	0.4	2.716	0.35	0.000576	0.50	0.35	0.28	0.056	2.07	○	1.29	×	15.42		122.26	7.93	○	0.2536	0.00066	0.39	0.00089	0.00029	0.32022
	2- 4	SBA0571	0.00564	0.5	3.0365803	0.35	0.000576	0.50	0.35	0.28	0.069	1.69	○	1.16	×	51.81		110.44	2.13	○	0.2835	0.00073	0.44	0.00095	0.00033	0.34737
	2- 4	SBA1072	0.00564	1	4.2943731	0.35	0.000576	0.50	0.35	0.28	0.119	0.98	×	0.82	×	97.47		61.26	0.63	×	0.4009	0.00104	0.93	0.00208	0.00080	0.38313
底版幅0.35m	2- 4	SBA0151	0.00564	0.1	1.358	0.35	0.000576	0.50	0.25	0.28	0.003	43.28	○	2.58	○	8.21		169.08	20.59	○	0.1268	0.00033	0.15	0.00026	-0.00001	-0.03922
重錘5.8kg	2- 4	SBA0251	0.00564	0.2	1.920502	0.35	0.000576	0.50	0.25	0.28	0.025	4.68	○	1.83	○	11.20		150.32	13.42	○	0.1793	0.00046	0.25	0.00043	0.00006	0.12791
衝突位置0.25m	2- 4	SBA0351	0.00564	0.3	2.352125	0.35	0.000576	0.50	0.25	0.28	0.042	2.78	○	1.49	○	13.49		135.32	10.03	○	0.2196	0.00057	0.31	0.00054	0.00011	0.19444
砂(締固め)	2- 4	SBA0451	0.00564	0.4	2.716	0.35	0.000576	0.50	0.25	0.28	0.056	2.07	○	1.29	×	15.42		122.26	7.93	○	0.2536	0.00066	0.35	0.00063	0.00012	0.18254
	2- 4	SBA0551	0.00564	0.5	3.0365803	0.35	0.000576	0.50	0.25	0.28	0.069	1.69	○	1.16	×	51.81		110.44	2.13	○	0.2835	0.00073	0.38	0.00068	0.00015	0.21324
	2- 4	SBA1051	0.00564	1	4.2943731	0.35	0.000576	0.50	0.25	0.28	0.119	0.98	×	0.82	×	97.47		61.26	0.63	×	0.4009	0.00104	0.56	0.00131	0.00043	0.32824
底版幅0.35m	2- 4	SBA0131	0.00564	0.1	1.358	0.35	0.000576	0.50	0.15	0.28	0.003	43.28	○	2.58	○	8.21		169.08	20.59	○	0.1268	0.00033	0.09	0.00026	0.00007	0.25490
重錘5.8kg	2- 4	SBA0231	0.00564	0.2	1.920502	0.35	0.000576	0.50	0.15	0.28	0.025	4.68	○	1.83	○	11.20		150.32	13.42	○	0.1793	0.00046	0.14	0.00045	0.00012	0.25556
衝突位置0.15m	2- 4	SBA0331	0.00564	0.3	2.352125	0.35	0.000576	0.50	0.15	0.28	0.042	2.78	○	1.49	○	13.49		135.32	10.03	○	0.2196	0.00057	0.15	0.00053	0.00013	0.23810
砂(締固め)	2- 4	SBA0431	0.00564	0.4	2.716	0.35	0.000576	0.50	0.15	0.28	0.056	2.07	○	1.29	×	15.42		122.26	7.93	○	0.2536	0.00066	0.19	0.00069	0.00020	0.29197
	2- 4	SBA1031	0.00564	1	4.2943731	0.35	0.000576	0.50	0.15	0.28	0.119	0.98	×	0.82	×	97.47		61.26	0.63	×	0.4009	0.00104	0.26	0.00181	0.00048	0.26519
底版幅0.20m	2- 3	SAA0131	0.00564	0.1	1.358	0.20	0.000576	0.50	0.15	0.18	0.037	1.82	○	2.61	○	55.80		68.39	1.23	×	0.3892	0.00030	0.13	0.00060	0.00021	0.35000
重錘5.8kg	2- 3	SAA0231	0.00564	0.2	1.920502	0.20	0.000576	0.50	0.15	0.18	0.061	1.09	○	1.85	○	90.84		42.87	0.47	×	0.5504	0.00042	0.18	0.00094	0.00039	0.40957
衝突位置0.15m	2- 3	SAA0331	0.00564	0.3	2.352125	0.20	0.000576	0.50	0.15	0.18	0.080	0.83	×	1.51	○	175.29		22.56	0.13	×	0.6742	0.00051	0.24	0.00115	0.00047	0.40870
砂(締固め)	2- 3	SAA0431	0.00564	0.4	2.716	0.20	0.000576	0.50	0.15	0.18	0.096	0.70	×	1.31	○	810.64		4.94	0.01	×	0.7784	0.00059	0.25	0.00147	0.00054	0.36519
	2- 3	SAA0531	0.00564	0.5	3.0365803	0.20	0.000576	0.50	0.15	0.18	0.110	0.61	×	1.17	×	-		0.00	0.00	×	0.8703	0.00066	0.35	0.00155	0.00057	0.36893
底版幅0.20m	2- 3	SAA0151	0.00564	0.1	1.358	0.20	0.000576	0.50	0.25	0.18	0.037	1.82	○	2.61	○	55.80		68.39	1.23	×	0.3892	0.00030	0.22	0.00048	0.00014	0.29474
重錘5.8kg	2- 3	SAA0251	0.00564	0.2	1.920502	0.20	0.000576	0.50	0.25	0.18	0.061	1.09	○	1.85	○	90.84		42.87	0.47	×	0.5504	0.00042	0.33	0.00068	0.00014	0.20741
衝突位置0.25m	2- 3	SAA0351	0.00564	0.3	2.352125	0.20	0.000576	0.50	0.25	0.18	0.080	0.83	×	1.51	○	175.29		22.56	0.13	×	0.6742	0.00051	0.41	0.00084	0.00017	0.19643
砂(締固め)	2- 3	SAA0451	0.00564	0.4	2.716	0.20	0.000576	0.50	0.25	0.18	0.096	0.70	×	1.31	○	810.64		4.94	0.01	×	0.7784	0.00059	0.50	0.00100	0.00018	0.17500
	2- 3	SAA0551	0.00564	0.5	3.0365803	0.20	0.000576	0.50	0.25	0.18	0.110	0.61	×	1.17	×	-		0.00	0.00	×	0.8703	0.00066	0.61	0.00118	0.00018	0.14831
	2- 3	SAA1051	0.00564	1	4.2943731	0.20	0.000576	0.50	0.25	0.18	0.164	0.41	×	0.83	×	-		0.00	0.00	×	1.2308	0.00094	1.07	0.00191	0.00030	0.15486
底版幅0.20m	2- 3	SAA0171	0.00564	0.1	1.358	0.20	0.000576	0.50	0.35	0.18	0.037	1.82	○	2.61	○	55.80		68.39	1.23	×	0.3892	0.00030	0.25	0.00054	0.00006	0.10280
重錘5.8kg	2- 3	SAA0271	0.00564	0.2	1.920502	0.20	0.000576	0.50	0.35	0.18	0.061	1.09	○	1.85	○	90.84		42.87	0.47	×	0.5504	0.00042	0.44	0.00071	0.00003	0.03521
衝突位置0.35m	2- 3	SAA0371	0.00564	0.3	2.352125	0.20	0.000576	0.50	0.35	0.18	0.080	0.83	×	1.51	○	175.29		22.56	0.13	×	0.6742	0.00051	0.66	0.00091	0.00004	0.03867
砂(締固め)	2- 3	SAA0471	0.00564	0.4	2.716	0.20	0.000576	0.50	0.35	0.18	0.096	0.70	×	1.31	○	810.64		4.94	0.01	×	0.7784	0.00059	0.77	0.00110	0.00003	0.02273
	2- 3	SAA0571	0.00564	0.5	3.0365803	0.20	0.000576	0.50	0.35	0.18	0.110	0.61	×	1.17	×	-		0.00	0.00	×	0.8703	0.00066	0.97	0.00130	0.00005	0.03462
	2- 3	SAA1071	0.00564	1	4.2943731	0.20	0.000576	0.50	0.35	0.18	0.164	0.41	×	0.83	×	-		0.00	0.00	×	1.2308	0.00094	1.59	0.00205	0.00029	0.14146
	2- 5	CBA0191	0.00564	0.1	1.358	0.35	0.000576	0.50	0.45	0.28	0.552	0.21	×	0.23	×	-		141487.10	0.00	×	0.0113	0.00003	0.20	0.00035	0.00001	0.01449
底版幅0.35m	2- 5	CBA0291	0.00564	0.2	1.920502	0.35	0.000576	0.50	0.45	0.28	0.801	0.15	×	0.16	×	-		113882.78	0.00	×	0.0160	0.00004	0.36	0.00055	-0.00001	-0.00917
重錘5.8kg	2- 5	CBA0391	0.00564	0.3	2.352125	0.35	0.000576	0.50	0.45	0.28	0.993	0.12	×	0.13	×	-		91840.73	0.00	×	0.0195	0.00005	0.64	0.00089	0.00002	0.01695
衝突位置0.45m	2- 5	CBA0491	0.00564	0.4	2.716	0.35	0.000576	0.50	0.45	0.28	1.155	0.10	×	0.11	×	-		74927.27	0.00	×	0.0226	0.00006	0.82	0.00090	-0.00008	-0.08333
コンクリート	2- 5	CBA0591	0.00564	0.5	3.0365803	0.35	0.000576	0.50	0.45	0.28	1.297	0.09	×	0.10	×	-		60668.56	0.00	×	0.0252	0.00007	0.88	0.00141	0.00002	0.01064
	2- 5	CBA1091	0.00564	1	4.2943731	0.35	0.000576	0.50	0.45	0.28	1.855	0.06	×	0.07	×	-		48106.39	0.00	×	0.0357	0.00009	1.32	0.00203	0.00052	0.25432
	2- 5	CBA1591	0.00564	1.5	5.2595114	0.35	0.000576	0.50	0.45	0.28	2.283	0.05	×	0.06	×	-		0.00	0.00	×	0.0437	0.00011	1.78	0.00284	0.00055	0.19224
	2- 5	CBA1592	0.00564	1.5	5.2595114	0.35	0.000576	0.50	0.45	0.28	2.283	0.05	×	0.06	×	-		0.00	0.00	×	0.0437	0.00011	1.90	0.00287	0.00068	0.23693
	2- 5	CBA2091	0.00564	2	6.0731606	0.35	0.000576	0.50	0.45	0.28	2.645	0.04	×	0.05	×	-		0.00	0.00	×	0.0504	0.00013	2.09	0.00474	0.00289	0.61035
底版幅0.20m	2- 6	TAA0191	0.00564	0.1	1.358	0.20	0.000576	0.50	0.45	0.18	0.023	2.89	○	3.40	○	14.93		14.96	1.00	×	0.5067	0.00038	0.87	0.00097	0.00021	0.21762
重錘5.8kg	2- 6	TAA0592	0.00564	0.5	3.0365803	0.20	0.000576	0.50	0.45	0.18	0.079	0.84	×	1.52	○	168.23		4.28	0.03	×	1.1330	0.00086	2.47	0.01084	0.00862	0.79474
衝突位置0.45m	2- 6	TAA1092	0.00564	1	4.2943731	0.20	0.000576	0.50	0.45	0.18	0.121	0.55	×	1.07	×	-		0.00	0.00	×	1.6023	0.00122	3.38	0.01349	0.01059	0.78495
砂(締固めなし)																										



(1)転倒

図4.2 転倒安全率と最大回転角の関係

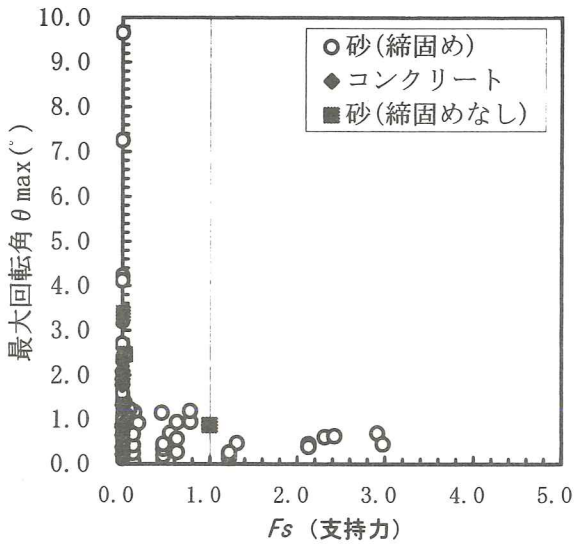


図4.3 支持力安全率と最大回転角の関係

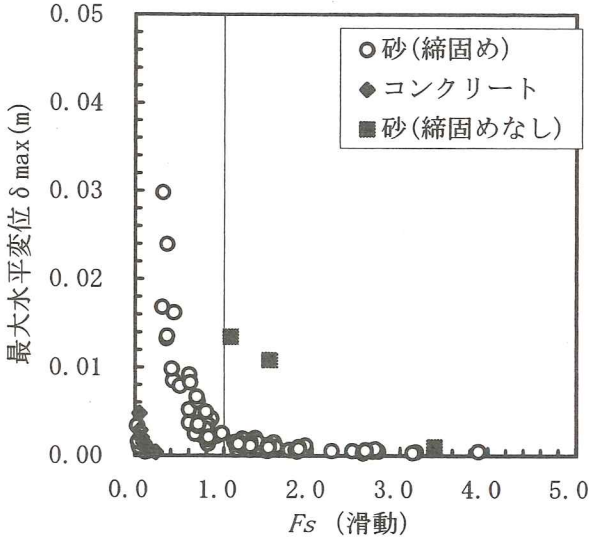


図4.4 滑動安全率と最大水平変位の関係

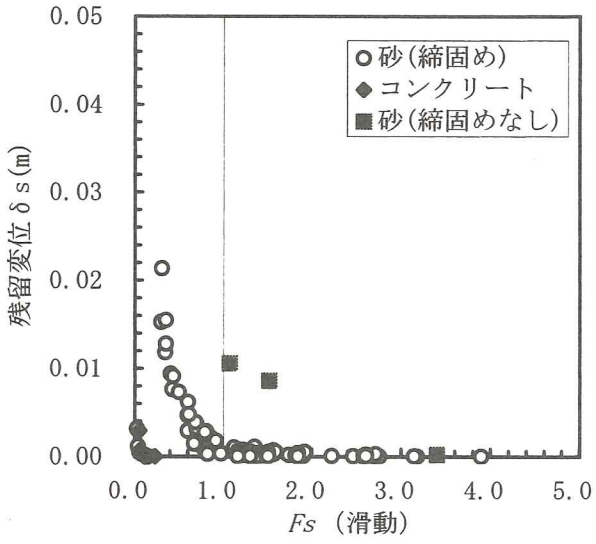


図4.5 滑動安全率と残留水平変位の関係

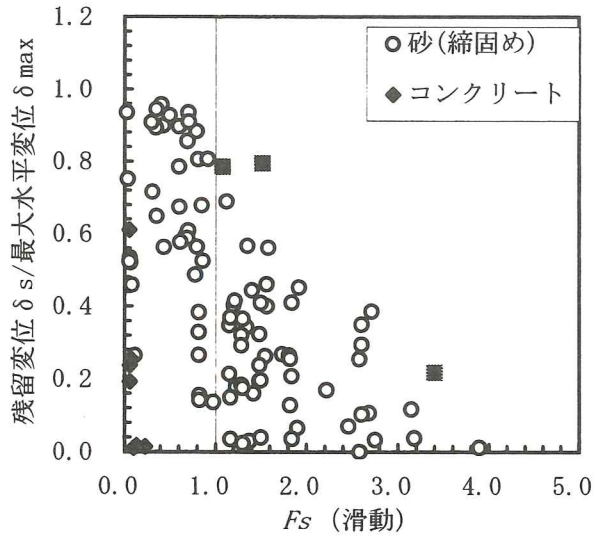


図4.6 滑動安全率と残留水平変位と最大水平変位の比の関係

1を下回り、ほぼ0近くの値となっているにもかかわらず、回転角は生じていない。

図4.4、図4.5に滑動安全率と実験における擁壁底面における最大水平変位および残留水平変位の関係を示す。砂地盤のケースでは、滑動安全率が1以下になると最大変位量および残留変位量とも大きくなっていることがわかる。しかし、滑動についても同様に、同じ安全率でも基礎地盤が固くなるほど最大水平変位は小さく、特にコンクリート基礎のケースで滑動がほとんど生じていないにも関わらず、安全率が大きく1を下回っている。また、安全率が1となるケースの最大水平変位および残留変位の実験値は最大でも10mm程度であり、擁壁幅の数%に過ぎない。また、**図4.6**には滑動安全率と擁壁底面における残留水平変位と最大水平変位の比率の関係を示す。安全率が小さいほどその比率は1に近づく、つまり塑性変形量が大きくなっていることがわかる。しかし、これも同様に基礎地盤が固いケースではその比率がほぼ0、つまり塑性変形が生じていないにもかかわらず、安全率が1を大きく下回っている。

滑動、転倒および支持力のいずれについても、安全率が小さいほど変形量は大きくなる傾向はみられる。しかし、同じ安全率でも基礎地盤が固くなるほど変形量は小さく、特に、コンクリート基盤のケースでは、変形が生じていないにも拘わらず、ほとんどのケースで安全率は大きく1を下回る。これは、旧落石対策便覧の設計法の評価では固くて良い地盤ほど擁壁が不安定となるという本質的な問題点が現れた結果である。また安全率が1となっても概して擁壁の安定性を損なうような大きさの変形量は生じることはなく、旧落石対策便覧の設計法は概して安全側に過ぎる評価法であるといえる。

4.3 まとめ

擁壁の重錘衝突実験を対象に旧落石対策便覧による安定性評価を行った。その結果以下のことがわかった。

擁壁の変形量について、水平変位、回転角とも実験では衝突速度の2乗に概ね比例するのに対して、旧落石対策便覧により求められる変位量と実験値との関係は衝突速度の1乗に比例するという定性的な違いがある。これは、旧落石対策便覧による計算の考え方では重錘の運動エネルギーが擁壁の弾性回転バネのひずみエネルギーに置き換わるとしており、他方、実現象では変位が大きくなると塑性変形が大きくなることの違いによるものと考えることができる。

滑動、転倒および支持力のいずれについても、安全率が小さいほど変形量は大きくなる傾向はみられた。しかし、同じ安全率でも基礎地盤が固くなるほど変形量は小さく、特に、コンクリート基盤のケースでは、変形が生じていないにも拘わらず、ほとんどのケースで安全率は大きく1を下回った。これは、旧落石対策便覧の設計法の評価では固くて良い地盤ほど擁壁が不安定となるという本質的な問題点が現れた結果である。また安全率が1となっても概して擁壁の安定性を損なうような大きさの変形量は生じることはなく、旧落石対策便覧の設計法は概して安全側に過ぎる評価法であるといえる。本件のような衝突現象を伴う問題では、最大衝撃力を静的に作用させて弾性論的に発生荷重（応力）を求めて、これを許容荷重（応力）と比較して安定性を評価する手法は一般に安全側であり、また安全側に過ぎることが多い。塑性変形量を考慮した方法によるのが合理的である。

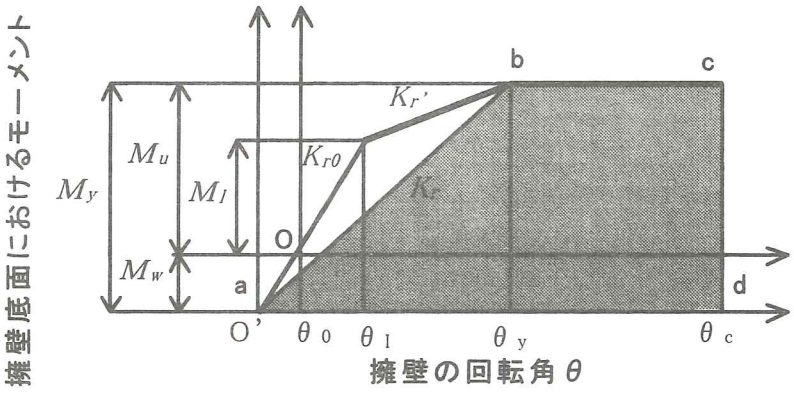
５．弾塑性地盤モデルによる設計法の検討

前章までに述べたように、旧落石対策便覧の設計法は許容応力度法により弾性領域で安定を照査するが、固くて良い地盤ほど擁壁が不安定となり、擁壁構造が大きくなる。しかし、実験結果では、最大水平変位量については地盤が固いほど擁壁の変位量は小さくなり、また、回転量についても、締固めた地盤では締め固められず軟らかいほど、回転角は大きくなっている。このように、旧落石対策便覧の設計法による評価は実験事実と整合していない。また、４．の検討結果から、旧落石対策便覧の設計手法で安全率が１となっても概して擁壁の安定性を損なうような大きさの変形量は生じることはなく、旧落石対策便覧の設計法は概して安全側に過ぎる評価法であることがわかった。さらに、擁壁の水平および回転角は重錘の運動エネルギーに比例したことから、擁壁の変形は地盤の塑性変形の結果として生じたものであることが考えられる。

ここでは、先ず擁壁支持地盤の塑性変形を考慮した擁壁の荷重－変位モデルを考え、これと擁壁の許容変位量から定まる基礎地盤の塑性変形を考慮した可能吸収エネルギーと落石の衝突により擁壁に伝わる運動エネルギーとを比較することにより安定性を照査する設計法を提案する。そして、実験結果を対象に設計法の妥当性を検討する。

5.1　弾塑性地盤モデルによる設計法

ここでは、**図5.1**に示す弾塑性の抵抗モーメント－回転角曲線を用いて、許容変位量から定まる基礎地盤の塑性変形を考慮した可能吸収エネルギーと落石の衝突により擁壁に伝わるエネルギーとを比較することにより安定性を照査する設計法について提案する。なお、鉄道総合研究所(1999)[6]においても、同様な考えの設計法が示されている。**図5.2**に落石防護擁壁の落石衝突時の安定に対する検討手順を示す。まず、旧落石対策便覧と同様に擁壁を弾性地盤によって支持される剛体（**図5.3**参照）と仮定して、基礎地盤の弾性応答



M_y：降伏モーメント　　θ_y：降伏回転角
M_u：最大抵抗モーメント　　θ_c：計算による回転角
M_l：浮上がり限界モーメント　　θ_0：M_wに達した時の回転角
M_w：擁壁自重によるモーメント

図 5.1　擁壁の抵抗モーメント－回転角曲線

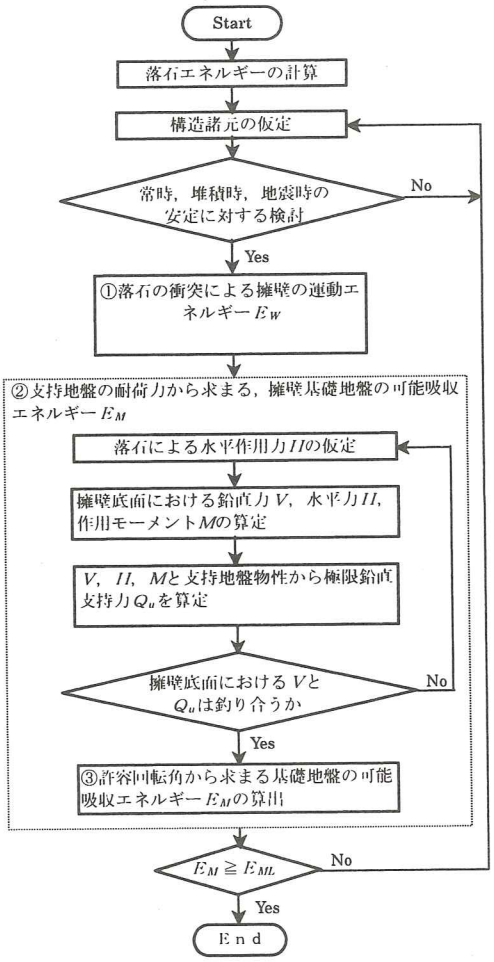


図 5.2　落石防護擁壁の落石衝突時の安定に対する検討手順

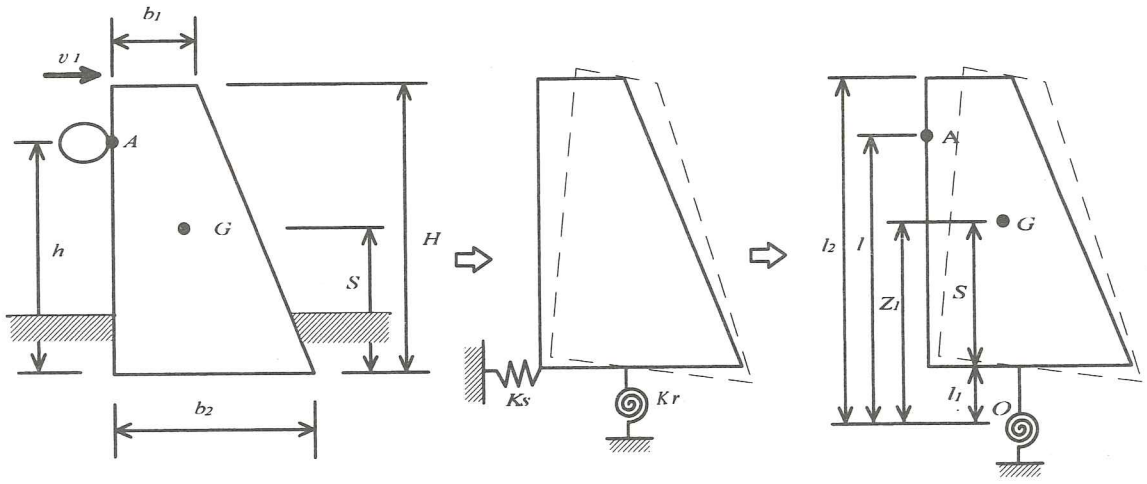


図 5.3　弾性バネに支持された落石防護擁壁のモデル

時の回転変形エネルギーE_{ML}および水平変形エネルギーE_{HL}を算出する。そして、E_{ML}が図5.1の抵抗モーメント－回転角曲線にて設定した許容回転角から求まる可能吸収回転エネルギーE_M以下となることを照査する。なお、滑動についても同様な検討が可能である。

ここでは、先ず、設計手順のうち重錘の衝突により擁壁に伝わる運動エネルギーの評価法について、実験結果と比較することにより、擁壁に伝わる運動エネルギーの評価法の適用性を検討した。次に、擁壁に伝えられたエネルギーとして実験値を用い、これと擁壁基礎地盤の弾塑性モデルより求まる擁壁の変形量と実験値を比較することにより、弾塑性地盤モデルの妥当性を検討した。最後に、擁壁に伝わる運動エネルギーの評価法および弾塑性モデルとも設計値を用いて計算した擁壁の変形量と実験値を比較することにより、提案した設計法の妥当性を検討した。

5.2　擁壁に伝達する運動エネルギーおよび地盤に伝達するエネルギーの評価法の検討

重錘の衝突によりどの程度の運動エネルギーが擁壁に伝えられ、それが滑動および回転変形にどれだけの割合が消費されたかについて検討した。また、旧落石対策便覧による落石衝突位置の擁壁の速度算出式により求められる擁壁の速度および擁壁に伝達されるエネルギーと実験値の比較を行った。

5.2.1　各エネルギーの算出方法

(1)擁壁に伝達するエネルギーの算出

重錘の衝突により擁壁に伝わる運動エネルギーを実験結果より逆算した。

擁壁に落石が衝突する前後の運動エネルギーは次式で表される。

$$E_{R1} = E_{R2} + E_{W1} + \Delta E \tag{5.1}$$

ここに、E_{R1}：衝突前の落石の運動エネルギー(=1/2・$m_0 v_0^2$)

E_{R2}：衝突後の落石の運動エネルギー(=1/2・$m_0 v_1^2$)

E_{W1}：衝突後の擁壁の運動エネルギー

ΔE：衝突により消散したエネルギー

m_0：重錘の質量

衝突の場合、運動量は保存されることから、落石が衝突した直後の擁壁の重心位置での速度Vと角速度ωを式(5.2)の運動量保存の法則と式(5.3)の角運動量保存の法則より求める。なお、この際衝突時間Δtは微少であるとして、擁壁底面の地盤反力は無視している。

$$m_0 v_0 = mV + m_0 v_1 \tag{5.2}$$

$$m_0 v_0 h_g = J\omega + m_0 v_1 h_g \tag{5.3}$$

ここに、m_0：重錘の質量

m　：擁壁の質量

v_0　：重錘の衝突直前の速度

v_1 ：重錘の衝突直後の速度

V ：擁壁の衝突直後の速度

h_g ：擁壁重心から衝突位置までの距離

ω ：擁壁の衝突直後の角速度

J ：擁壁の慣性モーメント

なお、v_0は実験による測定値であり、v_1は実験における重錘の加速度データ $a(t)$を用いて次式により求めた。

$$v_1 = v_0 - \int a(t)dt \tag{5.4}$$

したがって、落石の衝突により擁壁に伝達されるエネルギーE_{W1}は、以下の式で与えられる。

$$E_{W1} = \frac{1}{2}mV^2 + \frac{1}{2}J\omega^2 \tag{5.5}$$

(2)地盤により吸収されたエネルギーの算出

提案する設計法では、落石防護擁壁を剛体とし、落石の衝突により擁壁に伝えられた運動エネルギーと、支持地盤の可能吸収エネルギーを比較することにより評価する。その際、擁壁の運動エネルギーは擁壁の回転変位および水平変位に伴う地盤の変形により吸収される。そこで、設計において、擁壁の運動エネルギーが、どの程度の割合で回転変形および水平変形に伴う地盤の変形により吸収されるのかを検討する必要がある。

式(5.5)の重錘衝突後の擁壁の運動エネルギーE_{W1}は、擁壁の運動エネルギーの他に地盤の変形や擁壁の内部減衰に費やされ、以下の式で表される。

$$E_{W1} = E_{W2} + E_{W3} + E_{W4} + E_{W5} \tag{5.6}$$

ここに、E_{W2}：擁壁に残存する運動エネルギー

E_{W3}：滑動変形に費やされたエネルギー

E_{W4}：擁壁の回転により地盤に伝達されたエネルギー

E_{W5}：擁壁の内部減衰エネルギー(=0、無視する)

設計では擁壁の変位が最大となる時点を評価するため、その時点の擁壁の運動エネルギーE_{W2}は０である。また、擁壁の内部減衰エネルギーE_{W5}は非常に小さい値と考えられるので無視する。滑動変形に費やされたエネルギーE_{W3}は、摩擦試験より求まる水平荷重と水平変位との関係を**図5.4**のようにバイリニアの弾塑性モデルとし、実験で得られた最大水平変位 δ_{max}により囲まれる台形または三角形の面積として表される。図中のK_sは支持地盤のせん断バネ係数K_sであり、ここでは、平板載荷試験によるバネ係数 k_{v0}=31MN/m^{3}より、以下のように求めた。

$$K_v = k_{v0}\left(\frac{B_v}{0.3}\right)^{-\frac{3}{4}} \tag{5.7}$$

$$K_s = \frac{A \cdot K_v}{4} \tag{5.8}$$

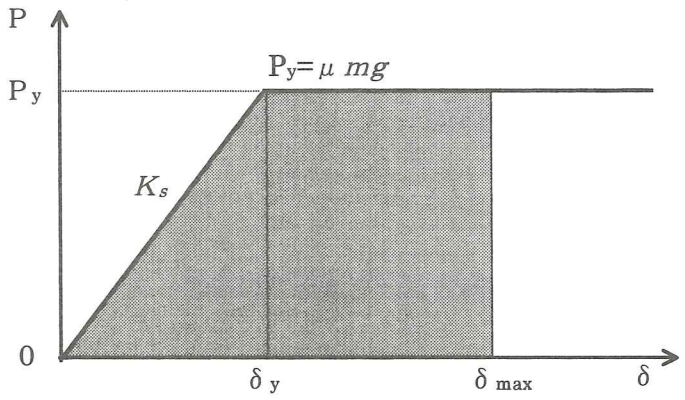


図 5.4　水平荷重と水平変位の関係

ここに、K_v：鉛直地盤反力係数

k_{v0}：直径30cmの剛体円盤による平板載荷試験の値に相当する鉛直地盤反力係数

B_v：基礎の換算載荷幅（$=\sqrt{A_v}$）

A_v：鉛直方向の載荷面積

A：基礎の底面積

ここでは、擁壁の水平変位荷重関係を図5.4のように仮定し、実験で得られた最大水平変位 δ_{max}より、擁壁の滑動変形により吸収されたエネルギーEw_3を求めた。この際の摩擦係数 μ は、締め固めた砂に対しては摩擦試験の結果である0.54を用いた。なお、コンクリート基礎の摩擦係数は道路土工擁壁工指針による岩盤の値として0.6、締め固めていな地盤の内部摩擦角 ϕ=25° として摩擦係数は0.47と仮定した。また、k_{v0}は平板載荷試験によるバネ係数 k_{v0}=31MN/m^{3}を用いた。したがって、擁壁の回転により地盤に伝達されたエネルギー E_{W4}は次式で与えられる。

$$E_{W4} = E_{W1} - E_{W3} \tag{5.9}$$

(3)旧落石便覧および新たな設計法による評価

次に、旧落石対策便覧による重錘衝突点での擁壁の速度、および擁壁の運動エネルギーと実験値との比較を行った。旧落石対策便覧による重錘衝突点での擁壁の速度は、落石と擁壁の衝突を非完全弾性衝突と仮定して運動量保存則より以下の式で与えられる。

$$V = \frac{m_0}{m_0 + \alpha' m} V_0 \tag{5.10}$$

ここに、V ：落石衝突点での擁壁の速度

m_0：落石の質量

V_0：落石の速度

m ：擁壁の質量

α'：式(2.15)で表される係数

旧落石対策便覧の設計法における、落石衝突による擁壁の弾性応答時の回転角 θ_Lおよび底面の変位量 δ_L

は以下のように求められる。

$$K_r = K_s\left(e_0{}^2 + l_1{}^2\right) \tag{5.11}$$

エネルギー保存則より、

$$\delta_d = \sqrt{(m+\alpha'\cdot M)\frac{l^2\cdot V^2}{K_1}} \tag{5.12}$$

以上から、

$$\theta_L = \frac{\delta_d}{l} \tag{5.13}$$

$$\delta_L = \delta_d - h\cdot\theta = \delta_d\left(1-\frac{h}{l}\right) \tag{5.14}$$

ここに、K_r：回転バネ係数

δ_d：A点の動的変位

l ：衝突点と回転中心の距離

旧落石対策便覧の安定性評価では擁壁底面の回転変位、水平変位と回転バネおよびせん断地盤バネ係数より、地盤に作用するモーメントおよび水平荷重を求めて安定計算を行う。ここでは、回転変形および水平変形により消費されるエネルギーを評価するため、以下の式により落石の衝突による弾性応答時の回転変形エネルギーE_{ML}および水平変形エネルギーE_{HL} を求めた。

$$E_{ML} = \frac{1}{2}K_r\cdot\theta_L{}^2 \tag{5.15}$$

$$E_{HL} = \frac{1}{2}K_s\cdot\delta_L{}^2 \tag{5.16}$$

また、実験結果との整合性を考慮して、落石と擁壁の衝突の考え方および基礎地盤の回転バネの取り扱いを以下のように修正したケース（以下、修正法と呼ぶ）についても検討した。

すなわち、旧落石対策便覧では、落石と擁壁の衝突を完全非弾性衝突として運動量保存の法則より擁壁の落石衝突位置の速度を求めるが、修正法では、落石と擁壁の衝突を安全側での評価として完全弾性衝突として擁壁の落石衝突位置の速度Vを式(5.17)で与える（旧落石対策便覧の手法は式(2.12)）。それに伴い、落石衝突位置の動的変位δ_dは式(5.18)で表される（旧落石対策便覧の手法は式(2.19)）。

$$V = \frac{2m_0}{m_0+\alpha' m}V_0 \tag{5.17}$$

$$\delta_d = \sqrt{\frac{\alpha'\cdot m\cdot l^2\cdot V^2}{K_{r1}}} \tag{5.18}$$

ここに、V ：落石衝突点での擁壁の速度

m_0：落石の質量

V_0：落石の速度

m　：擁壁の質量

α'：式(2.15)で表される係数

K_{r1}：換算回転バネ係数（式(2.19)参照）

l　：衝突点と回転中心の距離

δ_d　：A点の動的変位

ここで、旧落石対策便覧の評価法では弾性領域での設計であるので、換算回転バネ係数K_{r1}を算出する際に用いる、基礎地盤の回転バネ係数に初期回転バネ係数K_{r0}を与えるが、修正法ではでは塑性変形を考慮することから図5.1の直線abの傾きとして求められる割線回転バネ係数K_rを用いた。修正法においても、式(5.15)および式(5.16)を用いて落石の衝突による弾性応答時の回転変形エネルギーE_{ML}および水平変形エネルギーE_{HL} を求め、実験値と比較した。

5.2.2　擁壁に伝達される運動エネルギーおよび地盤に伝達するエネルギーの評価結果

(1)実験値の分析結果

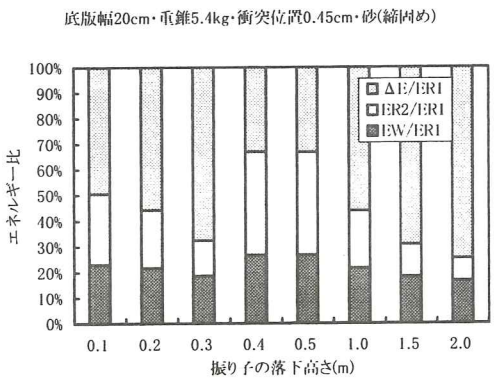
実験結果より求めた擁壁に伝達された運動エネルギー、その後回転変形および水平変形により消費されたエネルギーの算出結果の一覧を**表5.1**に示す。ここでは、各実験パラメータ毎にそれらの傾向を検討した。

1)底版幅の影響

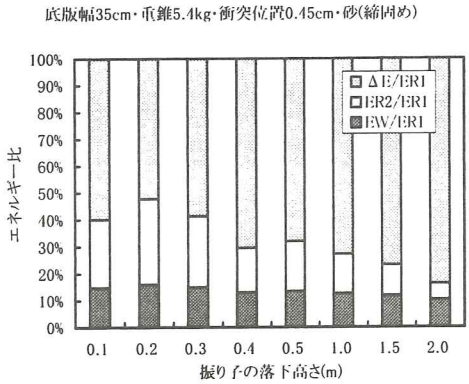
図5.5に、式(5.1)の関係で求められる衝突後の落石の運動エネルギーE_{R2}、衝突後の擁壁の運動エネルギーE_{W1}および衝突により消散したエネルギーΔEの、衝突前の落石の運動エネルギーE_{R1}(=1/2・$m_0v_0^2$)に対する比率を示す。図は、締め固めた砂地盤上に設置した擁壁に、質量5kgの重錘を底面より0.45mの位置に衝突させた実験の結果をまとめたものである。図(a)、(b)および(c)は、それぞれ底版幅0.20m、0.35m、0.50mの結果である。底版幅に関わらず、全運動エネルギーの50～60%は消散エネルギーΔEとなっている。また、擁壁に伝達する運動エネルギーは全エネルギーの約10～30%程度であるが、底版幅が大きいほど擁壁に伝達するエネルギーの比E_W/E_{R1}は小さくなっている傾向にある。

図5.6に、質量5kgの重錘を底面より0.45mの位置に衝突させた時の、擁壁の滑動変形により消費されたエネルギーと回転変形により消費されたエネルギーの比率を示す。底版幅にかかわらず、回転変形が卓越しており、擁壁の形状による変形モードの違いはあまり見られないが、底版幅が大きいほど滑動により消費されるエネルギーの割合が、若干大きくなるようである。

