

重力式岸壁の地震時残留変形量の簡易評価

一井康二¹・佐藤幸博²・井合 進³・劉 漢龍⁴

¹正会員 工修 運輸省港湾技術研究所地盤震動研究室 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

²学生会員 運輸省港湾技術研究所地盤震動研究室 (同上)

³正会員 工博 運輸省港湾技術研究所地震防災研究室長 (同上)

⁴劉 漢龍 河海大学岩土工程研究所 (中華人民共和国)

重力式岸壁を対象として、耐震強化施設の予備設計時や耐震強化施設以外の施設の耐震判定等に手軽に適用することができる地震時残留変形の簡易評価法について検討した。岸壁の変形照査への適用性が確認されている有効応力解析プログラムを用いて、種々の想定断面に対するパラメトリックな数値解析を行い、地震時残留変形に影響を与える因子について整理した。

解析結果を基に、重力式岸壁の残留変形量の評価フローを示し、既往の被災事例と比較した。検討の結果、今回提案した評価フローにより、おおよそ地震時残留変形量は評価できる見通しが得られた。

Key Words : Quay wall, Liquefaction, Deformation, Seismic coefficient

1. 地震時残留変形簡易評価の目的

地震時における岸壁の残留変形を予測する方法として、模型振動実験や有効応力法に基づく有限要素解析プログラム (例えば、FLIP¹⁾) が用いられることが多い。しかしながら、これらの手法は時間や手間がかかるため、耐震強化施設の変形等の照査の様に精度がある程度要求される場合には用いられるが、予備設計時や耐震強化施設以外の施設の耐震判定等に手軽に適用することはできなかった。そこで、精度は悪くても手軽に耐震判定等に使用できる地震時残留変形の簡易評価法があることが望ましい。

本研究では、兵庫県南部地震における被災事例の解析により、岸壁の変形照査への適用性が確認されている有効応力解析プログラムFLIP¹⁾を用いて、種々の想定断面に対するパラメトリックな数値解析を行い、重力式岸壁を対象とした地震時残留変形の簡易評価法について検討した。

2. 検討手法

重力式岸壁の変形量に影響を及ぼす主たる因子としては、岸壁の設計震度・入力地震動レベル・置換砂の層厚・置換砂及び裏埋土の液状化強度等が考えられる。ここで、置換砂とは兵庫県南部地震における神戸港の被災例が代表的なものであるが、重力式岸壁の安定性の確保のためケーソン直下の軟弱粘土層を砂により置換した地盤改良部である。ケーソンの変形量に及ぼす影響という観点では、軟弱粘土層の存在しない地盤においてはケーソン直下の砂質土

層が同様のものであると考えられる。

検討にあたっては、図-1に示す様な断面を重力式岸壁の標準断面と考えた。置換砂 (あるいは基盤上の砂層) の層厚を D_1 、ケーソン幅を W 、ケーソン高さを H で示している。岸壁の設計震度の影響を示すパラメータとしては、図-2に示すようにケーソンの縦横比(W/H)と設計震度に一定の相関があることから、ケーソンの縦横比(W/H)によって示すこととした。今回のパラメトリックスタディでは、 $W/H=0.65, 0.90, 1.05$ の3ケースについて検討しており、各々が設計震度 $Kh=0.1, 0.2, 0.25$ にはほぼ相当する。

入力地震動レベルのパラメータは基盤における最大加速度レベルを100, 200, 300, 400, 600Galと変化させて検討した。入力地震動波形としては、耐震強化施設の変形等の照査時に用いられることの多い兵庫県南部地震時のポートアイランド-79mの基盤波 (2E波)²⁾を用いた。用いた地震波形を図-3に示す。

