

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

東京電機大学 安田 進*
東京理科大学 石原研而**
不動建設(株) 原田健二***
東京電機大学 野村博之*

阪神・淡路大震災では多くの岸壁・護岸が2~4m程度前にはらみだし、液状化した背後地盤が大きく海に向かって流動した。その流動範囲は、激しい所では岸壁・護岸から200m以上にも及んだ。ただし、細かく見てみると、地盤が密な所や岸壁・護岸の移動量が小さい所では、流動が及んだ範囲も少なくなっているように見受けられた。そこで、流動が及んだ影響範囲に与えた要因として、地盤の密度、岸壁・護岸の移動量、護岸・岸壁の高さ、液状化層厚をとりあげ、いくつかの岸壁・護岸における値をまとめてみた。また、新潟地震の際の信濃川両岸での被害も、同様にまとめた。その結果、流動範囲と上記の要因との間に関係があったことがわかった。そこで、これらをもとに、流動範囲を推定する簡易方法を考案した。

1. はじめに

1995年阪神・淡路大震災では、神戸港等の岸壁および多くの埋立地の護岸が液状化に主に起因して大きくはらみだし、背後地盤で広範囲にわたって流動が発生した。振り返ってみると、1964年新潟地震の際にも信濃川両岸の護岸がはらみだし、やはり背後地盤が広い範囲にわたって流動を起こしていた。これらの流動が発生した範囲は、最大で岸壁・護岸から200m以上にも及んでいた。

流動が発生した範囲を、以後流動範囲と呼ぶことにする。この流動範囲は地盤の密度や、岸壁・護岸のはらみだし量、液状化層厚などに関係するのではないかと考えられる。そこで、阪神・淡路大震災や新潟地震などの被災事例を収集し、整理して、流動範囲に影響を与える要因について検討した。

2. 阪神・淡路大震災における流動範囲

(1) 検討対象地区の選定

阪神・淡路大震災における岸壁・護岸背後地盤の変位量に関して、石原ら^{1) 2)}は地表面に生じたクラックを調べてその分布を把握した。また、浜田ら³⁾地震前・後の航空写真を比較し、航空写真測量によって地表面の変位分布を求めた³⁾。そこで、これらの変位分布が岸壁・護岸から200~300m程明らかに

なっている所で、かつ岸壁・護岸の高さ・変位量もわかり、さらにN値を含むボーリング資料が流動範囲内にいくつかある地区を選び、岸壁・護岸に直角な測線上の断面を推定してみた。これが図-1(a)、(b)に示した測線である。これらは次の3種類のデータからなっている。

(2) ゆるい埋立地盤におけるクラックをもとにした詳細なデータ

前述したように石原らは地震直後から現地でクラックを詳細に調べている。図-1のP-3断面における測定結果を図-2に示す。これはポートアイランドの西側に位置する断面である。ここでは岸壁が海に向かって2.31mはらみだし、1.45m沈下した。それにともなって背後地盤で約129.7mにわたって流動が発生した。

このような変位分布を22断面について調査し、それらをまとめて水平変位分布図を作成している。また、流動範囲と岸壁・護岸のはらみだし(移動)量との間に、図-3に見られるような右上がりの関係があることを見いだしている²⁾。

本研究ではこのような変位分布が測定されている断面のうち、さらに地盤調査が行われてN値がわかっている3つの測線のデータを利用することにした。これが図-1に示したP-3、R-2、R-3、F-2の4断面である。これらはいずれも埋立地にあり、N値は10前後のゆるい地盤である。