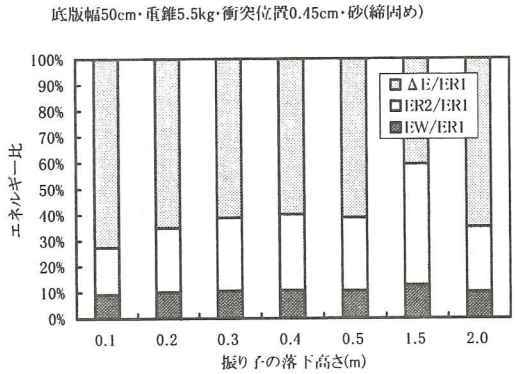
図5.7は最大回転角と重錘エネルギーE_{R1}、擁壁に伝達したエネルギーE_W、および擁壁の回転エネルギーE_{W4}の関係である。エネルギーの増加に伴い回転角はほぼ比例して増加し、底版幅が小さいほど回転角が大きくなる傾向が見られる。これらのうち、最大回転角と擁壁の回転エネルギーE_{W4}の相関が最も高い。



(a) 底版幅20cm

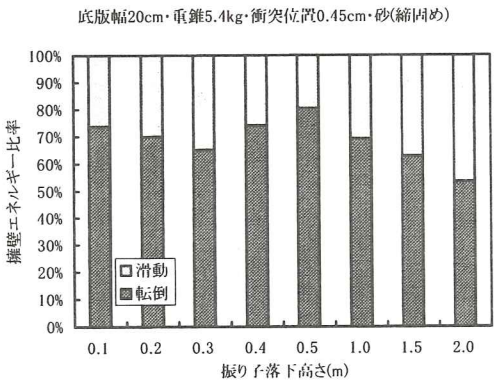


(b) 底版幅35cm

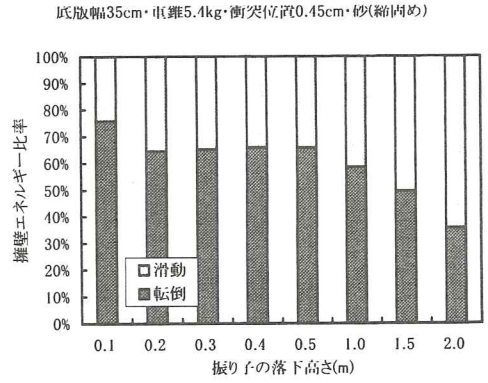


(c) 底版幅50cm

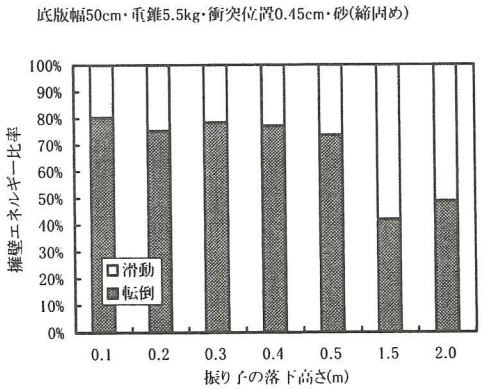
図5.5 衝突後の運動エネルギーの分担比率（底版幅別）



(a) 底版幅20cm



(b) 底版幅35cm



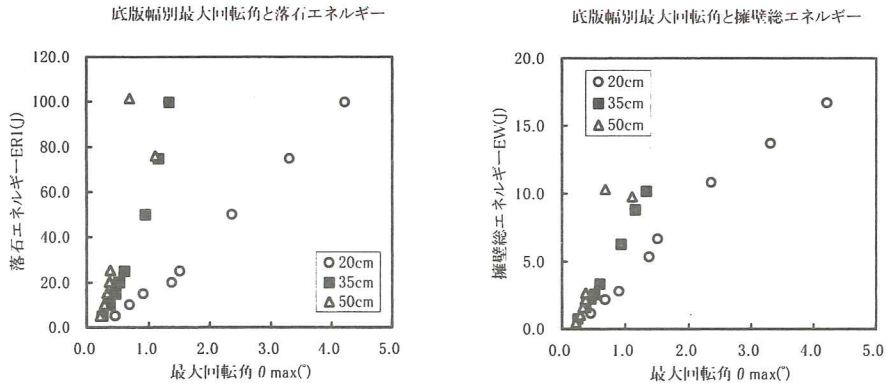
(c) 底版幅50cm

図5.6 滑動変形、回転変形により消費されたエネルギーの比率（底版幅別）

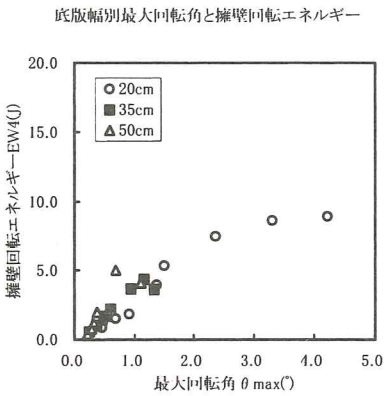
表5.1　重錘の衝突前後のエネルギーと擁壁に伝達したエネルギー

実験条件	ケース 番号	実験番号	振り子高さ h0 (m)	衝突位置 h (m)	エネルギー 衝突前 ER1 (J)	衝突後 ER2 (J)	擁壁 EW1 (J)	消散 ΔE (J)	滑動 EW2 (J)	転倒 EW4 (J)	ER2 ER1 (%)	ΔE ER1 (%)	EW1 ER1 (%)	EW2 EW1 (%)	EW4 EW1 (%)	回転度 限界回転角 θF(°)	回転度 回転安全度 θF/θmax	落石と擁壁の速度比 V／v0
底版幅0.35m 重錘5.4kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	1- 1	SBA0191	0.10	0.45	4.988	12.402	0.739	-8.153	0.052	0.687	248.6%	-163.4%	14.8%	7.0%	93.00%	41.406	165.626	0.02905
	1- 1	SBA0291	0.20	0.45	9.977	31.006	1.597	-22.626	0.214	1.383	310.8%	-226.8%	16.0%	13.4%	86.61%	41.406	111.909	0.03020
	1- 1	SBA0391	0.30	0.45	14.965	38.548	2.243	-25.825	0.282	1.961	257.6%	-172.6%	15.0%	12.6%	87.41%	41.406	90.014	0.02923
	1- 1	SBA0491	0.40	0.45	19.954	32.310	2.586	-14.941	0.304	2.281	161.9%	-74.9%	13.0%	11.8%	88.23%	41.406	79.628	0.02718
	1- 1	SBA0595	0.50	0.45	24.942	45.313	3.344	-23.714	0.436	2.908	181.7%	-95.1%	13.4%	13.0%	86.96%	41.406	69.011	0.02764
	1- 1	SBA1094	1.00	0.45	49.885	72.051	6.258	-28.424	1.473	4.785	144.4%	-57.0%	12.5%	23.5%	76.46%	41.406	44.049	0.02674
	1- 1	SBA1591	1.50	0.45	74.827	84.510	8.794	-18.477	3.055	5.739	112.9%	-24.7%	11.8%	34.7%	65.26%	41.406	35.695	0.02588
	1- 1	SBA2092	2.00	0.45	99.769	59.632	10.162	29.975	4.957	5.204	59.8%	30.0%	10.2%	48.8%	51.22%	41.406	31.133	0.02409
底版幅0.35m 重錘2.6kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	1- 4	SBD0191	0.10	0.45	4.988	12.658	0.342	-8.011	0.026	0.316	253.7%	-160.6%	6.8%	7.5%	92.45%	41.406	295.760	0.02915
	1- 4	SBD0291	0.20	0.45	9.977	13.533	0.565	-4.121	0.068	0.497	135.6%	-41.3%	5.7%	12.0%	88.04%	41.406	230.036	0.02651
	1- 4	SBD0391	0.30	0.45	14.965	27.736	0.927	-13.697	0.034	0.893	185.3%	-91.5%	6.2%	3.7%	96.33%	41.406	180.028	0.02772
	1- 4	SBD0491	0.40	0.45	19.954	52.479	1.383	-33.907	0.042	1.340	263.0%	-169.9%	6.9%	3.1%	96.93%	41.406	159.256	0.02933
	1- 4	SBD0591	0.50	0.45	24.942	61.522	1.691	-38.271	0.046	1.645	246.7%	-153.4%	6.8%	2.7%	97.27%	41.406	138.021	0.02901
	1- 4	SBD1091	1.00	0.45	49.885	39.367	2.472	8.045	0.047	2.425	78.9%	16.1%	5.0%	1.9%	98.11%	41.406	96.294	0.02480
	1- 4	SBD1592	1.50	0.45	74.827	100.748	4.227	-30.148	0.096	4.131	134.6%	-40.3%	5.6%	2.3%	97.72%	41.406	82.813	0.02648
	1- 4	SBD2091	2.00	0.45	99.769	136.699	5.663	-42.593	0.123	5.540	137.0%	-42.7%	5.7%	2.2%	97.82%	41.406	66.785	0.02655
底版幅0.35m 重錘11.1kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	1- 2	SBB0391	0.30	0.45	14.965	20.804	6.022	-11.860	0.952	5.070	139.0%	-79.3%	40.2%	15.8%	84.19%	41.406	36.321	0.02660
	1- 2	SBB0491	0.40	0.45	19.954	17.912	7.190	-5.148	1.302	5.887	89.8%	-25.8%	36.0%	18.1%	81.88%	41.406	33.940	0.02517
	1- 2	SBB0592	0.50	0.45	24.942	27.928	9.482	-12.468	2.788	6.694	112.0%	-50.0%	38.0%	29.4%	70.59%	41.406	29.576	0.02585
	1- 2	SBB1092	1.00	0.45	49.885	45.675	18.058	-13.848	8.593	9.464	91.6%	-27.8%	36.2%	47.6%	52.41%	41.406	20.297	0.02523
	1- 2	SBB1591	1.50	0.45	74.827	56.699	25.953	-7.826	14.390	11.563	75.8%	-10.5%	34.7%	55.4%	44.55%	41.406	15.450	0.02469
	1- 2	SBB2092	2.00	0.45	99.769	37.089	30.241	32.440	18.659	11.582	37.2%	32.5%	30.3%	61.7%	38.30%	41.406	12.899	0.02308
底版幅0.20m 重錘5.4kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	2- 1	SAA0191	0.10	0.45	4.988	13.401	1.156	-9.568	0.061	1.095	268.6%	-191.8%	23.2%	5.3%	94.73%	26.565	57.750	0.04579
	2- 1	SAA0291	0.20	0.45	9.977	22.024	2.166	-14.213	0.154	2.012	220.8%	-142.5%	21.7%	7.1%	92.89%	26.565	38.500	0.04432
	2- 1	SAA0391	0.30	0.45	14.965	20.013	2.802	-7.849	0.278	2.524	133.7%	-52.4%	18.7%	9.9%	90.07%	26.565	29.192	0.04116
	2- 1	SAA0491	0.40	0.45	19.954	78.789	5.324	-64.160	0.315	5.009	394.9%	-321.5%	26.7%	5.9%	94.08%	26.565	19.250	0.04913
	2- 1	SAA0592	0.50	0.45	24.942	98.275	6.649	-79.982	0.175	6.474	394.0%	-320.7%	26.7%	2.6%	97.37%	26.565	17.593	0.04911
	2- 1	SAA1091	1.00	0.45	49.885	108.878	10.790	-69.784	1.513	9.277	218.3%	-139.9%	21.6%	14.0%	85.98%	26.565	11.256	0.04424
	2- 1	SAA1591	1.50	0.45	74.827	91.660	13.687	-30.520	2.522	11.165	122.5%	-40.8%	18.3%	18.4%	81.57%	26.565	8.026	0.04068
	2- 1	SAA2091	2.00	0.45	99.769	84.448	16.676	-1.355	4.504	12.172	84.6%	-1.4%	16.7%	27.0%	72.99%	26.565	6.295	0.03889
底版幅0.50m 重錘5.5or5.4kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	2- 2	SCA0191	0.10	0.45	4.988	25.824	0.661	-21.496	0.098	0.563	517.7%	-430.9%	13.2%	14.8%	85.16%	50.856	423.800	0.02491
	2- 2	SCA0192	0.10	0.45	4.988	8.887	0.461	-4.359	0.012	0.449	178.1%	-87.4%	9.2%	2.6%	97.42%	50.856	231.164	0.02058
	2- 2	SCA0291	0.20	0.45	9.977	63.155	1.442	-54.619	0.216	1.226	633.0%	-547.5%	14.4%	15.0%	85.03%	50.856	317.850	0.02602
	2- 2	SCA0292	0.20	0.45	9.977	24.253	1.017	-15.293	0.062	0.955	243.1%	-153.3%	10.2%	6.1%	93.89%	50.856	175.366	0.02161
	2- 2	SCA0391	0.30	0.45	14.965	24.019	1.311	-10.365	0.372	0.940	160.5%	-69.3%	8.8%	28.4%	71.65%	50.856	267.663	0.02026
	2- 2	SCA0392	0.30	0.45	14.965	41.412	1.594	-28.041	0.090	1.504	276.7%	-187.4%	10.7%	5.6%	94.36%	50.856	154.109	0.02209
	2- 2	SCA0491	0.40	0.45	19.954	158.861	3.204	-142.110	0.538	2.666	796.1%	-712.2%	16.1%	16.8%	83.21%	50.856	242.171	0.02743
	2- 2	SCA0492	0.40	0.45	19.954	57.439	2.155	-39.640	0.145	2.010	287.9%	-198.7%	10.8%	6.7%	93.28%	50.856	137.449	0.02225
	2- 2	SCA0591	0.50	0.45	24.942	53.560	2.388	-31.005	0.536	1.852	214.7%	-124.3%	9.6%	22.5%	77.55%	50.856	254.280	0.02118
	2- 2	SCA0592	0.50	0.45	24.942	69.006	2.657	-46.720	0.258	2.398	276.7%	-187.3%	10.7%	9.7%	90.28%	50.856	133.832	0.02209
	2- 2	SCA1091	1.00	0.45	49.885	143.129	5.381	-98.625	1.153	4.228	286.9%	-197.7%	10.8%	21.4%	78.56%	50.856	94.178	0.02223
	2- 2	SCA1592	1.50	0.45	74.827	342.887	9.636	-277.696	3.868	5.767	458.2%	-371.1%	12.9%	40.1%	59.85%	50.856	45.816	0.02429
	2- 2	SCA2091	2.00	0.45	99.769	243.994	10.190	-154.414	4.174	6.015	244.6%	-154.8%	10.2%	41.0%	59.03%	50.856	73.704	0.02163
底版幅0.50m 重錘11.1kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	2- 2	SCB0191	0.10	0.45	4.988	15.758	1.714	-12.483	0.580	1.134	315.9%	-250.2%	34.3%	33.8%	66.17%	50.856	188.356	0.02262
	2- 2	SCB0291	0.20	0.45	9.977	29.870	3.362	-23.254	1.437	1.924	299.4%	-233.1%	33.7%	42.8%	57.25%	50.856	169.520	0.02240
	2- 2	SCB0391	0.30	0.45	14.965	39.772	4.837	-29.644	2.604	2.233	265.8%	-198.1%	32.3%	53.8%	46.16%	50.856	133.832	0.02194
	2- 2	SCB0491	0.40	0.45	19.954	53.152	6.454	-39.653	3.912	2.543	266.4%	-198.7%	32.3%	60.6%	39.40%	50.856	118.270	0.02195
	2- 2	SCB0591	0.50	0.45	24.942	49.495	7.329	-31.881	4.943	2.386	198.4%	-127.8%	29.4%	67.4%	32.56%	50.856	115.582	0.02092
	2- 2	SCB1091	1.00	0.45	49.885	86.810	14.085	-51.011	11.742	2.343	174.0%	-102.3%	28.2%	83.4%	16.63%	50.856	42.736	0.02051
	2- 2	SCB1591	1.50	0.45	74.827	127.313	20.988	-73.473	15.440	5.548	170.1%	-98.2%	28.0%	73.6%	26.43%	50.856	46.657	0.02044
	2- 2	SCB2091	2.00	0.45	99.769	93.677	23.911	-17.819	21.226	2.685	93.9%	-17.9%	24.0%	88.8%	11.23%	50.856	28.411	0.01889

底版幅0.20m 重錘11.1kg 衝突位置0.45m 砂(締固め)	2- 2	SAB0191	0.10	0.45	4.988	8.107	3.178	-6.296	0.762	2.416	162.5%	-126.2%	63.7%	24.0%	76.01%	26.565	78.133	0.04229
	2- 2	SAB0291	0.20	0.45	9.977	16.607	6.400	-13.031	0.812	5.589	166.5%	-130.6%	64.2%	12.7%	87.32%	26.565	19.391	0.04244
	2- 2	SAB0391	0.30	0.45	14.965	24.884	9.598	-19.517	3.350	6.248	166.3%	-130.4%	64.1%	34.9%	65.10%	26.565	31.625	0.04244
	2- 2	SAB0491	0.40	0.45	19.954	22.584	11.524	-14.154	3.421	8.103	113.2%	-70.9%	57.8%	29.7%	70.32%	26.565	9.839	0.04027
	2- 2	SAB0591	0.50	0.45	24.942	10.336	11.664	2.943	3.783	7.880	41.4%	11.8%	46.8%	32.4%	67.56%	26.565	6.448	0.03624
	2- 2	SAB1091	1.00	0.45	49.885	31.705	25.263	-7.084	8.348	16.915	63.6%	-14.2%	50.6%	33.0%	66.95%	26.565	3.664	0.03771
	2- 2	SAB1591	1.50	0.45	74.827	20.272	32.743	21.812	13.252	19.491	27.1%	29.1%	43.8%	40.5%	59.53%	26.565	2.750	0.03505
	2- 2	SAB2091	2.00	0.45	99.769	6.891	37.712	55.167	17.116	20.596	6.9%	55.3%	37.8%	45.4%	54.61%	26.565	2.349	0.03258
底版幅0.35m 重錘5.6kg 衝突位置0.35m 砂(締固め)	2- 4	SBA0173	0.10	0.35	4.988	22.291	0.518	-17.821	0.020	0.499	446.9%	-357.2%	10.4%	3.8%	96.20%	41.406	207.032	0.03237
	2- 4	SBA0271	0.20	0.35	9.977	23.598	0.822	-14.443	0.129	0.692	236.5%	-144.8%	8.2%	15.7%	84.28%	41.406	159.256	0.02881
	2- 4	SBA0371	0.30	0.35	14.965	37.280	1.254	-23.568	0.218	1.036	249.1%	-157.5%	8.4%	17.4%	82.63%	41.406	125.474	0.02906
	2- 4	SBA0471	0.40	0.35	19.954	56.120	1.743	-37.909	0.246	1.496	281.3%	-190.0%	8.7%	14.1%	85.87%	41.406	106.170	0.02967
	2- 4	SBA0571	0.50	0.35	24.942	67.984	2.155	-45.196	0.261	1.894	272.6%	-181.2%	8.6%	12.1%	87.88%	41.406	94.106	0.02951
	2- 4	SBA1072	1.00	0.35	49.885	138.607	4.338	-93.060	1.156	3.182	277.9%	-186.6%	8.7%	26.6%	73.36%	41.406	44.523	0.02961
底版幅0.35m 重錘5.6kg 衝突位置0.25m 砂(締固め)	2- 4	SBA0151	0.10	0.25	4.988	17.868	0.271	-13.151	0.000	0.271	358.2%	-263.6%	5.4%	0.0%	100.00%	41.406	276.043	0.03100
	2- 4	SBA0251	0.20	0.25	9.977	33.640	0.530	-24.193	0.037	0.493	337.2%	-242.5%	5.3%	6.9%	93.10%	41.406	165.626	0.03065
	2- 4	SBA0351	0.30	0.25	14.965	48.232	0.782	-34.048	0.059	0.722	322.3%	-227.5%	5.2%	7.6%	92.43%	41.406	133.569	0.03040
	2- 4	SBA0451	0.40	0.25	19.954	66.345	1.054	-47.445	0.086	0.968	332.5%	-237.8%	5.3%	8.1%	91.86%	41.406	118.304	0.03058
	2- 4	SBA0551	0.50	0.25	24.942	83.183	1.319	-59.560	0.099	1.220	333.5%	-238.8%	5.3%	7.5%	92.50%	41.406	108.964	0.03059
	2- 4	SBA1051	1.00	0.25	49.885	169.497	2.656	-122.269	0.550	2.107	339.8%	-245.1%	5.3%	20.7%	79.31%	41.406	73.940	0.03070
底版幅0.35m 重錘5.6kg 衝突位置0.15m 砂(締固め)	2- 4	SBA0131	0.10	0.15	4.988	17.565	0.277	-12.853	0.025	0.252	352.1%	-257.7%	5.6%	9.2%	90.84%	41.406	460.071	0.03090
	2- 4	SBA0231	0.20	0.15	9.977	32.515	0.538	-23.076	0.088	0.451	325.9%	-231.3%	5.4%	16.3%	83.73%	41.406	295.760	0.03046
	2- 4	SBA0331	0.30	0.15	14.965	57.899	0.861	-43.795	0.127	0.735	386.9%	-292.6%	5.8%	14.7%	85.30%	41.406	276.043	0.03146
	2- 4	SBA0431	0.40	0.15	19.954	66.933	1.088	-48.068	0.220	0.869	335.4%	-240.9%	5.5%	20.2%	79.81%	41.406	217.929	0.03063
	2- 4	SBA1031	1.00	0.15	49.885	177.637	2.782	-130.534	1.595	1.187	356.1%	-261.7%	5.6%	57.3%	42.68%	41.406	159.256	0.03097
底版幅0.20m 重錘5.6kg 衝突位置0.15m 砂(締固め)	2- 3	SAA0131	0.10	0.15	4.988	18.571	0.491	-14.074	0.136	0.355	372.3%	-282.1%	9.8%	27.7%	72.31%	26.565	204.347	0.04858
	2- 3	SAA0231	0.20	0.15	9.977	31.351	0.922	-22.296	0.352	0.570	314.2%	-223.5%	9.2%	38.2%	61.83%	26.565	147.584	0.04707
	2- 3	SAA0331	0.30	0.15	14.965	61.478	1.530	-48.043	0.491	1.039	410.8%	-321.0%	10.2%	32.1%	67.92%	26.565	110.688	0.04951
	2- 3	SAA0431	0.40	0.15	19.954	50.924	1.715	-32.685	0.761	0.954	255.2%	-163.8%	8.6%	44.4%	55.62%	26.565	106.260	0.04539
	2- 3	SAA0531	0.50	0.15	24.942	67.729	2.190	-44.976	0.755	1.435	271.5%	-180.3%	8.8%	34.5%	65.53%	26.565	75.900	0.04588
底版幅0.20m 重錘5.6kg 衝突位置0.25m 砂(締固め)	2- 3	SAA0151	0.10	0.25	4.988	17.051	0.394	-12.456	0.046	0.348	341.8%	-249.7%	7.9%	11.7%	88.31%	26.565	120.750	0.04781
	2- 3	SAA0251	0.20	0.25	9.977	36.319	0.806	-27.148	0.086	0.720	364.0%	-272.1%	8.1%	10.7%	89.32%	26.565	80.500	0.04837
	2- 3	SAA0351	0.30	0.25	14.965	56.342	1.224	-42.601	0.134	1.091	376.5%	-284.7%	8.2%	10.9%	89.09%	26.565	64.793	0.04868
	2- 3	SAA0451	0.40	0.25	19.954	124.598	2.012	-106.656	0.183	1.830	624.4%	-534.5%	10.1%	9.1%	90.93%	26.565	53.130	0.05405
	2- 3	SAA0551	0.50	0.25	24.942	39.483	1.529	-16.069	0.241	1.288	158.3%	-64.4%	6.1%	15.8%	84.24%	26.565	43.549	0.04214
	2- 3	SAA1051	1.00	0.25	49.885	172.865	3.956	-126.936	0.518	3.438	346.5%	-254.5%	7.9%	13.1%	86.90%	26.565	24.827	0.04793
底版幅0.20m 重錘5.6kg 衝突位置0.35m 砂(締固め)	2- 3	SAA0171	0.10	0.35	4.988	15.799	0.662	-11.472	0.058	0.604	316.7%	-230.0%	13.3%	8.7%	91.29%	26.565	106.260	0.04714
	2- 3	SAA0271	0.20	0.35	9.977	35.578	1.383	-26.984	0.061	1.322	356.6%	-270.5%	13.9%	4.4%	95.58%	26.565	60.375	0.04819
	2- 3	SAA0371	0.30	0.35	14.965	44.861	1.946	-31.842	0.062	1.884	299.8%	-212.8%	13.0%	3.2%	96.81%	26.565	40.250	0.04668
	2- 3	SAA0471	0.40	0.35	19.954	53.905	2.502	-36.454	0.105	2.397	270.2%	-182.7%	12.5%	4.2%	95.79%	26.565	34.500	0.04584
	2- 3	SAA0571	0.50	0.35	24.942	71.422	3.192	-49.672	0.118	3.074	286.3%	-199.1%	12.8%	3.7%	96.30%	26.565	27.387	0.04630
	2- 3	SAA1071	1.00	0.35	49.885	70.313	5.117	-25.546	0.252	4.865	141.0%	-51.2%	10.3%	4.9%	95.08%	26.565	16.708	0.04145
底版幅0.35m 重錘5.6kg 衝突位置0.45m コンクリート	2- 5	CBA0191	0.10	0.45	4.988	15.676	0.851	-11.539	0.024	0.827	314.3%	-231.3%	17.1%	2.8%	97.22%	41.406	207.032	0.03026
	2- 5	CBA0291	0.20	0.45	9.977	28.315	1.641	-19.979	0.000	1.641	283.8%	-200.2%	16.4%	0.0%	100.00%	41.406	115.018	0.02972
	2- 5	CBA0391	0.30	0.45	14.965	173.034	4.528	-162.597	0.087	4.441	1156.2%	-1086.5%	30.3%	1.9%	98.08%	41.406	64.698	0.04031
	2- 5	CBA0491	0.40	0.45	19.954	200.620	5.620	-186.286	0.000	5.620	1005.4%	-933.6%	28.2%	0.0%	100.00%	41.406	50.496	0.03889
	2- 5	CBA0591	0.50	0.45	24.942	92.048	4.515	-71.621	0.336	4.179	369.0%	-287.1%	18.1%	7.4%	92.56%	41.406	47.053	0.03118
	2- 5	CBA1091	1.00	0.45	49.885	6.427	2.718	40.740	0.620	2.098	12.9%	81.7%	5.4%	22.8%	77.18%	41.406	31.369	0.01711
	2- 5	CBA1591	1.50	0.45	74.827	566.919	18.370	-510.462	1.180	17.190	757.6%	-682.2%	24.5%	6.4%	93.57%	41.406	23.262	0.03631
	2- 5	CBA1592	1.50	0.45	74.827	0.372	4.970	69.485	1.085	3.885	0.5%	92.9%	6.6%	21.8%	78.18%	41.406	21.793	0.01889
	2- 5	CBA2091	2.00	0.45	99.769	0.126	7.094	92.550	3.416	3.678	0.1%	92.8%	7.1%	48.1%	51.85%	41.406	19.812	0.01954
底版幅0.20m 重錘5.6kg 衝突位置0.45m 砂(締固めなし)	2- 6	TAA0191	0.10	0.45	4.988	14.438	1.258	-10.708	0.024	1.234	289.4%	-214.7%	25.2%	1.9%	98.07%	26.565	30.535	0.04639
	2- 6	TAA0592	0.50	0.45	24.942	78.189	6.474	-59.721	7.320	-0.846	313.5%	-239.4%	26.0%	113.1%	-13.07%	26.565	10.755	0.04705
	2- 6	TAA1092	1.00	0.45	49.885	105.256	11.323	-66.694	8.951	2.372	211.0%	-133.7%	22.7%	79.1%	20.95%	26.565	7.859	0.04400



(a) 落石エネルギーER1　　(b) 擁壁総エネルギーEW



(c) 擁壁回転エネルギーEW4

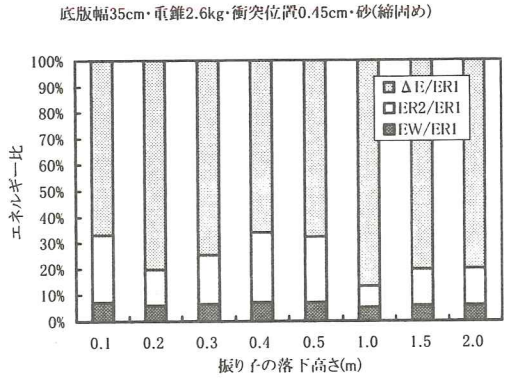
図5.7　最大回転角と各運動エネルギーの関係（底版幅別）

2)重錘質量の影響

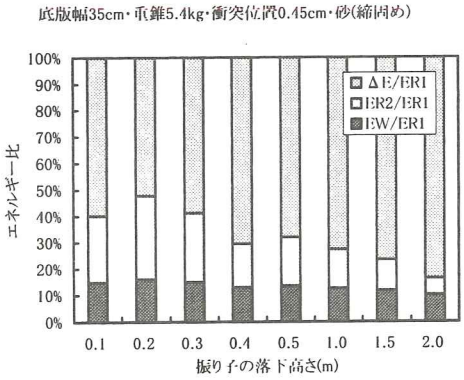
図5.8に、衝突後の落石の運動エネルギーE_{R2}、衝突後の擁壁の運動エネルギーE_{W1}および衝突により消散したエネルギーΔEの、衝突前の落石の運動エネルギーE_{R1}に対する比率を示す。図は締め固めた砂地盤上に設置した底版幅0.35mの擁壁に、重錘を底面より0.45mの位置に衝突させた実験において、重錘質量を変化させたときの結果をまとめている。図(a)、(b)および(c)は、それぞれ重錘質量3kg、5kg、10kgの結果である。重錘質量が小さいと消散エネルギーΔEが若干大きく、重錘質量が大きいほど、すなわち重錘エネルギーが大きいほど擁壁に伝達されたエネルギーの比E_W/E_{R1}は大きくなっている。

図5.9に、底版幅0.35mの擁壁に、重錘を底面より0.45mの位置に衝突させた時の、擁壁の滑動変形により消費されたエネルギーと回転変形により消費されたエネルギーの比率を示す。重錘質量が大きく落下高さが高いほど、すなわち重錘の運動エネルギーが大きいほど、回転変形によるエネルギー吸収が増加していることがわかる。

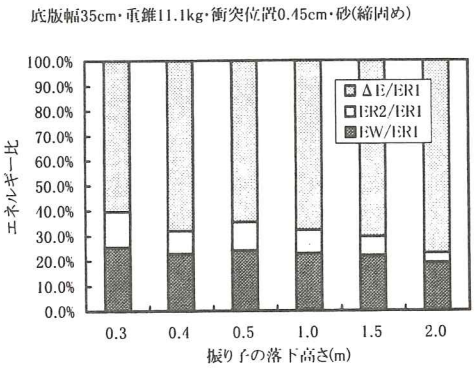
図5.10は最大回転角と重錘エネルギーE_{R1}、擁壁に伝達したエネルギーE_W、および擁壁の回転エネルギーE_{W4}の関係である。重錘エネルギーE_{R1}の増加に伴い回転角は増加する傾向にあるが、その関係は重錘質量毎に異なっている。これは、重錘質量により擁壁に伝達されるエネルギーが異なることに対応している。擁壁に伝達したエネルギーE_W、および擁壁の回転エネルギーE_{W4}と回転角θの関係は、重錘の質量によらずほぼ一定の関係が見られる。



(a) 重錘質量2.6kg

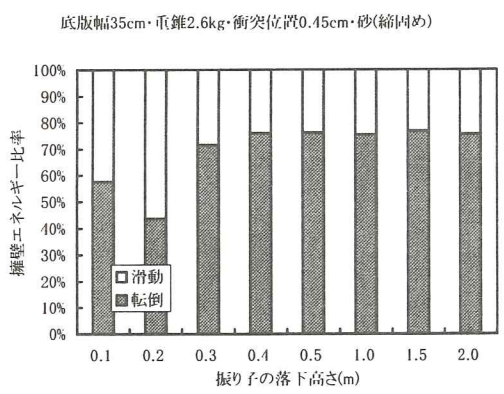


(b) 重錘質量5.4kg

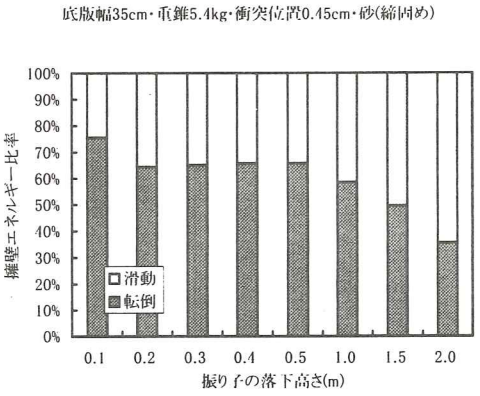


(c) 重錘質量11.1kg

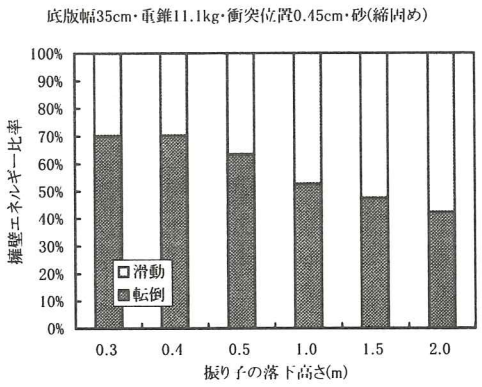
図5.8 衝突後の運動エネルギーの分担比率（重錘質量別）



(a) 重錘質量2.6kg

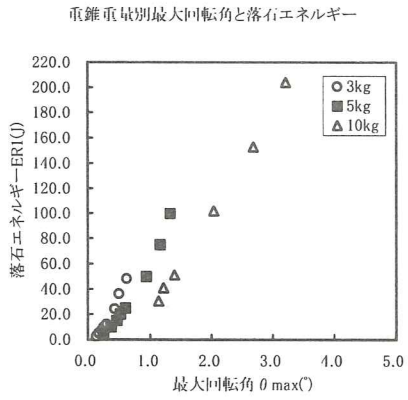


(b) 重錘質量5.4kg

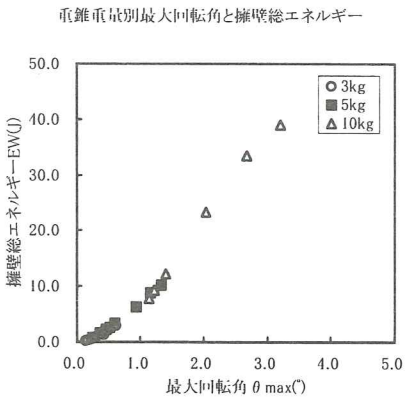


(c) 重錘質量11.1kg

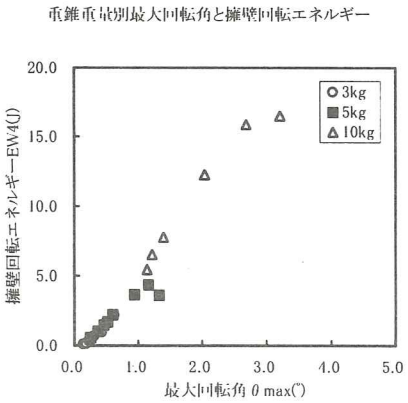
図5.9 滑動変形、回転変形により消費されたエネルギーの比率（重錘質量別）



(a) 落石エネルギーER1



(b) 擁壁総エネルギーEW



(c) 擁壁回転エネルギーEW4

図5.10　最大回転角と各運動エネルギーの関係（重錘質量別）

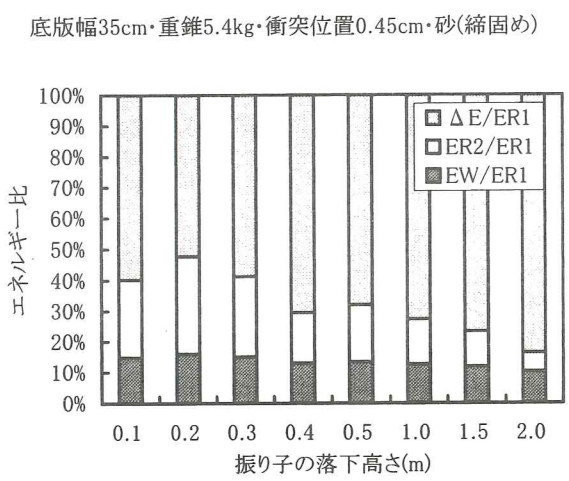
3)落石作用位置の影響

図5.11に締め固めた砂地盤上に設置した底版幅0.35mの擁壁に、質量5kg重錘を衝突させた実験において、重錘衝突位置を変化させたときの、衝突後の落石の運動エネルギーE_{R2}、衝突後の擁壁の運動エネルギーE_{W1}および衝突により消散したエネルギーΔEの衝突前の落石の運動エネルギーE_{R1}(=1/2・$m_0 v_0^2$)に対する比率を示す。(a)、(b)および(c)は、それぞれ重錘衝突高さ0.45m、0.15m、0.25mおよび0.15mの結果である。重錘衝突高さが小さいほど、擁壁に伝達されたエネルギーの比E_W/E_{R1}は小さくなっている。

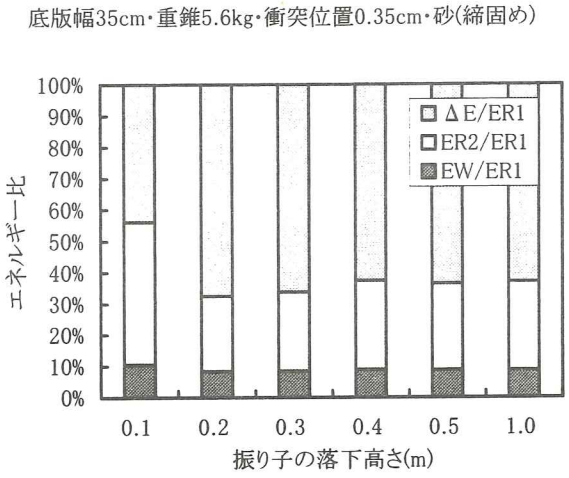
図5.12に、底面より0.45mおよび0.15mの位置に重錘を衝突させた時の、擁壁の滑動変形により消費されたエネルギーと回転変形により消費されたエネルギーの比率を示す。重錘の衝突位置に関わらず、回転変形が卓越していることがわかるが、衝突位置の低い0.15mの方が滑動変形に費やされるエネルギーの割合が若干大きくなる傾向が見られる。

図5.13に、締め固めた砂地盤上に設置した底版幅0.20mの擁壁の結果を示す。底版幅0.35mの場合と同様に、重錘衝突位置が高いほど擁壁への伝達エネルギーが大きくなる傾向が見られる。したがって、設計を考える場合は、擁壁頂部への落石の衝突について検討することが適切であると考えられる。

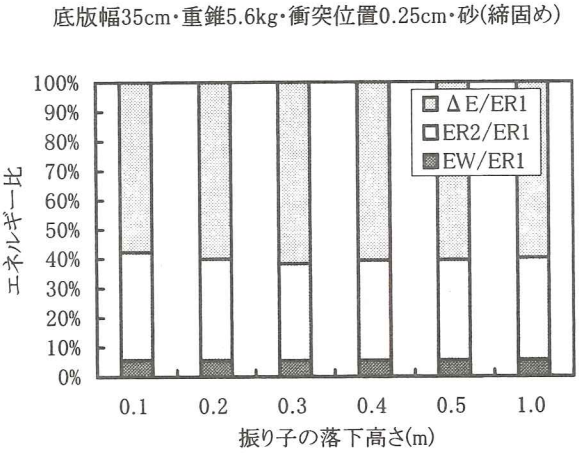
図5.14に、底面幅0.2mの擁壁のケースにおける、底面より0.45mおよび0.15mの位置に重錘を衝突させた時の、擁壁の滑動変形により消費されたエネルギーと回転変形により消費されたエネルギーの比率を示す。衝突位置の低い0.15mの方が滑動変形に費やされるエネルギーの割合が大きくなる傾向が、底版幅0.3mのケ