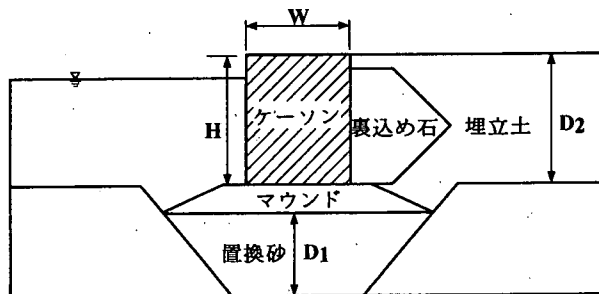


図-1 重力式岸壁の標準断面図

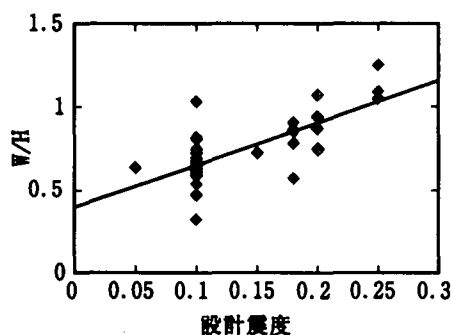


図-2 設計震度とW/Hの関係

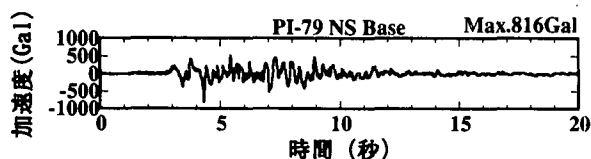


図-3 入力地震動波形

置換砂の層厚については、ケーソンの高さとの比 ($D1/H$) で考え、良好な地盤で置換砂層がない場合 ($D1/H=0.0$) と置換砂層が薄い場合 ($D1/H=0.5$)、置換砂層が厚い場合 ($D1/H=1.0$) を考えた。また、簡単のため、置換砂 (あるいは基盤上の砂層) と裏埋め土の地盤条件を同じとし、港湾における液状化判定時に用いられる等価N値 (有効上載圧約65kPa時における値に上載圧の補正をしたN値) を用いて地盤の液状化強度等をあらわすことにした。

3. 解析結果

(1) 設計震度の影響

等価N値が15の場合における、 W/H と変形量の関係を図-4に示す。図-4(a)が($D1/H=0.0$)のケース、図-4(b)が($D1/H=1.0$)のケースである。置換砂が薄い場合は W/H の増加 (設計震度の増加) に応じて変形量が減少するが、置換砂が厚い場合はあまり W/H と変形量の関係は明瞭でない。

(2) 入力加速度レベルの影響

$W/H=0.9$ (設計震度0.2相当) の場合における、入力加速度レベルと変形量の関係を図-5に示す。図-4と同じく図-5(a)が($D1/H=0.0$)のケース、図-5(b)が($D1/H=1.0$)のケースである。設計震度0.2相当であるため、激しく液状化の生じる等価N値が5あるいは8のケースを除き、200Galレベルでは変形量は小さい値に抑えられており、ほぼ現行設計法と矛盾のない結果が得られている。

(3) 地盤の液状化強度の影響

$W/H=0.9$ (設計震度0.2相当) の場合における、地盤の等価N値と変形量の関係を図-6に示す。図-4と同じく図-6(a)が($D1/H=0.0$)のケース、図-6(b)が($D1/H=1.0$)のケースである。置換砂層の有無によ

り大きく傾向が異なっており、($D1/H=0.0$)の場合は等価N値の影響はさほど大きくないのに比べ、($D1/H=1.0$)のケースは等価N値の値により変形量が大幅に変化する。したがって、変形量を簡易的に評価するには置換砂層 (あるいはケーソン直下の砂層) の有無を最初に考慮する必要がある。

(4) 置換砂層厚の影響

$W/H=0.9$ (設計震度0.2相当) の場合における置換砂層厚と変形量の関係を図-7に示す。図-7(a)が等価N値10のケースであり、図-7(b)が等価N値20のケースである。入力加速度レベルによって傾向が異なり、地震動が小さいレベルでは置換砂層厚の影響が大きいのにに対し、地震動が大きいレベルでは置換砂層厚の増加に伴い変形量が増加する。特に、 $D1/H<0.5$ における変形量の増加傾向が大きく、良好な基盤上の岸壁であるかどうか、岸壁の地震時安定性に対し極めて重要であることを示している。また、置換砂層厚の影響は地震動レベルと等価N値の両方に密接に関係していることがわかる。

4. 変形量の簡易評価法と被災事例との比較

(1) 地震時残留変形量の簡易評価フロー

以上の検討結果を基に、重力式岸壁の地震時残留変形量の簡易評価法を検討した。図-8に今回提案する評価フローを示す。この評価フローについては、変形量に大きく影響を及ぼすと思われる因子から順に評価している。筆者らは既に参考文献 4)に別の検討フローを発表しているが、今回は置換砂層が厚い場合は地盤条件の影響がきわめて大きいことが明らかになったため、検討の順番を若干変更している。各図はばらつき等の影響もあり必ずしも滑らかな線になっていないが、コンピュータ処理等のために滑らかな関数形を用いる際は参考文献 4),5)等の手法が参考になる。