(3) 中密な地盤におけるデータ

最近の研究によると、ゆるい地盤と密な地盤では

キーワード：液状化，地盤，流動，護岸，阪神・淡路大震災

* 東京電機大学理工学部，0492-96-2911

** 東京理科大学理工学部，0471-24-1501

*** 不動建設株式会社，03-3837-6034

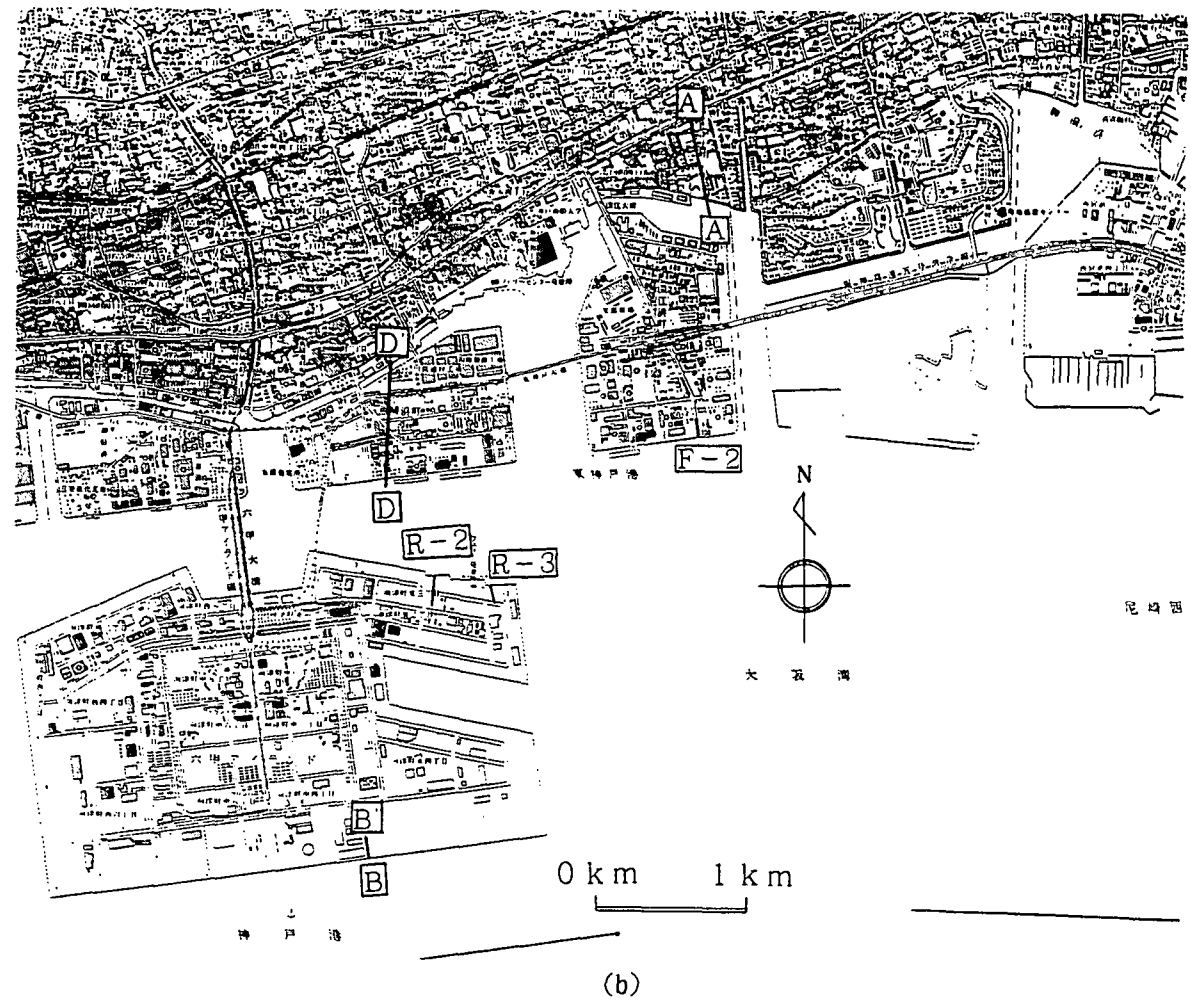
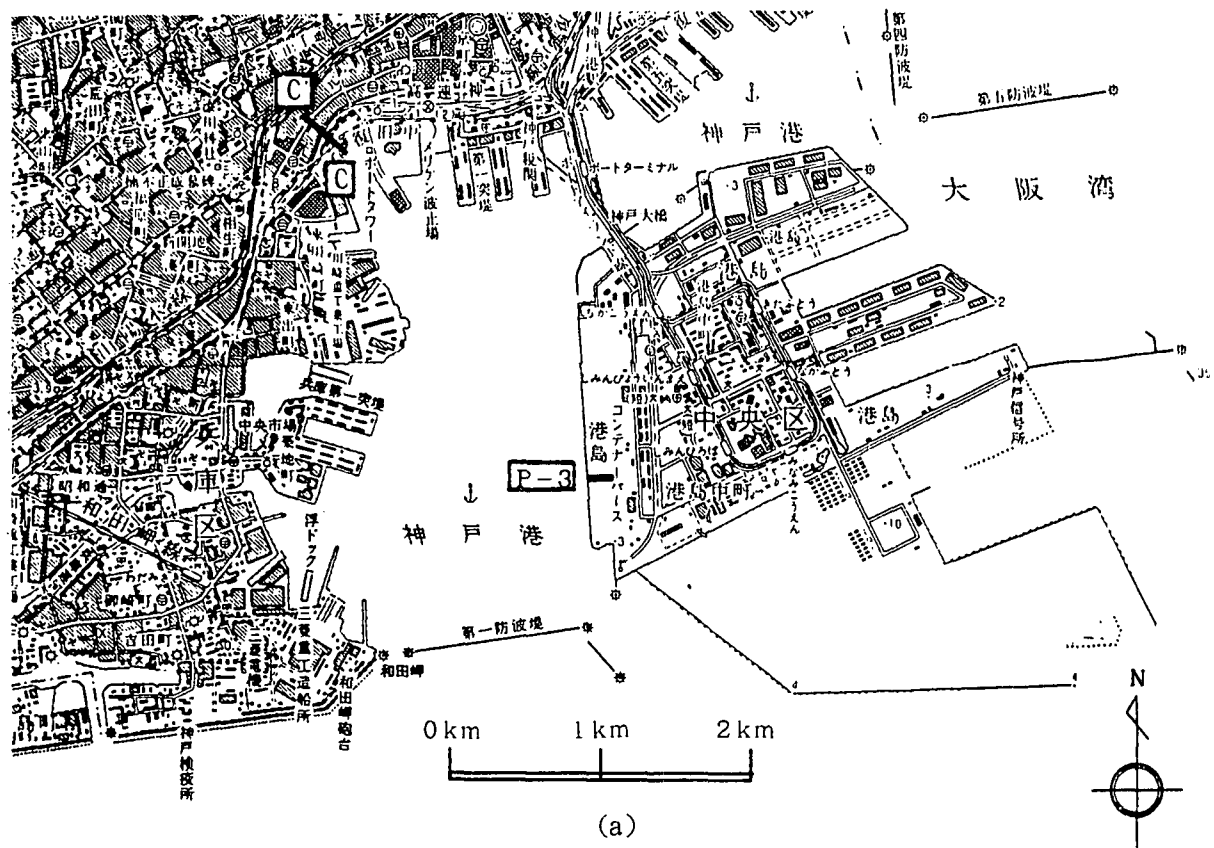