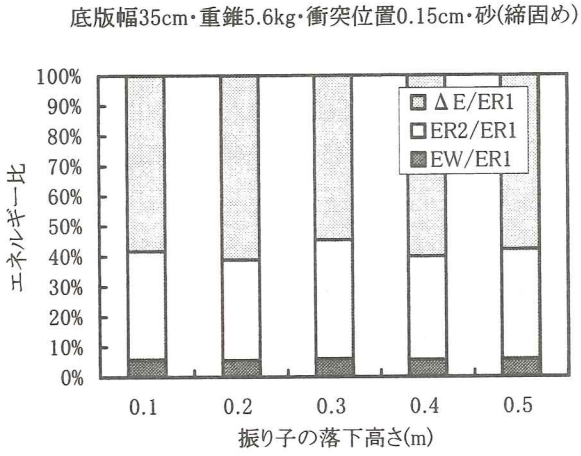
(a)落石衝突位置0.45m



(b)落石衝突位置0.35m

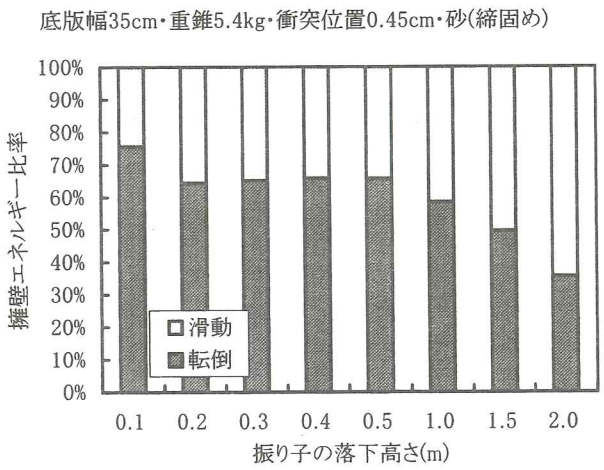


(c)落石衝突位置0.25m

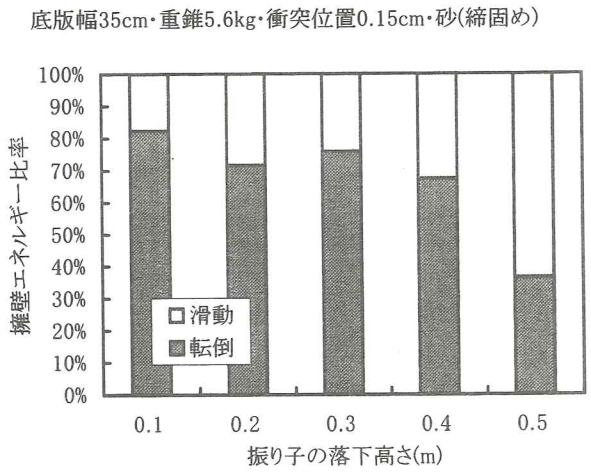


(d)落石衝突位置0.15m

図 5.11　衝突後の運動エネルギーの分担比率（衝突高さ別、底版幅 0.35m）

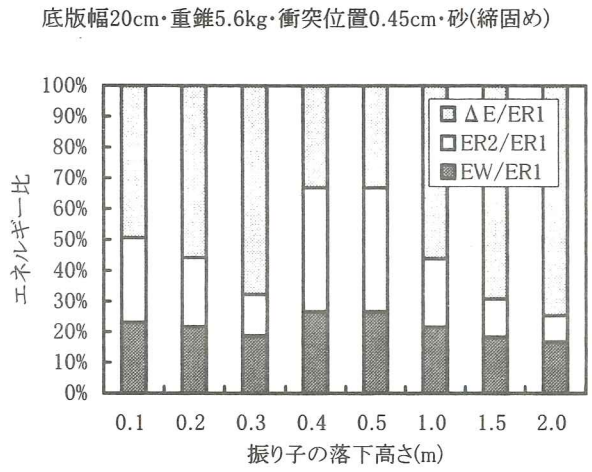


(a)落石衝突位置0.45m

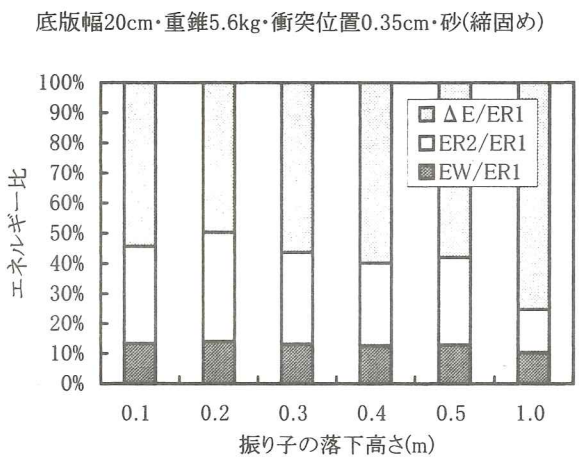


(b)落石衝突位置0.15m

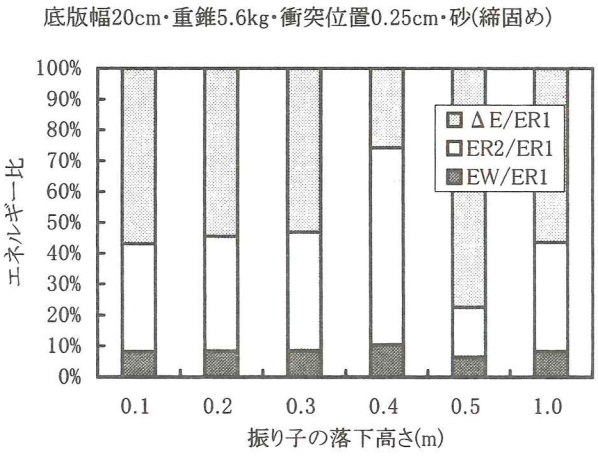
図 5.12　滑動変形、回転変形により消費されたエネルギーの比率（衝突高さ別、底版幅 0.35m）



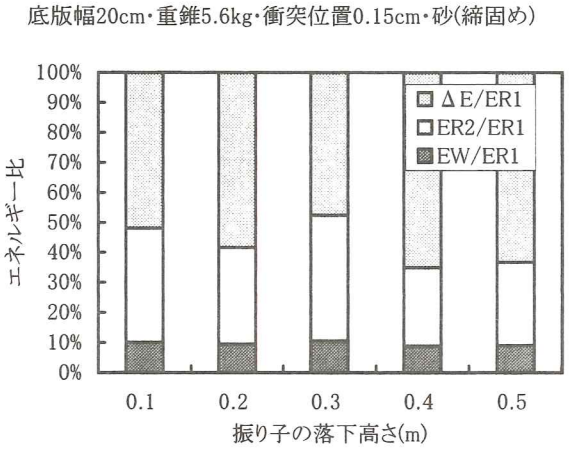
(a)落石衝突位置0.45m



(b)落石衝突位置0.35m

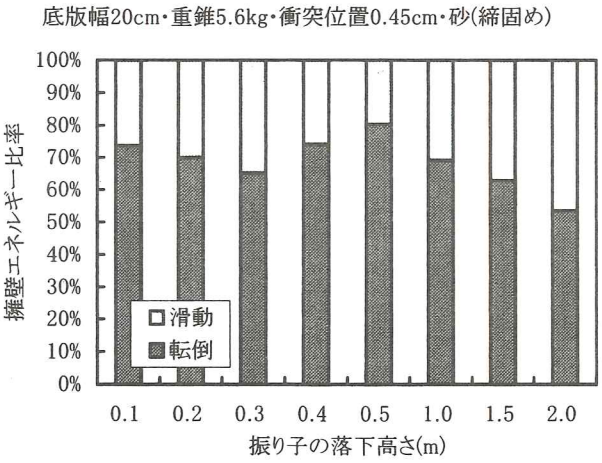


(c)落石衝突位置0.25m

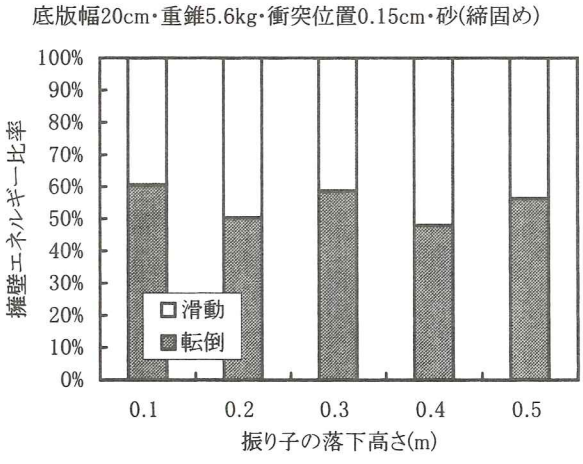


(d)落石衝突位置0.15m

図 5.13　衝突後の運動エネルギーの分担比率（衝突高さ別、底版幅 0.20m）

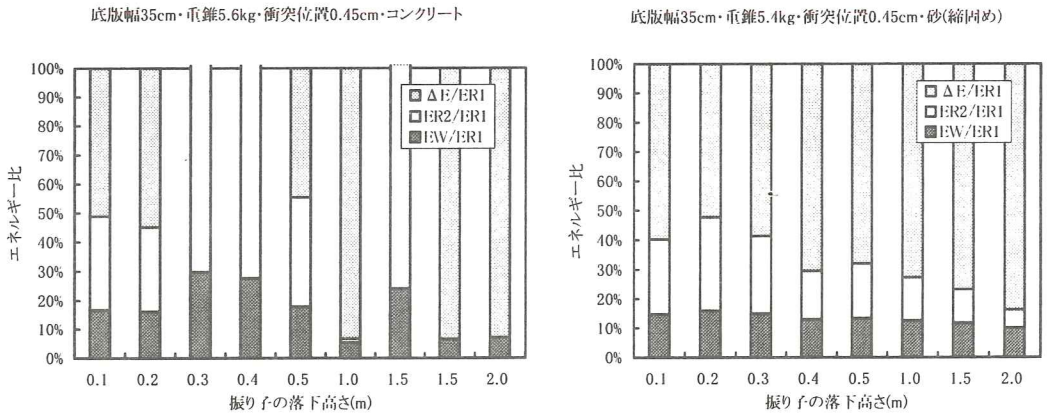


(a)落石衝突位置0.45m



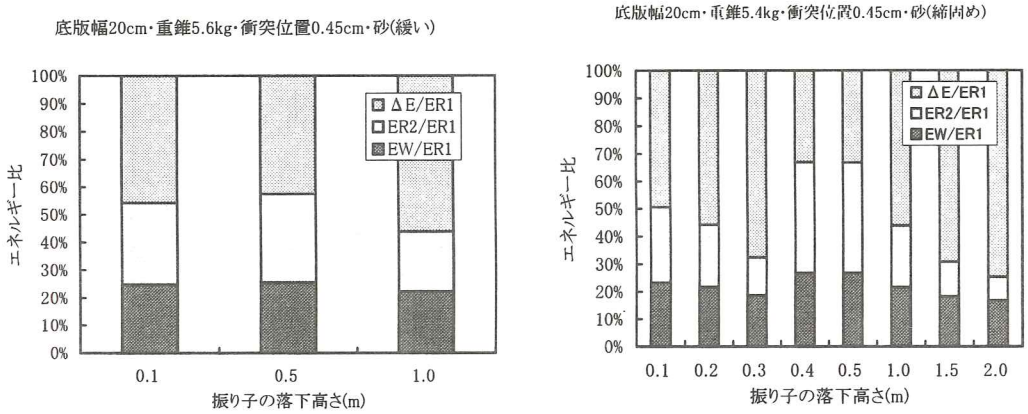
(b)落石衝突位置0.15m

図 5.14　滑動変形、回転変形により消費されたエネルギー（衝突高さ別、底版幅 0.20m）



(a) コンクリート地盤　　(b) 締め固めた砂地盤

図5.15　衝突後の運動エネルギーの分担比率（コンクリートと締め固めた砂地盤）



(a) 緩い砂地盤　　(b) 締め固めた砂地盤

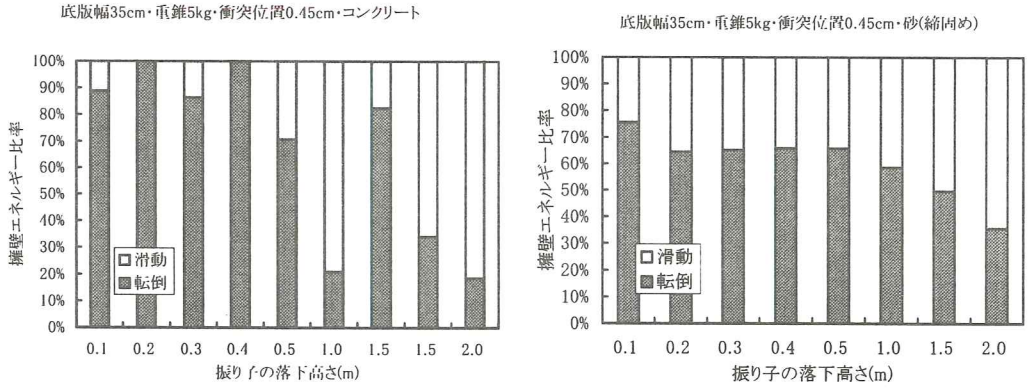
図5.16　衝突後の運動エネルギーの分担比率（緩い砂と締め固めた砂地盤）

ースよりも強く見られる。

4)地盤の硬さの影響

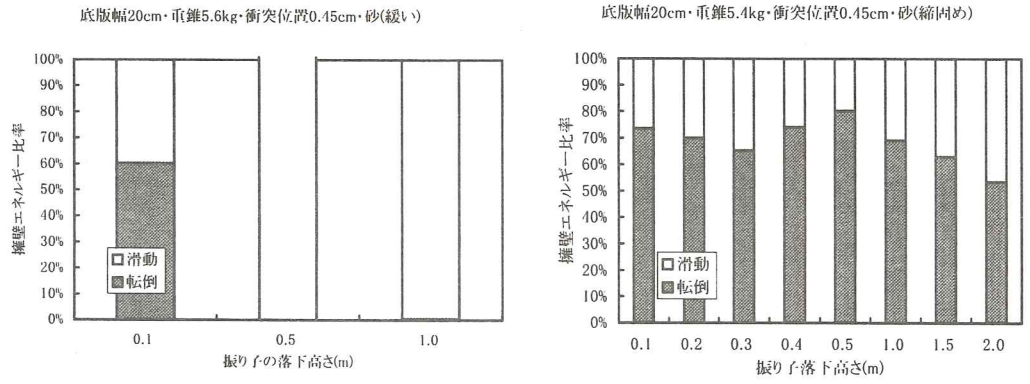
図5.15に底版幅0.35mの擁壁に、質量5kg重錘を衝突させた実験において、締め固めた砂地盤とコンクリート上に設置した場合の、衝突後の落石の運動エネルギーE_{R2}、衝突後の擁壁の運動エネルギーE_{W1}および衝突により消散したエネルギーΔEの衝突前の落石の運動エネルギーE_{R1}に対する比率を示す。また、**図5.16**に底版幅0.20mの擁壁に、質量5kg重錘を衝突させた実験において、締め固めた砂地盤と締め固めていない砂地盤上に設置した場合の結果を示す。擁壁に伝達する運動エネルギーは地盤の強度にはあまり依存しないことがわかる。

図5.17および**図5.18**に、底面より0.45mの位置に重錘を衝突させた時の、擁壁の滑動変形により消費されたエネルギーと回転変形により消費されたエネルギーの比率を示す。いずれの条件でも、重錘の落下高さが大きく、すなわち重錘の運動エネルギーが大きくなると、滑動変形による吸収エネルギーが大きくなっていく。締め固めた砂地盤と緩い砂地盤の場合では、同じ重錘落下高さでは、緩い砂地盤の方が滑動変形に費や



(a) コンクリート地盤　　(b) 締め固めた砂地盤

図5.17 滑動変形、回転変形により消費されたエネルギーの比率(コンクリートと締め固めた砂地盤)



(a) 緩い砂地盤　　(b) 締め固めた砂地盤

図5.18 滑動変形、回転変形により消費されたエネルギーの比率(緩い砂と締め固めた砂地盤)

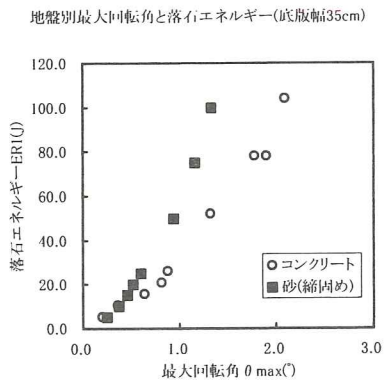
されるエネルギーの割合が大きくなる傾向が見られるが、コンクリートと締め固めた砂地盤では、実験のばらつきもあり、明瞭な関係は見られない。

図5.19および**図5.20**に、最大回転角と重錘エネルギーE_{R1}、擁壁に伝達したエネルギーE_W、および擁壁の回転エネルギーE_{W4}の関係を示す。重錘エネルギーE_{R1}の増加に伴い回転角は増加する傾向にあるが、締め固めた地盤に対し、コンクリートおよび緩い砂地盤の回転角は大きくなる傾向が見られる。擁壁に伝達したエネルギーE_W、および擁壁の回転エネルギーE_{W4}と回転角θの関係も同様な傾向が見られた。いずれにしても、地盤強度と回転角の関係は実験のばらつきもあるが、明瞭な関係は見られなかった。

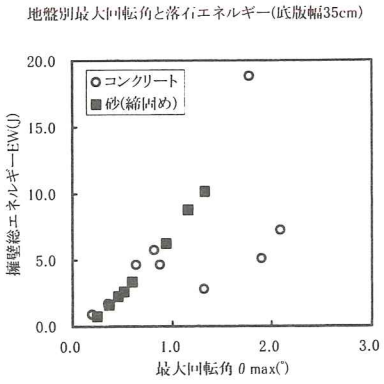
(2)旧落石対策便覧式との比較結果

旧落石対策便覧による方法および提案式による擁壁衝突点の速度から求めた擁壁に伝達される運動エネルギー、および回転変形、水平変形により消費されるエネルギーの算出結果について述べる。

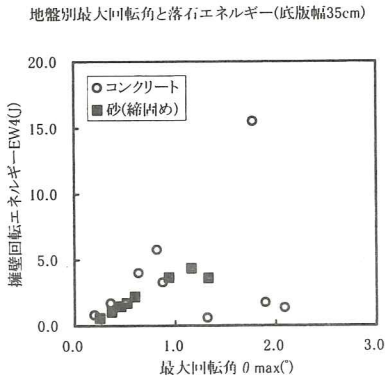
図5.21に、重錘衝突点の擁壁の速度の旧落石対策便覧および修正法による計算値V_Dと実験値V_{exp}を比較した図を示す。図中に示した実験ケースは、締め固めた地盤上の擁壁に質量5kgおよび10kgの重錘を衝突させた実験を対象とした結果である。実験による落石衝突位置での擁壁の速度V_{exp}は、擁壁重心の速度Vと角速度ωか



(a) 落石エネルギーER1

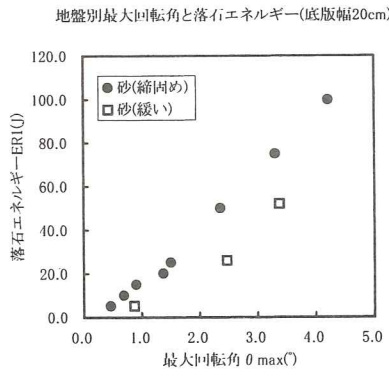


(b) 擁壁総エネルギーEW

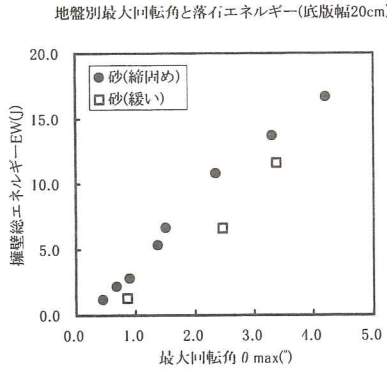


(c) 擁壁回転エネルギーEW4

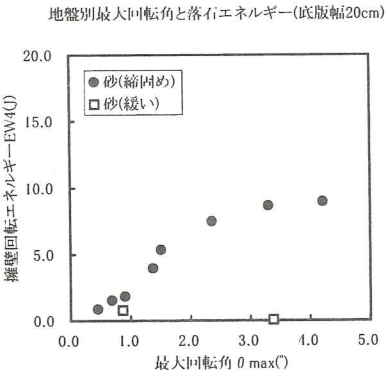
図5.19 最大回転角と各運動エネルギーの関係(コンクリートと締め固めた砂地盤)



(a) 落石エネルギーER1

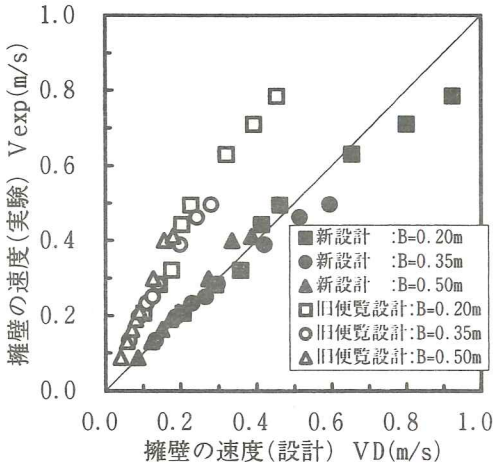


(b) 擁壁総エネルギーEW

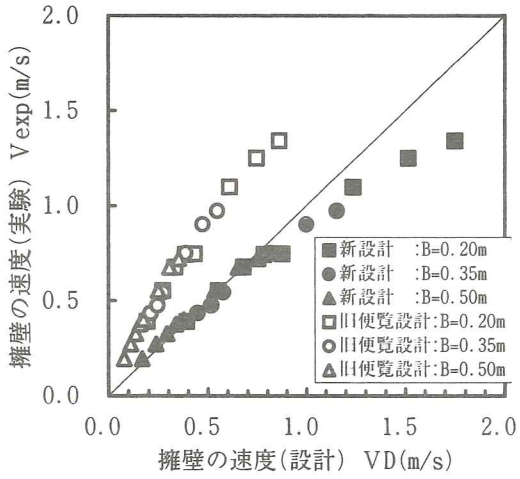


(c) 擁壁回転エネルギーEW4

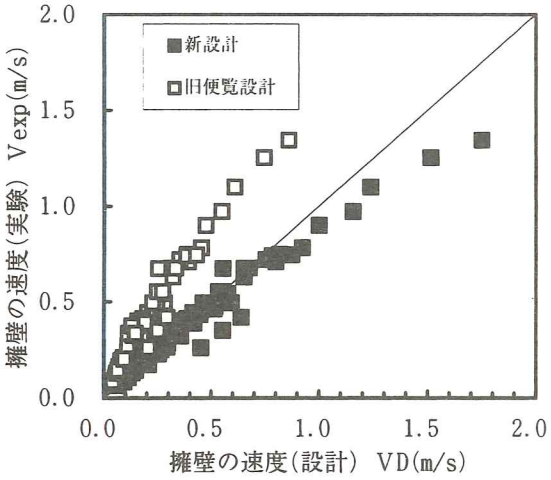
図5.20 最大回転角と各運動エネルギーの関係(緩い砂と締め固めた砂地盤)



(a) 重錘質量5.4～5.6kg



(b) 重錘質量11.1kg



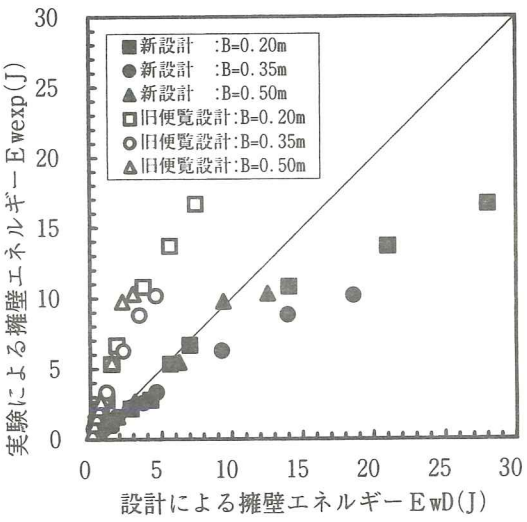
(c) 全ケース

図5.21 重錘衝突位置での擁壁速度の比較

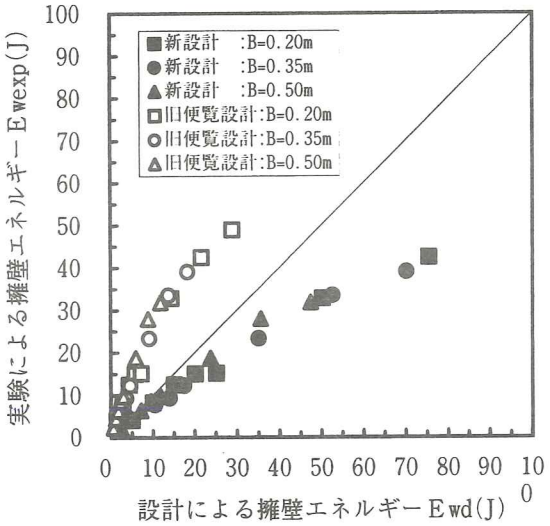
ら$V_{exp}=V+\omega h_g$で求めた。図より、旧設計法による擁壁の速度は実験値V_{exp}より小さいが、重錘と擁壁の衝突を完全弾性衝突とし、地盤降伏時の割線回転バネを用いた修正法では設計値と実験値がよく一致している。

図5.22に、落石の衝突により擁壁に伝達されるエネルギーについて、実験値E_{Wexp}と設計値E_{WD}を比較したものである。E_{Wexp}は式(5.9)より求めた値である。旧設計法による設計値は実験値の約半分である。落石速度4m/s以下で修正法による計算値は実験値とよく一致する。また、落石速度が4m/sを超える場合には、E_{Wexp}に比べて修正法によるE_{WD}が大きくなる。修正法によるE_{WD}は常にE_{Wexp}より大きいことから修正法は安全の評価法であると言える。

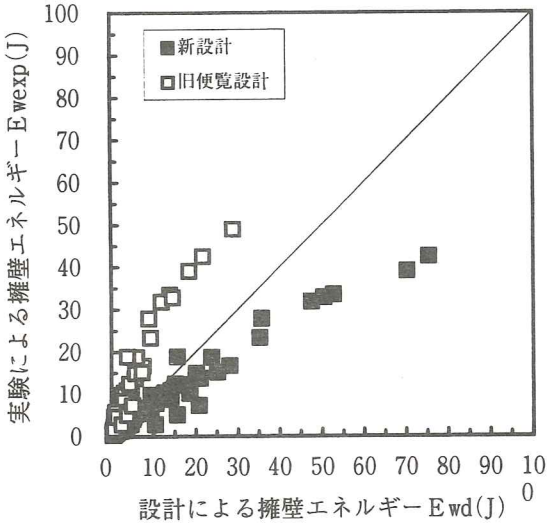
図5.23に、落石の衝突により擁壁に伝達されるエネルギーのうち、滑動変形に費やされるエネルギーと回転変形に費やされるエネルギーの比率を示す。図は重錘衝突高さ0.45mの結果である。実験値では、重錘の落下高さが高くなると、すなわち重錘エネルギーが大きくなると、滑動変形により消費されるエネルギーの割合が大きくなる。しかしながら、旧落石対策便覧による設計値、および修正法ではその比率は落石のエネルギーには依存せず、擁壁の条件と地盤条件で決定する。いずれの手法でも、擁壁幅が小さいと回転による比率が大きくなる傾向は表せている。しかし、旧落石対策便覧による評価法は、実験よりも回転エネルギー



(a) 重錘質量5.4～5.6kg



(b) 重錘質量11.1kg



(c) 全ケース

図5.22　擁壁に伝達されたエネルギーの比較

の割合を過小評価している傾向がある。一方、修正法では、振り子の高さが1m以下の時にB=0.20mで実験とよく一致するものの、その他の条件では、修正法においても回転エネルギーの割合を実験より小さく評価している。しかし、全体的には、旧落石対策便覧の評価法よりは実験値に近くなっている。

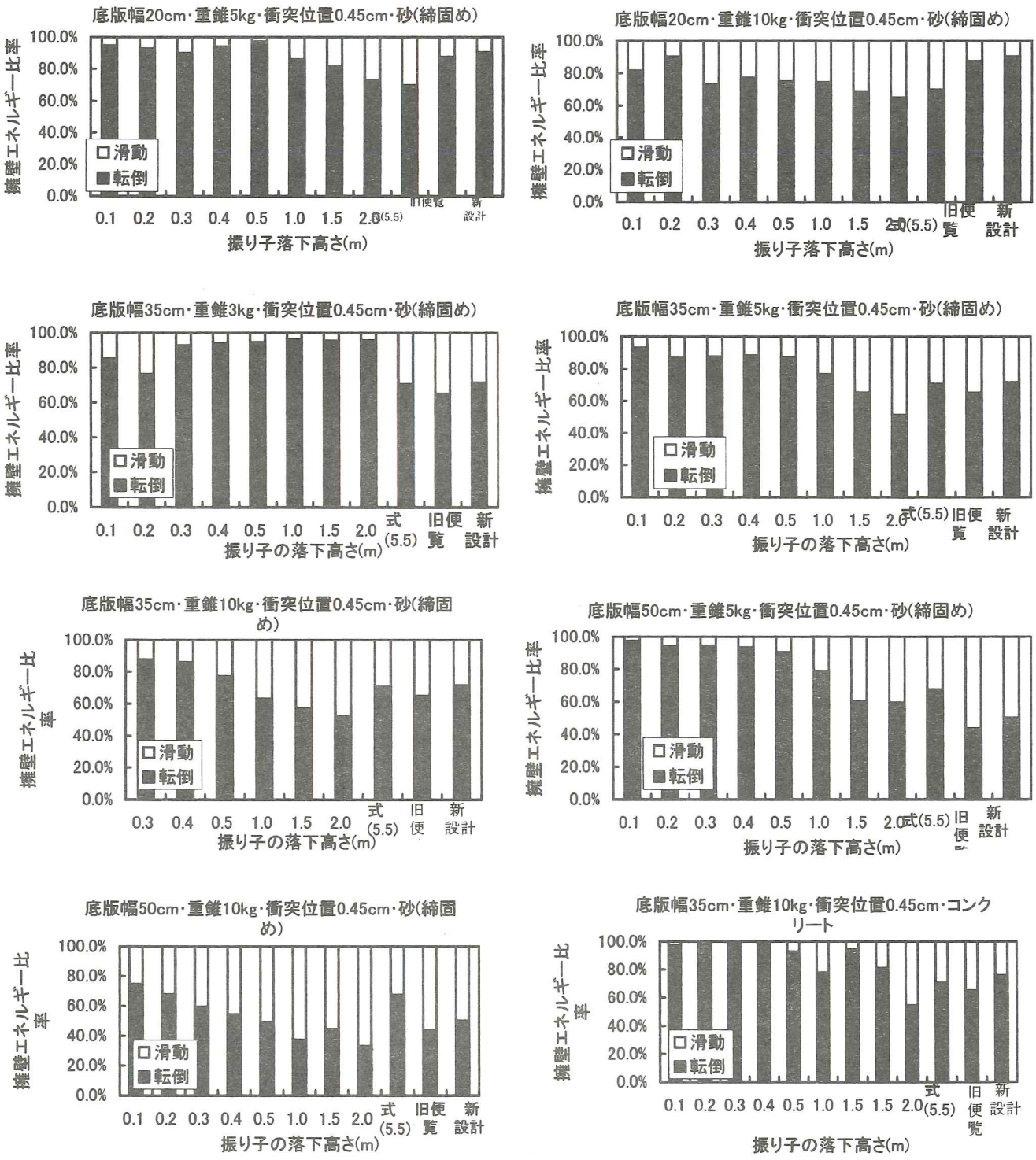


図 5.23　滑動変形、回転変形により消費されたエネルギーの比率

5.3　弾塑性地盤モデルの評価

5.3.1　弾塑性地盤モデルの検討方法

実験結果より、擁壁の回転による支持地盤の変形性状が著しい非線形性を示すことから、支持地盤の抵抗モーメント－回転角の関係は、図5.1に示したような、擁壁を弾塑性回転バネで支持された剛体と仮定し、トリリニア型のモデルを設定した。ここに、擁壁底面に浮上がりが生じるまで($M_I = mgB/6$)の回転バネ係数は道路橋示方書Ⅳ[7]による鉛直方向地盤反力係数K_vに擁壁底面の断面二次モーメントI_0を乗じた初期回転バネ係数K_{r0}とし、M_Iを超えて最大抵抗モーメントM_uに達するまでの回転バネ係数K_r'はK_{r0}の1/2と仮定する[3]。

最大抵抗モーメントM_uは**図5.24**に示すように、落石衝突位置に作用させる落石による水平力Hの大きさを変化させて、道路橋示方書Ⅳに準じて偏心荷重を考慮した地盤の極限支持力Qを求め、Qが擁壁自重Wと等しい状態の時の擁壁底面中心に作用する落石による抵抗モーメントMである。

ここでは、式(5.9)で求められる、擁壁の回転により地盤に伝達されたエネルギーE_{W4}と図5.1に示した面積が等しくなるような回転角θを逆算し、実験値と比較した。

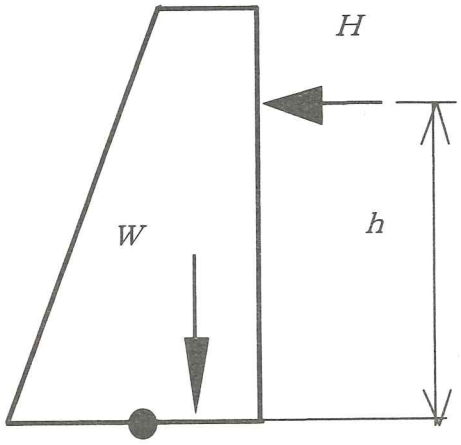


図 5.24　偏心荷重を考慮した地盤の極限支持力算出モデル

5.3.2　弾塑性地盤モデルの評価結果

図5.1に示した擁壁の回転角－モーメント関係の非線形モデルの妥当性を評価するために、図5.1に示した擁壁の回転角－モーメント関係と式(5.9)より求まる擁壁の回転変形により消費されるエネルギーE_{W4}より擁壁の最大回転角θ_cを求め、実験による最大回転角θ_{exp}と比較した。ここで、θ_cは図5.1の台形abcdの面積が式(5.9)より求まるE_{W4}と一致するときの値を求めた。

表5.2に、実験で用いた模型に対する、図5.1のように仮定した擁壁の回転角－モーメント関係での最大抵抗モーメントM_uを求めた結果を、また、**表5.3**に３．の実験で用いた擁壁の回転角－モーメント関係を求めた結果をそれぞれ示す。**図5.25**に締め固めた砂地盤およびコンクリートの最大抵抗モーメントM_uを求める際に算出した擁壁に作用させる水平力の仮定値と支持地盤の極限支持力と擁壁自重の比の関係を求めた結果を示す。図中の支持地盤の極限支持力と擁壁自重の比が１となる時の、水平力および擁壁自重によるモーメントが求める地盤の最大抵抗モーメントM_uである。

表5.2 地盤の極限支持力時に作用する抵抗モーメント

砂(締固めあり)地盤での試算結果

底版幅	天端幅	擁壁高	有効抵抗長	重量	作用位置	図心高	自重偏心	自重モーメント		単位体積重量	内部摩擦角	粘着力	底版の断面二次モーメント
(m)	(m)	(m)	(m)	W(kN)	(m)	(m)	ew(m)	Mw(kN·m)	Mw'(kN·m)	γ (kN/m^3)	φ (°)	c(kN/m^2)	I (m^4)
0.20	0.10	0.50	1.00	1.764	0.45	0.2222	0.0222	-0.039	0.216	14	40	0	0.00067

hG(m)	衝撃力 H(kN)	回転モーメント Mh(kN·m)	底版中心モーメント Mu(kN·m)	極限支持力 Q(kN)	回転安全率 Mw/Mh	滑動安全率 Fs	支持力安全率 Q/W	偏心量e 0.067	Be	H/W	Nc	Nr	qu(max) (kN/m2)	qu(min) (kN/m2)	x (m)
0.4500	0.0000	0.000	-0.039	12.914			7.321	-0.022	0.156	0.000	5.0	81.3	2.940	14.700	-
0.4500	0.1000	0.045	0.006	15.722	4.791	14.802	8.913	0.003	0.193	0.057	4.6	65.1	9.690	7.950	-
0.4500	0.2000	0.090	0.051	6.875	2.396	7.401	3.897	0.029	0.142	0.113	4.3	51.4	16.440	1.200	-
0.4500	0.2500	0.113	0.073	4.139	1.916	5.921	2.347	0.042	0.117	0.142	4.1	45.4	20.121	0.000	0.175
0.4500	0.3000	0.135	0.096	2.253	1.597	4.934	1.277	0.054	0.091	0.170	3.9	40.0	25.738	0.000	0.137
0.4500	0.3173	0.143	0.104	1.765	1.510	4.665	1.001	0.059	0.083	0.180	3.9	38.3	28.490	0.000	0.124
0.4500	0.3174	0.143	0.104	1.762	1.509	4.663	0.999	0.059	0.083	0.180	3.9	38.2	28.507	0.000	0.124
0.4500	0.3175	0.143	0.104	1.760	1.509	4.662	0.998	0.059	0.082	0.180	3.9	38.2	28.525	0.000	0.124

底版幅	天端幅	擁壁高	有効抵抗長	重量	作用位置	図心高	自重偏心	自重モーメント		単位体積重量	内部摩擦角	粘着力	底版の断面二次モーメント
(m)	(m)	(m)	(m)	W(kN)	(m)	(m)	ew(m)	Mw(kN·m)	Mw'(kN·m)	γ (kN/m^3)	φ (°)	c(kN/m^2)	I (m^4)
0.35	0.10	0.50	1.00	2.74400	0.45	0.2037	0.0509	-0.140	0.620	14	40	0	0.00357

hG(m)	衝撃力 H(kN)	回転モーメント Mh(kN·m)	底版中心モーメント Mu(kN·m)	極限支持力 Q(kN)	回転安全率 Mw/Mh	滑動安全率 Fs	支持力安全率 Q/W	偏心量e 0.117	Be	H/W	Nc	Nr	qu(max) (kN/m2)	qu(min) (kN/m2)	x (m)
0.4500	0.0000	0.000	-0.140	31.565			11.503	-0.051	0.248	0.000	5.0	81.3	0.996	14.684	-
0.4500	0.3000	0.135	-0.005	37.840	4.592	5.281	13.790	-0.002	0.347	0.109	4.3	52.3	7.608	8.072	-
0.4500	0.5000	0.225	0.085	19.428	2.755	3.168	7.080	0.031	0.288	0.182	3.9	37.9	12.016	3.664	-
0.4500	0.7000	0.315	0.175	8.459	1.968	2.263	3.083	0.064	0.222	0.255	3.4	26.8	16.461	0.000	0.333
0.4500	0.9000	0.405	0.265	3.005	1.531	1.760	1.095	0.097	0.157	0.328	3.0	18.7	23.354	0.000	0.235
0.4500	0.9150	0.412	0.272	2.747	1.506	1.731	1.001	0.099	0.152	0.333	2.9	18.1	24.111	0.000	0.228
0.4500	0.9151	0.412	0.272	2.745	1.505	1.731	1.000	0.099	0.152	0.333	2.9	18.1	24.116	0.000	0.228
0.4500	0.9152	0.412	0.272	2.743	1.505	1.731	1.000	0.099	0.152	0.334	2.9	18.1	24.121	0.000	0.228

