

液状化にともなう岸壁・護岸背後地盤の流動の簡易予測方法

石原研而¹・安田 進²・井合 進³

¹正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278 千葉県野田市山崎2641)

²正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設工学科 (〒350-03 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

³正会員 工博 運輸省港湾技術研究所室長 構造部地盤震動研究室 (〒239横須賀市長瀬3-1-1)

液状化にともなう護岸・岸壁背後地盤の流動に関して、過去の被災事例をもとに、地表面変位量の分布を簡易的に推定する方法を考案した。このために、まず、岸壁の移動量と液状化層厚、岸壁の形式の関係を過去のいくつかの事例からまとめた。また、流動がおよぶ範囲と地盤の密度、護岸・岸壁の移動量の関係、および、護岸・岸壁からの距離と地表面変位量の関係をまとめた。そして、以上の3つの調査結果を総合して、液状化にともなう護岸・岸壁背後地盤の流動を予測する簡易方法を提案した。この方法では、護岸・岸壁の形式、液状化層厚、地盤のN値がわかれば、背後地盤の地表面における水平・鉛直変位分布が推定できるようになっている。

Key Words : Liquefaction, Ground flow, Earthquake, Seismic Design, Sandy soil

1. まえがき

1995年阪神・淡路大震災の際、神戸港やその周辺で岸壁・護岸のはらみだしにともなって液状化した背後地盤が広い範囲にわたって流動し、各種構造物に甚大な被害を与えた。振り返ってみると、1964年新潟地震の際も、信濃川の両岸でも同様な被害が発生していた。

液状化した地盤が大きく流動するタイプを大別すると、①緩やかな傾斜地盤で発生するもの、②護岸や岸壁のはらみだし等の側方境界の拘束が失われたために発生するもの、に分けられる。前者に対しては、1983年日本海中部地震後あたりから、能代市などのデータをもとに、被災事例の研究・模型実験が行われ、流動量を簡易的に推定する経験式が提案されてきている。これに対し、後者のタイプでは、護岸や岸壁のはらみだし量が地盤の流動量に影響を与え、さらに護岸や岸壁のはらみだし量はその構造や液状化層厚などに関係して複雑なため、流動量を簡易的に推定する方法の開発はなかなか難しい状況にあった。現在でも難しい状況には変わらないが、最近このような簡易式の開発の必要性が指摘され、また、新潟地震・日本海中部地震でのデータに加えて、阪神・淡路大震災では詳細なデータが得られたため、これらを利用して、データを整理し、簡易式の開発を行ってみた。

2. 整理したデータ

護岸や岸壁のはらみだし量および背後地盤の流動量が測定されている事例としては、1964年新潟地震での信濃川両岸の被害、1983年日本海中部地震の秋田港での被害、および、1995年阪神・淡路大震災での神戸港等での被害がある。また、このほか、液状化にともなう岸壁のはらみだし量だけであれば1978年宮城県沖地震、1993年釧路沖地震、1993年北海道南西沖地震などでも測定されている。そこで、これらの被災例をもとに以下の整理を行った。

なお、整理にあたっては、図-1に概念図を示すよ

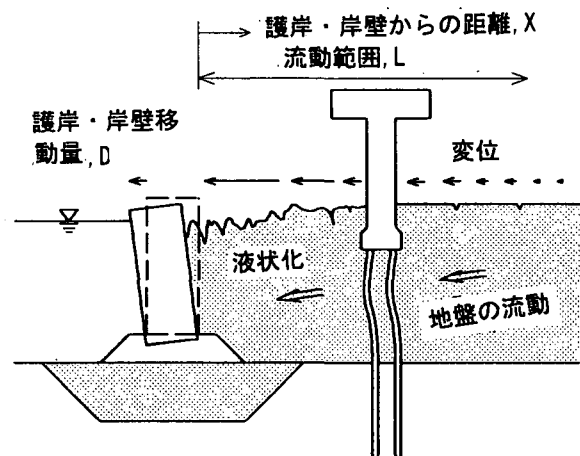


図-1 護岸移動量や流動範囲の概念図

うに、護岸や岸壁の水平移動（変位）量を“護岸の移動量, D”、護岸や岸壁から地盤流動が及んだ範囲を“流動範囲, L”、護岸や岸壁背後のある位置までの距離を“護岸からの距離, X”と呼ぶことにする。