図-1 阪神・淡路大震災に対して選定した断面

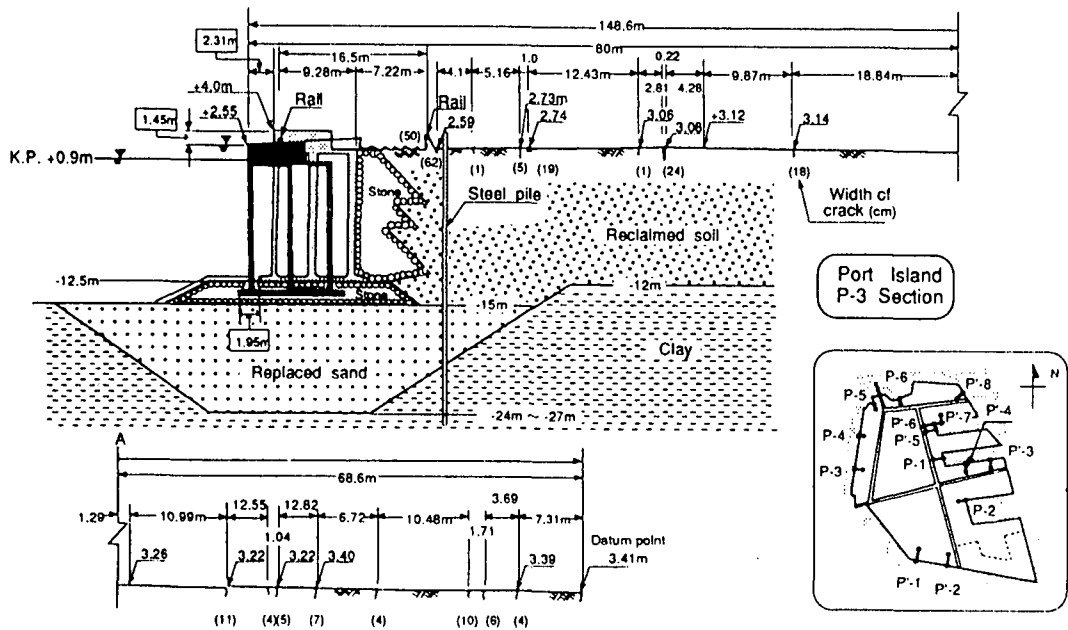


図-2 P-3断面における流動状況²⁾

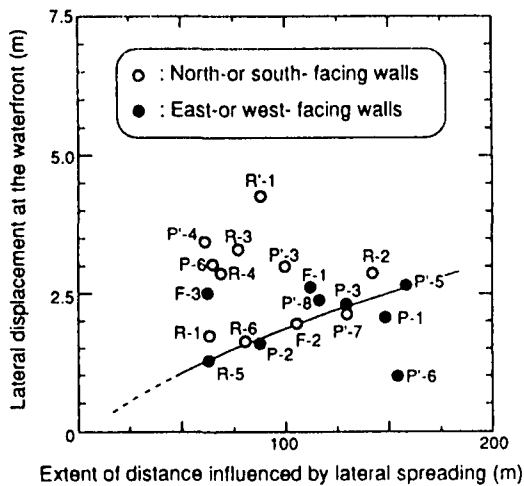


図-3 流動範囲と岸壁・護岸移動量の関係²⁾

液状化後の変形特性は異なっており、密な場合には液状化してもあまり変形しないことが明らかにされつつある。したがって、液状化が発生しても、地盤が密な場合は流動範囲が狭くなる可能性が考えられる。今後の耐震設計において、レベル2地震動（強い地震動）に対しても液状化および地盤の流動の検討を行う場合、このように地盤の密度による流動範囲の違いを考慮する必要がある。そこで、阪神・淡路大震災におけるこのような地盤条件での事例を捜してみた。