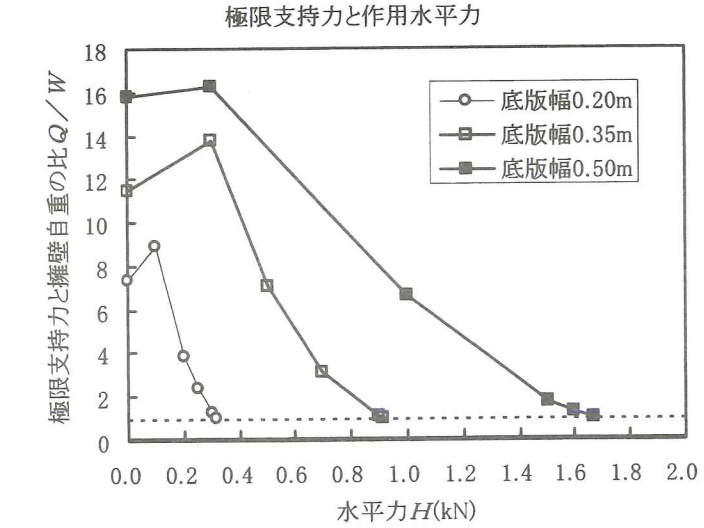
底版幅	天端幅	擁壁高	有効抵抗長	重量	作用位置	図心高	自重偏心	自重モーメント		単位体積重量	内部摩擦角	粘着力	底版の断面二次モーメント
(m)	(m)	(m)	(m)	W(kN)	(m)	(m)	ew(m)	Mw(kN·m)	Mw'(kN·m)	γ (kN/m^3)	φ (°)	c(kN/m^2)	I (m^4)
0.50	0.10	0.50	1.00	3.67500	0.45	0.1944	0.0778	-0.286	1.205	14	40	0	0.01042

hG(m)	衝撃力 H(kN)	回転モーメント Mh(kN·m)	底版中心モーメント Mu(kN·m)	極限支持力 Q(kN)	回転安全率 Mw/Mh	滑動安全率 Fs	支持力安全率 Q/W	偏心量e 0.167	Be	H/W	Nc	Nr	qu(max) (kN/m2)	qu(min) (kN/m2)	x (m)
0.4500	0.0000	0.000	-0.286	58.216			15.841	-0.078	0.344	0.000	5.0	81.3	0.490	14.210	-
0.4500	0.3000	0.135	-0.151	59.801	8.923	7.073	16.272	-0.041	0.418	0.082	4.3	58.7	3.730	10.970	-
0.4500	1.0000	0.450	0.164	24.376	2.677	2.122	6.633	0.045	0.411	0.272	2.7	24.7	11.290	3.410	-
0.4500	1.5000	0.675	0.389	6.280	1.785	1.415	1.709	0.106	0.288	0.408	1.6	12.2	17.002	0.000	0.432
0.4500	1.6000	0.720	0.434	4.575	1.673	1.326	1.245	0.118	0.264	0.435	1.4	10.5	18.580	0.000	0.396
0.4500	1.6655	0.749	0.464	3.678	1.607	1.274	1.001	0.126	0.248	0.453	1.2	9.5	19.784	0.000	0.372
0.4500	1.6656	0.750	0.464	3.676	1.607	1.274	1.000	0.126	0.248	0.453	1.2	9.5	19.786	0.000	0.371
0.4500	1.6657	0.750	0.464	3.675	1.607	1.274	1.000	0.126	0.248	0.453	1.2	9.5	19.788	0.000	0.371

コンクリートでの試算結果

底版幅	天端幅	擁壁高	有効抵抗長	重量	作用位置	図心高	自重偏心	自重モーメント		単位体積重量	内部摩擦角	粘着力	底版の断面二次モーメント
(m)	(m)	(m)	(m)	W(kN)	(m)	(m)	ew(m)	Mw(kN·m)	Mw'(kN·m)	γ (kN/m^3)	φ (°)	c(kN/m^2)	I (m^4)
0.35	0.10	0.50	1.00	2.74400	0.45	0.2037	0.0509	-0.140	0.620	25	0	20601	0.00357

hG(m)	衝撃力 H(kN)	回転モーメント Mh(kN·m)	底版中心モーメント Mu(kN·m)	極限支持力 Q(kN)	回転安全率 Mw/Mh	滑動安全率 Fs	支持力安全率 Q/W	偏心量e 0.117	Be	H/W	Nc	Nr	qu(max) (kN/m2)	qu(min) (kN/m2)	x (m)
0.4500	0.000	0.000	-0.13974	27463.337			10008.505	-0.051	0.248	0.000	5.000	-	0.996	14.684	-
0.4500	0.200	0.090	-0.04974	32137.718	6.888	8.232	11711.996	-0.018	0.314	0.073	4.541	-	5.404	10.276	-
0.4500	0.400	0.180	0.04026	29609.135	3.444	4.116	10790.501	0.015	0.321	0.146	4.089	-	9.812	5.868	-
0.4500	0.600	0.270	0.13026	20552.322	2.296	2.744	7489.913	0.047	0.255	0.219	3.633	-	14.220	1.460	-
0.4500	0.800	0.360	0.22026	13108.394	1.722	2.058	4777.112	0.080	0.189	0.292	3.178	-	19.311	0.000	0.284
0.4500	1.000	0.450	0.31026	7204.661	1.378	1.646	2625.605	0.113	0.124	0.364	2.722	-	29.538	0.000	0.186
0.4500	1.300	0.585	0.44526	1077.923	1.060	1.266	392.829	0.162	0.025	0.474	2.039	-	143.663	0.000	0.038
0.4500	1.350	0.608	0.46776	360.592	1.020	1.220	131.411	0.170	0.009	0.492	1.925	-	403.488	0.000	0.014
0.4500	1.370	0.617	0.47676	97.178	1.006	1.202	35.415	0.174	0.003	0.499	1.880	-	1458.898	0.000	0.004
0.4500	1.377	0.620	0.47991	8.136	1.000	1.196	2.965	0.175	0.000	0.502	1.864	-	17265.178	0.000	0.000
0.4500	1.37739	0.620	0.48008	3.223	1.000	1.195	1.175	0.175	0.000	0.502	1.863	-	43558.299	0.000	0.000
0.4500	1.37740	0.620	0.48009	3.097	1.000	1.195	1.129	0.175	0.000	0.502	1.863	-	45328.310	0.000	0.000
0.4500	1.37741	0.620	0.48009	2.971	1.000	1.195	1.083	0.175	0.000	0.502	1.863	-	47248.265	0.000	0.000



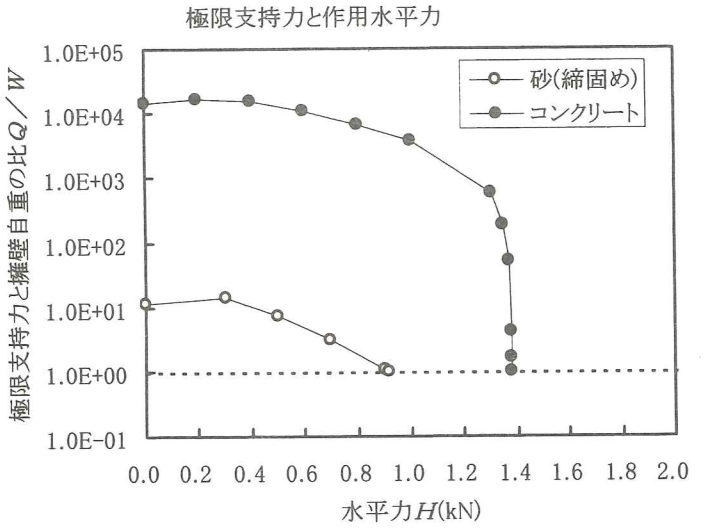


図 5.25　支持地盤の極限支持力と擁壁自重の比と水平力の関係

図5. 26 (a) 、 (b) および(c)に擁壁底版幅がB=0.20m、B=0.35mおよびB=0.50mの場合の回転角の実験値と計算値を比較した結果を示す。回転角が小さい範囲では実験値と計算値はよく一致するが、θ >2°となると計算値が過大となる傾向が見られる。

図5.26(d)は締め固めた地盤とコンクリート上に設置した擁壁の実験の比較を示したものである。ばらつきはあるものの、砂地盤とコンクリートでいずれも計算値と実験値は比較的よく一致する傾向がある。

ここで、擁壁底面幅20cmで回転角が大きい場合に計算回転角が例外的に大きくなっているが、この原因として、以下のことが考えられる。①底版幅が狭いため、擁壁に回転および滑動変位が生じると同時に、擁壁つま先部が地盤にめり込みやすく、滑動抵抗力および支持力値が図-5で想定した以上に増大したこと。②回転角が大きい場合は擁壁の回転に伴い、擁壁の重心位置が持ち上がるため、それによる擁壁の位置エネルギーの増加の影響が大きくなること。この傾向は基礎地盤が固いコンクリート上に設置したケースで顕著となる。

表5.3 擁壁の回転角－モーメント関係の算出結果

1．砂地盤(締固め)

底版幅	b(m)	0.20	浮上り限界モーメント	My(kN・m)	0.059	自重による回転角	θ0(°)	−0.14662
底版長	L(m)	1.00	M1に達したときの回転角	θ1(°)	0.220	降伏モーメント	My(kN・m)	0.143
基礎の換算載荷幅	Bv(m^2)	0.4472	極限支持力状態の作用回転モーメント	Mu(kN・m)	0.104	降伏回転角	θy(°)	0.702
底面の断面二次モーメント	I(m^4)	0.00067	極限支持力状態の回転角	θu(°)	0.555	割線回転バネ係数	Kr(kN・m	11.65931
地盤バネ定数	Kv0(kN/m^3)	31000	MyからMuまでの回転バネ係数	Kr'(kN・m)	7.659	極限支持力状態までの回転エネルギー	Eu(J)	0.875
鉛直方向地盤反力係数	Kv(kN/m^3)	22978.2	限界回転角	θF(°)	28.811			
回転バネ係数	Kr0(kN・m)	15.3188	自重によるモーメント	Mw(kN・m)	−0.0392			

重錘質量	5kg								
実験番号	振り子の高さ h_0(m)	実験値 Er1(J)	実験値 Ew4(J)	実験値 θexp(°)	計算値 θcal(°)	θexp/θu	θcal/θu	θF/θexp	θF/θcal
SAA0191	0.10	4.988	1.095	0.46	0.790	0.655	1.126	62.632	36.456
SAA0291	0.20	9.977	2.012	0.69	1.158	0.983	1.650	41.755	24.879
SAA0391	0.30	14.965	2.524	0.91	1.363	1.296	1.942	31.660	21.132
SAA0491	0.40	19.954	5.009	1.38	2.360	1.966	3.363	20.877	12.207
SAA0592	0.50	24.942	6.474	1.51	2.948	2.151	4.200	19.080	9.773
SAA1091	1.00	49.885	9.277	2.36	4.073	3.362	5.802	12.208	7.074
SAA1591	1.50	74.827	11.165	3.31	4.830	4.716	6.881	8.704	5.965
SAA2091	2.00	99.769	12.172	4.22	5.234	6.012	7.456	6.827	5.505

重錘質量	10kg								
実験番号	振り子の高さ h_0(m)	実験値 Er1(J)	実験値 Ew4(J)	実験値 θexp(°)	計算値 θcal(°)	θexp/θu	θcal/θu	θF/θexp	θF/θcal
SAB0191	0.10	10.198	3.360	0.34	1.699	0.484	2.420	84.738	16.961
SAB0291	0.20	20.396	7.490	1.37	3.355	1.952	4.781	21.030	8.586
SAB0391	0.30	30.595	9.099	0.84	4.001	1.197	5.700	34.299	7.201
SAB0491	0.40	40.793	11.526	2.70	4.975	3.847	7.088	10.671	5.792
SAB0591	0.50	50.991	11.345	4.12	4.902	5.870	6.984	6.993	5.878
SAB1091	1.00	101.982	24.419	7.25	10.146	10.329	14.456	3.974	2.839
SAB1591	1.50	152.973	29.217	9.66	12.071	13.763	17.198	2.982	2.387
SAB2091	2.00	203.965	31.798	11.31	13.106	16.114	18.673	2.547	2.198

底版幅	b(m)	0.35	浮上り限界モーメント	My(kN・m)	0.160	自重による回転角	θ0(°)	−0.12029
底版長	L(m)	1.00	Myに達したときの回転角	θy(°)	0.138	降伏モーメント	My(kN・m)	0.412
基礎の換算載荷幅	Bv(m^2)	0.5916	極限支持力状態の作用回転モーメント	Mu(kN・m)	0.272	降伏回転角	θy(°)	0.451
底面の断面二次モーメント	I(m^4)	0.00357	極限支持力状態の回転角	θu(°)	0.331	割線回転バネ係数	Kr(kN・m	52.3275
地盤バネ定数	Kv0(kN/m^3)	31000	MyからMuまでの回転バネ係数	Kr1(kN・m)	33.279	極限支持力状態までの回転エネルギー	Eu(J)	1.620
鉛直方向地盤反力係数	Kv(kN/m^3)	18628.5	限界回転角	θF(°)	47.961			
回転バネ係数	Kr(kN・m)	66.5580	自重によるモーメント	Mw(kN・m)	−0.13974			

重錘質量	3kg								
実験番号	振り子の高さ h_0(m)	実験値 Er1(J)	実験値 Ew4(J)	実験値 θexp(°)	計算値 θcal(°)	θexp/θu	θcal/θu	θF/θexp	θF/θcal
SBD0191	0.10	2.407	0.147	0.14	0.136	0.310	0.302	342.578	352.702
SBD0291	0.20	4.813	0.219	0.18	0.166	0.399	0.367	266.450	289.475
SBD0391	0.30	7.220	0.436	0.23	0.234	0.510	0.519	208.526	205.116
SBD0491	0.40	9.627	0.659	0.26	0.287	0.577	0.638	184.465	166.836
SBD0591	0.50	12.033	0.811	0.30	0.319	0.665	0.708	159.870	150.323
SBD1091	1.00	24.066	1.207	0.43	0.389	0.954	0.863	111.537	123.264
SBD1592	1.50	36.100	2.047	0.50	0.510	1.109	1.132	95.922	93.993
SBD2091	2.00	48.133	2.748	0.62	0.608	1.375	1.348	77.356	78.910

重錘質量	5kg								
実験番号	振り子の高さ h_0(m)	実験値 Er1(J)	実験値 Ew4(J)	実験値 θexp(°)	計算値 θcal(°)	θexp/θu	θcal/θu	θF/θexp	θF/θcal
SBA0191	0.10	4.988	0.687	0.25	0.294	0.554	0.651	191.844	163.339
SBA0291	0.20	9.977	1.383	0.37	0.417	0.821	0.924	129.624	115.130
SBA0391	0.30	14.965	1.961	0.46	0.498	1.020	1.105	104.263	96.256
SBA0491	0.40	19.954	2.281	0.52	0.543	1.153	1.204	92.233	88.352
SBA0595	0.50	24.942	2.908	0.60	0.630	1.331	1.397	79.935	76.127
SBA1094	1.00	49.885	4.785	0.94	0.891	2.085	1.977	51.022	53.815
SBA1591	1.50	74.827	5.739	1.16	1.024	2.573	2.271	41.346	46.838
SBA2092	2.00	99.769	5.204	1.33	0.950	2.950	2.106	36.061	50.508

重錘質量	10kg								
実験番号	振り子の高さ h_0(m)	実験値 Er1(J)	実験値 Ew4(J)	実験値 θexp(°)	計算値 θcal(°)	θexp/θu	θcal/θu	θF/θexp	θF/θcal
SBB0391	0.30	30.595	6.812	1.14	1.173	2.528	2.602	42.071	40.879
SBB0491	0.40	40.793	7.967	1.22	1.334	2.706	2.959	39.312	35.953
SBB0592	0.50	50.991	9.437	1.40	1.538	3.105	3.412	34.258	31.175
SBB1092	1.00	101.982	14.689	2.04	2.269	4.524	5.033	23.510	21.136
SBB1591	1.50	152.973	19.071	2.68	2.879	5.944	6.385	17.896	16.659
SBB2092	2.00	203.965	20.330	3.21	3.054	7.119	6.774	14.941	15.704

底版幅	b(m)	0.50	浮上り限界モーメント	My(kN・m)	0.306	自重による回転角	θ0(°)	−0.09648
底版長	L(m)	1.00	Myに達したときの回転角	θy(°)	0.103	降伏モーメント	My(kN・m)	0.750
基礎の換算載荷幅	Bv(m^2)	0.7071	極限支持力状態の作用回転モーメント	Mu(kN・m)	0.464	降伏回転角	θy(°)	0.306
底面の断面二次モーメント	I(m^4)	0.01042	極限支持力状態の回転角	θu(°)	0.210	割線回転バネ係数	Kr(kN・m	140.286
地盤バネ定数	Kv0(kN/m^3)	31000	MyからMuまでの回転バネ係数	Kr1(kN・m)	84.877	極限支持力状態までの回転エネルギーEu(J)		2.002
鉛直方向地盤反力係数	Kv(kN/m^3)	16296.3	限界回転角	θF(°)	59.323			
回転バネ係数	Kr(kN・m)	169.7531	自重によるモーメント	Mw(kN・m)	−0.28583			

重錘質量	5kg								
実験番号	振り子の高さ	実験値			計算値	θexp/θu	θcal/θu	θF/θexp	θF/θcal
	h_0(m)	Er1(J)	Ew4(J)	θexp(°)	θcal(°)				
SCA0191	0.10	4.988	0.563	0.12	0.162	0.160	0.216	494.356	365.590
SCA0192	0.10	5.071	0.454	0.22	0.146	0.294	0.194	269.649	406.971
SCA0291	0.20	9.977	1.226	0.16	0.240	0.213	0.320	370.767	247.683
SCA0292	0.20	10.143	0.966	0.29	0.213	0.387	0.284	204.561	279.047
SCA0391	0.30	14.965	0.940	0.19	0.210	0.253	0.280	312.225	282.879
SCA0392	0.30	15.214	1.521	0.33	0.267	0.440	0.356	179.766	222.332
SCA0491	0.40	19.954	2.666	0.21	0.357	0.280	0.476	282.489	166.243
SCA0492	0.40	20.286	2.033	0.37	0.308	0.494	0.412	160.332	192.313
SCA0591	0.50	24.942	1.852	0.20	0.294	0.267	0.393	296.614	201.521
SCA0592	0.50	25.357	2.427	0.38	0.339	0.507	0.452	156.112	175.215
SCA1091	1.00	50.715	4.285	0.54	0.481	0.720	0.641	109.857	123.431
SCA1592	1.50	76.072	5.870	1.11	0.602	1.481	0.803	53.444	98.576
SCA2091	2.00	101.429	6.124	0.69	0.621	0.921	0.829	85.975	95.499

重錘質量	10kg								
実験番号	振り子の高さ	実験値			計算値	θexp/θu	θcal/θu	θF/θexp	θF/θcal
	h_0(m)	Er1(J)	Ew4(J)	θexp(°)	θcal(°)				
SCB0191	0.10	10.198	1.696	0.27	0.282	0.360	0.376	219.714	210.544
SCB0291	0.20	20.396	3.028	0.30	0.385	0.400	0.513	197.742	154.283
SCB0391	0.30	30.595	3.820	0.38	0.445	0.507	0.594	156.112	133.286
SCB0491	0.40	40.793	4.661	0.43	0.509	0.574	0.680	137.960	116.461
SCB0591	0.50	50.991	4.791	0.44	0.519	0.587	0.693	134.824	114.231
SCB1091	1.00	101.982	6.966	1.19	0.686	1.588	0.915	49.851	86.533
SCB1591	1.50	152.973	12.436	1.09	1.104	1.454	1.473	54.425	53.748
SCB2091	2.00	203.965	10.533	1.79	0.958	2.388	1.278	33.141	61.908

2. コンクリート

底版幅	b(m)	0.35	浮上り限界モーメント	My(kN・m)	0.160	自重による回転角	θ0(°)	−0.00279
底版長	L(m)	1.00	Myに達したときの回転角	θy(°)	0.003	降伏モーメント	My(kN・m)	0.620
基礎の換算載荷幅	Bv(m^2)	0.5916	極限支持力状態の作用回転モーメント	Mu(kN・m)	0.480	降伏回転角	θy(°)	0.019
底面の断面二次モーメント	I(m^4)	0.00357	極限支持力状態の回転角	θu(°)	0.016	割線回転バネ係数	Kr(kN・m	1890.837
地盤バネ定数	Kv0(kN/m^3)	8.012E+05	MyからMuまでの回転バネ係数	Kr1(kN・m)	1433.545	極限支持力状態までの回転エネルギーEu(J)		0.102
鉛直方向地盤反力係数	Kv(kN/m^3)	8.025E+05	限界回転角	θF(°)	47.961			
回転バネ係数	Kr(kN・m)	2.867E+03	自重によるモーメント	Mw(kN・m)	−0.13974			

重錘質量	5kg								
実験番号	振り子の高さ	実験値			計算値	θexp/θu	θcal/θu	θF/θexp	θF/θcal
	h_0(m)	Er1(J)	Ew4(J)	θexp(°)	θcal(°)				
CBA0191	0.10	5.201	0.848	0.20	0.088	0.323	0.142	239.805	546.644
CBA0291	0.20	10.401	1.680	0.36	0.165	0.581	0.266	133.225	291.154
CBA0391	0.30	15.602	4.550	0.64	0.430	1.033	0.694	74.939	111.539
CBA0491	0.40	20.802	5.756	0.82	0.541	1.323	0.874	58.489	88.581
CBA0591	0.50	26.003	4.288	0.88	0.406	1.420	0.655	54.501	118.203
CBA1591	1.50	78.008	17.749	1.78	1.650	2.872	2.662	26.944	29.067

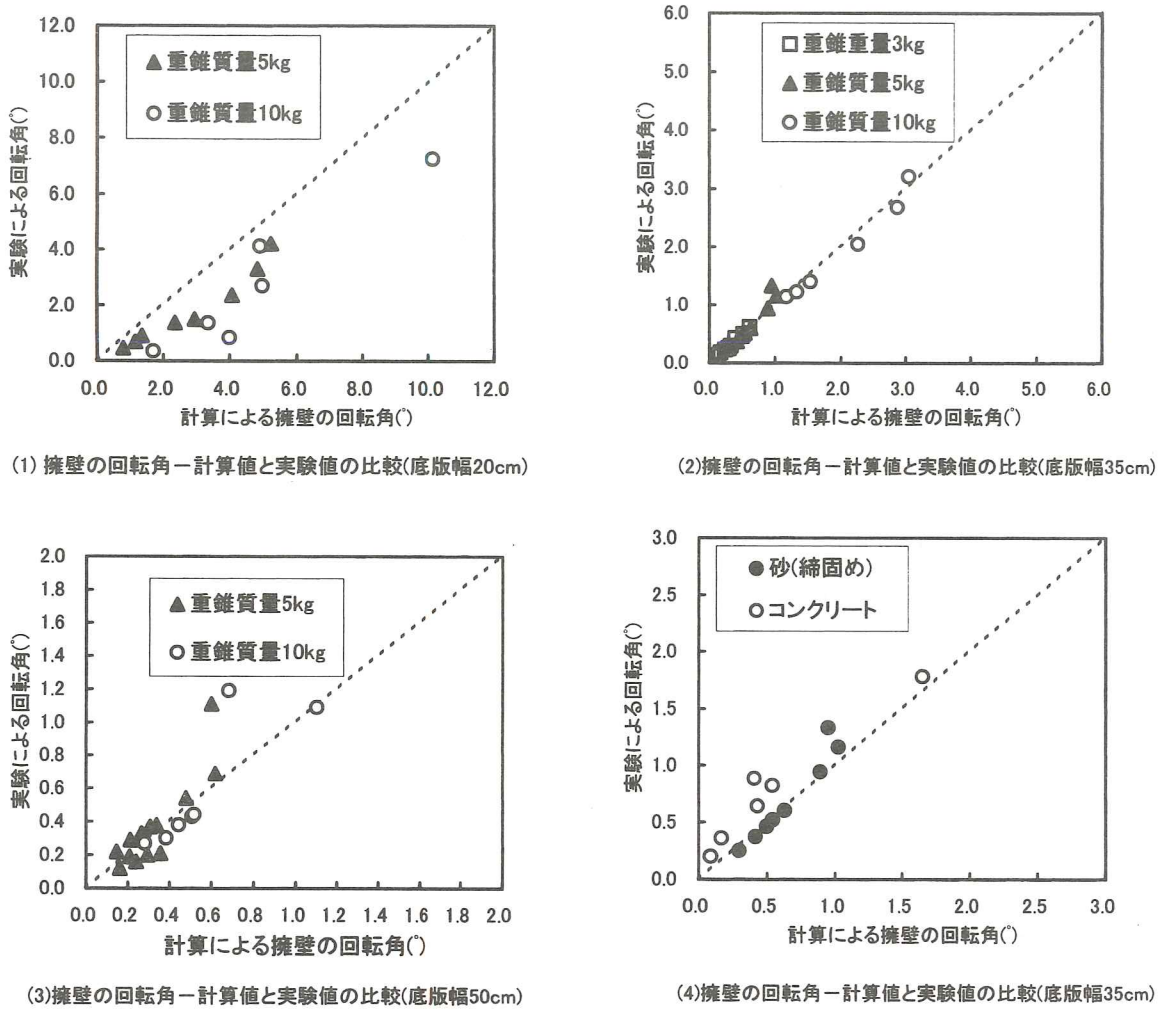


図5.26 最大回転角の実験値と設計値の比較

しかしながら、設計で回転角の許容値を設定する場合、擁壁としての機能を考慮すると、許容回転角 θa は２～３°程度と考えられるため、設計上は問題ないものと考えられる。

5.4 地盤の弾塑性変形を考慮した計法の提案および適用性の検討

ここでは、5.3で検討した抵抗モーメント－回転角曲線（図5.1参照）を用いて、許容変位量から定まる基礎地盤の塑性変形を考慮した可能吸収エネルギーと落石の衝突により擁壁に伝わるエネルギーとを比較することにより安定性を照査する設計法を提案し、実験結果との比較によりその妥当性を検討する。

5.4.1 提案手法の概要

図5.1の抵抗モーメント－回転角曲線を用いて、許容変位量から定まる基礎地盤の塑性変形を考慮した可能吸収エネルギーと落石の衝突により擁壁に伝わるエネルギーとを比較することにより安定性を照査する設計法の概要を述べる。**図5.27**に落石防護擁壁の落石衝突時の安定に対する検討手順を示す。まず、旧落石対策便覧と同様に擁壁を弾性地盤によって支持される剛体（図5.3参照）と仮定して、基礎地盤の弾性応答時

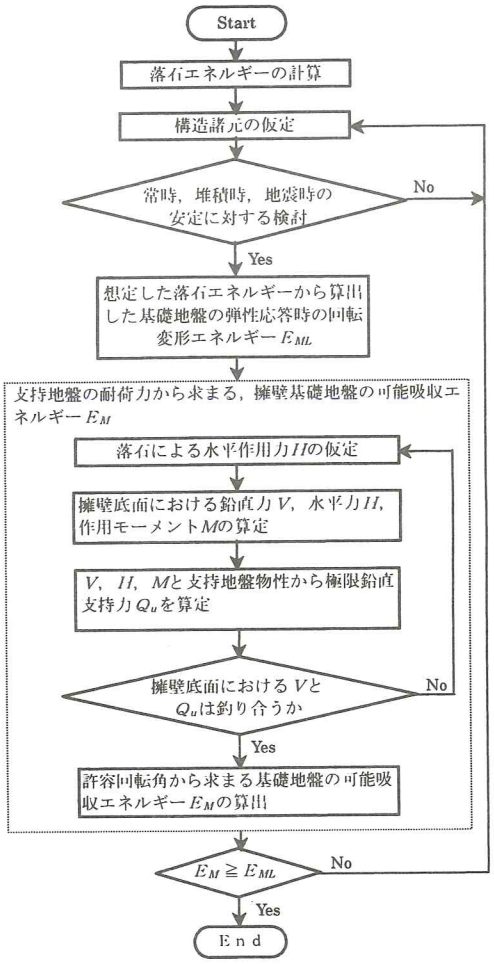


図 5.27　落石防護擁壁の落石衝突時の安定に対する検討手順

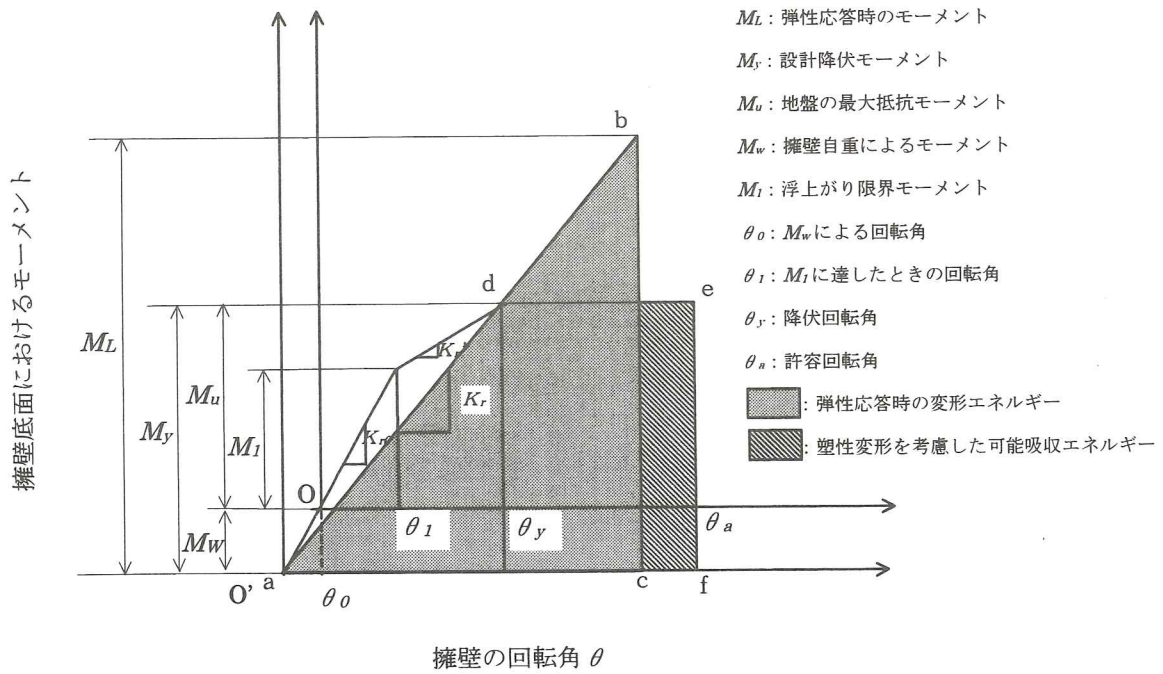


図 5.28　荷重－変位曲線

の回転変形エネルギーE_{ML}を算出する。そして、E_{ML}が図5.1の抵抗モーメント－回転角曲線にて設定した許容回転角から求まる可能吸収回転エネルギーE_M以下となることを照査する。すなわち、**図5.28**において、基礎地盤の弾性応答時の回転変形エネルギーE_{ML}および許容回転角から求まる可能吸収回転エネルギーE_Mは、それぞれabcの面積、adefの面積として表せ、abcの面積＜adefの面積となることを照査することになる。

なお、滑動についても図5.4に示した滑動限界荷重を降伏点とする、弾塑性の水平力－水平変位曲線を用いて同様な検討が可能である。

5.4.2　旧落石対策便覧からの変更点

提案する設計法では、以下の２点を旧落石対策便覧から変更した。

①擁壁に伝達される運動エネルギーの評価

②擁壁の安定性の評価

(1)擁壁に伝達される運動エネルギーの評価

弾性応答時の回転変形エネルギーE_{ML}の算出には旧落石対策便覧の底面中心の外力を求める式を利用するが、5.2の検討の結果、実験より落石と擁壁の衝突の考え方および基礎地盤の回転バネについて取り扱いを以下のように変更した。

旧落石対策便覧は弾性領域での設計であるので、基礎地盤の回転バネ係数に初期回転バネ係数K_{r0}を与えるが、新たな設計法では塑性変形を考慮することから図5.1の直線abの傾きとして求められる割線回転バネ係数K_rを用いる。また、旧落石対策便覧では、落石と擁壁の衝突を完全非弾性衝突として運動量保存の法則より擁壁の落石衝突位置の速度を求めるが、ここに、落石と擁壁の衝突を安全側に完全弾性衝突と仮定して擁壁の落石衝突位置の速度Vを式(5.17)で与える。それに伴い、落石衝突位置の動的変位δ_dは式(5.18)で表される。

$$V = \frac{2m_0}{m_0 + \alpha' m} V_0 \qquad (5.17)再掲$$

$$\delta_d = \sqrt{\frac{\alpha' \cdot m \cdot l^2 \cdot V^2}{K_{r1}}} \qquad (5.18)再掲$$

ここに、記号は初出（5.17）および(5.18)に示したとおり。

(2)擁壁の安定性の評価

旧落石対策便覧では、衝突直後の擁壁の運動エネルギーが地盤の弾性バネの変形エネルギーと等しくなるまで回転変位を生じ、擁壁の安定はこの回転バネにより擁壁底面に作用する荷重を求め、これを用いて支持力、滑動、転倒に対する安定計算を行う。新たな設計法では、落石衝突による擁壁の弾性応答時の変形エネルギーと、図5.1の抵抗モーメント－回転角曲線により求められる、許容回転変位までの擁壁基礎地盤の塑性変形を考慮した可能吸収エネルギーを比較することにより照査する。

5.4.3　設計値と実験値の比較

図5.27の設計手順と旧設計法の変更点の妥当性を実証するために、旧落石対策便覧よる設計法と新設計法により求まる変形量と実験値を比較した。ここでは、旧落石対策便覧よる設計法と新設計法にもとづき、重錘衝突実験における重錘の衝突直前の速度から擁壁に伝達される運動エネルギーを求め、次に、擁壁に伝達される運動エネルギーから水平および回転変形により消費されるエネルギーを求め、さらに、図5.1に示した擁壁の回転角－モーメント関係、および図5.4に示した擁壁の水平変位－水平荷重関係より擁壁の回転角および水平変位を求めた。なお、旧落石対策便覧による設計は元々変形量を照査するものではないため、変形量で比較するのは問題がある。実際、４．において、旧落石対策便覧による設計から求まる変位量は、実験値と大きく離れていた。そこで、ここでは旧設計法についても、弾性応答時の抵抗モーメントがM_uを超える場合のθ_Dは、弾性応答時の回転エネルギーE_{ML}が図5.1の塑性変形量を考慮したモーメント－回転角関係の台形abcdの面積と一致するときのθの値として求めた。したがって、ここでの旧落石対策便の手法とは擁壁に伝達されるエネルギーの評価法のみ旧落石対策便覧の手法を適用したものである。

旧落石対策便覧による計算結果の一覧を**表5.4**、**表5.5**、**表5.6**に、新設計法による計算結果の一覧を**表5.7**、**表5.8**、**表5.9**に示す。

図5.29に、擁壁の最大回転角について、実験の実測値θ_{exp}と計算値θ_Dを比較した図を示す。旧落石対策便覧の手法による計算値は実験値より小さい。一方、新設計法による計算値は、ばらつきはあるものの回転角の小さい範囲では実験値に概ね整合している。ただし、回転角が2°以上になると急激に計算値が大きくなる。

図5.30は擁壁底面の最大水平変位について、実験値δ_{exp}と計算値δ_Dを比較したものである。ここに、弾性応答時の水平力がP_yを超える場合、δ_Dは弾性応答時の滑動エネルギーが図5.4の水平荷重－水平変位曲線の台形の面積と一致するとして求めた。図より、旧落石対策便覧による計算値は実験値よりも小さい。一方、新設計法による計算値はばらつきがあるものの実験値と一致している。ただし、変形量が大きくなると実験値からのばらつきが大きくなる傾向にある。

回転、水平変位とも変形量が大きくなると実験値からのズレが大きくなる傾向が見られる。したがって、新設計法においても過度の塑性変形に対しては十分に対応できていないと考えられる。これは、5.3で考察したことと同様に、地盤降伏後の抵抗を一定と仮定していること、回転変形により重心位置が変わること等が影響しているものと考えられる。

表 5.4　旧落石対策便覧の

実験条件			擁壁条件																		
	ケース番号	実験番号	底版幅 (m)	天端幅 (m)	高さ (m)	有効抵抗長 (m)	質量 (t)	擁壁重心に関する質性モーメン	擁壁底版の断面二次モーメント(m⁴)	擁壁の底面積 (m²)	擁壁底面から重心までの距離S(m)	擁壁つま先から重心までの距離XG(m)	鉛直方向地盤反力係数Kv (kN/m³)	せん断バネ係数K (kN/m)	回転バネ係数Kr (kN·m)	i_0^2 (m²)	e_0^2 (m²)	Z1 (m)	l1(m)	l2(m)	落石作用位置h(m)	l(m)
底版幅0.35m 重錘5.4kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	1− 1	SBA0191	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	1− 1	SBA0291	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	1− 1	SBA0391	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	1− 1	SBA0491	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	1− 1	SBA0595	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	1− 1	SBA1094	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	1− 1	SBA1591	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	1− 1	SBA2092	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
底版幅0.35m 重錘2.6kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	1− 4	SBD0191	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	1− 4	SBD0291	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	1− 4	SBD0391	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	1− 4	SBD0491	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	1− 4	SBD0591	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	1− 4	SBD1091	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	1− 4	SBD1592	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	1− 4	SBD2091	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
底版幅0.35m 重錘11.1kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	1− 2	SBB0391	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	1− 2	SBB0491	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	1− 2	SBB0592	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	1− 2	SBB1092	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	1− 2	SBB1591	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	1− 2	SBB2092	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	66.558	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
底版幅0.20m 重錘5.4kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2− 1	SAA0191	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	0.00402222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	15.319	0.0223	0.0133	0.266	0.044	0.544	0.450	0.494
	2− 1	SAA0291	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	0.00402222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	15.319	0.0223	0.0133	0.266	0.044	0.544	0.450	0.494
	2− 1	SAA0391	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	0.00402222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	15.319	0.0223	0.0133	0.266	0.044	0.544	0.450	0.494
	2− 1	SAA0491	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	0.00402222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	15.319	0.0223	0.0133	0.266	0.044	0.544	0.450	0.494
	2− 1	SAA0592	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	0.00402222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	15.319	0.0223	0.0133	0.266	0.044	0.544	0.450	0.494
	2− 1	SAA1091	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	0.00402222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	15.319	0.0223	0.0133	0.266	0.044	0.544	0.450	0.494
	2− 1	SAA1591	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	0.00402222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	15.319	0.0223	0.0133	0.266	0.044	0.544	0.450	0.494
	2− 1	SAA2091	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	0.00402222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	15.319	0.0223	0.0133	0.266	0.044	0.544	0.450	0.494
底版幅0.50m 重錘5.5kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2− 2	SCA0192	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	0.01178241	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	169.753	0.0314	0.0833	0.522	0.327	0.827	0.450	0.777
	2− 2	SCA0292	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	0.01178241	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	169.753	0.0314	0.0833	0.522	0.327	0.827	0.450	0.777
	2− 2	SCA0392	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	0.01178241	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	169.753	0.0314	0.0833	0.522	0.327	0.827	0.450	0.777
	2− 2	SCA0492	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	0.01178241	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	169.753	0.0314	0.0833	0.522	0.327	0.827	0.450	0.777
	2− 2	SCA0592	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	0.01178241	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	169.753	0.0314	0.0833	0.522	0.327	0.827	0.450	0.777
	2− 2	SCA1091	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	0.01178241	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	169.753	0.0314	0.0833	0.522	0.327	0.827	0.450	0.777
	2− 2	SCA1592	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	0.01178241	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	169.753	0.0314	0.0833	0.522	0.327	0.827	0.450	0.777
	2− 2	SCA2091	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	0.01178241	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	169.753	0.0314	0.0833	0.522	0.327	0.827	0.450	0.777
底版幅0.50m 重錘11.1kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2− 2	SCB0191	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	0.01178241	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	169.753	0.0314	0.0833	0.522	0.327	0.827	0.450	0.777
	2− 2	SCB0291	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	0.01178241	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	169.753	0.0314	0.0833	0.522	0.327	0.827	0.450	0.777
	2− 2	SCB0391	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	0.01178241	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	169.753	0.0314	0.0833	0.522	0.327	0.827	0.450	0.777
	2− 2	SCB0491	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	0.01178241	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	169.753	0.0314	0.0833	0.522	0.327	0.827	0.450	0.777
	2− 2	SCB0591	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	0.01178241	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	169.753	0.0314	0.0833	0.522	0.327	0.827	0.450	0.777
	2− 2	SCB1091	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	0.01178241	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	169.753	0.0314	0.0833	0.522	0.327	0.827	0.450	0.777
	2− 2	SCB1591	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	0.01178241	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	169.753	0.0314	0.0833	0.522	0.327	0.827	0.450	0.777
	2− 2	SCB2091	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	0.01178241	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	169.753	0.0314	0.0833	0.522	0.327	0.827	0.450	0.777
底版幅0.20m 重錘11.1kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2− 2	SAB0191	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	0.00402222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	15.319	0.0223	0.0133	0.266	0.044	0.544	0.450	0.494
	2− 2	SAB0291	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	0.00402222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	15.319	0.0223	0.0133	0.266	0.044	0.544	0.450	0.494
	2− 2	SAB0391	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	0.00402222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	15.319	0.0223	0.0133	0.266	0.044	0.544	0.450	0.494
	2− 2	SAB0491	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	0.00402222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	15.319	0.0223	0.0133	0.266	0.044	0.544	0.450	0.494
	2− 2	SAB0591	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	0.00402222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	15.319	0.0223	0.0133	0.266	0.044	0.544	0.450	0.494
	2− 2	SAB1091	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	0.00402222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	15.319	0.0223	0.0133	0.266	0.044	0.544	0.450	0.494
	2− 2	SAB1591	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	0.00402222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	15.319	0.0223	0.0133	0.266	0.044	0.544	0.450	0.494
	2− 2	SAB2091	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	0.00402222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	15.319	0.0223	0.0133	0.266	0.044	0.544	0.450	0.494
底版幅0.35m 重錘5.6kg 衝突位置 0.45m コンクリート	2− 5	CBA0191	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	801224.390	70107.1	2862.708	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	2− 5	CBA0291	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	801224.390	70107.1	2862.708	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	2− 5	CBA0391	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	801224.390	70107.1	2862.708	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	2− 5	CBA0491	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	801224.390	70107.1	2862.708	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	2− 5	CBA0591	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	801224.390	70107.1	2862.708	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	2− 5	CBA1091	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	801224.390	70107.1	2862.708	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	2− 5	CBA1591	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	801224.390	70107.1	2862.708	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	2− 5	CBA1592	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	801224.390	70107.1	2862.708	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598
	2− 5	CBA2091	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	0.0071061	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	801224.390	70107.1	2862.708	0.0254	0.0408	0.352	0.148	0.648	0.450	0.598