3. 岸壁・護岸の変形量に関するまとめ¹⁾

まず、岸壁の移動量と岸壁構造、液状化層、地震動の関係を調べた¹⁾。取り上げた被災事例は、1978年宮城県沖地震における石巻港での矢板式岸壁1件、1983年日本海中部地震における秋田港での重力式岸壁1件・矢板式岸壁2件、1993年釧路沖地震における釧路港での重力式岸壁2件、1993年北海道南西沖地震における函館港での矢板式岸壁1件、1995年阪神・淡路大震災における神戸港での重力式岸壁1件である。これらのうち、石巻港、秋田港、函館港では、各地震時に設計震度相当の地震動が発生していた。これに対し、釧路港や神戸港ではその1.5～2.0倍程度といった大きな地震動が発生した。そこで、前者はレベル1地震動、後者はレベル2地震動を受けたと見なした。

取り上げた事例はすべて背後地盤にN値が5～15程度の液状化し易い緩い砂質土が存在しているものである。ただし、基礎地盤にも緩い砂質土がある場合や、矢板式岸壁で控え工周辺まで緩い砂質土がある場合もあった。そこで、これらの液状化層の広がり条件を分けてみた。

このように、地震動のレベルと液状化層の広がりを大まかに分け、岸壁の変形率の概略値をまとめると、表-1のようになった。ここで、変形率とは、岸壁の水平変位量を岸壁高さで除した値である。この表に見られるように、変形率は重力式岸壁に比べ

矢板式岸壁の方が少し大きく、また、地震動レベルや液状化層の広がりが大きくなると変形率も大きくなる傾向となった。なお、ここでまとめた事例は以下の条件の範囲内のものであり、他の条件の岸壁・護岸の場合は表に示した変形率と異なってくる可能性があることに注意を要する。

- ・水深-8.0～-14.0m程度の大型ケーソンまたは矢板式岸壁・護岸
- ・設計震度0.1～0.2で耐震設計がなされている岸壁・護岸
- ・基礎地盤の緩い砂質土の層厚は25m程度以下

4. 流動範囲に関するまとめ²⁾

次に、表-2に示す17の事例に対し、流動範囲と護岸の移動量などの関係を調べた²⁾。これらの内、最初の4つの事例は1995年阪神・淡路大震災の後、現地で地表面のクラック等を詳しく調べたものである³⁾。流動範囲はこの現地調査結果に基づいて判断した。これらはN値が10程度以下の緩い地盤のデータである。これに対し、密な地盤でのデータを加えるために、阪神・淡路大震災における神戸市の深江・海岸通り、および六甲アイランドのサンドドレーンで改良した地区のデータを調べた。前二者は古くからの海岸線でのデータであり、後者はN値が15程度に改良されていた地区のデータである。これらの箇所の流動範囲は、航空写真による地表面変位分布測量結果や、クラックの発生状況判読結果をもとに判断した。さらに、1964年新潟地震における信濃川兩岸の8件の事例と1983年日本海中部地震での秋田港での事例を1件つけ加えた。新潟のものは矢板護岸における被災事例である。これらも航空写真による

表-1 既往の地震事例にみられる液状化時の岸壁・護岸変形量の概略値¹⁾

構造形式	地震動レベル	地盤条件		変形率*(%)
重力式岸壁・護岸	レベル1	護岸背後のみ緩い砂質土		5～10
		護岸背後及び基礎地盤がいずれも緩い砂質土		10～20
	レベル2	護岸背後のみ緩い砂質土		10～20
		護岸背後及び基礎地盤がいずれも緩い砂質土		20～40
矢板式岸壁・護岸	レベル1	護岸背後のみ緩い砂質土	控え工周辺は堅固な地盤	5～15
		護岸背後のみ緩い砂質土	控え工周辺も緩い砂質土	15～25
		護岸背後・控え工周辺・基礎地盤がいずれも緩い砂質土		25～50

*変形率=岸壁・護岸の水平変位/護岸高さ

表-2 流動範囲と主要な要因のまとめ²⁾

地震	地域	地点	護岸移動量(m) D	流動範囲(m) L	液状化層厚(m) Z	岸壁・護岸高(m) H	平均N値	平均N ₁ 値	
*	兵庫県南	ポートアイランド*	P-3	2.31	129.7	23.66	16.5	8.5	8.7
		六甲アイランド*	R-2	1.56	141.74	22.09	13	7.5	6
		六甲アイランド*	R-3	3.3	76.92	23.19	13	7.5	6
		深江浜	F-2	1.97	105.1	16.85	8.5	7.5	7.6
*	兵庫県南	深江	A-A'	0.7	52	14.4	4.8	15.7	19.2
		六甲SD改	B-B'	2.3	21.8	24.5	11	15	15
		海岸通り	C-C'	2.8	40	10	4.3	11.3	11.2
		魚崎浜	D-D'	2.9	136	15.5	7.4	7	7.1
新潟(信濃川)	越後線左岸	A-A'	11.3	315	12.5	6	8	9.1	
		B-B'	2.7	193	10	9.7	6.5	7.6	
		C-C'	2.9	135	7.3	9.7	6.9	9.9	
		C-C'	5.2	130	10.5	9.7	5.4	8.2	
		D-D'	1.9	170	12.9	9.7	12.9	15	
		F-F'	8.3	293	8	9.7	8.8	11.3	
		H-H'	6	180	4	9.7	3.9	5.7	
		I-I'	5.1	230	12	9.7	4.8	5.3	
日本海中部	秋田港外港	II-II'	1.5	144	14.8	14.5	6	6.4	