捜し出したひとつの事例は、ゆるい地盤でも地盤改良が施してあって中密になっているものである。岸壁・護岸の背後地盤で改良が施してあった箇所を調べたが、改良が全面的に行われた箇所はなかなか見つからず、唯一岸壁から30m離れた位置から改良が行ってある箇所が見つかった。これが図-4に示

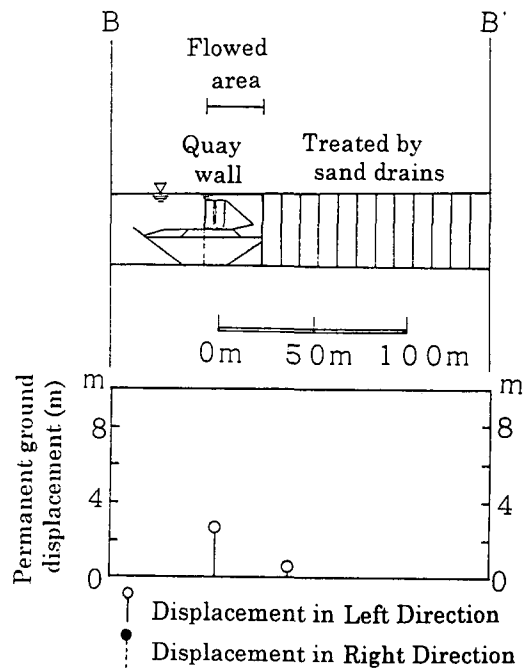


図-4 地盤改良が施されていたB-B'断面

す六甲アイランド南側のB-B'断面である。ここでは岸壁から30m離れた位置からサンドドレン工法によって原地盤および埋立て層が改良されていた。近傍の同様な改良箇所およびその他の地盤改良箇所⁴⁾でのデータから、埋立て層の改良地盤のN値は15程度であったのではないかと推定された。この断面付近の断面方向の地盤の変位分布について航空写真測量の結果³⁾をもとに推定してみると、図-4の下図となる。点数は少ないが30m程度で変位は小さくなっており、流動範囲は30m程度以内と考えられる。30mの範囲までは地盤改良が行われていないため、正

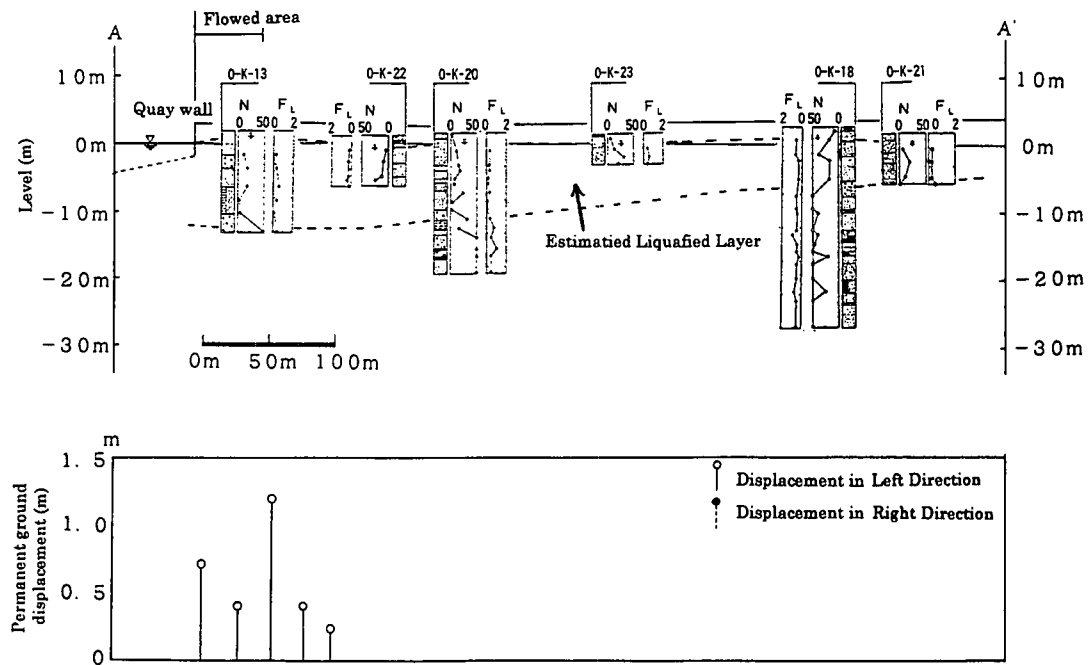


図-5 A-A'断面での地層構成と変位分布

確ではないが、一応”N値が15程度の中密な地盤で30m程度の流動範囲であった”とみなすことにする。なお、ここでの岸壁の水平方向のはらみだし量は2m余りであったが、両側の地盤改良を施してなかった岸壁では3~4m程度も生じていた。これらの違いも興味ある現象であり、今後検討したいと考えている。