設計法による計算結果

便覧式による設計計算

落石質量 M0 (t)	落石速度V0 (m/s)	α'	擁壁の速度V' (m/s)	換算バネ定数K	静的変位 (m)	動的変位 (m)	回転角 θR(°)	変位 δb(m)	落石モーメン ML(kN·m)	水平反力 (kN)	鉛直反力 (kN)	底面中心モーメント M(kN·m)	転倒 e	転倒 Fs		滑動 Fs		支持力 qumax	支持力 qu	支持力 Fs		許容支持力度		x (m)
0.005410	1.358	0.3982	0.0628	102.272	1.89E-05	0.0013	0.1217	0.00031	0.141	0.513	2.747	0.002	0.001	208.55	○	3.09	○	7.923	198.546	25.059	○	7.923	○	−
0.005410	1.921	0.3982	0.0889	102.272	1.89E-05	0.0018	0.1722	0.00044	0.200	0.725	2.747	0.060	0.022	5.33	○	2.19	○	10.792	174.273	16.148	○	10.792	○	−
0.005410	2.352	0.3982	0.1089	102.272	1.89E-05	0.0022	0.2109	0.00054	0.245	0.888	2.747	0.105	0.038	3.05	○	1.79	○	12.994	155.648	11.978	○	12.994	○	−
0.005410	2.716	0.3982	0.1257	102.272	1.89E-05	0.0025	0.2435	0.00063	0.283	1.025	2.747	0.143	0.052	2.24	○	1.55	○	14.850	139.946	9.424	○	14.850	○	−
0.005410	3.037	0.3982	0.1405	102.272	1.89E-05	0.0028	0.2722	0.00070	0.316	1.146	2.747	0.176	0.064	1.82	○	1.38	×	49.581	126.113	2.544	○	16.527	○	0.332
0.005410	4.294	0.3982	0.1987	102.272	1.89E-05	0.0040	0.3850	0.00099	0.447	1.621	2.747	0.307	0.112	1.04	○	0.98	×	87.041	71.837	0.825	×	29.014	○	0.189
0.005410	5.260	0.3982	0.2434	102.272	1.89E-05	0.0049	0.4715	0.00122	0.548	1.985	2.747	0.408	0.148	0.79	×	0.80	×	207.118	30.189	0.146	×	69.039	○	0.080
0.005410	6.073	0.3982	0.2811	102.272	1.89E-05	0.0057	0.5444	0.00141	0.632	2.293	2.747	0.493	0.179	0.65	×	0.69	×	−	0.000	0.000	×	-423.539	○	-0.013
0.002610	1.358	0.3982	0.0311	102.272	9.13E-06	0.0006	0.0594	0.00015	0.069	0.250	2.747	−0.071	−0.026	0.00	○	6.33	○	4.379	228.530	52.187	○	4.379	○	−
0.002610	1.921	0.3982	0.0439	102.272	9.13E-06	0.0009	0.0841	0.00022	0.098	0.354	2.747	−0.042	−0.015	0.00	○	4.48	○	5.780	216.677	37.487	○	5.780	○	−
0.002610	2.352	0.3982	0.0538	102.272	9.13E-06	0.0011	0.1030	0.00027	0.120	0.434	2.747	−0.020	−0.007	0.00	○	3.66	○	6.855	207.582	30.281	○	6.855	○	−
0.002610	2.716	0.3982	0.0621	102.272	9.13E-06	0.0012	0.1189	0.00031	0.138	0.501	2.747	−0.002	−0.001	0.00	○	3.17	○	7.762	199.915	25.757	○	7.762	○	−
0.002610	3.037	0.3982	0.0695	102.272	9.13E-06	0.0014	0.1329	0.00034	0.154	0.560	2.747	0.015	0.005	22.05	○	2.83	○	8.560	193.159	22.565	○	8.560	○	−
0.002610	4.294	0.3982	0.0982	102.272	9.13E-06	0.0020	0.1880	0.00049	0.218	0.792	2.747	0.078	0.029	4.08	○	2.00	○	11.693	166.655	14.253	○	11.693	○	−
0.002610	5.260	0.3982	0.1203	102.272	9.13E-06	0.0024	0.2302	0.00059	0.267	0.970	2.747	0.128	0.046	2.51	○	1.64	○	14.097	146.318	10.379	○	14.097	○	−
0.002610	6.073	0.3982	0.1389	102.272	9.13E-06	0.0028	0.2659	0.00069	0.309	1.120	2.747	0.169	0.062	1.90	○	1.42	×	48.406	129.173	2.669	○	16.135	○	0.340
0.011060	2.352	0.3982	0.2123	102.272	3.87E-05	0.0044	0.4210	0.00109	0.489	1.773	2.747	0.349	0.127	0.92	×	0.89	×	114.757	54.487	0.475	×	38.252	○	0.144
0.011060	2.716	0.3982	0.2451	102.272	3.87E-05	0.0051	0.4862	0.00126	0.565	2.047	2.747	0.425	0.155	0.75	×	0.77	×	270.270	23.135	0.086	×	90.090	○	0.061
0.011060	3.037	0.3982	0.2740	102.272	3.87E-05	0.0057	0.5435	0.00140	0.631	2.289	2.747	0.492	0.179	0.65	×	0.69	×	−	0.000	0.000	×	-464.611	○	-0.012
0.011060	4.294	0.3982	0.3876	102.272	3.87E-05	0.0080	0.7687	0.00199	0.893	3.237	2.747	0.753	0.274	0.43	×	0.49	×	−	0.000	0.000	×	-18.468	○	-0.297
0.011060	5.260	0.3982	0.4747	102.272	3.87E-05	0.0098	0.9414	0.00243	1.094	3.964	2.747	0.954	0.347	0.34	×	0.40	×	−	0.000	0.000	×	-10.633	○	-0.517
0.011060	6.073	0.3982	0.5481	102.272	3.87E-05	0.0113	1.0871	0.00281	1.263	4.578	2.747	1.123	0.409	0.29	×	0.35	×	−	0.000	0.000	×	-7.832	○	-0.701
0.005410	1.358	0.3723	0.1014	17.496	7.53E-05	0.0032	0.3739	0.00028	0.100	0.326	1.766	0.061	0.034	1.94	○	3.12	○	53.833	74.669	1.387	×	17.944	○	0.197
0.005410	1.921	0.3723	0.1435	17.496	7.53E-05	0.0046	0.5288	0.00040	0.141	0.462	1.766	0.102	0.058	1.15	○	2.21	○	83.785	47.975	0.573	×	27.928	○	0.126
0.005410	2.352	0.3723	0.1757	17.496	7.53E-05	0.0056	0.6477	0.00049	0.173	0.565	1.766	0.134	0.076	0.88	×	1.80	○	146.207	27.493	0.188	×	48.736	○	0.072
0.005410	2.716	0.3723	0.2029	17.496	7.53E-05	0.0064	0.7479	0.00057	0.200	0.653	1.766	0.161	0.091	0.73	×	1.56	○	393.108	10.225	0.026	×	131.036	○	0.027
0.005410	3.037	0.3723	0.2268	17.496	7.53E-05	0.0072	0.8362	0.00064	0.224	0.730	1.766	0.184	0.104	0.64	×	1.40	×	−	0.000	0.000	×	-268.632	○	-0.013
0.005410	4.294	0.3723	0.3208	17.496	7.53E-05	0.0102	1.1825	0.00090	0.316	1.032	1.766	0.277	0.157	0.43	×	0.99	×	−	0.000	0.000	×	-20.717	○	-0.170
0.005410	5.260	0.3723	0.3929	17.496	7.53E-05	0.0125	1.4483	0.00110	0.387	1.264	1.766	0.348	0.197	0.34	×	0.81	×	−	0.000	0.000	×	-12.128	○	-0.291
0.005410	6.073	0.3723	0.4536	17.496	7.53E-05	0.0144	1.6723	0.00127	0.447	1.460	1.766	0.408	0.231	0.29	×	0.70	×	−	0.000	0.000	×	-8.987	○	-0.393
0.005500	1.358	0.4799	0.0403	387.857	8.57E-06	0.0007	0.0505	0.00029	0.149	0.587	3.679	−0.137	−0.037	0.00	○	3.62	○	4.078	326.820	80.135	○	4.078	○	−
0.005500	1.921	0.4799	0.0570	387.857	8.57E-06	0.0010	0.0714	0.00041	0.211	0.830	3.679	−0.075	−0.020	0.00	○	2.56	○	5.565	307.661	55.290	○	5.565	○	−
0.005500	2.352	0.4799	0.0698	387.857	8.57E-06	0.0012	0.0874	0.00050	0.259	1.017	3.679	−0.027	−0.007	0.00	○	2.09	○	6.705	292.960	43.693	○	6.705	○	−
0.005500	2.716	0.4799	0.0805	387.857	8.57E-06	0.0014	0.1009	0.00058	0.299	1.174	3.679	0.013	0.003	47.66	○	1.81	○	7.666	280.567	36.598	○	7.666	○	−
0.005500	3.037	0.4799	0.0901	387.857	8.57E-06	0.0015	0.1128	0.00064	0.334	1.313	3.679	0.048	0.013	12.73	○	1.62	○	8.513	269.648	31.674	○	8.513	○	−
0.005500	4.294	0.4799	0.1274	387.857	8.57E-06	0.0022	0.1596	0.00091	0.473	1.856	3.679	0.187	0.051	3.29	○	1.14	×	11.836	226.808	19.162	○	11.836	○	−
0.005500	5.260	0.4799	0.1560	387.857	8.57E-06	0.0027	0.1954	0.00112	0.579	2.273	3.679	0.293	0.080	2.09	○	0.93	×	14.386	193.935	13.481	○	14.386	○	−
0.005500	6.073	0.4799	0.1801	387.857	8.57E-06	0.0031	0.2257	0.00129	0.669	2.625	3.679	0.382	0.104	1.60	○	0.81	×	50.379	166.223	3.299	○	16.793	○	0.438
0.011060	1.358	0.4799	0.0786	387.857	1.72E-05	0.0014	0.1000	0.00057	0.296	1.163	3.679	0.010	0.003	60.78	○	1.83	○	7.600	281.426	37.032	○	7.600	○	−
0.011060	1.921	0.4799	0.1112	387.857	1.72E-05	0.0019	0.1414	0.00081	0.419	1.645	3.679	0.133	0.036	4.62	○	1.29	×	10.544	243.464	23.090	○	10.544	○	−
0.011060	2.352	0.4799	0.1362	387.857	1.72E-05	0.0023	0.1732	0.00099	0.513	2.015	3.679	0.227	0.062	2.70	○	1.05	×	12.804	214.335	16.740	○	12.804	○	−
0.011060	2.716	0.4799	0.1573	387.857	1.72E-05	0.0027	0.2000	0.00114	0.592	2.326	3.679	0.306	0.083	2.00	○	0.91	×	14.709	189.779	12.902	○	14.709	○	−
0.011060	3.037	0.4799	0.1758	387.857	1.72E-05	0.0030	0.2236	0.00128	0.662	2.601	3.679	0.376	0.102	1.63	○	0.82	×	49.804	168.144	3.376	○	16.601	○	0.443
0.011060	4.294	0.4799	0.2487	387.857	1.72E-05	0.0043	0.3162	0.00181	0.937	3.678	3.679	0.651	0.177	0.94	×	0.58	×	100.580	83.259	0.828	×	33.527	○	0.219
0.011060	5.260	0.4799	0.3045	387.857	1.72E-05	0.0053	0.3872	0.00221	1.147	4.505	3.679	0.861	0.234	0.71	×	0.47	×	462.015	18.125	0.039	×	151.005	○	0.048
0.011060	6.073	0.4799	0.3516	387.857	1.72E-05	0.0061	0.4471	0.00255	1.325	5.202	3.679	1.039	0.282	0.59	×	0.41	×	−	0.000	0.000	×	-75.884	○	-0.097
0.011060	1.358	0.3723	0.1924	17.496	0.000154	0.0063	0.7363	0.00056	0.197	0.643	1.766	0.158	0.089	0.75	×	1.59	○	328.865	12.223	0.037	×	109.622	○	0.032
0.011060	1.921	0.3723	0.2720	17.496	0.000154	0.0090	1.0413	0.00079	0.278	0.909	1.766	0.239	0.135	0.49	×	1.12	×	−	0.000	0.000	×	-33.217	○	-0.106
0.011060	2.352	0.3723	0.3332	17.496	0.000154	0.0110	1.2753	0.00097	0.341	1.113	1.766	0.302	0.171	0.39	×	0.92	×	−	0.000	0.000	×	-16.610	○	-0.213
0.011060	2.716	0.3723	0.3847	17.496	0.000154	0.0127	1.4726	0.00112	0.394	1.285	1.766	0.354	0.201	0.33	×	0.79	×	−	0.000	0.000	×	-11.685	○	-0.302
0.011060	3.037	0.3723	0.4301	17.496	0.000154	0.0142	1.6464	0.00125	0.440	1.437	1.766	0.401	0.227	0.29	×	0.71	×	−	0.000	0.000	×	-9.265	○	-0.381
0.011060	4.294	0.3723	0.6083	17.496	0.000154	0.0201	2.3284	0.00177	0.623	2.032	1.766	0.583	0.330	0.20	×	0.50	×	−	0.000	0.000	×	-5.111	○	-0.691
0.011060	5.260	0.3723	0.7450	17.496	0.000154	0.0246	2.8516	0.00217	0.762	2.489	1.766	0.723	0.410	0.16	×	0.41	×	−	0.000	0.000	×	-3.803	○	-0.929
0.011060	6.073	0.3723	0.8603	17.496	0.000154	0.0284	3.2928	0.00250	0.880	2.874	1.766	0.841	0.476	0.14	×	0.35	×	−	0.000	0.000	×	-3.128	○	-1.129
0.005640	1.358	0.3982	0.0654	4398.8	4.59E-07	0.0002	0.0193	0.00005	0.966	3.502	2.747	0.826	0.301	0.39	×	0.45	×	−	136048.634	0.000	×	-14.564	○	-0.377
0.005640	1.921	0.3982	0.0925	4398.8	4.59E-07	0.0003	0.0273	0.00007	1.366	4.952	2.747	1.226	0.446	0.26	×	0.32	×	−	123187.979	0.000	×	-6.747	○	-0.814
0.005640	2.352	0.3982	0.1133	4398.8	4.59E-07	0.0003	0.0335	0.00009	1.673	6.065	2.747	1.533	0.558	0.21	×	0.26	×	−	113319.652	0.000	×	-4.779	○	-1.150
0.005640	2.716	0.3982	0.1308	4398.8	4.59E-07	0.0004	0.0387	0.00010	1.932	7.003	2.747	1.792	0.652	0.18	×	0.23	×	−	105000.267	0.000	×	-3.836	○	-1.432
0.005640	3.037	0.3982	0.1462	4398.8	4.59E-07	0.0005	0.0432	0.00011	2.160	7.830	2.747	2.020	0.735	0.16	×	0.20	×	−	97670.742	0.000	×	-3.268	○	-1.681
0.005640	4.294	0.3982	0.2068	4398.8	4.59E-07	0.0006	0.0611	0.00016	3.055	11.073	2.747	2.915	1.061	0.11	×	0.14	×	−	68913.444	0.000	×	-2.067	○	-2.658
0.005640	5.260	0.3982	0.2533	4398.8	4.59E-07	0.0008	0.0749	0.00019	3.741	13.562	2.747	3.601	1.311	0.09	×	0.12	×	−	46847.194	0.000	×	-1.612	○	-3.408
0.005640	5.260	0.3982	0.2533	4398.8	4.59E-07	0.0008	0.0749	0.00019	3.741	13.562	2.747	3.601	1.311	0.09	×	0.12	×	−	46847.194	0.000	×	-1.612	○	-3.408
0.005640	6.073	0.3982	0.2924	4398.8	4.59E-07	0.0009	0.0865	0.00022	4.320	15.660	2.747	4.180	1.522	0.08	×	0.10	×	−	28244.484	0.000	×	-1.360	○	-4.040

表 5.5　旧落石対策便覧の設計法に

ケース	番号	実験番号	弾性域の地盤バネ定数 Kr0(kN・m)	基礎の応答変位 回転角 θN(°)	基礎の応答変位 水平変位 δN(mm)	モーメントと回転角の関係 浮上り限界モーメント My(kN・m)	自重によるモーメント M0(kN・m)	浮上り限界回転角 θy(°)	最大抵抗モーメント Mu(kN・m)	極限支持力時回転 θu(°)	降伏モーメント My(kN・m)	降伏回転角 θy(°)	割線バネ係数(My/θy) Kr(kN・m)	My～Muの回転バネ係 Kr1(kN・m)	最大抵抗までのエネル Eu(J)
底版幅0.35m 重錘5.4kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	1- 1	SBA0191	66.558	0.137	0.315	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
	1- 1	SBA0291	66.558	0.194	0.445	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
	1- 1	SBA0391	66.558	0.238	0.545	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
	1- 1	SBA0491	66.558	0.275	0.629	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
	1- 1	SBA0595	66.558	0.307	0.703	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
	1- 1	SBA1094	66.558	0.434	0.995	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
	1- 1	SBA1591	66.558	0.539	1.218	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
	1- 1	SBA2092	66.558	0.643	1.788	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
底版幅0.35m 重錘2.6kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	1- 4	SBD0191	66.558	0.067	0.154	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
	1- 4	SBD0291	66.558	0.095	0.217	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
	1- 4	SBD0391	66.558	0.116	0.266	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
	1- 4	SBD0491	66.558	0.134	0.307	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
	1- 4	SBD0591	66.558	0.150	0.343	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
	1- 4	SBD1091	66.558	0.212	0.486	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
	1- 4	SBD1592	66.558	0.260	0.595	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
	1- 4	SBD2091	66.558	0.300	0.687	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
底版幅0.35m 重錘11.1kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	1- 2	SBB0391	66.558	0.475	1.088	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
	1- 2	SBB0491	66.558	0.559	1.582	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
	1- 2	SBB0592	66.558	0.642	1.785	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
	1- 2	SBB1092	66.558	1.059	2.798	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
	1- 2	SBB1591	66.558	1.475	3.812	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
	1- 2	SBB2092	66.558	1.892	4.826	0.160	−0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279	1.620
底版幅0.20m 重錘5.4kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2- 1	SAA0191	15.319	0.429	0.284	0.059	−0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659	0.875
	2- 1	SAA0291	15.319	0.606	0.402	0.059	−0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659	0.875
	2- 1	SAA0391	15.319	0.743	0.492	0.059	−0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659	0.875
	2- 1	SAA0491	15.319	0.874	0.568	0.059	−0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659	0.875
	2- 1	SAA0592	15.319	1.005	0.635	0.059	−0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659	0.875
	2- 1	SAA1091	15.319	1.660	0.907	0.059	−0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659	0.875
	2- 1	SAA1591	15.319	2.314	1.134	0.059	−0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659	0.875
	2- 1	SAA2091	15.319	2.968	1.362	0.059	−0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659	0.875
底版幅0.50m 重錘5.5kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2- 2	SCA0192	169.753	0.055	0.288	0.306	−0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877	2.002
	2- 2	SCA0292	169.753	0.078	0.408	0.306	−0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877	2.002
	2- 2	SCA0392	169.753	0.096	0.499	0.306	−0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877	2.002
	2- 2	SCA0492	169.753	0.111	0.576	0.306	−0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877	2.002
	2- 2	SCA0592	169.753	0.124	0.644	0.306	−0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877	2.002
	2- 2	SCA1091	169.753	0.176	0.911	0.306	−0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877	2.002
	2- 2	SCA1592	169.753	0.215	1.116	0.306	−0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877	2.002
	2- 2	SCA2091	169.753	0.248	1.289	0.306	−0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877	2.002
底版幅0.50m 重錘11.1kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2- 2	SCB0191	169.753	0.110	0.571	0.306	−0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877	2.002
	2- 2	SCB0291	169.753	0.156	0.807	0.306	−0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877	2.002
	2- 2	SCB0391	169.753	0.190	0.989	0.306	−0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877	2.002
	2- 2	SCB0491	169.753	0.220	1.142	0.306	−0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877	2.002
	2- 2	SCB0591	169.753	0.246	1.277	0.306	−0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877	2.002
	2- 2	SCB1091	169.753	0.351	2.670	0.306	−0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877	2.002
	2- 2	SCB1591	169.753	0.449	3.452	0.306	−0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877	2.002
	2- 2	SCB2091	169.753	0.548	4.234	0.306	−0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877	2.002
底版幅0.20m 重錘11.1kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2- 2	SAB0191	15.319	0.858	0.559	0.059	−0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659	0.875
	2- 2	SAB0291	15.319	1.366	0.791	0.059	−0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659	0.875
	2- 2	SAB0391	15.319	1.873	0.981	0.059	−0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659	0.875
	2- 2	SAB0491	15.319	2.380	1.158	0.059	−0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659	0.875
	2- 2	SAB0591	15.319	2.888	1.334	0.059	−0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659	0.875
	2- 2	SAB1091	15.319	5.425	2.216	0.059	−0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659	0.875
	2- 2	SAB1591	15.319	7.962	3.098	0.059	−0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659	0.875
	2- 2	SAB2091	15.319	10.499	3.979	0.059	−0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659	0.875
底版幅0.35m 重錘5.6kg 衝突位置 0.45m コンクリート	2- 5	CBA0191	2862.708	0.024	0.073	0.160	−0.140	0.003	0.480	0.016	0.620	0.019	1888.352	1431.354	0.102
	2- 5	CBA0291	2862.708	0.040	0.128	0.160	−0.140	0.003	0.480	0.016	0.620	0.019	1888.352	1431.354	0.102
	2- 5	CBA0391	2862.708	0.055	0.183	0.160	−0.140	0.003	0.480	0.016	0.620	0.019	1888.352	1431.354	0.102
	2- 5	CBA0491	2862.708	0.070	0.239	0.160	−0.140	0.003	0.480	0.016	0.620	0.019	1888.352	1431.354	0.102
	2- 5	CBA0591	2862.708	0.085	0.294	0.160	−0.140	0.003	0.480	0.016	0.620	0.019	1888.352	1431.354	0.102
	2- 5	CBA1091	2862.708	0.160	0.570	0.160	−0.140	0.003	0.480	0.016	0.620	0.019	1888.352	1431.354	0.102
	2- 5	CBA1591	2862.708	0.235	0.845	0.160	−0.140	0.003	0.480	0.016	0.620	0.019	1888.352	1431.354	0.102
	2- 5	CBA1592	2862.708	0.235	0.845	0.160	−0.140	0.003	0.480	0.016	0.620	0.019	1888.352	1431.354	0.102
	2- 5	CBA2091	2862.708	0.311	1.121	0.160	−0.140	0.003	0.480	0.016	0.620	0.019	1888.352	1431.354	0.102

よる変位量とエネルギー

設計計算におけるエネルギー						履歴と骨のエネルギー比			降伏比率(回転角)			降伏比率(水平変位)		
最大抵抗水平力 Hu(kN)	滑動限界変位 δu(mm)	弾性滑動エネル Esu(J)	擁壁回転エネル Ew4d(J)	擁壁滑動エネル Ew2d(J)	擁壁のエネルギー Ewd(J)	実験値 Ew1	設計 Ewd/ER	実験 Ew1/ER	実験値 θexp(°)	実験 θexp/θu	設計 θN/θu	実験値 δexp(mm)	実験 δexp/δu	設計 δN/δu
1.585	1.54199	1.222	0.150	0.081	0.231	0.739	4.63%	14.81%	0.250	0.555	0.305	0.252	0.163	0.204
1.585	1.54199	1.222	0.300	0.161	0.462	1.597	4.63%	16.01%	0.370	0.821	0.431	0.512	0.332	0.288
1.585	1.54199	1.222	0.451	0.242	0.693	2.243	4.63%	14.99%	0.460	1.020	0.527	0.589	0.382	0.353
1.585	1.54199	1.222	0.601	0.322	0.923	2.586	4.63%	12.96%	0.520	1.154	0.609	0.611	0.396	0.408
1.585	1.54199	1.222	0.751	0.403	1.154	3.344	4.63%	13.41%	0.600	1.331	0.681	0.731	0.474	0.456
1.585	1.54199	1.222	1.502	0.806	2.309	6.258	4.63%	12.55%	0.940	2.085	0.963	1.495	0.969	0.645
1.585	1.54199	1.222	2.254	1.209	3.463	8.794	4.63%	11.75%	1.160	2.573	1.196	2.648	1.717	0.790
1.585	1.54199	1.222	3.005	1.612	4.617	10.162	4.63%	10.19%	1.330	2.950	1.427	4.034	2.616	1.160
1.585	1.54199	1.222	0.036	0.019	0.055	0.173	2.29%	7.19%	0.140	0.311	0.149	0.178	0.115	0.100
1.585	1.54199	1.222	0.072	0.038	0.110	0.286	2.29%	5.95%	0.180	0.399	0.210	0.288	0.187	0.141
1.585	1.54199	1.222	0.107	0.058	0.165	0.470	2.29%	6.51%	0.230	0.510	0.258	0.204	0.132	0.173
1.585	1.54199	1.222	0.143	0.077	0.220	0.701	2.29%	7.28%	0.260	0.577	0.297	0.228	0.148	0.199
1.585	1.54199	1.222	0.179	0.096	0.275	0.858	2.29%	7.13%	0.300	0.665	0.333	0.238	0.154	0.223
1.585	1.54199	1.222	0.358	0.192	0.551	1.253	2.29%	5.21%	0.430	0.954	0.470	0.240	0.155	0.315
1.585	1.54199	1.222	0.537	0.288	0.826	2.143	2.29%	5.94%	0.500	1.109	0.576	0.344	0.223	0.386
1.585	1.54199	1.222	0.717	0.384	1.101	2.871	2.29%	5.97%	0.620	1.375	0.665	0.389	0.252	0.445
1.585	1.54199	1.222	1.797	0.964	2.761	7.764	9.02%	25.38%	1.140	2.529	1.055	1.115	0.723	0.705
1.585	1.54199	1.222	2.396	1.286	3.682	9.270	9.02%	22.72%	1.220	2.706	1.239	1.370	0.889	1.026
1.585	1.54199	1.222	2.995	1.607	4.602	12.225	9.02%	23.97%	1.400	3.106	1.424	2.453	1.591	1.157
1.585	1.54199	1.222	5.990	3.214	9.204	23.282	9.02%	22.83%	2.040	4.525	2.349	6.684	4.335	1.815
1.585	1.54199	1.222	8.985	4.821	13.806	33.462	9.02%	21.87%	2.680	5.945	3.273	10.910	7.075	2.472
1.585	1.54199	1.222	11.979	6.428	18.408	38.990	9.02%	19.12%	3.210	7.121	4.197	14.021	9.093	3.129
1.019	0.90409	0.461	0.326	0.046	0.373	1.156	7.47%	23.18%	0.460	0.656	0.611	0.326	0.360	0.314
1.019	0.90409	0.461	0.653	0.093	0.745	2.166	7.47%	21.71%	0.690	0.983	0.864	0.518	0.573	0.444
1.019	0.90409	0.461	0.979	0.139	1.118	2.802	7.47%	18.72%	0.910	1.297	1.060	0.696	0.770	0.544
1.019	0.90409	0.461	1.305	0.185	1.490	5.324	7.47%	26.68%	1.380	1.967	1.246	0.740	0.819	0.628
1.019	0.90409	0.461	1.631	0.232	1.863	6.649	7.47%	26.66%	1.510	2.152	1.433	0.552	0.611	0.703
1.019	0.90409	0.461	3.263	0.464	3.726	10.790	7.47%	21.63%	2.360	3.363	2.365	2.099	2.322	1.003
1.019	0.90409	0.461	4.894	0.695	5.589	13.687	7.47%	18.29%	3.310	4.717	3.298	3.243	3.587	1.255
1.019	0.90409	0.461	6.525	0.927	7.452	16.676	7.47%	16.71%	4.220	6.014	4.230	5.491	6.073	1.506
2.123	2.21317	2.350	0.066	0.085	0.150	0.466	2.97%	9.19%	0.220	0.719	0.181	0.108	0.049	0.130
2.123	2.21317	2.350	0.132	0.169	0.301	1.028	2.97%	10.13%	0.290	0.948	0.256	0.247	0.112	0.184
2.123	2.21317	2.350	0.197	0.254	0.451	1.611	2.97%	10.59%	0.330	1.078	0.314	0.297	0.134	0.226
2.123	2.21317	2.350	0.263	0.338	0.602	2.178	2.97%	10.74%	0.370	1.209	0.363	0.377	0.170	0.260
2.123	2.21317	2.350	0.329	0.423	0.752	2.685	2.97%	10.59%	0.380	1.242	0.405	0.503	0.227	0.291
2.123	2.21317	2.350	0.658	0.846	1.504	5.438	2.97%	10.72%	0.540	1.764	0.573	1.079	0.487	0.412
2.123	2.21317	2.350	0.987	1.269	2.256	9.738	2.97%	12.80%	1.110	3.627	0.702	2.556	1.155	0.504
2.123	2.21317	2.350	1.317	1.692	3.008	10.298	2.97%	10.15%	0.690	2.255	0.811	2.723	1.230	0.582
2.123	2.21317	2.350	0.258	0.332	0.590	2.276	5.79%	22.32%	0.270	0.882	0.359	0.754	0.341	0.258
2.123	2.21317	2.350	0.517	0.664	1.181	4.465	5.79%	21.89%	0.300	0.980	0.508	1.233	0.557	0.365
2.123	2.21317	2.350	0.775	0.996	1.771	6.424	5.79%	21.00%	0.380	1.242	0.622	1.868	0.844	0.447
2.123	2.21317	2.350	1.034	1.328	2.362	8.573	5.79%	21.02%	0.430	1.405	0.719	2.580	1.166	0.516
2.123	2.21317	2.350	1.292	1.660	2.952	9.734	5.79%	19.09%	0.440	1.438	0.803	3.141	1.419	0.577
2.123	2.21317	2.350	2.584	3.321	5.905	18.708	5.79%	18.34%	1.190	3.888	1.146	6.841	3.091	1.207
2.123	2.21317	2.350	3.877	4.981	8.857	27.876	5.79%	18.22%	1.090	3.562	1.468	8.854	4.000	1.560
2.123	2.21317	2.350	5.169	6.641	11.810	31.759	5.79%	15.57%	1.790	5.849	1.791	12.002	5.423	1.913
1.019	0.90409	0.461	1.265	0.180	1.445	4.122	14.17%	40.42%	0.340	0.485	1.223	1.248	1.381	0.619
1.019	0.90409	0.461	2.530	0.360	2.889	8.302	14.17%	40.70%	1.370	1.952	1.946	1.304	1.443	0.875
1.019	0.90409	0.461	3.795	0.539	4.334	12.449	14.17%	40.69%	0.840	1.197	2.669	4.182	4.626	1.085
1.019	0.90409	0.461	5.060	0.719	5.779	14.947	14.17%	36.64%	2.700	3.848	3.392	4.262	4.714	1.280
1.019	0.90409	0.461	6.324	0.899	7.223	15.128	14.17%	29.67%	4.120	5.871	4.115	4.673	5.169	1.475
1.019	0.90409	0.461	12.649	1.798	14.446	32.767	14.17%	32.13%	7.250	10.332	7.731	9.849	10.894	2.451
1.019	0.90409	0.461	18.973	2.696	21.669	42.469	14.17%	27.76%	9.660	13.766	11.346	15.409	17.044	3.426
1.019	0.90409	0.461	25.298	3.595	28.893	48.914	14.17%	23.98%	11.310	16.117	14.961	19.790	21.889	4.402
1.585	0.03585	0.028	0.163	0.087	0.250	0.871	4.82%	16.75%	0.200	10.638	1.301	0.170	4.755	2.039
1.585	0.03585	0.028	0.326	0.175	0.501	1.680	4.82%	16.16%	0.360	19.148	2.103	0.231	6.439	3.577
1.585	0.03585	0.028	0.489	0.262	0.751	4.637	4.82%	29.72%	0.640	34.040	2.904	0.326	9.106	5.116
1.585	0.03585	0.028	0.652	0.350	1.002	5.756	4.82%	27.67%	0.820	43.614	3.706	0.184	5.143	6.654
1.585	0.03585	0.028	0.815	0.437	1.252	4.624	4.82%	17.78%	0.880	46.805	4.507	0.642	17.907	8.193
1.585	0.03585	0.028	1.630	0.874	2.504	2.784	4.82%	5.35%	1.320	70.208	8.515	0.873	24.347	15.885
1.585	0.03585	0.028	2.445	1.312	3.756	18.81337	4.82%	24.12%	1.780	94.675	12.522	1.281	35.735	23.578
1.585	0.03585	0.028	2.445	1.312	3.756	5.089749	4.82%	6.52%	1.900	101.057	12.522	1.211	33.788	23.578
1.585	0.03585	0.028	3.259	1.749	5.008	7.264751	4.82%	6.98%	2.090	111.163	16.530	2.910	81.178	31.270

表 5.6　旧落石対策便覧の

	ケース番号	実験番号	振り子の高さ h0(m)	設計値 回転エネルギー比 Ew4d/Ewd	設計値 滑動エネルギー比 Ew2d/Ewd	設計値 落石と擁壁のエネルギー Ewd/E_R	実験値 回転エネルギー比 Ew4d/Ewd	実験値 滑動エネルギー比 Ew2d/Ewd	実験値 落石と擁壁のエネルギー Ew1/E_R	水平力の条件 極限支持力となる水平力 H(kN)	水平力の条件 滑動抵抗力 Hu(kN)
底版幅0.35m 重錘5.4kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	1- 1	SBA0191	0.1	65.1%	34.9%	4.6%	93.0%	7.0%	14.8%	0.939	1.585
	1- 1	SBA0291	0.2	65.1%	34.9%	4.6%	86.6%	13.4%	16.0%	0.939	1.585
	1- 1	SBA0391	0.3	65.1%	34.9%	4.6%	87.4%	12.6%	15.0%	0.939	1.585
	1- 1	SBA0491	0.4	65.1%	34.9%	4.6%	88.2%	11.8%	13.0%	0.939	1.585
	1- 1	SBA0595	0.5	65.1%	34.9%	4.6%	87.0%	13.0%	13.4%	0.939	1.585
	1- 1	SBA1094	1.0	65.1%	34.9%	4.6%	76.5%	23.5%	12.5%	0.939	1.585
	1- 1	SBA1591	1.5	65.1%	34.9%	4.6%	65.3%	34.7%	11.8%	0.939	1.585
	1- 1	SBA2092	2.0	65.1%	34.9%	4.6%	51.2%	48.8%	10.2%	0.939	1.585
		設計	設計				65.1%	34.9%	4.6%	59.2%	
底版幅0.35m 重錘2.6kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	1- 4	SBD0191	0.1	65.1%	34.9%	2.3%	85.1%	14.9%	7.2%	0.939	1.585
	1- 4	SBD0291	0.2	65.1%	34.9%	2.3%	76.4%	23.6%	5.9%	0.939	1.585
	1- 4	SBD0391	0.3	65.1%	34.9%	2.3%	92.8%	7.2%	6.5%	0.939	1.585
	1- 4	SBD0491	0.4	65.1%	34.9%	2.3%	94.0%	6.0%	7.3%	0.939	1.585
	1- 4	SBD0591	0.5	65.1%	34.9%	2.3%	94.6%	5.4%	7.1%	0.939	1.585
	1- 4	SBD1091	1.0	65.1%	34.9%	2.3%	96.3%	3.7%	5.2%	0.939	1.585
	1- 4	SBD1592	1.5	65.1%	34.9%	2.3%	95.5%	4.5%	5.9%	0.939	1.585
	1- 4	SBD2091	2.0	65.1%	34.9%	2.3%	95.7%	4.3%	6.0%	0.939	1.585
		設計	設計				65.1%	34.9%	2.3%	59.2%	
底版幅0.35m 重錘11.1kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	1- 2	SBB0391	0.3	65.1%	34.9%	9.0%	87.7%	12.3%	25.4%	0.939	1.585
	1- 2	SBB0491	0.4	65.1%	34.9%	9.0%	85.9%	14.1%	22.7%	0.939	1.585
	1- 2	SBB0592	0.5	65.1%	34.9%	9.0%	77.2%	22.8%	24.0%	0.939	1.585
	1- 2	SBB1092	1.0	65.1%	34.9%	9.0%	63.1%	36.9%	22.8%	0.939	1.585
	1- 2	SBB1591	1.5	65.1%	34.9%	9.0%	57.0%	43.0%	21.9%	0.939	1.585
	1- 2	SBB2092	2.0	65.1%	34.9%	9.0%	52.1%	47.9%	19.1%	0.939	1.585
		設計	設計				65.1%	34.9%	9.0%	59.2%	
底版幅0.20m 重錘5.4kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2- 1	SAA0191	0.1	87.6%	12.4%	7.5%	94.7%	5.3%	23.2%	0.293	1.019
	2- 1	SAA0291	0.2	87.6%	12.4%	7.5%	92.9%	7.1%	21.7%	0.293	1.019
	2- 1	SAA0391	0.3	87.6%	12.4%	7.5%	90.1%	9.9%	18.7%	0.293	1.019
	2- 1	SAA0491	0.4	87.6%	12.4%	7.5%	94.1%	5.9%	26.7%	0.293	1.019
	2- 1	SAA0592	0.5	87.6%	12.4%	7.5%	97.4%	2.6%	26.7%	0.293	1.019
	2- 1	SAA1091	1.0	87.6%	12.4%	7.5%	86.0%	14.0%	21.6%	0.293	1.019
	2- 1	SAA1591	1.5	87.6%	12.4%	7.5%	81.6%	18.4%	18.3%	0.293	1.019
	2- 1	SAA2091	2.0	87.6%	12.4%	7.5%	73.0%	27.0%	16.7%	0.293	1.019
		設計	設計				87.6%	12.4%	7.5%	28.7%	
底版幅0.50m 重錘5.5kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2- 2	SCA0192	0.1	43.8%	56.2%	3.0%	97.4%	2.6%	9.2%	1.838	2.123
	2- 2	SCA0292	0.2	43.8%	56.2%	3.0%	94.0%	6.0%	10.1%	1.838	2.123
	2- 2	SCA0392	0.3	43.8%	56.2%	3.0%	94.4%	5.6%	10.6%	1.838	2.123
	2- 2	SCA0492	0.4	43.8%	56.2%	3.0%	93.3%	6.7%	10.7%	1.838	2.123
	2- 2	SCA0592	0.5	43.8%	56.2%	3.0%	90.4%	9.6%	10.6%	1.838	2.123
	2- 2	SCA1091	1.0	43.8%	56.2%	3.0%	78.8%	21.2%	10.7%	1.838	2.123
	2- 2	SCA1592	1.5	43.8%	56.2%	3.0%	60.3%	39.7%	12.8%	1.838	2.123
	2- 2	SCA2091	2.0	43.8%	56.2%	3.0%	59.5%	40.5%	10.2%	1.838	2.123
		設計	設計				43.8%	56.2%	3.0%	86.6%	
底版幅0.50m 重錘11.1kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2- 2	SCB0191	0.1	43.8%	56.2%	5.8%	74.5%	25.5%	22.3%	1.838	2.123
	2- 2	SCB0291	0.2	43.8%	56.2%	5.8%	67.8%	32.2%	21.9%	1.838	2.123
	2- 2	SCB0391	0.3	43.8%	56.2%	5.8%	59.5%	40.5%	21.0%	1.838	2.123
	2- 2	SCB0491	0.4	43.8%	56.2%	5.8%	54.4%	45.6%	21.0%	1.838	2.123
	2- 2	SCB0591	0.5	43.8%	56.2%	5.8%	49.2%	50.8%	19.1%	1.838	2.123
	2- 2	SCB1091	1.0	43.8%	56.2%	5.8%	37.2%	62.8%	18.3%	1.838	2.123
	2- 2	SCB1591	1.5	43.8%	56.2%	5.8%	44.6%	55.4%	18.2%	1.838	2.123
	2- 2	SCB2091	2.0	43.8%	56.2%	5.8%	33.2%	66.8%	15.6%	1.838	2.123
		設計	設計				43.8%	56.2%	5.8%	86.6%	
底版幅0.20m 重錘11.1kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2- 2	SAB0191	0.1	87.6%	12.4%	14.2%	81.5%	18.5%	40.4%	0.293	1.019
	2- 2	SAB0291	0.2	87.6%	12.4%	14.2%	90.2%	9.8%	40.7%	0.293	1.019
	2- 2	SAB0391	0.3	87.6%	12.4%	14.2%	73.1%	26.9%	40.7%	0.293	1.019
	2- 2	SAB0491	0.4	87.6%	12.4%	14.2%	77.1%	22.9%	36.6%	0.293	1.019
	2- 2	SAB0591	0.5	87.6%	12.4%	14.2%	75.0%	25.0%	29.7%	0.293	1.019
	2- 2	SAB1091	1.0	87.6%	12.4%	14.2%	74.5%	25.5%	32.1%	0.293	1.019
	2- 2	SAB1591	1.5	87.6%	12.4%	14.2%	68.8%	31.2%	27.8%	0.293	1.019
	2- 2	SAB2091	2.0	87.6%	12.4%	14.2%	65.0%	35.0%	24.0%	0.293	1.019
		設計	設計				87.6%	12.4%	14.2%	28.7%	
底版幅0.35m 重錘5.6kg 衝突位置 0.45m コンクリート	2- 5	CBA0191	0.1	65.1%	34.9%	4.8%	97.3%	2.7%	16.8%	1.377	1.585
	2- 5	CBA0291	0.2	65.1%	34.9%	4.8%	100.0%	0.0%	16.2%	1.377	1.585
	2- 5	CBA0391	0.3	65.1%	34.9%	4.8%	98.1%	1.9%	29.7%	1.377	1.585
	2- 5	CBA0491	0.4	65.1%	34.9%	4.8%	100.0%	0.0%	27.7%	1.377	1.585
	2- 5	CBA0591	0.5	65.1%	34.9%	4.8%	92.7%	7.3%	17.8%	1.377	1.585
	2- 5	CBA1091	1.0	65.1%	34.9%	4.8%	77.7%	22.3%	5.4%	1.377	1.585
	2- 5	CBA1591	1.5	65.1%	34.9%	4.8%	94.3%	5.7%	24.1%	1.377	1.585
	2- 5	CBA1592	1.5	65.1%	34.9%	4.8%	81.0%	19.0%	6.5%	1.377	1.585
	2- 5	CBA2091	2.0	65.1%	34.9%	4.8%	54.6%	45.4%	7.0%	1.377	1.585
		設計	設計				65.1%	34.9%	4.8%	86.9%	