*:今回調べたデータ

地表面変位分布測量結果や、クラックの発生状況判読結果をもとに流動範囲を判断した。

以上の事例に対しては、護岸や岸壁から直角方向の断面をとり、ボーリング資料をもとに液状化層の推定を行い、液状化層厚を求めた。そして、流動範囲内で、かつ、推定された液状化層内における基準化N値の平均値を求めた。ここで基準化N値、 N_1 とは測定されたN値を 1kgf/cm^2 の有効上載圧で基準化したN値である。

このようにして求めた護岸移動量/ N_1 値と流動範囲の関係をとって見たのが図-2である。ばらつきは大きいものの、範囲で示したような関係があるのではないかと考えられた。この平均的な関係を式で表すと $L=250(D/N_1)$ となる。

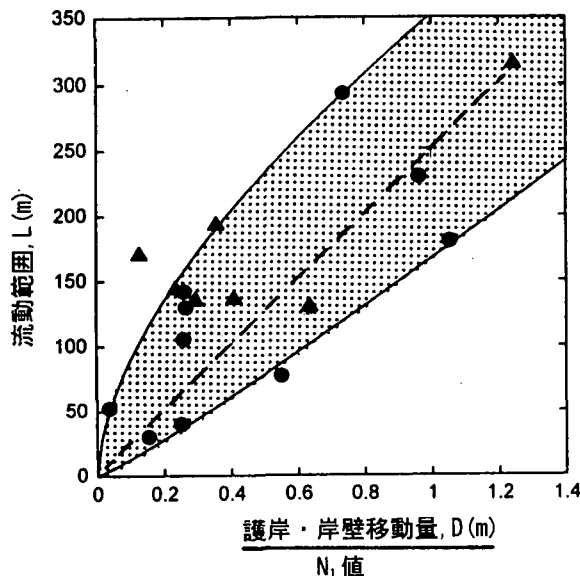


図-2 流動範囲と N_1 値、護岸・岸壁の移動量の関係²⁾

5. 地表面の変位分布に関するまとめ³⁾

1995年阪神・淡路大震災で被災したポートアイランド、六甲アイランド、深江浜などの岸壁・護岸のうち、22箇所に対して岸壁・護岸の変状や背後地盤に発生したクラックの幅などを現地で詳細に調査した³⁾。そしてそれをもとに地表面での水平変位分布を整理したのが図-3である。図に示されるように流動範囲は最大150m程度まで及んでいた。この図の横軸を流動範囲で、また、縦軸を岸壁・護岸の移動量で正規化してまとめ直し、その平均曲線を描いたのが図-4である。南北方向に面した岸壁・護岸と、東西方向に面したそれらとを分けて整理してみると、それぞれの平均曲線は図に示すよう多少異なった。

岸壁・護岸背後地盤の沈下量分布も同様に調べ、さらに、流動範囲と岸壁・護岸の移動量で正規化してみると、図-5となった。ただし、これは流動にともなう沈下量のみである。