もう一つのタイプの事例は、自然堆積地盤が古い埋立地で、地盤が中密なものである。神戸市では海岸線のほとんどに新しい埋立地が造られており、このような地盤はなかなかなかったが、旧地形図と比較して深江のA-A'断面と海岸通りのC-C'断面がこれに相当すると判断した。そして、神戸の地盤図⁵⁾からボーリング資料をひろいだした。また、(財)地震予知総合研究振興会で新たに行われた航空写真測量結果をもとに、地表面での変位分布および護岸のはらみだし量を推定した。A-A'断面についてこれらの結果を示したのが図-5である。変位分布および航空写真に見られたクラックから推定すると、ここでは流動範囲は52m程度と判断された。なお、図中の液状化に対する安全率 F_L は地表最大加速度を500galとし、現行の道路橋示方書・同解説(1990年)の式で計算してあるが、このような大きな加速度に対しては現行の方法は適用しにくいことがわかってきており、他の断面での検討結果⁶⁾をもとにこの断面に対してはN値が20程度以下の沖積砂層を液状化したとみなしている。

(4) 他の研究データ

岸壁・護岸から200~300m間の地盤データが示されており、上記で選定した地区と異なる地区での他の研究者の研究成果を捜したところ、図-1に示すD-D'断面がこれに相当するた考えられた。これは浜田ら³⁾が調べているものである。したがって、後のまとめにこのデータも用いることとした。

3. 新潟地震における流動範囲

1964年新潟地震の際、新潟市内の信濃川両岸では護岸が川に向かってはらみだしたり倒れだし、背後地盤が広い範囲にわたって流動した。航空写真測量⁷⁾によると、昭和大橋~万代橋付近で最大で8m余りも川に向かって変位が生じていた。はらみだした護岸の多くは矢板式護岸であった。

この地域では図-6に示すA-A'、B-B'、C-C'、D-D'の4測線で既に断面図が描かれている⁷⁾。そこで、変位量の少ない地区も含めて、F-F'、H-H'、I-I'の3測線で断面図を描いてみた。図-7にF-F'測線の断面図を示す。下段には航空写真測量結果から読みとった測線に沿った断面方向の水平変位分布を示す。これに見られるように、護岸から離れると変位量が少なくなり、ある距離のところから変位の方向が逆転している。そこで、この範囲を流動範囲と判断した。また、地表面最大加速度を川岸町での記録から159galと仮定して、現行の道路橋示方書・同解説(1990年)の方法で F_L の値を計算し、それをもとに液状化層を推定した。