設計計算値と実験値の比較

	設計計算結果と実験結果の比較											
設計水平力 Hd(kN)	実験による擁壁速度 Vexp(m/s)	速度比率 V/Vexp	実験回転角 θ exp(°)	回転比率 θ d/ θ exp	実験水平変位 δ exp(m)	水平変位比率 δ d/ δ exp	実験擁壁エネル Ew1(J)	擁壁エネルギー比 Ew1d/Ew1	実験回転エネル Ew4(J)	回転エネルギー比率 Ew4d/Ew4	実験滑動エネル Ew2(J)	滑動エネルギー比 Ew2d/Ew2
0.513	0.134	0.470	0.25	0.549	0.00025	1248.897	0.739	0.312	0.687	0.219	0.052	1.560
0.725	0.197	0.452	0.37	0.525	0.00051	868.541	1.597	0.289	1.383	0.217	0.214	0.754
0.888	0.233	0.467	0.46	0.517	0.00059	925.559	2.243	0.309	1.961	0.230	0.282	0.857
1.025	0.250	0.502	0.52	0.528	0.00061	1029.161	2.586	0.357	2.281	0.263	0.304	1.059
1.146	0.285	0.494	0.60	0.512	0.00073	961.566	3.344	0.345	2.908	0.258	0.436	0.925
1.621	0.389	0.511	0.94	0.462	0.00149	665.437	6.258	0.369	4.785	0.314	1.473	0.547
1.985	0.461	0.527	1.16	0.465	0.00265	460.083	8.794	0.394	5.739	0.393	3.055	0.396
2.293	0.496	0.567	1.33	0.484	0.00403	443.219	10.162	0.454	5.204	0.577	4.957	0.325
0.250	0.065	0.480	0.14	0.479	0.00018	863.672	0.173	0.318	0.147	0.243	0.026	0.746
0.354	0.083	0.528	0.18	0.527	0.00029	754.378	0.286	0.385	0.219	0.328	0.068	0.569
0.434	0.107	0.504	0.23	0.505	0.00020	1302.170	0.470	0.352	0.436	0.247	0.034	1.696
0.501	0.130	0.477	0.26	0.516	0.00023	1346.604	0.701	0.314	0.659	0.218	0.042	1.813
0.560	0.144	0.482	0.30	0.500	0.00024	1441.758	0.858	0.321	0.811	0.221	0.046	2.079
0.792	0.174	0.564	0.43	0.493	0.00068	709.277	1.253	0.439	1.207	0.297	0.047	4.104
0.970	0.228	0.528	0.50	0.519	0.00034	1730.879	2.143	0.385	2.047	0.263	0.096	2.996
1.120	0.264	0.527	0.62	0.484	0.00039	1766.009	2.871	0.383	2.748	0.261	0.123	3.119
1.773	0.434	0.490	1.14	0.417	0.00112	975.485	7.764	0.356	6.812	0.264	0.952	1.012
2.047	0.474	0.517	1.22	0.458	0.00137	1154.520	9.270	0.397	7.967	0.301	1.302	0.987
2.289	0.544	0.504	1.40	0.459	0.00245	727.525	12.225	0.376	9.437	0.317	2.788	0.576
3.237	0.751	0.516	2.04	0.519	0.00668	418.653	23.282	0.395	14.689	0.408	8.593	0.374
3.964	0.900	0.527	2.68	0.551	0.01091	349.412	33.462	0.413	19.071	0.471	14.390	0.335
4.578	0.972	0.564	3.21	0.589	0.01402	344.172	38.990	0.472	20.330	0.589	18.659	0.344
0.326	0.207	0.491	0.46	0.932	0.00033	872.616	1.156	0.322	1.095	0.298	0.061	0.761
0.462	0.283	0.507	0.69	0.878	0.00052	775.868	2.166	0.344	2.012	0.324	0.154	0.602
0.565	0.322	0.546	0.91	0.817	0.00070	707.185	2.802	0.399	2.524	0.388	0.278	0.500
0.653	0.443	0.458	1.38	0.634	0.00074	767.313	5.324	0.280	5.009	0.261	0.315	0.589
0.730	0.495	0.458	1.51	0.666	0.00055	1150.881	6.649	0.280	6.474	0.252	0.175	1.325
1.032	0.631	0.508	2.36	0.703	0.00210	432.020	10.790	0.345	9.277	0.352	1.513	0.306
1.264	0.711	0.553	3.31	0.699	0.00324	349.777	13.687	0.408	11.165	0.438	2.522	0.276
1.460	0.785	0.578	4.22	0.703	0.00549	248.034	16.676	0.447	12.172	0.536	4.504	0.206
0.587	0.087	0.460	0.22	0.252	0.00011	2667.880	0.466	0.323	0.454	0.145	0.012	7.118
0.830	0.130	0.438	0.29	0.271	0.00025	1650.408	1.028	0.293	0.966	0.136	0.062	2.724
1.017	0.163	0.429	0.33	0.291	0.00030	1680.429	1.611	0.280	1.521	0.130	0.090	2.824
1.174	0.189	0.426	0.37	0.300	0.00038	1528.284	2.178	0.276	2.033	0.130	0.145	2.336
1.313	0.210	0.429	0.38	0.327	0.00050	1280.054	2.685	0.280	2.427	0.136	0.258	1.639
1.856	0.299	0.426	0.54	0.325	0.00108	844.738	5.438	0.277	4.285	0.154	1.153	0.733
2.273	0.400	0.390	1.11	0.194	0.00256	436.605	9.738	0.232	5.870	0.168	3.868	0.328
2.625	0.411	0.438	0.69	0.360	0.00272	473.299	10.298	0.292	6.124	0.215	4.174	0.405
1.163	0.193	0.407	0.27	0.407	0.00075	756.885	2.276	0.259	1.696	0.152	0.580	0.573
1.645	0.271	0.411	0.30	0.518	0.00123	654.789	4.465	0.265	3.028	0.171	1.437	0.462
2.015	0.325	0.419	0.38	0.501	0.00187	529.315	6.424	0.276	3.820	0.203	2.604	0.382
2.326	0.375	0.419	0.43	0.511	0.00258	442.662	8.573	0.276	4.661	0.222	3.912	0.340
2.601	0.400	0.440	0.44	0.559	0.00314	406.475	9.734	0.303	4.791	0.270	4.943	0.336
3.678	0.554	0.449	1.19	0.295	0.00684	390.339	18.708	0.316	6.966	0.371	11.742	0.283
4.505	0.677	0.450	1.09	0.412	0.00885	389.939	27.876	0.318	12.436	0.312	15.440	0.323
5.202	0.722	0.487	1.79	0.306	0.01200	352.789	31.759	0.372	10.533	0.491	21.226	0.313
0.643	0.390	0.493	0.34	2.524	0.00125	448.118	4.122	0.350	3.360	0.377	0.762	0.236
0.909	0.554	0.491	1.37	0.997	0.00130	606.558	8.302	0.348	7.490	0.338	0.812	0.443
1.113	0.678	0.492	0.84	2.230	0.00418	234.619	12.449	0.348	9.099	0.417	3.350	0.161
1.285	0.743	0.518	2.70	0.882	0.00426	271.588	14.947	0.387	11.526	0.439	3.421	0.210
1.437	0.747	0.576	4.12	0.701	0.00467	285.422	15.128	0.477	11.345	0.557	3.783	0.238
2.032	1.100	0.553	7.25	0.748	0.00985	224.967	32.767	0.441	24.419	0.518	8.348	0.215
2.489	1.252	0.595	9.66	0.824	0.01541	201.022	42.469	0.510	29.217	0.649	13.252	0.203
2.874	1.344	0.640	11.31	0.928	0.01979	201.084	48.914	0.591	31.798	0.796	17.116	0.210
3.502	0.145	0.450	0.20	0.122	0.00017	428.727	0.871	0.287	0.848	0.192	0.024	3.692
4.952	0.202	0.458	0.36	0.110	0.00023	555.551	1.680	0.298	1.680	0.194	0.000	#DIV/0!
6.065	0.335	0.338	0.64	0.085	0.00033	561.763	4.637	0.162	4.550	0.107	0.087	3.020
7.003	0.373	0.350	0.82	0.085	0.00018	1293.933	5.756	0.174	5.756	0.113	0.000	#DIV/0!
7.830	0.335	0.437	0.88	0.096	0.00064	457.504	4.624	0.271	4.288	0.190	0.336	1.302
11.073	0.260	0.796	1.32	0.121	0.00087	652.445	2.784	0.900	2.163	0.754	0.621	1.408
13.562	0.675	0.375	1.78	0.132	0.00128	659.790	18.813	0.200	17.749	0.138	1.065	1.232
13.562	0.351	0.721	1.90	0.124	0.00121	697.824	5.090	0.738	4.121	0.593	0.969	1.354
15.660	0.419	0.697	2.09	0.149	0.00291	385.210	7.265	0.689	3.965	0.822	3.300	0.530

表 5.7　新設計法（完全弾性

実験条件			擁壁条件																		
	ケース番号	実験番号	底版幅 (m)	先端幅 (m)	高さ (m)	有効抵抗長 (m)	質量 (t)	自重によるモーメント M0(kN・m)	擁壁重心に関する慣性モーメント	擁壁底版の断面二次モーメント(m^4)	擁壁の底面積 (m^2)	擁壁底面から重心までの距離S(m)	擁壁つま先から重心までの距離XG(m)	鉛直方向地盤反力係数Kv (kN/m^3)	せん断バネ係数Ks (kN/m)	制線バネ係数(My/θy) (kN・m)	i_0^2 (m^2)	e_0^2 (m^2)	Z1 (m)	I1(m)	I2(m)
底版幅0.35m 重錘5.4kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	1-1	SBA0191	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
	1-1	SBA0291	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
	1-1	SBA0391	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
	1-1	SBA0491	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
	1-1	SBA0595	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
	1-1	SBA1094	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
	1-1	SBA1591	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
	1-1	SBA2092	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
底版幅0.35m 重錘2.6kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	1-4	SBD0191	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
	1-4	SBD0291	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
	1-4	SBD0391	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
	1-4	SBD0491	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
	1-4	SBD0591	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
	1-4	SBD1091	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
	1-4	SBD1592	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
	1-4	SBD2091	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
底版幅0.35m 重錘11.1kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	1-2	SBB0391	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
	1-2	SBB0491	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
	1-2	SBB0592	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
	1-2	SBB1092	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
	1-2	SBB1591	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
	1-2	SBB2092	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	18628.467	1629.99	52.339	0.0254	0.0321	0.317	0.113	0.613
底版幅0.20m 重錘5.4kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2-1	SAA0191	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	-0.039	0.004022222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	11.662	0.0223	0.0102	0.255	0.033	0.533
	2-1	SAA0291	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	-0.039	0.004022222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	11.662	0.0223	0.0102	0.255	0.033	0.533
	2-1	SAA0391	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	-0.039	0.004022222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	11.662	0.0223	0.0102	0.255	0.033	0.533
	2-1	SAA0491	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	-0.039	0.004022222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	11.662	0.0223	0.0102	0.255	0.033	0.533
	2-1	SAA0592	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	-0.039	0.004022222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	11.662	0.0223	0.0102	0.255	0.033	0.533
	2-1	SAA1091	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	-0.039	0.004022222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	11.662	0.0223	0.0102	0.255	0.033	0.533
	2-1	SAA1591	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	-0.039	0.004022222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	11.662	0.0223	0.0102	0.255	0.033	0.533
	2-1	SAA2091	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	-0.039	0.004022222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	11.662	0.0223	0.0102	0.255	0.033	0.533
底版幅0.50m 重錘5.5kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2-2	SCA0192	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	-0.286	0.011782407	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	140.320	0.0314	0.0689	0.456	0.262	0.762
	2-2	SCA0292	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	-0.286	0.011782407	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	140.320	0.0314	0.0689	0.456	0.262	0.762
	2-2	SCA0392	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	-0.286	0.011782407	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	140.320	0.0314	0.0689	0.456	0.262	0.762
	2-2	SCA0492	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	-0.286	0.011782407	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	140.320	0.0314	0.0689	0.456	0.262	0.762
	2-2	SCA0592	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	-0.286	0.011782407	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	140.320	0.0314	0.0689	0.456	0.262	0.762
	2-2	SCA1091	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	-0.286	0.011782407	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	140.320	0.0314	0.0689	0.456	0.262	0.762
	2-2	SCA1592	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	-0.286	0.011782407	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	140.320	0.0314	0.0689	0.456	0.262	0.762
	2-2	SCA2091	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	-0.286	0.011782407	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	140.320	0.0314	0.0689	0.456	0.262	0.762
底版幅0.50m 重錘11.1kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2-2	SCB0191	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	-0.286	0.011782407	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	140.320	0.0314	0.0689	0.456	0.262	0.762
	2-2	SCB0291	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	-0.286	0.011782407	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	140.320	0.0314	0.0689	0.456	0.262	0.762
	2-2	SCB0391	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	-0.286	0.011782407	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	140.320	0.0314	0.0689	0.456	0.262	0.762
	2-2	SCB0491	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	-0.286	0.011782407	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	140.320	0.0314	0.0689	0.456	0.262	0.762
	2-2	SCB0591	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	-0.286	0.011782407	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	140.320	0.0314	0.0689	0.456	0.262	0.762
	2-2	SCB1091	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	-0.286	0.011782407	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	140.320	0.0314	0.0689	0.456	0.262	0.762
	2-2	SCB1591	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	-0.286	0.011782407	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	140.320	0.0314	0.0689	0.456	0.262	0.762
	2-2	SCB2091	0.50	0.10	0.50	1.00	0.375	-0.286	0.011782407	0.01041667	0.50	0.19444	0.32778	16296.295	2037.04	140.320	0.0314	0.0689	0.456	0.262	0.762
底版幅0.20m 重錘11.1kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2-2	SAB0191	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	-0.039	0.004022222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	11.662	0.0223	0.0102	0.255	0.033	0.533
	2-2	SAB0291	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	-0.039	0.004022222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	11.662	0.0223	0.0102	0.255	0.033	0.533
	2-2	SAB0391	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	-0.039	0.004022222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	11.662	0.0223	0.0102	0.255	0.033	0.533
	2-2	SAB0491	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	-0.039	0.004022222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	11.662	0.0223	0.0102	0.255	0.033	0.533
	2-2	SAB0591	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	-0.039	0.004022222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	11.662	0.0223	0.0102	0.255	0.033	0.533
	2-2	SAB1091	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	-0.039	0.004022222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	11.662	0.0223	0.0102	0.255	0.033	0.533
	2-2	SAB1591	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	-0.039	0.004022222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	11.662	0.0223	0.0102	0.255	0.033	0.533
	2-2	SAB2091	0.20	0.10	0.50	1.00	0.180	-0.039	0.004022222	0.00066667	0.20	0.22222	0.12222	22978.220	1148.91	11.662	0.0223	0.0102	0.255	0.033	0.533
底版幅0.35m 重錘5.6kg 衝突位置 0.45m コンクリート	2-5	CBA0191	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	801224.390	70107.1	1888.352	0.0254	0.0269	0.297	0.093	0.593
	2-5	CBA0291	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	801224.390	70107.1	1888.352	0.0254	0.0269	0.297	0.093	0.593
	2-5	CBA0391	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	801224.390	70107.1	1888.352	0.0254	0.0269	0.297	0.093	0.593
	2-5	CBA0491	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	801224.390	70107.1	1888.352	0.0254	0.0269	0.297	0.093	0.593
	2-5	CBA0591	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	801224.390	70107.1	1888.352	0.0254	0.0269	0.297	0.093	0.593
	2-5	CBA1091	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	801224.390	70107.1	1888.352	0.0254	0.0269	0.297	0.093	0.593
	2-5	CBA1591	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	801224.390	70107.1	1888.352	0.0254	0.0269	0.297	0.093	0.593
	2-5	CBA1592	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	801224.390	70107.1	1888.352	0.0254	0.0269	0.297	0.093	0.593
	2-5	CBA2091	0.35	0.10	0.50	1.00	0.280	-0.140	0.007106104	0.00357292	0.35	0.20370	0.22593	801224.390	70107.1	1888.352	0.0254	0.0269	0.297	0.093	0.593

衝突）による設計計算値

便覧式による設計計算

落石作用位置 h(m)	l(m)	落石質量 M0 (t)	落石速度 V0 (m/s)	α'	擁壁の速度V (m/s)	換算バネ定数Krl	静的変位 (m)	動的変位 (m)	回転角 θR(°)	変位 δb(m)	落石モーメント ML(kN·m)	水平反力 (kN)	鉛直反力 (kN)	底面中心モーメント M(kN·m)	転倒 e	転倒 Fs		滑動 Fs		支持力 qumax	支持力 qu	支持力 Fs	
0.450	0.563	0.0054	1.358	0.3755	0.1329	73.205	0.000023	0.002837	0.2886	0.00057	0.264	0.929	2.747	0.124	0.045	2.59	○	1.71	○	13.909	147.902	10.633	○
0.450	0.563	0.0054	1.921	0.3755	0.1880	73.205	0.000023	0.004012	0.4082	0.00081	0.373	1.314	2.747	0.233	0.085	1.38	○	1.21	×	60.912	102.652	1.685	○
0.450	0.563	0.0054	2.352	0.3755	0.2302	73.205	0.000023	0.004913	0.4999	0.00099	0.457	1.609	2.747	0.317	0.115	1.01	○	0.99	×	92.046	67.931	0.738	×
0.450	0.563	0.0054	2.716	0.3755	0.2658	73.205	0.000023	0.005673	0.5772	0.00114	0.527	1.858	2.747	0.387	0.141	0.83	×	0.85	×	161.741	38.659	0.239	×
0.450	0.563	0.0054	3.037	0.3755	0.2972	73.205	0.000023	0.006343	0.6453	0.00127	0.590	2.077	2.747	0.450	0.164	0.71	×	0.76	×	485.839	12.870	0.026	×
0.450	0.563	0.0054	4.294	0.3755	0.4203	73.205	0.000023	0.008970	0.9127	0.00180	0.834	2.938	2.747	0.694	0.253	0.46	×	0.54	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.563	0.0054	5.260	0.3755	0.5148	73.205	0.000023	0.010986	1.1178	0.00221	1.021	3.598	2.747	0.881	0.321	0.36	×	0.44	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.563	0.0054	6.073	0.3755	0.5944	73.205	0.000023	0.012686	1.2907	0.00255	1.179	4.154	2.747	1.039	0.378	0.31	×	0.38	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.563	0.0026	1.358	0.3755	0.0658	73.205	0.000011	0.001401	0.1429	0.00028	0.130	0.460	2.747	−0.009	−0.003	0.00	○	3.45	○	7.388	203.073	27.486	○
0.450	0.563	0.0026	1.921	0.3755	0.0930	73.205	0.000011	0.001986	0.2020	0.00040	0.185	0.650	2.747	0.045	0.016	7.17	○	2.44	○	10.036	180.675	18.003	○
0.450	0.563	0.0026	2.352	0.3755	0.1140	73.205	0.000011	0.002432	0.2474	0.00049	0.226	0.796	2.747	0.086	0.031	3.72	○	1.99	○	12.067	163.489	13.548	○
0.450	0.563	0.0026	2.716	0.3755	0.1316	73.205	0.000011	0.002808	0.2857	0.00056	0.261	0.920	2.747	0.121	0.044	2.65	○	1.72	○	13.780	149.000	10.813	○
0.450	0.563	0.0026	3.037	0.3755	0.1471	73.205	0.000011	0.003140	0.3194	0.00063	0.292	1.028	2.747	0.152	0.055	2.11	○	1.54	○	15.289	136.235	8.911	○
0.450	0.563	0.0026	4.294	0.3755	0.2080	73.205	0.000011	0.004440	0.4517	0.00089	0.413	1.454	2.747	0.273	0.099	1.17	○	1.09	×	72.578	86.152	1.187	×
0.450	0.563	0.0026	5.260	0.3755	0.2548	73.205	0.000011	0.005438	0.5533	0.00109	0.505	1.781	2.747	0.366	0.133	0.88	×	0.89	×	131.024	47.722	0.364	×
0.450	0.563	0.0026	6.073	0.3755	0.2942	73.205	0.000011	0.006279	0.6389	0.00126	0.584	2.056	2.747	0.444	0.162	0.72	×	0.77	×	408.033	15.324	0.038	×
0.450	0.563	0.0111	2.352	0.3755	0.4478	73.205	0.000048	0.009556	0.9723	0.00192	0.888	3.129	2.747	0.748	0.272	0.43	×	0.51	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.563	0.0111	2.716	0.3755	0.5170	73.205	0.000048	0.011034	1.1227	0.00222	1.026	3.614	2.747	0.886	0.322	0.36	×	0.44	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.563	0.0111	3.037	0.3755	0.5781	73.205	0.000048	0.012337	1.2552	0.00248	1.147	4.040	2.747	1.007	0.366	0.32	×	0.39	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.563	0.0111	4.294	0.3755	0.8175	73.205	0.000048	0.017447	1.7751	0.00351	1.622	5.714	2.747	1.482	0.539	0.22	×	0.28	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.563	0.0111	5.260	0.3755	1.0012	73.205	0.000048	0.021368	2.1740	0.00429	1.986	6.998	2.747	1.846	0.672	0.17	×	0.23	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.563	0.0111	6.073	0.3755	1.1561	73.205	0.000048	0.024673	2.5103	0.00496	2.293	8.080	2.747	2.153	0.784	0.15	×	0.20	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.483	0.0054	1.358	0.3650	0.2066	12.895	0.000098	0.007120	0.8450	0.00048	0.172	0.555	1.766	0.133	0.075	0.89	×	1.84	○	142.297	28.248	0.199	×
0.450	0.483	0.0054	1.921	0.3650	0.2922	12.895	0.000098	0.010069	1.1950	0.00068	0.243	0.785	1.766	0.204	0.116	0.58	×	1.30	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.483	0.0054	2.352	0.3650	0.3579	12.895	0.000098	0.012332	1.4636	0.00084	0.298	0.961	1.766	0.259	0.146	0.46	×	1.06	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.483	0.0054	2.716	0.3650	0.4132	12.895	0.000098	0.014240	1.6900	0.00097	0.344	1.110	1.766	0.305	0.173	0.39	×	0.92	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.483	0.0054	3.037	0.3650	0.4620	12.895	0.000098	0.015921	1.8895	0.00108	0.385	1.241	1.766	0.345	0.196	0.34	×	0.82	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.483	0.0054	4.294	0.3650	0.6533	12.895	0.000098	0.022515	2.6722	0.00153	0.544	1.755	1.766	0.505	0.286	0.23	×	0.58	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.483	0.0054	5.260	0.3650	0.8002	12.895	0.000098	0.027575	3.2728	0.00187	0.666	2.150	1.766	0.627	0.355	0.19	×	0.17	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.483	0.0054	6.073	0.3650	0.9240	12.895	0.000098	0.031811	3.7791	0.00216	0.769	2.482	1.766	0.730	0.413	0.16	×	0.41	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.712	0.0055	1.358	0.4157	0.0865	279.697	0.000010	0.001505	0.1212	0.00055	0.297	1.127	3.679	0.011	0.003	57.50	○	1.88	○	7.613	281.248	36.941	○
0.450	0.712	0.0055	1.921	0.4157	0.1224	279.697	0.000010	0.002128	0.1714	0.00078	0.420	1.594	3.679	0.134	0.036	4.59	○	1.33	×	10.564	243.213	23.023	○
0.450	0.712	0.0055	2.352	0.4157	0.1499	279.697	0.000010	0.002607	0.2099	0.00096	0.514	1.952	3.679	0.228	0.062	2.69	○	1.09	×	12.828	214.027	16.685	○
0.450	0.712	0.0055	2.716	0.4157	0.1730	279.697	0.000010	0.003010	0.2424	0.00111	0.594	2.254	3.679	0.307	0.084	1.99	○	0.94	×	44.209	189.423	4.285	○
0.450	0.712	0.0055	3.037	0.4157	0.1935	279.697	0.000010	0.003365	0.2710	0.00124	0.664	2.520	3.679	0.378	0.103	1.62	○	0.84	×	49.922	167.746	3.360	○
0.450	0.712	0.0055	4.294	0.4157	0.2736	279.697	0.000010	0.004759	0.3832	0.00175	0.939	3.564	3.679	0.652	0.177	0.91	×	0.60	×	101.264	82.697	0.817	×
0.450	0.712	0.0055	5.260	0.4157	0.3351	279.697	0.000010	0.005829	0.4693	0.00214	1.149	4.365	3.679	0.863	0.235	0.71	×	0.49	×	480.274	17.436	0.036	×
0.450	0.712	0.0055	6.073	0.4157	0.3869	279.697	0.000010	0.006731	0.5420	0.00247	1.327	5.040	3.679	1.041	0.283	0.59	×	0.42	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.712	0.0111	1.358	0.4157	0.1686	279.697	0.000020	0.002932	0.2361	0.00108	0.578	2.196	3.679	0.292	0.079	2.10	○	0.97	×	14.367	194.182	13.516	○
0.450	0.712	0.0111	1.921	0.4157	0.2384	279.697	0.000020	0.004147	0.3339	0.00152	0.818	3.105	3.679	0.532	0.141	1.15	○	0.68	×	69.737	120.083	1.722	○
0.450	0.712	0.0111	2.352	0.4157	0.2919	279.697	0.000020	0.005079	0.4089	0.00187	1.001	3.803	3.679	0.715	0.194	0.86	×	0.56	×	132.452	63.225	0.477	×
0.450	0.712	0.0111	2.716	0.4157	0.3371	279.697	0.000020	0.005864	0.4722	0.00216	1.156	4.391	3.679	0.870	0.237	0.70	×	0.18	×	547.652	15.291	0.028	×
0.450	0.712	0.0111	3.037	0.4157	0.3769	279.697	0.000020	0.006556	0.5279	0.00241	1.293	4.909	3.679	1.007	0.274	0.61	×	0.43	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.712	0.0111	4.294	0.4157	0.5330	279.697	0.000020	0.009272	0.7466	0.00341	1.828	6.943	3.679	1.542	0.419	0.40	×	0.31	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.712	0.0111	5.260	0.4157	0.6528	279.697	0.000020	0.011356	0.9144	0.00417	2.239	8.503	3.679	1.953	0.531	0.31	×	0.25	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.712	0.0111	6.073	0.4157	0.7538	279.697	0.000020	0.013113	1.0558	0.00482	2.586	9.819	3.679	2.300	0.625	0.27	×	0.22	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.483	0.0111	1.358	0.3650	0.3913	12.895	0.000200	0.013484	1.6004	0.00092	0.326	1.051	1.766	0.287	0.162	0.41	×	0.97	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.483	0.0111	1.921	0.3650	0.5534	12.895	0.000200	0.019070	2.2633	0.00129	0.461	1.487	1.766	0.421	0.239	0.28	×	0.69	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.483	0.0111	2.352	0.3650	0.6777	12.895	0.000200	0.023356	2.7720	0.00158	0.564	1.821	1.766	0.525	0.297	0.22	×	0.56	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.483	0.0111	2.716	0.3650	0.7826	12.895	0.000200	0.026969	3.2008	0.00183	0.651	2.103	1.766	0.612	0.347	0.19	×	0.48	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.483	0.0111	3.037	0.3650	0.8750	12.895	0.000200	0.030152	3.5786	0.00205	0.728	2.351	1.766	0.689	0.390	0.17	×	0.43	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.483	0.0111	4.294	0.3650	1.2374	12.895	0.000200	0.042642	5.0609	0.00289	1.030	3.324	1.766	0.991	0.561	0.12	×	0.31	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.483	0.0111	5.260	0.3650	1.5155	12.895	0.000200	0.052225	6.1983	0.00354	1.262	4.072	1.766	1.222	0.692	0.10	×	0.25	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.483	0.0111	6.073	0.3650	1.7499	12.895	0.000200	0.060301	7.1572	0.00409	1.457	4.701	1.766	1.418	0.803	0.08	×	0.22	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.543	0.0056	1.358	0.3621	0.1431	2496.49	0.000001	0.000195	0.0523	0.00008	1.722	5.956	2.747	1.583	0.576	0.20	×	0.27	×	-	111732.299	0.000	×
0.450	0.543	0.0056	1.921	0.3621	0.2024	2496.49	0.000001	0.000701	0.0739	0.00012	2.436	8.423	2.747	2.296	0.836	0.14	×	0.19	×	-	88799.488	0.000	×
0.450	0.543	0.0056	2.352	0.3621	0.2479	2496.49	0.000001	0.000858	0.0905	0.00015	2.983	10.316	2.747	2.844	1.035	0.11	×	0.15	×	-	71202.524	0.000	×
0.450	0.543	0.0056	2.716	0.3621	0.2863	2496.49	0.000001	0.000991	0.1045	0.00017	3.445	11.912	2.747	3.305	1.203	0.10	×	0.13	×	-	56367.597	0.000	×
0.450	0.543	0.0056	3.037	0.3621	0.3201	2496.49	0.000001	0.001108	0.1169	0.00019	3.852	13.318	2.747	3.712	1.351	0.09	×	0.12	×	-	43297.764	0.000	×
0.450	0.543	0.0056	4.294	0.3621	0.4527	2496.49	0.000001	0.001567	0.1653	0.00027	5.447	18.831	2.747	5.307	1.932	0.06	×	0.08	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.543	0.0056	5.260	0.3621	0.5544	2496.49	0.000001	0.001919	0.2024	0.00033	6.671	23.067	2.747	6.531	2.378	0.05	×	0.07	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.543	0.0056	5.260	0.3621	0.5544	2496.49	0.000001	0.001919	0.2024	0.00033	6.671	23.067	2.747	6.531	2.378	0.05	×	0.07	×	-	0.000	0.000	×
0.450	0.543	0.0056	6.073	0.3621	0.6401	2496.49	0.000001	0.002216	0.2337	0.00038	7.703	26.636	2.747	7.563	2.753	0.04	×	0.06	×	-	0.000	0.000	×

表 5.8　新設計法に

	ケース番号	実験番号	弾性域の地盤バネ定数 Kr0(kN·m)	基礎の応答変位 回転角 θN(°)	基礎の応答変位 水平変位 δN(mm)	モーメントと回転角の関係 浮上り限界モーメント M1(kN·m)	自重によるモーメント M0(kN·m)	浮上り限界回転角 θ1(°)	最大抵抗モーメント Mu(kN·m)	極限支持力時回転 θu(°)	降伏モーメント My(kN·m)	降伏回転角 θy(°)	割線バネ係数(My/θy) Kr(kN·m)	My～Muの回転バネ係 Kr1(kN·m)
底版幅0.35m 重錘5.4kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	1- 1	SBA0191	66.558	0.289	0.570	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
	1- 1	SBA0291	66.558	0.408	0.806	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
	1- 1	SBA0391	66.558	0.503	0.999	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
	1- 1	SBA0491	66.558	0.595	1.191	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
	1- 1	SBA0595	66.558	0.687	1.383	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
	1- 1	SBA1094	66.558	1.149	2.343	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
	1- 1	SBA1591	66.558	1.611	3.302	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
	1- 1	SBA2092	66.558	2.073	4.262	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
底版幅0.35m 重錘2.6kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	1- 4	SBD0191	66.558	0.143	0.282	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
	1- 4	SBD0291	66.558	0.202	0.399	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
	1- 4	SBD0391	66.558	0.247	0.489	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
	1- 4	SBD0491	66.558	0.286	0.564	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
	1- 4	SBD0591	66.558	0.319	0.631	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
	1- 4	SBD1091	66.558	0.452	0.893	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
	1- 4	SBD1592	66.558	0.565	1.128	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
	1- 4	SBD2091	66.558	0.678	1.364	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
底版幅0.35m 重錘11.1kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	1- 2	SBB0391	66.558	1.274	2.601	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
	1- 2	SBB0491	66.558	1.623	3.327	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
	1- 2	SBB0592	66.558	1.973	4.054	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
	1- 2	SBB1092	66.558	3.720	7.684	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
	1- 2	SBB1591	66.558	5.468	11.315	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
	1- 2	SBB2092	66.558	7.215	14.945	0.160	-0.140	0.138	0.272	0.331	0.412	0.451	52.339	33.279
底版幅0.20m 重錘5.4kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2- 1	SAA0191	15.319	0.860	0.483	0.059	-0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659
	2- 1	SAA0291	15.319	1.368	0.683	0.059	-0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659
	2- 1	SAA0391	15.319	1.877	0.840	0.059	-0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659
	2- 1	SAA0491	15.319	2.386	0.991	0.059	-0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659
	2- 1	SAA0592	15.319	2.895	1.142	0.059	-0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659
	2- 1	SAA1091	15.319	5.439	1.898	0.059	-0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659
	2- 1	SAA1591	15.319	7.983	2.655	0.059	-0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659
	2- 1	SAA2091	15.319	10.527	3.411	0.059	-0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659
底版幅0.50m 重錘5.5kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2- 2	SCA0192	169.753	0.121	0.553	0.306	-0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877
	2- 2	SCA0292	169.753	0.171	0.782	0.306	-0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877
	2- 2	SCA0392	169.753	0.210	0.960	0.306	-0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877
	2- 2	SCA0492	169.753	0.242	1.129	0.306	-0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877
	2- 2	SCA0592	169.753	0.271	1.297	0.306	-0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877
	2- 2	SCA1091	169.753	0.393	2.141	0.306	-0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877
	2- 2	SCA1592	169.753	0.513	2.985	0.306	-0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877
	2- 2	SCA2091	169.753	0.633	3.829	0.306	-0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877
底版幅0.50m 重錘11.1kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2- 2	SCB0191	169.753	0.236	1.094	0.306	-0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877
	2- 2	SCB0291	169.753	0.335	1.735	0.306	-0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877
	2- 2	SCB0391	169.753	0.426	2.375	0.306	-0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877
	2- 2	SCB0491	169.753	0.517	3.016	0.306	-0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877
	2- 2	SCB0591	169.753	0.608	3.657	0.306	-0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877
	2- 2	SCB1091	169.753	1.064	6.860	0.306	-0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877
	2- 2	SCB1591	169.753	1.519	10.063	0.306	-0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877
	2- 2	SCB2091	169.753	1.974	13.266	0.306	-0.286	0.103	0.464	0.210	0.750	0.306	140.320	84.877
底版幅0.20m 重錘11.1kg 衝突位置 0.45m 砂(締固め)	2- 2	SAB0191	15.319	2.176	0.928	0.059	-0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659
	2- 2	SAB0291	15.319	4.001	1.471	0.059	-0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659
	2- 2	SAB0391	15.319	5.826	2.013	0.059	-0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659
	2- 2	SAB0491	15.319	7.651	2.556	0.059	-0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659
	2- 2	SAB0591	15.319	9.476	3.098	0.059	-0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659
	2- 2	SAB1091	15.319	18.600	5.811	0.059	-0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659
	2- 2	SAB1591	15.319	27.725	8.523	0.059	-0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659
	2- 2	SAB2091	15.319	36.850	11.236	0.059	-0.039	0.220	0.104	0.555	0.143	0.702	11.662	7.659
底版幅0.35m 重錘5.6kg 衝突位置 0.45m コンクリート	2- 5	CBA0191	2862.708	0.082	0.193	0.160	-0.140	0.003	0.480	0.016	0.620	0.019	1888.352	1431.354
	2- 5	CBA0291	2862.708	0.155	0.377	0.160	-0.140	0.003	0.480	0.016	0.620	0.019	1888.352	1431.354
	2- 5	CBA0391	2862.708	0.227	0.560	0.160	-0.140	0.003	0.480	0.016	0.620	0.019	1888.352	1431.354
	2- 5	CBA0491	2862.708	0.300	0.744	0.160	-0.140	0.003	0.480	0.016	0.620	0.019	1888.352	1431.354
	2- 5	CBA0591	2862.708	0.373	0.927	0.160	-0.140	0.003	0.480	0.016	0.620	0.019	1888.352	1431.354
	2- 5	CBA1091	2862.708	0.736	1.844	0.160	-0.140	0.003	0.480	0.016	0.620	0.019	1888.352	1431.354
	2- 5	CBA1591	2862.708	1.099	2.762	0.160	-0.140	0.003	0.480	0.016	0.620	0.019	1888.352	1431.354
	2- 5	CBA1592	2862.708	1.099	2.762	0.160	-0.140	0.003	0.480	0.016	0.620	0.019	1888.352	1431.354
	2- 5	CBA2091	2862.708	1.462	3.679	0.160	-0.140	0.003	0.480	0.016	0.620	0.019	1888.352	1431.354