(2) 被災事例との比較

今回提案した評価フローを既往の被災事例と比較した。被災事例としては、($D1/H=0.0$)のケースとして、1993年釧路沖地震における釧路港第二埠頭地区西側岸壁(-9.0m)⁶⁾の例を、($D1/H=1.0$)のケースとしては1995年兵庫県南部地震における六甲アイランド-10m岸壁 (Tバース)⁷⁾の例を参照した。各被災事例の断面を図-9に示す。

今回提案した簡易評価フローにより求めた変形量を表-1に示す。被災事例における変位量のばらつきや等価N値の推定等のばらつきを考慮すると、今回の評価フローに基づき簡易評価した天端水平変位量は被災事例とほぼ一致しているといえる。

5. まとめと今後の課題

有効応力法に基づく有限要素プログラムFLIP¹⁾を

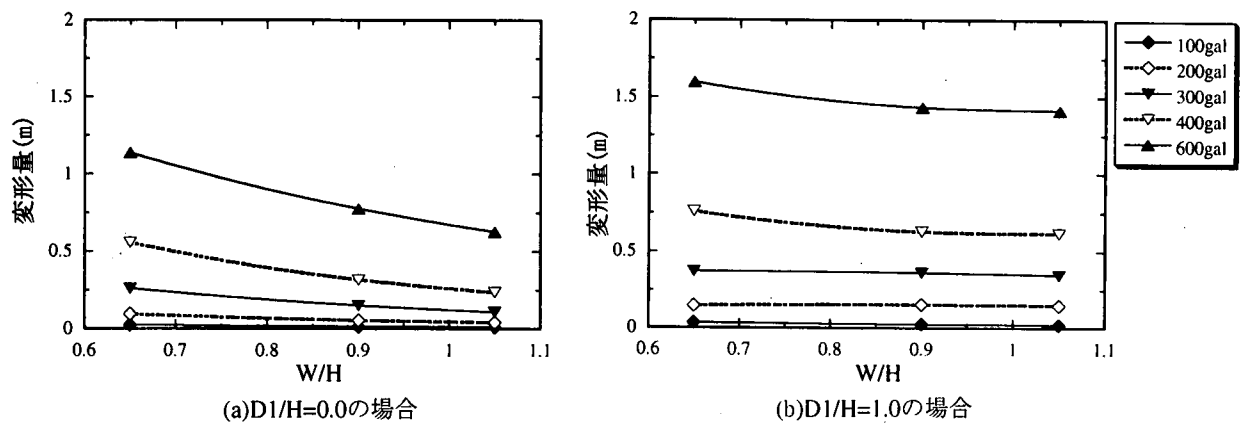


図-4 設計震度の影響 (等価N値15)

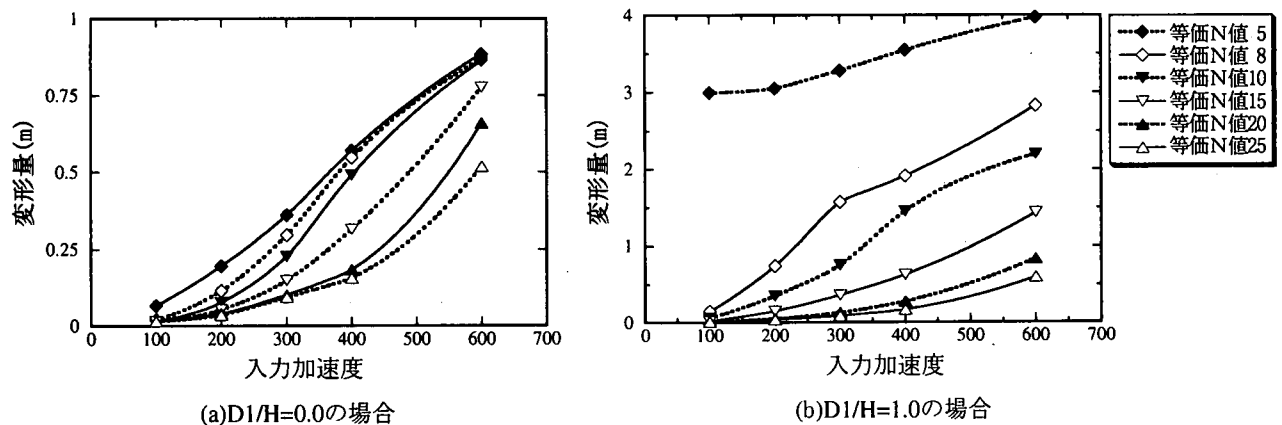


図-5 入力地震動レベルの影響 ($W/H=0.9$)