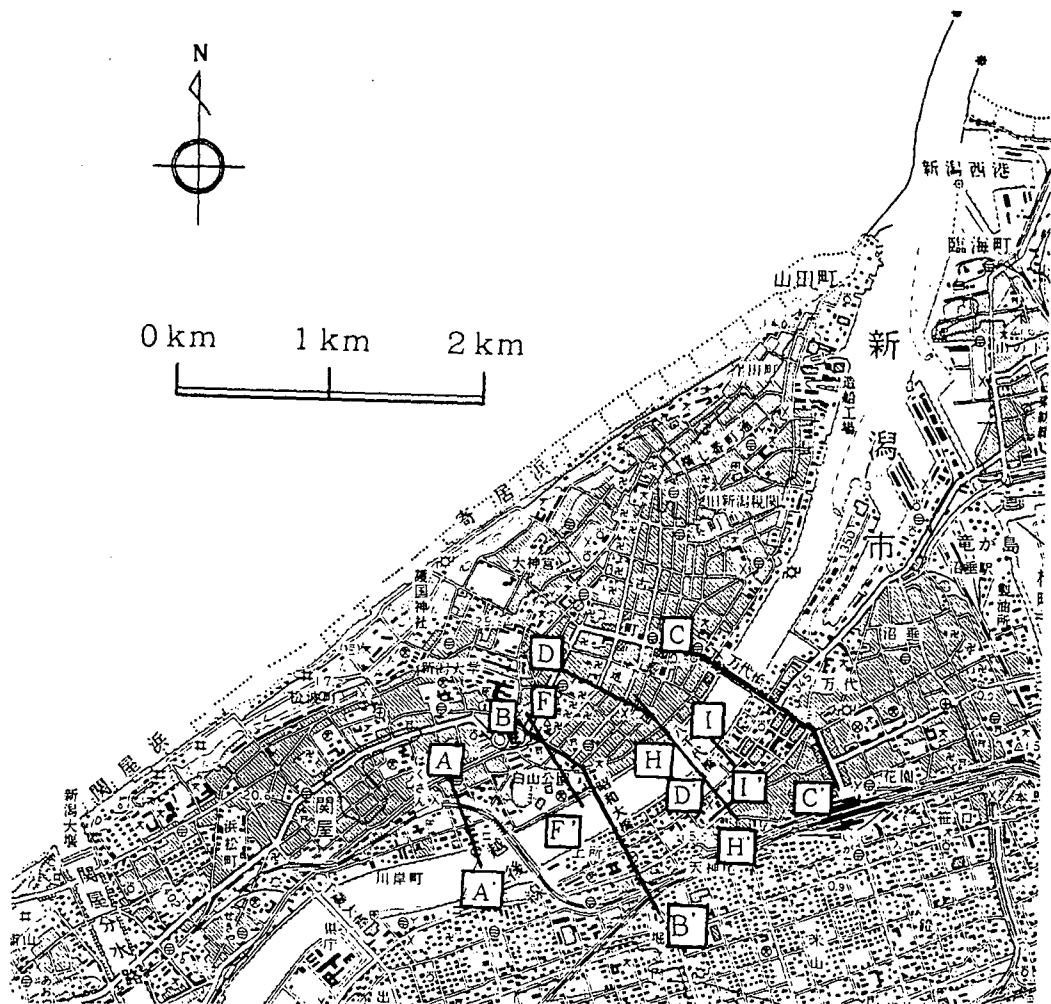


図-6 新潟地震に対して選定した断面

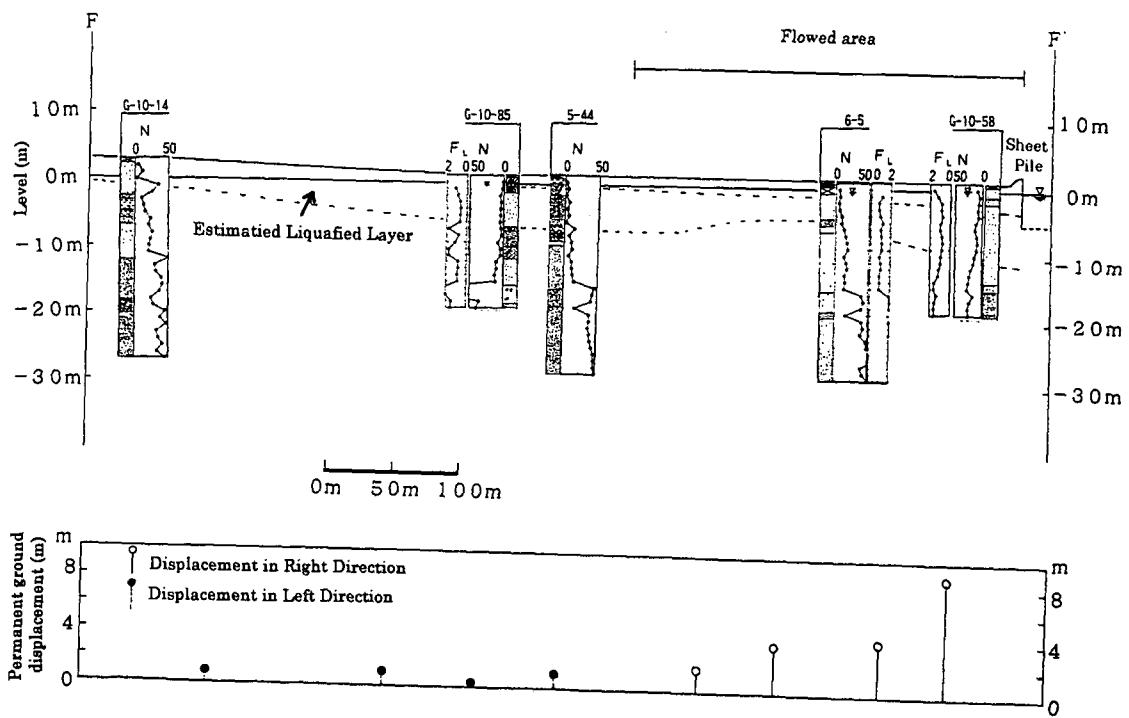


図-7 F-F'断面での地層構成と変位分布

他の断面も合わせて、新潟地震における液状化層厚と流動範囲の関係をプロットすると図-8となる。データのばらつきは大きいものの、一応右上がりの関係になっているようで、液状化層厚が厚いほど流動範囲は広くなると言えそうである。

4. 流動範囲と要因の関係

以上みてきたように、流動範囲には岸壁・護岸の移動量（はらみだし量）、地盤の密度、液状化層厚が関係しているのではないかと考えられる。この他岸壁・護岸高さも関係あるものと考えられたため、これらの4つの要因が主要と判断し、流動範囲との関係をまとめてみた。ただし、地盤の密度に関する要因としては、流動範囲内の液状化層における N_1 値の平均をとってみた。ここで N_1 値とは N 値を 1kgf/cm^2 (98KPa)での値に次式を用いて換算したものである。

$$N_1 = 1.7N / (\sigma' + 0.7) \quad (1)$$

ただし、 σ' ：有効上載圧(kgf/cm^2)