よる変位量とエネルギー

	設計計算におけるエネルギー									降伏比率(回転角)			降伏比率(水平変位)		
最大抵抗までのエネルEu(J)	最大抵抗水平力Hu(kN)	滑動限界変位δu(mm)	弾性滑動エネルEsu(J)	擁壁回転エネルEw1d(J)	擁壁滑動エネルEw2d(J)	擁壁のエネルギーEwd(J)	実験値Ew1	設計Ewd/ER	実験Ew1/ER	実験値θexp(°)	実験θexp/θy	設計θN/θy	実験値δexp(mm)	実験δexp/δu	設計δN/δu
1.620	1.379	0.84606	0.583	0.664	0.265	0.929	0.739	18.62%	14.81%	0.250	0.555	0.640	0.252	0.298	0.674
1.620	1.379	0.84606	0.583	1.328	0.529	1.857	1.597	18.62%	16.01%	0.370	0.821	0.905	0.512	0.605	0.953
1.620	1.379	0.84606	0.583	1.992	0.794	2.786	2.243	18.62%	14.99%	0.460	1.020	1.115	0.589	0.696	1.181
1.620	1.379	0.84606	0.583	2.656	1.059	3.715	2.586	18.62%	12.96%	0.520	1.154	1.320	0.611	0.722	1.407
1.620	1.379	0.84606	0.583	3.320	1.324	4.644	3.344	18.62%	13.41%	0.600	1.331	1.525	0.731	0.864	1.634
1.620	1.379	0.84606	0.583	6.640	2.647	9.287	6.258	18.62%	12.55%	0.940	2.085	2.549	1.495	1.767	2.769
1.620	1.379	0.84606	0.583	9.960	3.971	13.931	8.794	18.62%	11.75%	1.160	2.573	3.574	2.648	3.129	3.903
1.620	1.379	0.84606	0.583	13.280	5.294	18.574	10.162	18.62%	10.19%	1.330	2.950	4.599	4.034	4.768	5.037
1.620	1.379	0.84606	0.583	0.163	0.065	0.228	0.173	9.45%	7.19%	0.140	0.311	0.317	0.178	0.210	0.333
1.620	1.379	0.84606	0.583	0.325	0.130	0.455	0.286	9.45%	5.95%	0.180	0.399	0.448	0.288	0.340	0.472
1.620	1.379	0.84606	0.583	0.488	0.195	0.683	0.470	9.45%	6.51%	0.230	0.510	0.549	0.204	0.241	0.577
1.620	1.379	0.84606	0.583	0.651	0.259	0.910	0.701	9.45%	7.28%	0.260	0.577	0.634	0.228	0.270	0.667
1.620	1.379	0.84606	0.583	0.813	0.324	1.138	0.858	9.45%	7.13%	0.300	0.665	0.709	0.238	0.282	0.746
1.620	1.379	0.84606	0.583	1.627	0.649	2.275	1.253	9.45%	5.21%	0.430	0.954	1.002	0.240	0.283	1.056
1.620	1.379	0.84606	0.583	2.440	0.973	3.413	2.143	9.45%	5.94%	0.500	1.109	1.253	0.344	0.406	1.334
1.620	1.379	0.84606	0.583	3.254	1.297	4.551	2.871	9.45%	5.97%	0.620	1.375	1.504	0.389	0.460	1.612
1.620	1.379	0.84606	0.583	7.535	3.004	10.539	7.764	34.45%	25.38%	1.140	2.529	2.826	1.115	1.318	3.075
1.620	1.379	0.84606	0.583	10.047	4.005	14.053	9.270	34.45%	22.72%	1.220	2.706	3.601	1.370	1.619	3.933
1.620	1.379	0.84606	0.583	12.559	5.007	17.566	12.225	34.45%	23.97%	1.400	3.106	4.376	2.453	2.899	4.791
1.620	1.379	0.84606	0.583	25.118	10.014	35.132	23.282	34.45%	22.83%	2.040	4.525	8.253	6.684	7.900	9.082
1.620	1.379	0.84606	0.583	37.677	15.020	52.697	33.462	34.45%	21.87%	2.680	5.945	12.129	10.910	12.895	13.373
1.620	1.379	0.84606	0.583	50.236	20.027	70.263	38.990	34.45%	19.12%	3.210	7.121	16.005	14.021	16.572	17.665
0.875	0.887	0.77164	0.342	1.268	0.134	1.402	1.156	28.11%	23.18%	0.460	0.656	1.225	0.326	0.422	0.626
0.875	0.887	0.77164	0.342	2.537	0.268	2.805	2.166	28.11%	21.71%	0.690	0.983	1.950	0.518	0.671	0.885
0.875	0.887	0.77164	0.342	3.805	0.402	4.207	2.802	28.11%	18.72%	0.910	1.297	2.675	0.696	0.902	1.088
0.875	0.887	0.77164	0.342	5.073	0.536	5.610	5.324	28.11%	26.68%	1.380	1.967	3.400	0.740	0.960	1.284
0.875	0.887	0.77164	0.342	6.342	0.670	7.012	6.649	28.11%	26.66%	1.510	2.152	4.125	0.552	0.715	1.480
0.875	0.887	0.77164	0.342	12.683	1.341	14.024	10.790	28.11%	21.63%	2.360	3.363	7.750	2.099	2.721	2.460
0.875	0.887	0.77164	0.342	19.025	2.011	21.036	13.687	28.11%	18.29%	3.310	4.717	11.376	3.243	4.203	3.440
0.875	0.887	0.77164	0.342	25.367	2.682	28.048	16.676	28.11%	16.71%	4.220	6.014	15.001	5.491	7.116	4.420
2.002	1.847	0.90670	0.837	0.314	0.312	0.626	0.466	12.34%	9.19%	0.220	0.719	0.396	0.108	0.119	0.610
2.002	1.847	0.90670	0.837	0.628	0.624	1.251	1.028	12.34%	10.13%	0.290	0.948	0.560	0.247	0.272	0.863
2.002	1.847	0.90670	0.837	0.942	0.935	1.877	1.611	12.34%	10.59%	0.330	1.078	0.686	0.297	0.328	1.058
2.002	1.847	0.90670	0.837	1.255	1.247	2.502	2.178	12.34%	10.74%	0.370	1.209	0.792	0.377	0.416	1.245
2.002	1.847	0.90670	0.837	1.569	1.559	3.128	2.685	12.34%	10.59%	0.380	1.242	0.885	0.503	0.555	1.431
2.002	1.847	0.90670	0.837	3.139	3.118	6.256	5.438	12.34%	10.72%	0.540	1.764	1.284	1.079	1.190	2.362
2.002	1.847	0.90670	0.837	4.708	4.676	9.384	9.738	12.34%	12.80%	1.110	3.627	1.676	2.556	2.819	3.292
2.002	1.847	0.90670	0.837	6.277	6.235	12.512	10.298	12.34%	10.15%	0.690	2.255	2.068	2.723	3.003	4.223
2.002	1.847	0.90670	0.837	1.191	1.183	2.374	2.276	23.28%	22.32%	0.270	0.882	0.771	0.754	0.832	1.207
2.002	1.847	0.90670	0.837	2.382	2.366	4.749	4.465	23.28%	21.89%	0.300	0.980	1.095	1.233	1.360	1.913
2.002	1.847	0.90670	0.837	3.574	3.550	7.123	6.424	23.28%	21.00%	0.380	1.242	1.393	1.868	2.061	2.620
2.002	1.847	0.90670	0.837	4.765	4.733	9.498	8.573	23.28%	21.02%	0.430	1.405	1.690	2.580	2.845	3.326
2.002	1.847	0.90670	0.837	5.956	5.916	11.872	9.734	23.28%	19.09%	0.440	1.438	1.988	3.141	3.464	4.033
2.002	1.847	0.90670	0.837	11.912	11.832	23.745	18.708	23.28%	18.34%	1.190	3.888	3.475	6.841	7.545	7.566
2.002	1.847	0.90670	0.837	17.869	17.749	35.617	27.876	23.28%	18.22%	1.090	3.562	4.963	8.854	9.765	11.098
2.002	1.847	0.90670	0.837	23.825	23.665	47.490	31.759	23.28%	15.57%	1.790	5.849	6.451	12.002	13.238	14.631
0.875	0.887	0.77164	0.342	4.549	0.481	5.030	4.122	49.33%	40.42%	0.340	0.485	3.101	1.248	1.618	1.203
0.875	0.887	0.77164	0.342	9.099	0.962	10.061	8.302	49.33%	40.70%	1.370	1.952	5.701	1.304	1.690	1.906
0.875	0.887	0.77164	0.342	13.648	1.443	15.091	12.449	49.33%	40.69%	0.840	1.197	8.302	4.182	5.420	2.609
0.875	0.887	0.77164	0.342	18.197	1.924	20.121	14.947	49.33%	36.64%	2.700	3.848	10.903	4.262	5.523	3.312
0.875	0.887	0.77164	0.342	22.747	2.405	25.151	15.128	49.33%	29.67%	4.120	5.871	13.503	4.673	6.056	4.015
0.875	0.887	0.77164	0.342	45.493	4.810	50.303	32.767	49.33%	32.13%	7.250	10.332	26.506	9.849	12.764	7.531
0.875	0.887	0.77164	0.342	68.240	7.214	75.454	42.469	49.33%	27.76%	9.660	13.766	39.510	15.409	19.969	11.046
0.875	0.887	0.77164	0.342	90.987	9.619	100.606	48.914	49.33%	23.98%	11.310	16.117	52.513	19.790	25.647	14.561
0.102	1.379	0.01967	0.014	0.786	0.253	1.039	0.871	19.97%	16.75%	0.200	10.638	4.363	0.170	8.666	9.826
0.102	1.379	0.01967	0.014	1.571	0.506	2.077	1.680	19.97%	16.16%	0.360	19.148	8.227	0.231	11.735	19.152
0.102	1.379	0.01967	0.014	2.357	0.759	3.116	4.637	19.97%	29.72%	0.640	34.040	12.090	0.326	16.597	28.478
0.102	1.379	0.01967	0.014	3.142	1.012	4.154	5.756	19.97%	27.67%	0.820	43.614	15.954	0.184	9.373	37.804
0.102	1.379	0.01967	0.014	3.928	1.265	5.193	4.624	19.97%	17.78%	0.880	46.805	19.817	0.642	32.637	47.130
0.102	1.379	0.01967	0.014	7.856	2.530	10.386	2.784	19.97%	5.35%	1.320	70.208	39.134	0.873	44.374	93.760
0.102	1.379	0.01967	0.014	11.784	3.795	15.578	18.81337	19.97%	24.12%	1.780	94.675	58.452	1.281	65.129	140.390
0.102	1.379	0.01967	0.014	11.784	3.795	15.578	5.089749	19.97%	6.52%	1.900	101.057	58.452	1.211	61.580	140.390
0.102	1.379	0.01967	0.014	15.711	5.060	20.771	7.264751	19.97%	6.98%	2.090	111.163	77.769	2.910	147.950	187.019

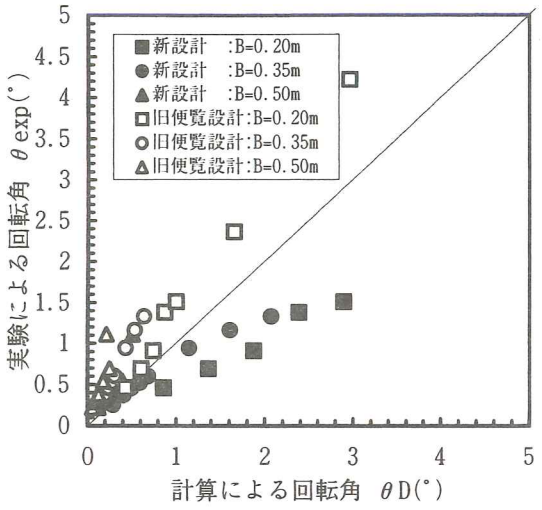
表 5.9　新設計法による設計計算値

	ケース 番号	実験番号	振り子の高さ h0(m)	設計値 回転エネルギー比 Ew4d/Ewd	設計値 滑動エネルギー比 Ew2d/Ewd	設計値 落石と擁壁のエネルギー Ewd/E_R	実験値 回転エネルギー比 Ew4d/Ewd	実験値 滑動エネルギー比 Ew2d/Ewd	実験値 落石と擁壁のエネルギー Ew1/E_R	水平力の条件 極限支持力となる水平 H(kN)	水平力の条件 滑動抵抗力 Hu(kN)	水平力の条件 設計水平力 Hd(kN)
	1- 1	SBA0191	0.1	71.5%	28.5%	18.6%	93.0%	7.0%	14.8%	0.939	1.379	0.929
底版幅0.35m	1- 1	SBA0291	0.2	71.5%	28.5%	18.6%	86.6%	13.4%	16.0%	0.939	1.379	1.314
重錘5.4kg	1- 1	SBA0391	0.3	71.5%	28.5%	18.6%	87.4%	12.6%	15.0%	0.939	1.379	1.609
衝突位置	1- 1	SBA0491	0.4	71.5%	28.5%	18.6%	88.2%	11.8%	13.0%	0.939	1.379	1.858
0.45m	1- 1	SBA0595	0.5	71.5%	28.5%	18.6%	87.0%	13.0%	13.4%	0.939	1.379	2.077
砂(締固め)	1- 1	SBA1094	1.0	71.5%	28.5%	18.6%	76.5%	23.5%	12.5%	0.939	1.379	2.938
	1- 1	SBA1591	1.5	71.5%	28.5%	18.6%	65.3%	34.7%	11.8%	0.939	1.379	3.598
	1- 1	SBA2092	2.0	71.5%	28.5%	18.6%	51.2%	48.8%	10.2%	0.939	1.379	4.154
							70.5%	29.5%				
							65.1%	34.9%	4.6%			
		設計					71.5%	28.5%	18.6%	68.1%		
	1- 4	SBD0191	0.1	71.5%	28.5%	9.5%	85.1%	14.9%	7.2%	0.939	1.379	0.460
底版幅0.35m	1- 4	SBD0291	0.2	71.5%	28.5%	9.5%	76.4%	23.6%	5.9%	0.939	1.379	0.650
重錘2.6kg	1- 4	SBD0391	0.3	71.5%	28.5%	9.5%	92.8%	7.2%	6.5%	0.939	1.379	0.796
衝突位置	1- 4	SBD0491	0.4	71.5%	28.5%	9.5%	94.0%	6.0%	7.3%	0.939	1.379	0.920
0.45m	1- 4	SBD0591	0.5	71.5%	28.5%	9.5%	94.6%	5.4%	7.1%	0.939	1.379	1.028
砂(締固め)	1- 4	SBD1091	1.0	71.5%	28.5%	9.5%	96.3%	3.7%	5.2%	0.939	1.379	1.454
	1- 4	SBD1592	1.5	71.5%	28.5%	9.5%	95.5%	4.5%	5.9%	0.939	1.379	1.781
	1- 4	SBD2091	2.0	71.5%	28.5%	9.5%	95.7%	4.3%	6.0%	0.939	1.379	2.056
							70.5%	29.5%				
							65.1%	34.9%	2.3%			
		設計					71.5%	28.5%	9.5%	68.1%		
底版幅0.35m	1- 2	SBB0391	0.3	71.5%	28.5%	34.4%	87.7%	12.3%	25.4%	0.939	1.379	3.129
重錘11.1kg	1- 2	SBB0491	0.4	71.5%	28.5%	34.4%	85.9%	14.1%	22.7%	0.939	1.379	3.614
衝突位置	1- 2	SBB0592	0.5	71.5%	28.5%	34.4%	77.2%	22.8%	24.0%	0.939	1.379	4.040
0.45m	1- 2	SBB1092	1.0	71.5%	28.5%	34.4%	63.1%	36.9%	22.8%	0.939	1.379	5.714
砂(締固め)	1- 2	SBB1591	1.5	71.5%	28.5%	34.4%	57.0%	43.0%	21.9%	0.939	1.379	6.998
	1- 2	SBB2092	2.0	71.5%	28.5%	34.4%	52.1%	47.9%	19.1%	0.939	1.379	8.080
							70.5%	29.5%				
							65.1%	34.9%	9.0%			
		設計					71.5%	28.5%	34.4%	68.1%		
	2- 1	SAA0191	0.1	90.4%	9.6%	28.1%	94.7%	5.3%	23.2%	0.293	0.887	0.555
底版幅0.20m	2- 1	SAA0291	0.2	90.4%	9.6%	28.1%	92.9%	7.1%	21.7%	0.293	0.887	0.785
重錘5.4kg	2- 1	SAA0391	0.3	90.4%	9.6%	28.1%	90.1%	9.9%	18.7%	0.293	0.887	0.961
衝突位置	2- 1	SAA0491	0.4	90.4%	9.6%	28.1%	94.1%	5.9%	26.7%	0.293	0.887	1.110
0.45m	2- 1	SAA0592	0.5	90.4%	9.6%	28.1%	97.4%	2.6%	26.7%	0.293	0.887	1.241
砂(締固め)	2- 1	SAA1091	1.0	90.4%	9.6%	28.1%	86.0%	14.0%	21.6%	0.293	0.887	1.755
	2- 1	SAA1591	1.5	90.4%	9.6%	28.1%	81.6%	18.4%	18.3%	0.293	0.887	2.150
	2- 1	SAA2091	2.0	90.4%	9.6%	28.1%	73.0%	27.0%	16.7%	0.293	0.887	2.482
							69.9%	30.1%				
							87.6%	12.4%	7.5%			
		設計					90.4%	9.6%	28.1%	33.0%		
	2- 2	SCA0192	0.1	50.2%	49.8%	12.3%	97.4%	2.6%	9.2%	1.838	1.847	1.127
底版幅0.50m	2- 2	SCA0292	0.2	50.2%	49.8%	12.3%	94.0%	6.0%	10.1%	1.838	1.847	1.594
重錘5.5kg	2- 2	SCA0392	0.3	50.2%	49.8%	12.3%	94.4%	5.6%	10.6%	1.838	1.847	1.952
衝突位置	2- 2	SCA0492	0.4	50.2%	49.8%	12.3%	93.3%	6.7%	10.7%	1.838	1.847	2.254
0.45m	2- 2	SCA0592	0.5	50.2%	49.8%	12.3%	90.4%	9.6%	10.6%	1.838	1.847	2.520
砂(締固め)	2- 2	SCA1091	1.0	50.2%	49.8%	12.3%	78.8%	21.2%	10.7%	1.838	1.847	3.564
	2- 2	SCA1592	1.5	50.2%	49.8%	12.3%	60.3%	39.7%	12.8%	1.838	1.847	4.365
	2- 2	SCA2091	2.0	50.2%	49.8%	12.3%	59.5%	40.5%	10.2%	1.838	1.847	5.040
							67.5%	32.5%				
							43.8%	56.2%	3.0%			
		設計					50.2%	49.8%	12.3%	99.5%		
	2- 2	SCB0191	0.1	50.2%	49.8%	23.3%	74.5%	25.5%	22.3%	1.838	1.847	2.196
底版幅0.50m	2- 2	SCB0291	0.2	50.2%	49.8%	23.3%	67.8%	32.2%	21.9%	1.838	1.847	3.105
重錘11.1kg	2- 2	SCB0391	0.3	50.2%	49.8%	23.3%	59.5%	40.5%	21.0%	1.838	1.847	3.803
衝突位置	2- 2	SCB0491	0.4	50.2%	49.8%	23.3%	54.4%	45.6%	21.0%	1.838	1.847	4.391
0.45m	2- 2	SCB0591	0.5	50.2%	49.8%	23.3%	49.2%	50.8%	19.1%	1.838	1.847	4.909
砂(締固め)	2- 2	SCB1091	1.0	50.2%	49.8%	23.3%	37.2%	62.8%	18.3%	1.838	1.847	6.943
	2- 2	SCB1591	1.5	50.2%	49.8%	23.3%	44.6%	55.4%	18.2%	1.838	1.847	8.503
	2- 2	SCB2091	2.0	50.2%	49.8%	23.3%	33.2%	66.8%	15.6%	1.838	1.847	9.819
							67.5%	32.5%				
							43.8%	56.2%	5.8%			
		設計					50.2%	49.8%	23.3%	99.5%		
	2- 2	SAB0191	0.1	90.4%	9.6%	49.3%	81.5%	18.5%	40.4%	0.293	0.887	1.051
底版幅0.20m	2- 2	SAB0291	0.2	90.4%	9.6%	49.3%	90.2%	9.8%	40.7%	0.293	0.887	1.487
重錘11.1kg	2- 2	SAB0391	0.3	90.4%	9.6%	49.3%	73.1%	26.9%	40.7%	0.293	0.887	1.821
衝突位置	2- 2	SAB0491	0.4	90.4%	9.6%	49.3%	77.1%	22.9%	36.6%	0.293	0.887	2.103
0.45m	2- 2	SAB0591	0.5	90.4%	9.6%	49.3%	75.0%	25.0%	29.7%	0.293	0.887	2.351
砂(締固め)	2- 2	SAB1091	1.0	90.4%	9.6%	49.3%	74.5%	25.5%	32.1%	0.293	0.887	3.324
	2- 2	SAB1591	1.5	90.4%	9.6%	49.3%	68.8%	31.2%	27.8%	0.293	0.887	4.072
	2- 2	SAB2091	2.0	90.4%	9.6%	49.3%	65.0%	35.0%	24.0%	0.293	0.887	4.701
							69.9%	30.1%				
							87.6%	12.4%	14.2%			
		設計					90.4%	9.6%	49.3%	33.0%		
	2- 5	CBA0191	0.1	75.6%	24.4%	20.0%	97.3%	2.7%	16.8%	1.377	1.379	5.956
底版幅0.35m	2- 5	CBA0291	0.2	75.6%	24.4%	20.0%	100.0%	0.0%	16.2%	1.377	1.379	8.423
重錘5.6kg	2- 5	CBA0391	0.3	75.6%	24.4%	20.0%	98.1%	1.9%	29.7%	1.377	1.379	10.316
衝突位置	2- 5	CBA0491	0.4	75.6%	24.4%	20.0%	100.0%	0.0%	27.7%	1.377	1.379	11.912
0.45m	2- 5	CBA0591	0.5	75.6%	24.4%	20.0%	92.7%	7.3%	17.8%	1.377	1.379	13.318
コンクリート	2- 5	CBA1091	1.0	75.6%	24.4%	20.0%	77.7%	22.3%	5.4%	1.377	1.379	18.834
	2- 5	CBA1591	1.5	75.6%	24.4%	20.0%	94.3%	5.7%	24.1%	1.377	1.379	23.067
	2- 5	CBA1592	1.5	75.6%	24.4%	20.0%	81.0%	19.0%	6.5%	1.377	1.379	23.067
	2- 5	CBA2091	2.0	75.6%	24.4%	20.0%	54.6%	45.4%	7.0%	1.377	1.379	26.636
							70.5%	29.5%				
							65.1%	34.9%	4.8%			
		設計					75.6%	24.4%	20.0%	99.9%		

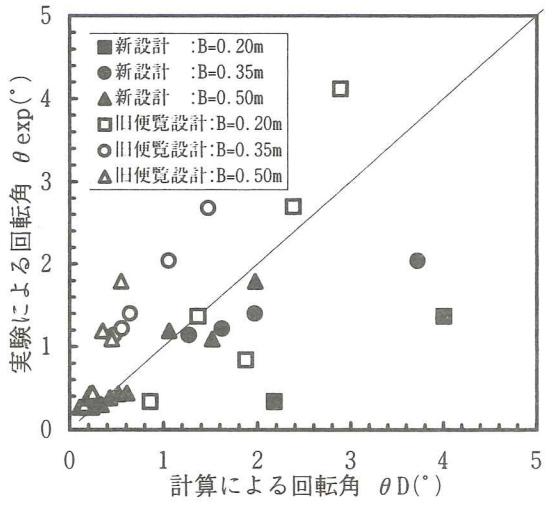
と実験値の比較

設計計算結果と実験結果の比較

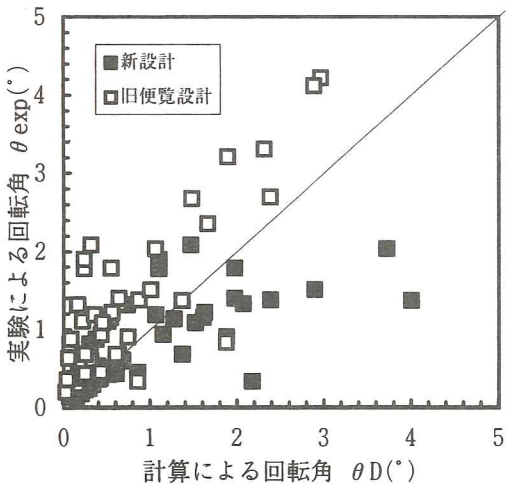
実験による擁壁速度 Vexp(m/s)	速度比率 V/Vexp	実験回転角 θ exp(°)	回転比率 θ d/ θ exp	実験水平変位 δ exp(m)	水平変位比率 δ d/ δ exp	実験擁壁エネルギー Ew1(J)	擁壁エネルギー比 Ew1d/Ew1	実験回転エネルギー Ew4(J)	回転エネルギー比 Ew4d/Ew4	実験滑動エネルギー Ew2(J)	滑動エネルギー比 Ew2d/Ew2
0.134	0.994	0.25	1.154	0.00025	2263.060	0.739	1.257	0.687	0.966	0.052	5.121
0.197	0.956	0.37	1.103	0.00051	1573.838	1.597	1.163	1.383	0.960	0.214	2.477
0.233	0.988	0.46	1.093	0.00059	1697.134	2.243	1.242	1.961	1.016	0.282	2.813
0.250	1.062	0.52	1.144	0.00061	1948.330	2.586	1.437	2.281	1.164	0.304	3.478
0.285	1.044	0.60	1.146	0.00073	1890.627	3.344	1.389	2.908	1.142	0.436	3.036
0.389	1.080	0.94	1.223	0.00149	1567.293	6.258	1.484	4.785	1.388	1.473	1.797
0.461	1.115	1.16	1.389	0.00265	1247.276	8.794	1.584	5.739	1.735	3.055	1.300
0.496	1.198	1.33	1.559	0.00403	1056.479	10.162	1.828	5.204	2.552	4.957	1.068
0.065	1.016	0.14	1.020	0.00018	1586.338	0.173	1.314	0.147	1.104	0.026	2.516
0.083	1.117	0.18	1.122	0.00029	1385.594	0.286	1.589	0.219	1.487	0.068	1.920
0.107	1.068	0.23	1.076	0.00020	2391.743	0.470	1.453	0.436	1.120	0.034	5.720
0.130	1.010	0.26	1.099	0.00023	2473.356	0.701	1.298	0.659	0.988	0.042	6.117
0.144	1.021	0.30	1.065	0.00024	2648.129	0.858	1.327	0.811	1.003	0.046	7.013
0.174	1.194	0.43	1.051	0.00068	1304.580	1.253	1.815	1.207	1.348	0.047	13.845
0.228	1.118	0.50	1.130	0.00034	3283.642	2.143	1.592	2.047	1.192	0.096	10.107
0.264	1.116	0.62	1.094	0.00039	3506.016	2.871	1.585	2.748	1.184	0.123	10.522
0.434	1.033	1.14	1.117	0.00112	2333.003	7.764	1.357	6.812	1.106	0.952	3.154
0.474	1.091	1.22	1.331	0.00137	2428.486	9.270	1.516	7.967	1.261	1.302	3.075
0.544	1.062	1.40	1.409	0.00245	1652.488	12.225	1.437	9.437	1.331	2.788	1.796
0.751	1.089	2.04	1.824	0.00668	1149.633	23.282	1.509	14.689	1.710	8.593	1.165
0.900	1.112	2.68	2.040	0.01091	1037.140	33.462	1.575	19.071	1.976	14.390	1.044
0.972	1.190	3.21	2.248	0.01402	1065.936	38.990	1.802	20.330	2.471	18.659	1.073
0.207	1.000	0.46	1.869	0.00033	1483.978	1.156	1.213	1.095	1.158	0.061	2.202
0.283	1.033	0.69	1.983	0.00052	1319.447	2.166	1.295	2.012	1.261	0.154	1.741
0.322	1.113	0.91	2.063	0.00070	1206.599	2.802	1.502	2.524	1.508	0.278	1.446
0.443	0.932	1.38	1.729	0.00074	1338.045	5.324	1.054	5.009	1.013	0.315	1.703
0.495	0.933	1.51	1.917	0.00055	2069.049	6.649	1.055	6.474	0.980	0.175	3.831
0.631	1.035	2.36	2.305	0.00210	904.230	10.790	1.300	9.277	1.367	1.513	0.886
0.711	1.126	3.31	2.412	0.00324	818.474	13.687	1.537	11.165	1.704	2.522	0.798
0.785	1.178	4.22	2.494	0.00549	621.191	16.676	1.682	12.172	2.084	4.504	0.595
0.087	0.989	0.22	0.551	0.00011	5122.103	0.466	1.343	0.454	0.691	0.012	26.236
0.130	0.942	0.29	0.591	0.00025	3168.644	1.028	1.217	0.966	0.650	0.062	10.040
0.163	0.921	0.33	0.636	0.00030	3231.219	1.611	1.165	1.521	0.619	0.090	10.409
0.189	0.915	0.37	0.655	0.00038	2992.557	2.178	1.149	2.033	0.618	0.145	8.609
0.210	0.921	0.38	0.713	0.00050	2577.196	2.685	1.165	2.427	0.647	0.258	6.040
0.299	0.916	0.54	0.728	0.00108	1984.972	5.438	1.150	4.285	0.732	1.153	2.703
0.400	0.838	1.11	0.462	0.00256	1167.838	9.738	0.964	5.870	0.802	3.868	1.209
0.411	0.941	0.69	0.917	0.00272	1406.337	10.298	1.215	6.124	1.025	4.174	1.494
0.193	0.872	0.27	0.874	0.00075	1450.177	2.276	1.043	1.696	0.702	0.580	2.041
0.271	0.880	0.30	1.117	0.00123	1406.601	4.465	1.064	3.028	0.787	1.437	1.647
0.325	0.899	0.38	1.122	0.00187	1271.288	6.424	1.109	3.820	0.936	2.604	1.363
0.375	0.899	0.43	1.203	0.00258	1169.063	8.573	1.108	4.661	1.022	3.912	1.210
0.400	0.943	0.44	1.383	0.00314	1164.120	9.734	1.220	4.791	1.243	4.943	1.197
0.554	0.962	1.19	0.894	0.00684	1002.678	18.708	1.269	6.966	1.710	11.742	1.008
0.677	0.965	1.09	1.394	0.00885	1136.575	27.876	1.278	12.436	1.437	15.440	1.150
0.722	1.044	1.79	1.103	0.01200	1105.281	31.759	1.495	10.533	2.262	21.226	1.115
0.390	1.003	0.34	6.399	0.00125	743.676	4.122	1.220	3.360	1.354	0.762	0.631
0.554	1.000	1.37	2.920	0.00130	1127.743	8.302	1.212	7.490	1.215	0.812	1.185
0.678	1.000	0.84	6.935	0.00418	481.438	12.449	1.212	9.099	1.500	3.350	0.431
0.743	1.054	2.70	2.834	0.00426	599.671	14.947	1.346	11.526	1.579	3.421	0.562
0.747	1.171	4.12	2.300	0.00467	662.971	15.128	1.663	11.345	2.005	3.783	0.636
1.100	1.125	7.25	2.566	0.00985	589.982	32.767	1.535	24.419	1.863	8.348	0.576
1.252	1.210	9.66	2.870	0.01541	553.132	42.469	1.777	29.217	2.336	13.252	0.544
1.344	1.302	11.31	3.258	0.01979	567.757	48.914	2.057	31.798	2.861	17.116	0.562
0.145	0.985	0.20	0.410	0.00017	1133.866	0.871	1.192	0.848	0.927	0.024	10.683
0.202	1.004	0.36	0.430	0.00023	1632.049	1.680	1.236	1.680	0.935	0.000	#DIV/0!
0.335	0.740	0.64	0.355	0.00033	1715.885	4.637	0.672	4.550	0.518	0.087	8.737
0.373	0.767	0.82	0.366	0.00018	4033.484	5.756	0.722	5.756	0.546	0.000	#DIV/0!
0.335	0.957	0.88	0.423	0.00064	1444.075	4.624	1.123	4.288	0.916	0.336	3.766
0.260	1.743	1.32	0.557	0.00087	2112.941	2.784	3.731	2.163	3.632	0.621	4.074
0.675	0.821	1.78	0.617	0.00128	2155.547	18.813	0.828	17.749	0.664	1.065	3.564
0.351	1.579	1.90	0.578	0.00121	2279.805	5.090	3.061	4.121	2.860	0.969	3.916
0.419	1.526	2.09	0.700	0.00291	1264.069	7.265	2.859	3.965	3.963	3.300	1.533



(a) 重錘質量5.4～5.6kg

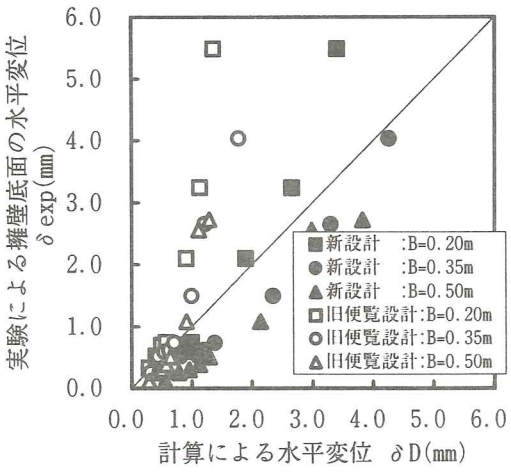


(b) 重錘質量11.1kg

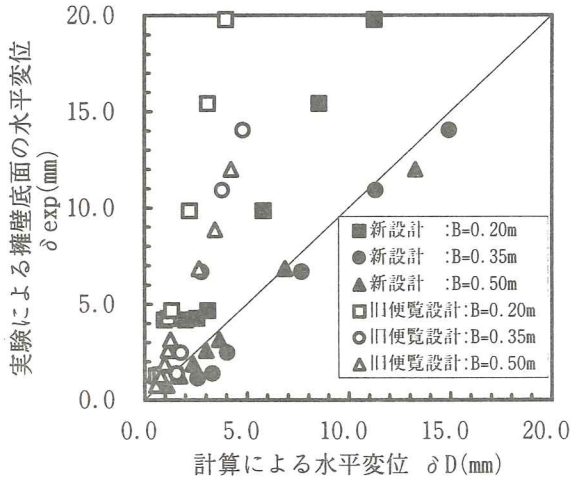


(c) 全ケース

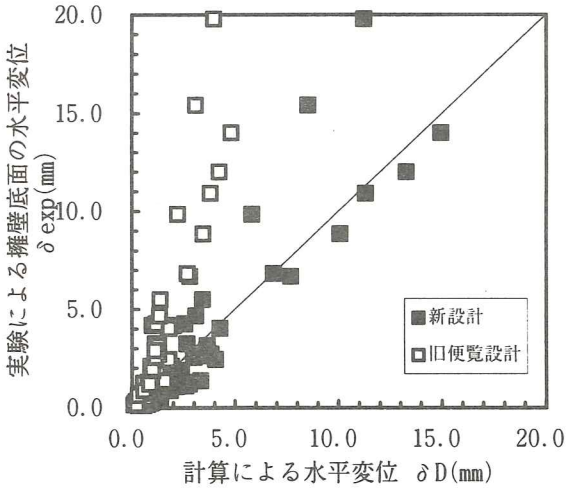
図 5.29　最大回転角の実験値と計算値の比較



(a) 重錘質量5.4～5.6kg



(b) 重錘質量11.1kg



(c) 全ケース

図 5.30　最大水平変位の実験値と計算値の比較

5.4.4　許容変形量の検討

実験における擁壁の最大回転角 θ_{exp} と降伏回転角 θ_y の比を塑性率(= θ_{exp}/θ_y)と定義し、実験における塑性率を求めた。**図5.31**に、実験における擁壁の最大回転角 θ_{exp} と塑性率 θ_{exp}/θ_y の関係を示す。実験にて安定を保てたケースはほぼ、塑性率 θ_{exp}/θ_y<6かつ θ_{exp}<5° の範囲にある。また、5.4.3の検討の結果、回転角 θ が2°より大きくなる領域では、新設計法でも十分に評価しているとは言えない。したがって、落石荷重の不確実性、地盤の定数のばらつき、落石衝突後の修復の必要性、衝撃力を受ける際の擁壁本体の設計法が確立されていないこと等を考慮して、設計上の許容値は、塑性率 θ_{exp}/θ_y<4～6、かつ最大回転角 θ<2～3° とする事が妥当と考えられる。

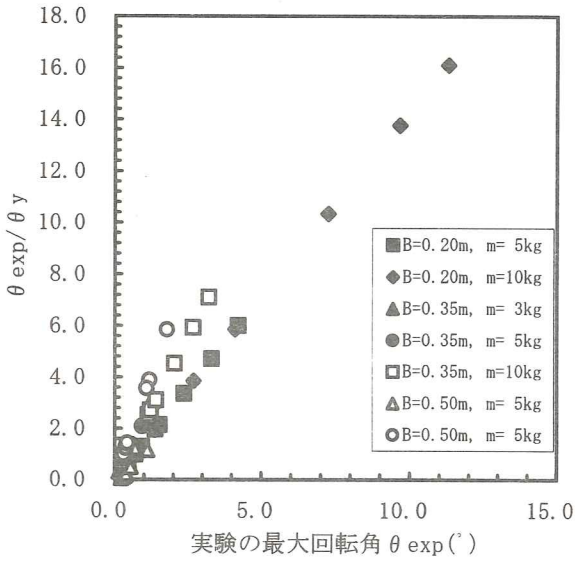


図 5.31　最大回転角と塑性率の関係

5.5　まとめ

地盤バネ係数と偏心荷重を考慮した地盤の極限支持力を降伏点とする擁壁基礎の荷重－変位曲線を弾塑性の抵抗モーメント－回転角曲線を用いて、許容変位量から定まる基礎地盤の塑性変形を考慮した可能吸収エネルギーと落石の衝突により擁壁に伝わるエネルギーとを比較することにより安定性を照査する設計法について提案し、実験を対象に検討を行った。

(1)擁壁に伝達する運動エネルギーおよび地盤に伝達するエネルギーの評価法の検討

擁壁に伝達された運動エネルギー、その後回転変形および水平変形により消費されたエネルギーを実験結果より求め、旧落石対策便覧式および新設計法による評価式の比較を行った。その結果以下のことがわかった。

重錘の衝突直前の運動エネルギーに対する重錘に伝達するエネルギーの比率は、擁壁底版幅が大きいほど、重錘エネルギーが大きいほど、また、重錘衝突位置が高いほど、大きくなる傾向が見られた。

地盤に伝達するエネルギーについては、重錘エネルギーが大きいほど、擁壁幅が大きいほど、また、地盤強度が小さいほど、滑動変形により消費される運動エネルギーの割合が高くなる傾向が見られた。しかし擁