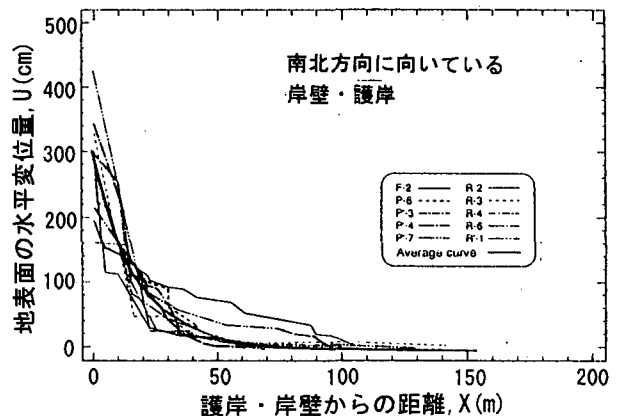


図-3 護岸・岸壁背後地盤の水平変位量分布の調査例³⁾

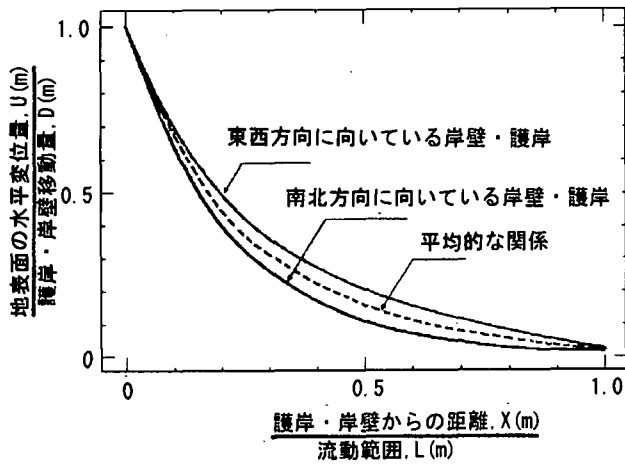


図-4 正規化した地表面の水平変位量と護岸からの距離の関係³⁾

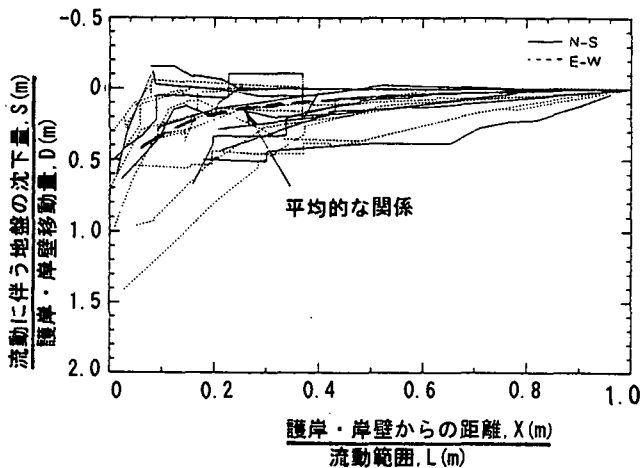


図-5 正規化した沈下量と護岸からの距離の関係

6. 流動の簡易予測手順

以上の結果を用いると、護岸や岸壁のはらみだしにともなう背後地盤の地表面水平および鉛直変位分布が簡易的に推定できる。その手順を示すと以下のようなになる。

- ①護岸や岸壁背後地盤および基礎地盤の液状化層を推定する。
- ②表-1を用いて護岸や岸壁の移動量Dを推定する。
- ③図-2を用いて背後地盤の流動範囲Lを推定する。
- ④図-4を用いて検討対象地点Xにおける地表水平変位量を求める。
- ⑤図-5を用いて検討対象地点Xにおける沈下量Sを求める。ただし、これは地盤の流動に起因した沈下量のみである。実際にはこの他に間隙水の排水にともなう沈下が生じる。これについては、例えば文献4)などに基づいて推定し、流動に起因した沈下量に足し合わせればよい。

なお、このように求めた地表面水平変位量から応

答変位法により杭基礎の設計を行う場合は、深さ方向の変位量分布を設定し、それを地盤バネを介して杭に与えることになる。この際、地盤バネの値をいくらにするかが問題であり、これに関して現在研究がいくつか進められているが、例えばモデル杭における試算結果⁵⁾をもとに、流動時の地盤バネの値は常時の1/500~1/1000程度が適当ではないかと考えられる。

7. まとめ

液状化にともなう護岸や岸壁背後地盤の流動に関し、過去の6つの地震時の事例を調査した。そして、それをもとに、岸壁や護岸の移動量、流動範囲、地表面の水平変位量および沈下量を簡易的に推定する方法の考えてみた。調査した事例は十分と言えず、また、ここで取り上げた要因以外にもこれらの量に影響を与えるものもあると考えられる。したがって、詳細な検討が必要な場合は地震応答解析や残留解析などを用いることが望まれる。

参考文献

- 1) 井合進・一井康二・森田年一・佐藤幸博：既往の地震事例に見られる液状化時の護岸変形量について、土木学会第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会、1997。
- 2) 安田進・石原研而・原田健二：液状化にともなう護岸背後地盤の流動範囲に影響を与える要因、第2回土木学会阪神・淡路大震災に関する学術講演会、pp. 113-120、1997。
- 3) Ishihara, K., Yoshida, K. and Kato, M. : Lateral Spreading of Liquefied Deposits during the 1995 Kobe Earthquake, KIG Forum' 97, Geotechnical Engineering in Recovery from Urban Earthquake Disaster, pp. 31-50, 1997.
- 4) Ishihara, K. and Yoshimine, M. : Evaluation of Settlement in Sand Deposits Following Liquefaction During Earthquake, 土質工学会論文報告集, Vol. 31, No. 2, pp. 173-188, 1992.
- 5) 石原研而：地盤の液状化と基礎に及ぼす側方流動、土木学会平成8年度全国大会研究討論会1資料、pp. 14~21、1996。