阪神・淡路大震災と新潟地震の事例についてこれらの要因をまとめてみると表-1となる。なお、1983年日本海中部地震の際に被災した秋田港外港地区の、ケーソン岸壁背後地盤でのデータもつけ加えている。図-9に4つの要因とも考慮して、液状化層厚・護岸移動量/(護岸高・ N_1 値)と流動範囲の関係を示す。ばらつきが大きいものの一応右上がりになっている。ただし、この整理の仕方によると、横軸は無次元化されているものの、護岸高を分母にしてよいかどうか問題もある。つまり、矢板式護岸では分母でよいが、ケーソン式護岸では分子に入れた方がよい可能性がある。

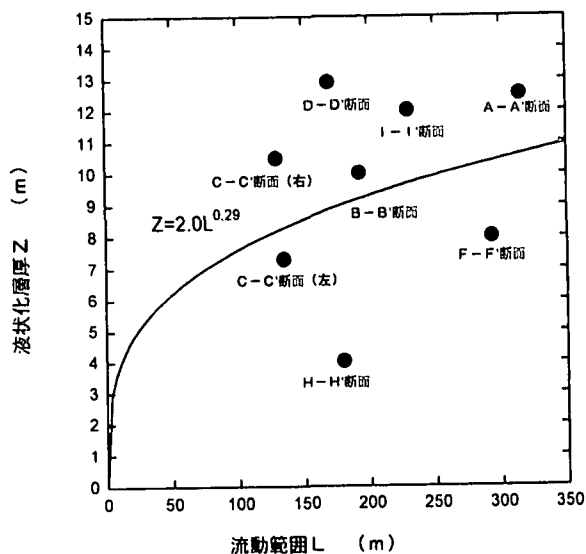


図-8 新潟地震における液状化層厚と流動範囲

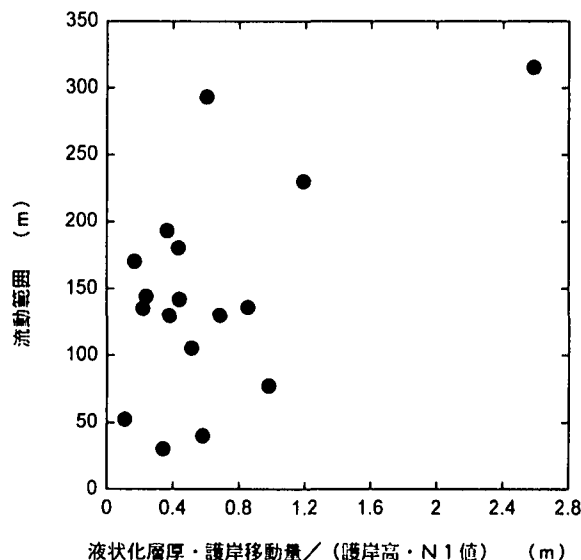
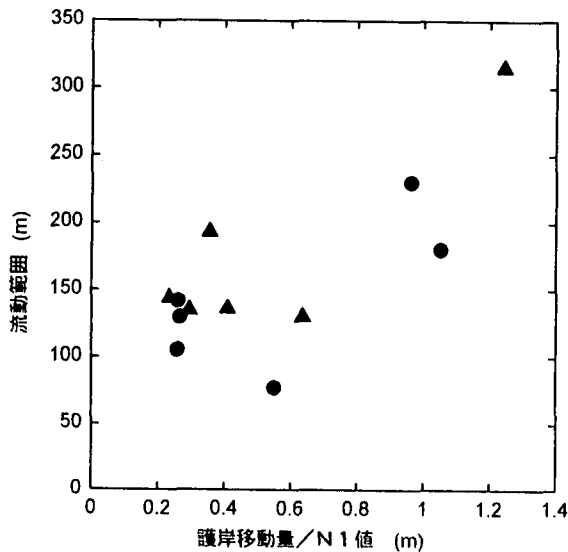


図-9 流動範囲と4つの要因の関係

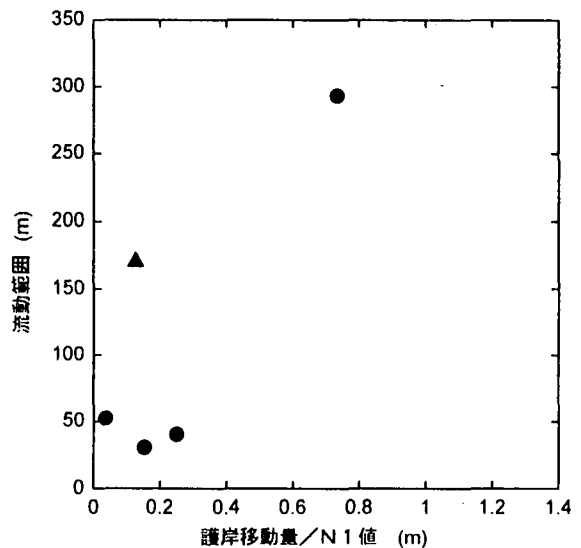
表-1 流動範囲と要因のまとめ

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N1値
* 兵庫県南	六甲アイランド*	P-3	2.91	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	30	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
	昭和大橋	B-B'	2.7	193	10	9.7	6.5	7.6
	万代橋左岸	C-C'	2.9	135	7.3	9.7	6.9	9.9
	万代橋右岸	C-C'	5.2	130	10.5	9.7	5.4	8.2
	八千代橋左岸	D-D'	1.9	170	12.9	9.7	12.9	15
* *	昭和橋上流左岸	F-F'	8.3	293	8	9.7	8.8	11.3
* *	八千代橋右岸	H'-H''	6	180	4	9.7	3.9	5.7
* *	八千代橋下流右岸	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