壁幅の違いは小さかった。

重錘衝突点の擁壁の速度の評価法の比較の結果、現行設計法による擁壁の速度は実験値より小さくなった。一方、重錘と擁壁の衝突を完全弾性衝突とし、地盤降伏時の割線回転バネを用いた修正法では設計値と実験値が比較的よく一致した。

落石の衝突により擁壁に伝達されるエネルギーのうち、水平変形に費やされるエネルギーと回転変形に費やされるエネルギーの割合は、旧落石対策便覧による評価法は実験よりも過小評価し、修正法ではそれよりも実験値に近くなった。

(2)弾塑性地盤モデルの評価

地盤バネ係数と偏心荷重を考慮した地盤の極限支持力により与えられる擁壁の荷重－変位曲線モデルの妥当性を、実験模型を対象に検証した。その結果以下のことがわかった。

回転角 $\theta<2^{\circ}$ で実験値と計算値はよく一致するが、$\theta>2^{\circ}$ となると計算値が過大となる傾向にある。この理由として、擁壁の滑動変形量の増加による塑性変形する地盤の範囲が広がり、極限支持力以降の支持力の増加、擁壁の重心位置が持ち上がりの影響が考えられた。大きな変形を伴うような落石衝突での落石防護擁壁の挙動には未解明な部分が多く、この現象の解明が今後の課題である。

(3)地盤の弾塑性変形を考慮した計法の提案および適用性の検討

提案した抵抗モーメント－回転角曲線を用いて、許容変位量から定まる基礎地盤の塑性変形を考慮した可能吸収エネルギーと落石の衝突により擁壁に伝わるエネルギーとを比較することにより安定性を照査する設計法を提案し、実験結果との比較によりその妥当性を検討した。その結果以下のことがわかった。

回転変形については、回転角 θ が2° 以下では、新設計法による設計値は実験値とよく一致するが、回転角が大きくなると実験値よりも過大評価する傾向が見られた。水平変位についても変位が大きくなると、設計法は過小評価する傾向が見られた。したがって、新設計法においても変形量が大きい範囲での精度には問題が残った。

6．まとめと今後の課題

6.1　まとめ

本研究では、落石防護擁壁の挙動を把握することを目的に落石防護擁壁の重錘衝突実験を行った。また、この実験結果に基づき、「旧落石対策便覧」で示されている落石防護擁壁の設計法の問題点を把握するとともに、新たな設計法を提案し、実験結果を対象としてその適用性を検討した。結果をまとめると以下のとおりである。

(1)落石防護擁壁の重錘衝突実験

①衝突する重錘の速度が同じ条件では、擁壁底面の水平変位、回転変位とも、落石質量が大きいほど、底版幅が狭いほど、また砂地盤が軟らかいほど変位量は大きくなった。地盤が軟らかいほど変形量が大きくなることは、旧落石対策便覧による評価で基礎地盤が固いほど擁壁の安定性が低くなることと矛盾した。

②衝突高さの違いについては、水平変位量に顕著な違いは見られなかったが、回転角に衝突高さが高いほど大きくなる傾向が見られた。また、コンクリート基礎と砂基礎の違いでは、コンクリート基礎で擁壁の回転角が大きくなる傾向が見られた。

③擁壁の水平および回転角は重錘の運動エネルギーに比例しており、また、擁壁の最大水平変位が少しでも大きくなると残留変位と同程度となることから、擁壁の変形は地盤の塑性変形の結果として生じたものであることが推測された。

④旧落石対策便覧の安定性評価を実験結果に適用した結果、安全率が小さいほど変形量は大きくなる傾向はみられる。しかし、同じ安全率でも基礎地盤が固くなるほど変形量は小く、特に、コンクリート基盤のケースでは、変形が生じていないにも関わらず、ほとんどのケースで安全率は大きく１を下回った。また安全率が１となってもそれほど変形量は大きくなく、変形量で評価した場合、旧落石対策便覧の設計法は安全側の評価法であるといえる。

(2)地盤の塑性変形を考慮した設計法の提案

①地盤バネ係数と偏心荷重を考慮した地盤の極限支持力を降伏点とする擁壁基礎の荷重－変位曲線を弾塑性の抵抗モーメント－回転角曲線を用いて、許容変位量から定まる基礎地盤の塑性変形を考慮した可能吸収エネルギーと落石の衝突により擁壁に伝わるエネルギーとを比較することにより安定性を照査する設計法について提案した。

②擁壁に伝達する運動エネルギーおよび地盤に伝達するエネルギーの評価法の検討

重錘衝突点の擁壁の速度の評価法の比較の結果、現行設計法による擁壁の速度は実験値より小さくなった。一方、重錘と擁壁の衝突を完全弾性衝突とし、地盤降伏時の割線回転バネを用いた修正法では設計値と実験値が比較的よく一致した。

落石の衝突により擁壁に伝達されるエネルギーのうち、水平変形に費やされるエネルギーと回転変形

に費やされるエネルギーの割合は、旧落石対策便覧による評価法は実験よりも回転エネルギーの割合を小さく評価し修正法では、旧落石対策便覧の評価法よりは実験値に近くなった。

③弾塑性地盤モデルの評価

地盤バネ係数と偏心荷重を考慮した地盤の極限支持力により与えられる、擁壁の荷重－変位曲線モデルの妥当性を、実験模型を対象に検証した。その結果以下のことがわかった。

回転角 $\theta<2^{\circ}$ で実験値と計算値はよく一致するが、$\theta>2^{\circ}$ となると計算値が過大となる傾向にある。

この理由として、擁壁の滑動変形量の増加による塑性変形する地盤の範囲が広がり、極限支持力以降の支持力の増加、擁壁の重心位置が持ち上がりの影響が考えられた。大きな変形を伴うような落石衝突での落石防護擁壁の挙動には未解明な部分が多く、この現象の解明が今後の課題である。

④地盤の弾塑性変形を考慮した計法の提案および適用性の検討

提案した抵抗モーメント－回転角曲線を用いて、許容変位量から定まる基礎地盤の塑性変形を考慮した可能吸収エネルギーと落石の衝突により擁壁に伝わるエネルギーとを比較することにより安定性を照査する設計法を提案し、実験結果との比較によりその妥当性を検討した。その結果以下のことがわかった。

回転変形については、回転角 θ が2° 以下では、新設計法による設計値は実験値とよく一致するが、回転角が大きくなると実験値よりも過大評価する傾向が見られた。水平変位についても変位が大きくなると、設計法は過小評価する傾向が見られた。したがって、新設計法においても変形量大きい範囲での精度には問題が残った。

6.2　今後の課題

今回提案した地盤の塑性変形を考慮した設計法は、旧落石対策便覧の設計法よりは実験結果を比較的よく説明することができたが、変形量が大きい場合の評価に問題が残った。今後検討を要する項目として以下のことがあげられる。

(1)擁壁に伝わったエネルギーの回転変形および水平変形への分担率

落石衝突後の擁壁に伝わった運動エネルギーは、擁壁の変形に伴い、回転変形および水平変形へのエネルギーとして消費されてゆく。今回の提案手法では、回転変形と水平変形に消費されるエネルギーの割合を、旧落石対策便覧で採用されていた弾性回転バネによるモデルにより評価している。しかしながら、この評価手法では、その割合は、擁壁形状、地盤のバネ係数に依存し、実験において重錘のエネルギーが増大するほど、水平変形エネルギーの割合が増加する傾向を表すことができない。今後の課題として、重錘のエネルギーが増大するほど、水平変形エネルギーの割合が増加するメカニズムを解明する事があげられる。

(2)変形量が大きい場合の評価

今回提案した弾塑性変形を考慮した設計法では、変形量が大きい場合の評価に問題が残った。これは今回提案した弾塑性変形モデルが、降伏荷重以降一定であると考えていることによる。実際には擁壁の滑動変形

量の増加により、回転により塑性変形する地盤の範囲が広がり、抵抗力が大きくなることが推測される。また、極限支持力以降の抵抗モーメントは一定と仮定しているが、擁壁の回転変形に伴い擁壁は地盤にめり込むため、支持力値が増加することも考えられる。したがって、弾塑性地盤変形モデルをより現実に近づけることが今後の課題としてあげられる。

また、今回の提案手法では、擁壁の変位に伴うエネルギーの消散は、全て地盤の変形エネルギーとして評価したが、擁壁の回転角が大きくなると、擁壁の回転に伴い擁壁の重心位置が持ち上がるため、それによる擁壁の位置エネルギーの増加の影響が大きくなる。右城ら(2000)[4]は、擁壁に伝えられた運動エネルギーは全て擁壁の回転に伴う位置エネルギーの増加として考慮した設計法を提案している。実際は、地盤の変形によるエネルギーの消散と位置エネルギーの増加が同時に進んでいるものと考えられる。したがって、擁壁の回転に伴う位置エネルギーを考慮した設計法の検討も今後の課題としてあげられる。

(3)擁壁躯体の安定性および有効幅の評価

落石衝突時の躯体の健全性については、現在確立した手法がない。「落石対策便覧」においても照査手法は示されておらず、構造細目で規定された鉄筋の配筋を用いることで、衝撃荷重に対する健全性が保たれるものとしている。本研究では擁壁躯体の安定性については検討対象としなかったが、被害事例では無筋コンクリート擁壁躯体の損傷が生じた事例が見られる[2]。擁壁躯体に作用する衝撃力、擁壁躯体に生じるひび割れ性状、および落石衝突時の擁壁の有効幅について調べた研究もある（川瀬ら2000）[8]が、研究事例も少なく、落石衝突時の安定性の他、躯体の健全性および安定性を評価する際の有効幅の設定法等について、検討の余地は残されている。

参考文献

1)日本道路協会：落石対策便覧、1983.

2)松尾修、堤達也、佐々木哲也：平成９年度落石に関する実態調査報告書、土木研究所資料、第3556号、1998.

3)原島鮮：質点系・剛体の力学、裳華房、1968.

4)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論文集、pp. 223-226、 土木学会構造工学委員会、衝撃実験・解析法の標準化に関する研究小委員会、2000.

5)地盤工学会：地盤調査法、1995.

6)鉄道総合研究所：落石対策技術マニュアル、1999.

7)日本道路協会：道路橋示方書Ⅳ下部構造設計編、1996.

8)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論文集、土木学会、pp.227-232、2000.

（付録A. 1）回転中心について

水平および回転地盤バネで支持された２自由度系剛体の振動問題およびその解については既存の文献に示されている（たとえば小坪(1973)）。ただし、擁壁は断面形状が台形であり、式がやや煩雑となるため、ここに誘導して示すこととする。

(1) 基礎方程式

本文の図-2.1を参照して、水平方向および回転運動の方程式はそれぞれつぎのようになる。

$$M\ddot{x} = -K_s(x - S\theta) \tag{A1.1}$$

$$I\ddot{\theta} = -K_r\theta + K_sS(x - S\theta) \tag{A1.2}$$

(2) 上式の解として

$$x = Xe^{i\omega t}$$
$$\theta = \Theta e^{i\omega t} \tag{A1.3}$$

と置き、式(A1.1)、(A1.2)に代入し、$e^{i\omega t}$を分離すれば、

$$\left(K_s - M\omega^2\right)X - K_sS\Theta = 0 \tag{A1.4}$$
$$K_sSX - \left(K_r - I\omega^2 + K_sS^2\right)\Theta = 0$$

これはXおよびΘに関する同次方程式であるから、その係数の行列式を０に等置した次式が振動数方程式となる。

$$\begin{vmatrix} \left(K_s - M\omega^2\right) & -K_sS \\ K_sS & -\left(K_r - I\omega^2 + K_sS^2\right) \end{vmatrix} = 0 \tag{A1.5}$$

以下、これを解く。

$$K_s - M\omega^2 = \lambda \tag{A1.6}$$

とおく。これより、

$$-M\omega^2 = \lambda - K_s \tag{A1.7}$$

$$-I\omega^2 = I/M(\lambda - K_s) = i_0^2(\lambda - K_s) \tag{A1.8}$$

ただし、

i_0：回転半径（$i_0^2 = I/M$） (A1.9)

式(A1.6)～(A1.8)を式(A1.5)に代入すると

$$\begin{vmatrix} \lambda & -K_sS \\ K_sS & -\left\{K_r + K_sS^2 + i_0^2(\lambda - K_s)\right\} \end{vmatrix} = 0 \tag{A1.10}$$

これをλに関して解くと

$$\lambda = \left\{ -\left(K_r + K_s S^2 - K_s {i_0}^2\right) \pm \sqrt{\left(K_r + K_s S^2 - K_2 {i_0}^2\right)^2 + 4{K_s}^2 S^2 {i_0}^2} \right\} / 2{i_0}^2 \tag{A1.11}$$

この式を式(A1.6)に代入すれば1次及び2次の固有角振動数 ω_1、 ω_2 が得られる。なお、1次固有角振動数に対応する解は、式(A1.11)右辺の複合記号のうちの＋に対応するものである。ここでの関心は固有振動モードにあるので、固有角振動数の解をこれ以上書き下すのは省略する。

式(A1.4)より固有振動モードは

$$\Theta = \left(K_s - M\omega^2\right) X / K_s S \tag{A1.12}$$

また、本文図-2.2を参照して、幾何学的関係より

$$Z_1 = X / \Theta \tag{A1.13}$$

式(A1.13)に式（A1.12)、(A1.6)、(A1.11)を代入することにより

$$\begin{aligned} Z_1 &= K_s S / \lambda \\ &= \left\{ \left(K_r + K_s S^2 - K_s {i_0}^2\right) + \sqrt{\left(K_r + K_s S^2 - K_s {i_0}^2\right)^2 + 4K_s^2 S^2 i_0^2} \right\} / 2K_s S \\ &= \frac{1}{2S}\left(\frac{K_r}{K_s} + S^2 - i_0^2\right) + \sqrt{\frac{1}{4S^2}\left(\frac{K_r}{K_s} + S^2 - i_o^2\right)^2 + i_0^2} \\ &= \frac{1}{2S}\left(S^2 + e_0^2 - i_0^2\right) + \sqrt{\frac{1}{4S^2}\left(S^2 + e_0^2 - i_0^2\right)^2 + i_0^2} \end{aligned} \tag{A1.14}$$

ここに、

$$e_0^2 = K_r / K_s \tag{A1.15}$$

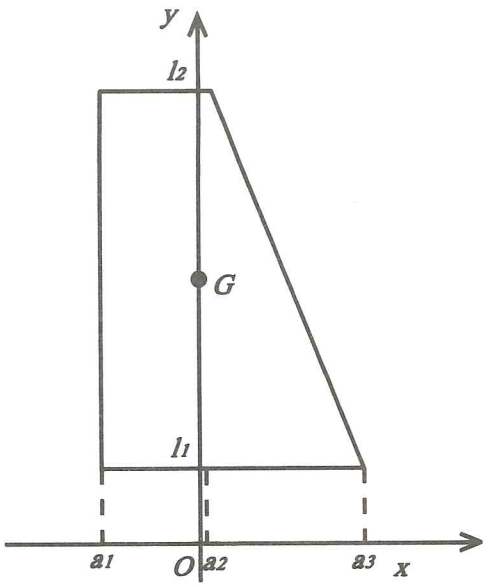
式(A1.14)で計算されるZ_1 が擁壁の1次固有振動モードにおける回転（ロッキング）中心と擁壁重心との距離である。

（参考文献）

小坪清真：土木振動学、pp. 106-109, 森北出版、1973.

（付録A. 2） 本文式(2. 11)の誘導

図A2. 1のように座標系を設定する。ここで、原点0は本文式(2.1)に示されるロッキング振動の回転中心に対応し、y軸は擁壁の重心Gを通過するように設定している。



図A2. 1　座標の定義

(1)擁壁の重心位置

原点0からとった擁壁重心の位置ベクトル$r_G=(x_G,y_G)$は次式で定義される。

$$r_G = \frac{\int r dM}{M} \tag{A2.1}$$

ここに

$r=(x,y)$：擁壁内の任意の点の位置ベクトル

この式により擁壁重心の座標(x_G,y_G)を計算するとつぎのように得られる。

$$\begin{aligned} x_G &= \int x dM / M \\ &= \frac{\rho(l_2-l_1)}{6M}\left(-3a_1^2+a_2^2+a_3^2+a_2a_3\right) \end{aligned} \tag{A2.2}$$

$$\begin{aligned} y_G &= \int y dM / M \\ &= \frac{\rho(l_2-l_1)}{6M}\left\{3(l_1+l_2)(a_2-a_1)+(2l_1+l_2)(a_3-a_2)\right\} \end{aligned} \tag{A2.3}$$

ここで、

$$a_2 = a_1 + b_1 \tag{A2.4}$$

$$a_3 = a_1 + b_2 \tag{A2.5}$$

$$M=\frac{\rho}{2}(l_2-l_1)(a_3+a_2-2a_1)=\frac{\rho}{2}(l_2-l_1)(b_1+b_2) \tag{A2.6}$$

であることから、これらを式(A2.2)、(A2.3)に代入すると

$$x_G=a_1+\frac{b_1^2+b_1b_2+b_2^2}{3(b_1+b_2)} \tag{A2.7}$$

$$y_G=l_1+\frac{b_1+2b_2}{3(b_1+b_2)}(l_2-l_1) \tag{A2.8}$$

なお、x_G= 0となるように座標系を設定していることから、上式より座標a_1が定まる。

(2)慣性モーメントの計算

図A2.1を参照することにより、

$$\begin{aligned}I&=\int(x^2+y^2)\,dM\\&=\rho\iint(x^2+y^2)\,dxdy\\&=\rho\left[\frac{l_2-l_1}{12}\left\{-(a_2+a_3)(a_2^2+a_3^2)-4a_1^3\right\}-\frac{a_3-a_2}{4}(l_1+l_2)(l_1^2+l_2^2)\right.\\&\qquad\left.+\frac{a_3l_2-a_2l_1-a_1(l_2-l_1)}{3}(l_1^2+l_1l_2+l_2^2)\right]\end{aligned} \tag{A2.9}$$

式(A2.4),(A2.5),(A2.6)を上式に代入することにより

$$\begin{aligned}I=\frac{2M}{(b_1+b_2)(l_2-l_1)}&\left[\frac{l_2-l_1}{12}\left\{-(a_2+a_3)(a_2^2+a_3^2)-4a_1^3\right\}-\frac{b_2-b_1}{4}(l_1+l_2)(l_1^2+l_2^2)\right.\\&\left.+\frac{b_2l_2-b_1l_1}{3}(l_1^2+l_1l_2+l_2^2)\right]\end{aligned} \tag{A2.10}$$

上式で、右辺第１項は擁壁のy方向速度成分にもとづく項であり、これは他の２項に比べて小さい。旧便覧ではこの項は無視されている。

（付録A.3）擁壁の安定性評価手法

擁壁の安定性評価手法については本文第４章に示した。ここでは、安定性評価手法について検討する過程で考察した事項を補遺として記しておく。

内容は、落石が衝突した直後の擁壁および落石の速度を算定する方法と、擁壁の安定性評価手法に関するものである。

A3.1 落石が衝突した直後の擁壁および落石の速度の算定

A3.1.1　基本的な考え方

（１）エネルギー保存則・運動量保存則の適用性

落石が擁壁に衝突する場合、落石が衝突直前に保有していた運動エネルギーは、衝突直後の落石の運動エネルギー、衝突点付近での消費エネルギー（石および擁壁接触面およびその周辺部分の破損、衝突音、熱など）、擁壁の運動エネルギー、さらには擁壁底面の変位による地盤への仕事などに転嫁される。これをエネルギー保存則で表せば次式のようになる。

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 \tag{A3.1}$$

ここに、

E　：落石の衝突直前運動エネルギー、

E_1：落石の衝突直後運動エネルギー、

E_2：衝突点付近での消費エネルギー、

E_3：擁壁の運動エネルギー（剛体的な運動と擁壁内部の振動の２つに分けて考えることもできる）、

E_4：地盤を変形させるための消費エネルギー

上記のうち、工学的な観点から知りたいものはE_1およびE_3であるが、このためにはE_2、E_4、およびE_3のうちの擁壁自体の振動エネルギーを知ることが必要である（ただし十分ではない）。このうち、E_4については、衝突現象がきわめて短時間に経過すると考えればその間の擁壁底面の変位量は無視でき、したがって、E_4もその他のエネルギー項に比べて無視できる。しかしながら、E_2については無視できる大きさではなく、これの推定は一般に困難である。したがって、エネルギー保存則から衝突直後の運動を知ろうとするのは適当ではない。

他方、運動量保存則は上述のように見積もりが困難なエネルギー消費項がある場合に適している。

A3.1.2　計算条件の設定

計算モデルを**図A3.1**に示す。

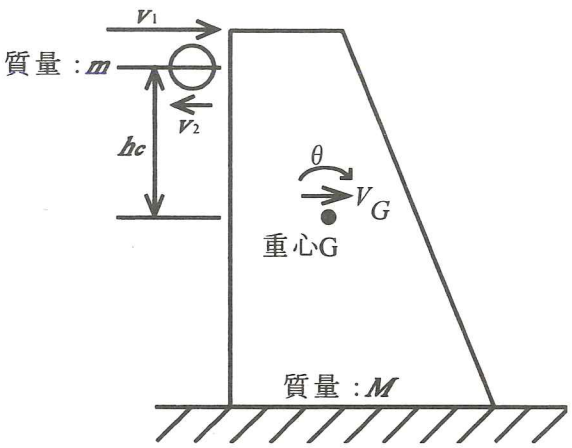
また、以下の計算条件を設定する。

（条件１）落石と擁壁とは反発係数eで反発するものとする。

（条件２）衝突時間はきわめて短く、このためその時間内における擁壁底面の支持地盤の反力の変化は小さいものとする。

なお、反発係数は本来質点系の衝突運動について定義されるものであるが、ここでは大きさを有する剛体同士の衝突問題であるため、便宜上、衝突点の相対速度の変化の比として定義するものとする。

また、（条件２）の妥当性については、支持地盤がよほど固くない限りは受け入れられるものである。



図A3.1　計算モデル

A3.1.3　基礎方程式

落石・擁壁系について水平(x)方向の運動量保存則および回転(θ)方向の角運動量保存則は次式のように表される（鉛直方向の運動量保存則は無視する）。

$$mv_1 = mv_2 + MV_G \tag{A3.2}$$

$$mv_1 h_c = mv_2 h_c + I_G \dot{\eta} \tag{A3.3}$$

また、反発係数は以下のように定義される。（ここに、擁壁の衝突点における速度 $V = V_G + h_c\dot{\theta}$ はである。）

$$e = -(v_2 - V)/v_1 \tag{A3.4}$$

ここに、

m　：落石の質量、

M　：擁壁の質量、

I_G　：擁壁の重心まわりの慣性モーメント、

v_1　：落石の衝突前水平速度、

v_2　：落石の衝突後水平速度、

V　：落石の衝突位置における擁壁の衝突後水平速度、

V_G　：擁壁の重心位置における衝突後水平速度、

$\dot{\eta}$　：擁壁の衝突後角速度、

h_c　：落石の衝突地点と擁壁重心との鉛直距離（腕の長さ）

以上が基礎方程式である。ここに、未知数は衝突直後の運動速度v_2、V、$\dot{\eta}$の３つであり、基礎方程式も３つであることから解くことができる。ただし、反発係数eは既知とする。

A3.1.4　方程式の解

連立方程式(A3.2), (A3.3), (A3.4)を解くと、以下の解が得られる。

$$v_2 = \frac{mI_G + Mmh_c^{\,2} - eMI_G}{mI_G + Mmh_c^{\,2} + MI_G} v_1 \tag{A3.5}$$

$$V_G = \frac{(1+e)mI_G}{mI_G + Mmh_c^{\,2} + MI_G} v_1 \tag{A3.6}$$

$$\dot{\theta} = \frac{(1+e)Mmhc}{mI_G + Mmh_c^{\,2} + MI_G} v_1 \tag{A3.7}$$

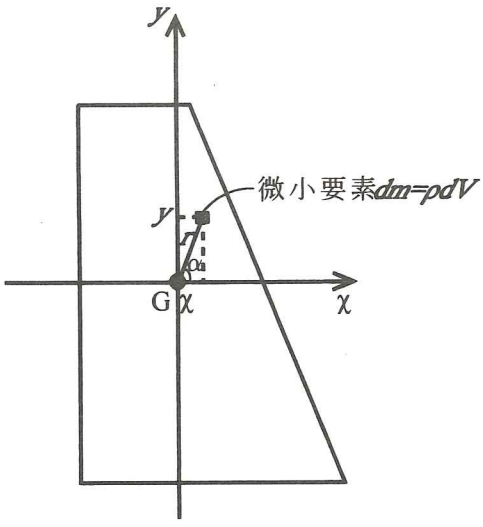
A3.1.5　備考

(1) 上式からわかるように、落石衝突高さが擁壁の重心より低い(h_c＜0)場合には回転速度θは負の値をとる。

(2)　落石衝突高さが擁壁の重心位置と一致する(h_c=0)場合には、回転速度はゼロとなり、v_2及びV_Gの解は質点系の解に一致する。

(3)　反発係数の大きさと衝突によるエネルギー消費の関係を上式から調べてみよう。

まず、衝突後の擁壁の運動エネルギーを計算する。このため、**図A3.2**に示すように、擁壁の重心を原点にとった(x, y)座標系を考える。



図A3.2　座標の定義

擁壁の任意の地点(x, y)における微小質量要素dmの速度は

$$\left(r\dot{\theta}\sin\alpha + V_G, -r\dot{\theta}\cos\alpha\right)$$

である。

したがって、擁壁全体の運動エネルギーE_{w2}は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} E_{w2} &= \int \frac{1}{2}\left\{\left(r\dot{\theta}\sin\alpha + V_G\right)^2 + \left(-r\dot{\theta}\cos\alpha\right)^2\right\} dm \\ &= \frac{1}{2}\int v\left(r^2\dot{\theta}^2 + 2r\dot{\theta}V_G\sin\alpha + {V_G}^2\right)\rho dV \\ &= \frac{1}{2}\dot{\theta}^2\int_v r^2\rho dV + \dot{\theta}V_G\int_v r\sin\alpha\,\rho dV + \frac{1}{2}{V_G}^2\int_v \rho dV \end{aligned} \tag{A3.8}$$

ここに、dV：微少体積要素（$dm = \rho\, dV$）

ここで、右辺の各項について以下のように与えられる。

$$\int_v r^2\rho\, dV = I_G \qquad \text{（擁壁の重心まわりの慣性モーメント} \tag{A3.9}$$

$$\int_V \rho\, dV = M \qquad \text{（擁壁の質量）} \tag{A3.10}$$

また、

$$\begin{aligned} \int_v r\sin\alpha\rho\, dV &= \int \sqrt{x^2+y^2}\cdot\frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}}\rho\, dV \\ &= \int_v \rho\, y dV \\ &= 0 \end{aligned} \tag{A3.11}$$

なお、式(A3.11)は、座標系の原点を重心にとっていることからゼロとなるものである。

式(A3.9)～(A3.11)を式(A3.8)に代入すれば

$$E_{w2} = \frac{1}{2}I_G\dot{\theta} + \frac{1}{2}M{V_G}^2 \tag{A3.12}$$

これより、剛体である擁壁の運動エネルギーは重心の線運動エネルギーと重心まわりの回転運動エネルギーの単純和で与えられることが知れる。

つぎに、落石および擁壁のそれぞれの衝突前後の運動エネルギーはつぎのように与えられる。

$$\begin{aligned} E_{R1} &= \frac{1}{2}mv_1^2 \\ E_{w1} &= 0 \\ E_{R2} &= \frac{1}{2}mv_2^2 \\ E_{W2} &= \frac{1}{2}M{V_G}^2 + \frac{1}{2}I_G\dot{\theta}^2 \end{aligned} \tag{A3.13}$$

また、落石および擁壁を含む剛体系の衝突前後の運動エネルギーE_1, E_2はそれぞれつぎのとおりである。

$$E_1 = E_{R1} + E_{W1}$$
$$E_2 = E_{R2} + E_{W2} \tag{A3.14}$$

式(A3.13)および式(A3.5)～(A3.7)を上式に代入することにより

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{R1} + E_{W1} \\ &= \frac{1}{2} m v_1^2 \end{aligned} \tag{A3.15}$$

$$\begin{aligned} E_2 &= E_{R2} + E_{W2} \\ &= \frac{1}{2} m v_2^2 + \frac{1}{2} M {V_G}^2 + \frac{1}{2} I_G \dot{\theta} \\ &= \frac{1}{2} m \left\{ \frac{mI_G + Mmhc^2 - eMI_G}{mI_G + Mmhc^2 + MI_G} \right\} v_1^2 \\ &\quad + \frac{1}{2} M \left\{ \frac{(1+e)mI_G}{mI_G + Mmhc^2 + MI_G} \right\} v_1^2 \\ &\quad + \frac{1}{2} I_G \left\{ \frac{(1+e)Mmhc}{mI_G + Mmhc^2 + MI_G} \right\}^2 v_1^2 \\ &= \frac{1}{2} m v_1^2 \left[1 - \frac{(1+e)\, MmI_G \left(I_G + Mhc^2 \right) + M^2 {I_G}^2}{\left(mI_G + Mmhc^2 + MI_G \right)^2} (1-e) \right] \end{aligned} \tag{A3.16}$$

これより、$e = 1$ とすれば$E_2 = E_1$ となり、エネルギーが保存されていることから、完全弾性衝突に相当していることがわかる。また、$e<1$ のときには$E_2<E_1$ となる。

したがって、A3.1.2の冒頭に述べたように、大きさを有する剛体同士の衝突問題において、衝突点における両剛体の衝突前後の相対速度の比として反発係数eを定義することは物理的に妥当と考えられる。

(4) 擁壁の初速度から回転中心を求めるとつぎのようになる。すなわち、擁壁の重心から下方の回転中心までの鉛直距離をZ_1とすると、幾何学的関係により、

$$Z_1 = v_2 / \dot{\theta} \tag{A3.17}$$

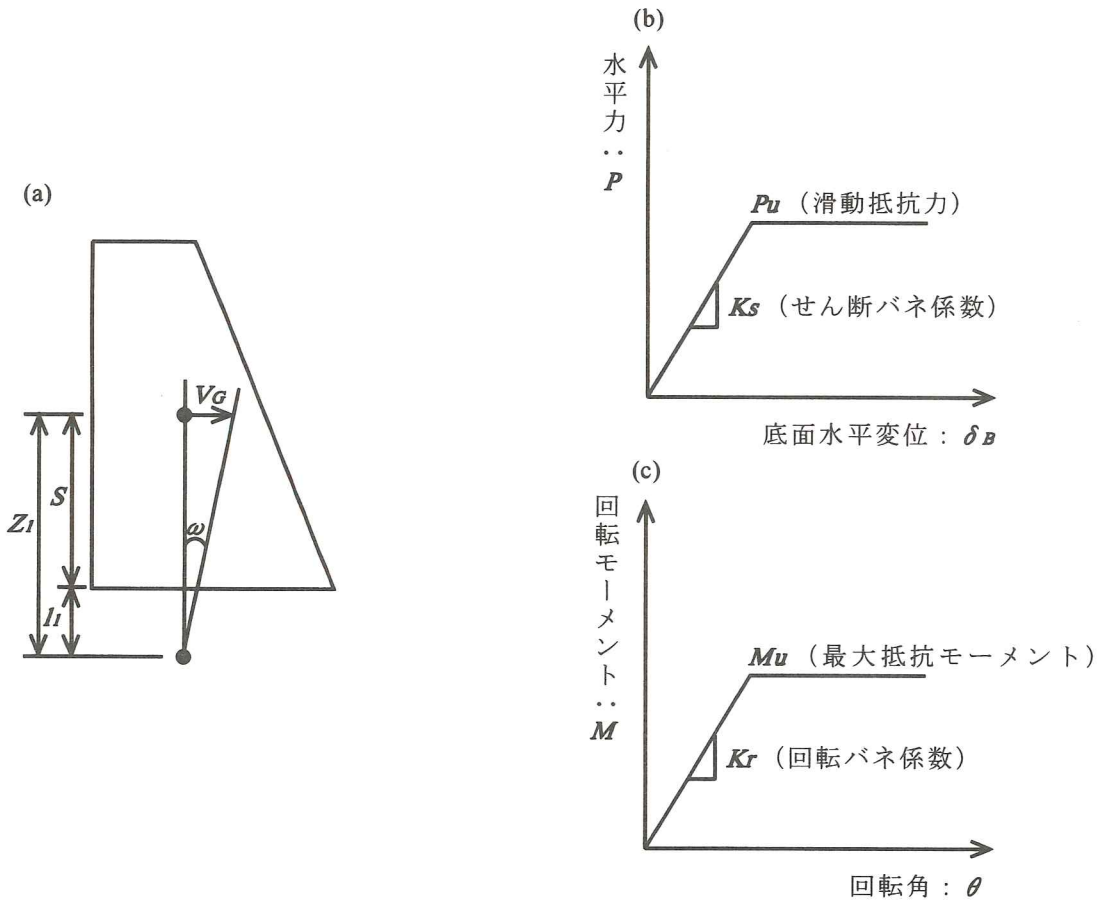
ただし、これは初速度についてのみ成立するものであり、擁壁の変位が進行すると支持地盤の反力が変化するため、一般には回転中心は一定しない。

A3.2　落石が衝突した後の擁壁の運動および安定性の評価

落石が衝突した直後に擁壁に生じる初速度は既に前節A3.1に示した。擁壁はこの後支持地盤の変形を伴いながら運動する。衝突直後に擁壁が保有した運動エネルギーはこの過程で支持地盤を弾塑性変形させるのに費やされる。落石の運動エネルギーが大きいと擁壁には過大な滑動変位ないしは回転変位が生じ、ひいては転倒に至る可能性もある。擁壁が転倒に至らない場合、擁壁は前方に最大変位を生じた後後方に反転し、以

後減衰振動を経て静止する。したがって、擁壁の安定性の観点からは前方への最大変位の大きさを推定することが肝要であると考えられる。なお、擁壁自体が落石の大きな衝撃荷重により破壊されることも考えられるが、これはここでの考察の対象としない。

さて、擁壁の運動を精密に予測するためには、擁壁と支持地盤の間の相互作用すなわち擁壁底面の変位と地盤反力の関係を正しく捉えることが必要である。しかし、一般的な変位－反力関係を得ることは容易でない。したがって、実務的には何らかの単純モデル化が必要である。その代表的な例として、相互作用関係を地盤反力係数と極限耐力を用いて弾完全塑性モデルで表す方法がある。すなわち、**図A3.3**に示すように、擁壁底面の水平変位に対してはせん断バネ係数と滑動抵抗力を用いて図A3.3(b)のような関係を設定し、回転変位に対しては回転バネ係数と最大抵抗モーメントを用いて図A3.3(c)のような関係を設定するものである。なお、これらの定数の求め方については本文第３章に示されているので参照されたい。断っておくが、支持地盤の極限抵抗は滑動、回転変位に対して独立に定まる訳ではなく、本来は水平荷重、鉛直荷重および回転モーメントの組み合わせ荷重条件の下で定まるものである。したがって、上に述べたように水平変位、回転変位に対して独立に変位－荷重関係を設定するのは実務的な便法である。



図A3.3　滑動と回転に関する荷重－変位関係

以上、擁壁の初速度、擁壁底面と支持地盤の間の荷重－変位関係が与えられれば、運動方程式を解くことにより、以後の擁壁の運動を知ることができる。

ここでは現象をより単純化して簡便に擁壁の最大変位量を予測する方法を示す。それは、擁壁の運動モー

ドが、初速度運動モードに従うという仮定を導入するものである。以下に概要を示す。

まず、擁壁の初速度（V_G, ω）より、回転中心の位置は次式で与えられる（図A3.3参照）。

$$Z_1 = V_G / \omega \tag{A3.18}$$

また、擁壁底面の水平変位 δ_B と回転角 θ の関係は

$$\delta_B = l_1 \theta \tag{A3.19}$$

ここに、

Z_1 ：擁壁重心から回転中心までの距離、

V_G：擁壁重心の水平速度、

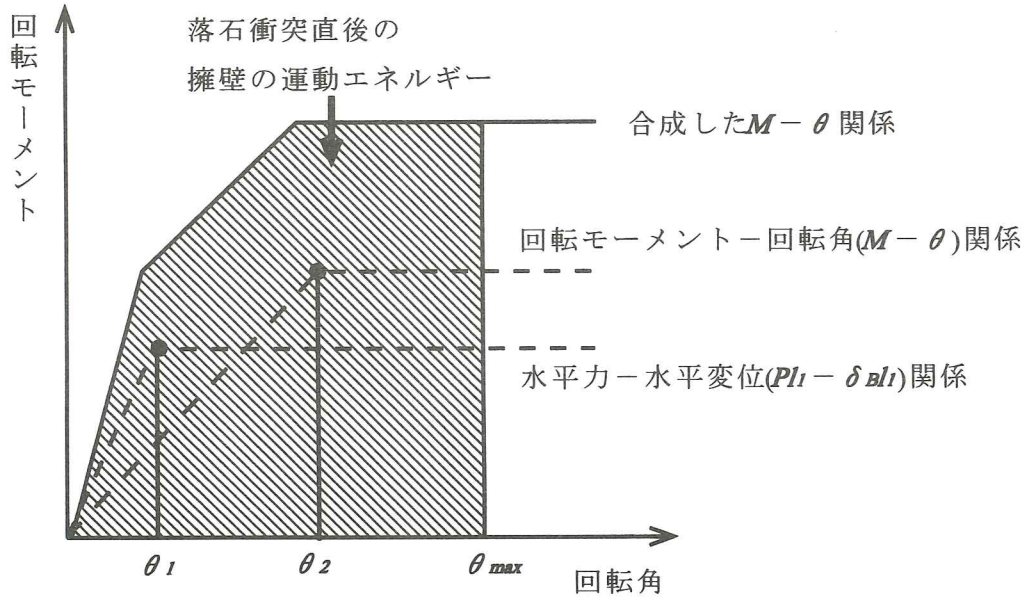
ω ：擁壁の角速度（$\omega = d\theta/dt$）、

δ_B ：擁壁底面の水平変位、

l_1 ：擁壁底面から回転中心までの距離、

θ ：擁壁の回転角

式(A3.19)を用いれば図A3.3(b)及び(c)の荷重－変位関係は合成することが可能となり、その結果は図A3.4のように得られる。同図は回転モーメント(M)－回転角(θ)関係を示しているが、水平力(P)－底面水平変位(δ_B)関係で表してもよい。



θ_1：水平変位の降伏点（$\theta_1 = \delta_{By l_1}$）

θ_2：回転変位の降伏点（$\theta_2 = \theta_y$）

図A3.4　合成した荷重－変位関係

つぎに、擁壁が落石の衝突直後に保有した運動エネルギーはすべて支持地盤を変形させるのに消費される

としてエネルギー保存則を適用すれば、**図A3.4**より最大回転角 θ_{max} を求めることができる。ちなみにこのときの最大底面水平変位は以下のとおりである。

$$\delta_{B\,max} = l_1\,\theta_{max} \tag{A3.20}$$

最後に安定性の照査は、上のように得られた最大変位量が許容変位量より小さいことを確認することにより行う。ここで、許容変位量の設定方法としては、許容塑性率を用いる方法と絶対値により規定する方法の２つが考えられる。

許容塑性率を用いる方法は、水平変位、回転変位の両者についてそれぞれ許容塑性率を設定し、以下が満足されることを確認するものである。

$$\theta_{max} \leqq \mu_{\theta}\,\theta_y,$$
$$\delta_{B\,max} \leqq \mu_{\delta}\,\delta_y \tag{A3.21}$$

他方、絶対値を規定する方法としては、たとえば転倒に至る回転角や前面への最大せり出し許容量をある安全率で割り引いて許容値とする方法も考えられよう。式で表現するとつぎのようになる。

$$\theta_{max} \leqq \theta_{ultt}/Fs,$$
$$\delta_{B\,max} \leqq \delta_{ult}/Fs \tag{A3.22}$$

ここに、

θ_{ultt}：極限（転倒に至る）回転角（擁壁形状から幾何学的に得られる）、

δ_{ult}：極限水平変位量（道路空間の確保の上から許容し得る変位量）。