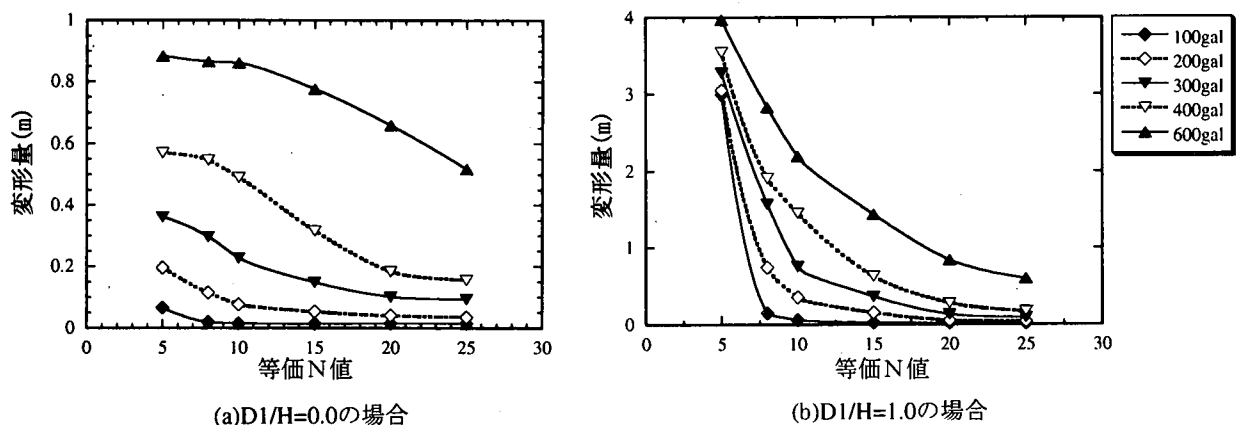


図-6 地盤の等価N値の影響 ($W/H=0.9$)

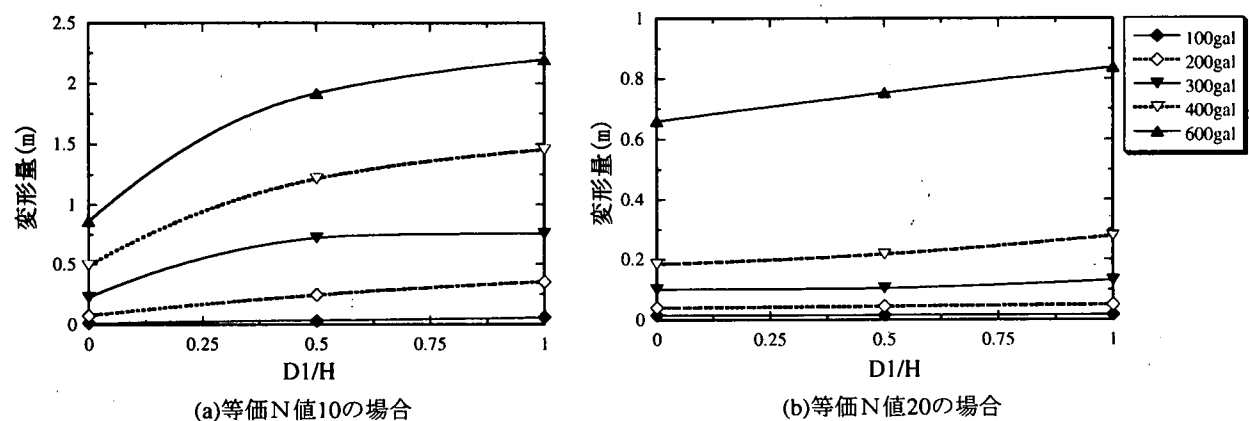


図-7 置換砂の層厚の影響 ($W/H=0.9$)

用いて種々の想定断面に対する解析を行い、重力式岸壁の地震時変形量に大きく影響を及ぼすと考えられる因子について整理した。また、解析結果を基に、残留変形量の評価フローを示し、既往の被災事例と比較した。検討の結果、今回提案した評価フローにより、おおよそ地震時残留変形量は評価できる見通しが得られた。

しかしながら、今回の検討ではケーソン高さを13mに固定しており、岸壁水深の違いによる影響等については検討されていない。また、岸壁形状についても現行の設計法とのすりあわせは厳密に行われていないため、解析に用いた岸壁断面は必ずしも実際に存在するような岸壁断面であるとはいえない。したがって、今回の解析結果を利用する際には、その適用限界について注意する必要がある。

これらの問題点については、(財)沿岸開発技術研究センターを中心とした検討が現在進められており、近い内に実務に耐えうる簡易変形照査チャートが提案される予定である。

参考文献

1) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
2) 運輸省港湾局監修：埋立地の液状化対策ハンドブック (改訂版), pp.81,1997