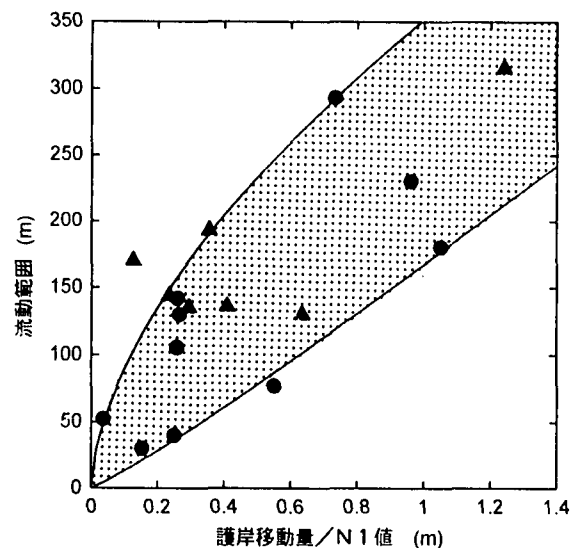
(a) N_1 値が10以下



(b) N_1 値が10以上

図-10 N 値ごとの護岸移動量/ N_1 と流動範囲の関係

ところで、護岸移動量自体に液状化層厚と護岸高の影響がはいっている可能性がある。そこで、4つの要因のうち、液状化層厚と護岸高を省いて、護岸移動量/ N_1 値と流動範囲の関係をとって見た。これが図-10である。なお、この図では筆者達が今回調べたデータを●印で、その他のデータを▲印で示している。また、 N_1 値が10以下のデータを(a)に、 N_1 がそれ以上のものを(b)に示す。 N_1 が10以上のデータは少なく、また、両図ともばらつきが大きい、一応両図とも右上がりと同様な関係となっているようである。そこで、両者を合わせてみると図-11となる。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る。



● : 筆者達が今回調べたデータ
▲ : その他のデータ

図-11 護岸移動量/ N_1 と流動範囲の関係

5. まとめ

液状化にともなう岸壁・護岸背後地盤の流動範囲に関し、阪神・淡路大震災や新潟地震の事例などを調べた。その結果、流動範囲には岸壁・護岸の移動量や地盤の密度、岸壁・護岸の高さ、液状化層厚などが影響していることがわかった。特に、岸壁・護岸の移動量を換算 N 値で除した値と流動範囲との間には関係があるようである。

なお、本研究を行うにあたって、鴻池組の加藤満氏や、東京電機大学学生の大沢研一・田中智宏・田辺哲三君の協力を得た。末筆ながら感謝する次第である。

参考文献

- 1) Ishihara, K., Yasuda, S. and Nagase, H. : Soil Characteristic and Ground Damage, Soils and Foundations, Special Issue, pp.109-118, 1996.
- 2) Ishihara, K., Yoshida, K. and Kato, M. : Ground Deformation Characteristics Caused by Lateral Spreading during the 1995 Hanshin-Awaji Earthquake, Proc. of the 6th US-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Liquefaction, 1996(in press).
- 3) Hamada, M. Isoyama, R. and Wakamatsu, K. : The 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake-Liquefaction, Ground Displacement and Soil Condition in Hanshin Area-, ADEP, 1995.
- 4) Yasuda, S., Ishihara, K., Harada, K. and Shinkawa, N. : Effect of Soil Improvement on Ground Subsidence due to Liquefaction, Soils and Foundations, Special Issue, pp.99-107, 1996.
- 5) 神戸市企画局総合調査課 : 神戸の地盤, 1980.
- 6) 安田進・坪田邦治・西川修・内藤福隆 : 兵庫県南部地震における液状化・非液状化地点のN値の比較、第31回地盤工学研究発表会講演集、pp.1225-1226、1996.
- 7) 浜田政則・安田進・磯山龍二・恵本克利 : 液状化による地盤の永久変位の測定と考察、土木学会論文集、No. 376、Ⅲ-6、pp. 211-220、1986.

FACTORS AFFECTED THE AREA OF LATERAL FLOW OCCURRED IN THE GROUND BEHIND QUAYWALLS

Susumu YASUDA, Kenji ISHIHARA, Kenji HARADA
and Hiroyuki NOMURA

The area of lateral flow due to liquefaction occurred in the ground behind quaywalls were studied. Several data on horizontal displacements, soil conditions, and movements of quaywalls during the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake and the 1964 Niigata Earthquake were collected. The area of lateral flow increased with the increase of displacements of quaywalls, and decreased with the increase of SPT N-values.