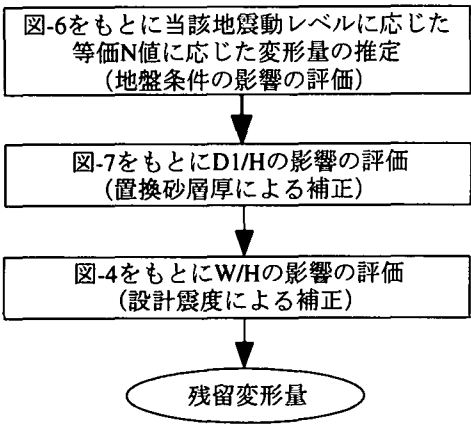
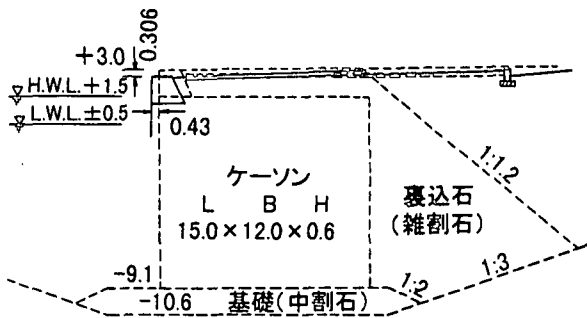
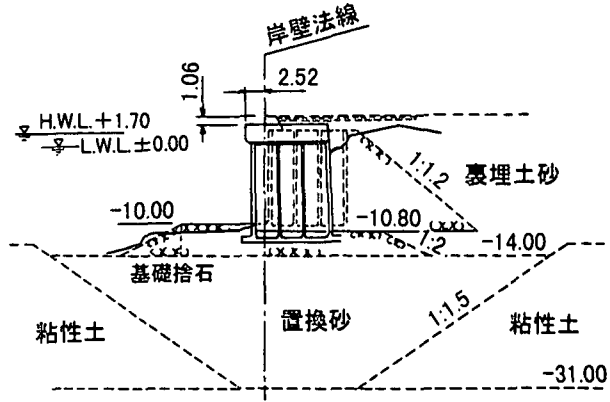


図-8 残留変形量の評価フロー

3) Iai, S., Ichii, K., Liu, H. and Morita, T.: Effective Stress Analyses of Port Structures, *Soils and Foundations Special Issue*, No.2, pp.97-114, 1997.
4) 佐藤幸博, 一井康二, 井合 進, 劉 漢龍: 重力式岸壁の簡易変形予測法の開発, 第26回関東支部技術研究発表会, (社)土木学会関東支部, pp.156-157.
5) 佐藤幸博, 一井康二, 井合 進, 劉 漢龍: 重力式岸壁の地震時変形量に及ぼす地盤条件の影響について, 第34回地盤工学研究発表会投稿中
6) 上田 茂ほか: 1993年釧路沖地震港湾施設被害報告, 港湾技研資料, No.766, pp. 168-172, 1993.
7) 稲富隆昌ほか: 1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告, 港湾技研資料, No.857, pp. 481-485, 1993.



(a) 釧路港第二埠頭地区西側岸壁(-9.0m)



(b) 神戸港六甲アイランド-10m岸壁 (Tバース)

図-9 被災事例の断面

表-1 被災事例の検討結果

ケース名	釧路港第二埠頭地区西側岸壁(-9.0m) 1993年釧路沖地震	神戸港六甲アイランド-10m岸壁 (Tバース) 1995年兵庫県南部地震
入力地震動レベル	釧路港基盤観測値で水平最大 280Gal より、300Gal 入力レベルを参照	ポートアイランド GL-32m 観測値で NS544Gal より、600Gal 入力レベルを参照
等価N値の影響	詳しい資料はないが液状化したことから等価N値 10 として、図-7(a)より変形量は約 0.24m	詳しい資料はないが、液状化強度等から判断して等価N値 10 程度。図-6(b)より、変形量は約 2.2m
D1/Hの影響	D1/H=0.0より補正なし	ほぼD1/H=1.0より補正なし
W/Hの影響	W=12.5, H=12.1 (上部工含む)より W/H=1.03 図-5(a)より W/H=0.9に比べ0.9~1.0倍	W=10.4 (フーチングなし)、H=14.0m (上部工含む)より W/H=0.74 図-4(b)よりほぼ補正なし
推定変形量	0.22m~0.24m程度 (実測値は0.02~0.43m:平均0.25m)	2.2m程度 (実測値は上部工天端で、2.1~2.6m程度)