

事例分析による側方流動の予測法に関する基礎的研究

濱田 政則¹・若松 加寿江²・目堅 智久³

¹フェロー 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169 東京都新宿区大久保3-4-1)

²正会員 工博 研究員 東京大学生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木7-2-2-1)

³学生会員 早稲田大学大学院理工学研究科 (〒169 東京都新宿区大久保3-4-1)

兵庫県南部地震など既往地震による側方流動の事例を分析し、側方流動による地表面変位と地形・地盤条件との相関性を調査して予測法提案のための基礎的知見を得た。傾斜地盤における地表面変位は地表面勾配と液状化層厚の積とほぼ比例関係にあること、および護岸等の移動に伴う地表面変位は護岸移動量にほぼ比例するが、液状化層厚との相関性は低いことが明らかにされた。

Key Words : Liquefaction, Case study, Ground displacement, Sloped ground, Quaywall

1. はじめに

兵庫県南部地震では、側方流動により各種構造物に甚大な被害が発生した。このため側方流動の影響を耐震基準に取り入れる方向で検討が進められている。側方流動による地表面変位の推定については既にいくつかの経験式¹⁾²⁾が提案されているが、経験式の工学的意味が明確でないなどの問題点がある。また地盤の水平変位発生メカニズムなどについては未だ不明確な点も数多く残されている。本研究では、地表面変位を予測するための基礎的知見を得ることを目的として、既往の地震による地表面変位データを用いて変位量への影響要因の分析を行った。

2. 検討対象地域の選定

地震前後に撮影された航空写真を用いた測量により、側方流動による地表面の変位量が測定されている事例(1995年兵庫県南部地震、1983年日本海中部地震、1964年新潟地震、1948年福井地震)³⁾⁴⁾の中から、以下の条件を満たしているエリアを選定した。1)広領域にわたり地盤の水平変位の方向や変位量が安定しており、側方流動の起点と終点が比較的明瞭である。2)建物の地下室や構造物の基礎杭など、地中埋設物の影響が少ない。3)護岸・盛土の崩壊などの影響を受けていない。4)液状化層の判定が容易である(中間層を挟んで複数の液状化層が存在したり、液状化の判定が困難な細粒分を多く含む砂質土が堆積する地域は除外する)。

3. 側方流動のタイプ

筆者らがこれまでに行ってきた側方流動に関する事例研究の成果によれば、側方流動のタイプには図-1に示す2種類があることが示されている。

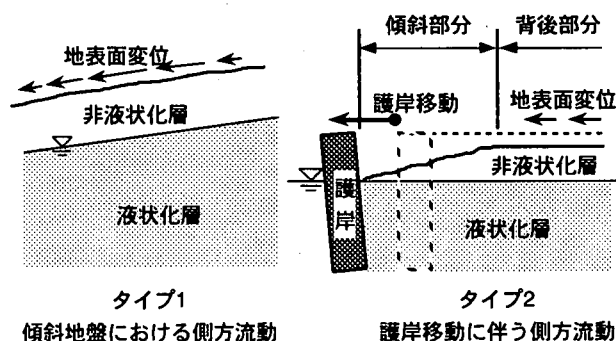


図-1 側方流動の発生パターン

タイプ1：傾斜地盤において液状化土が標高の高い所から低い所へ移動するタイプ(例：1983年日本海中部地震の能代市、1964年新潟地震の新潟市大形地区など)。タイプ2：埋立地や河川沿岸において、護岸が移動することにより、背後地盤が流動するタイプ(1995年兵庫県南部地震の神戸市などの埋立地、1964年新潟地震の信濃川沿岸地域など)。

以下では、側方流動を上記の2つのタイプに分けて分析を行う。

4. 傾斜地盤における側方流動（タイプ1）

図-2 に、タイプ1の傾斜地盤における側方流動の一例として、能代市（日本海中部地震）における地表面変位ベクトルおよび航空写真測量により描いた地震前後の地表面形状を示す。

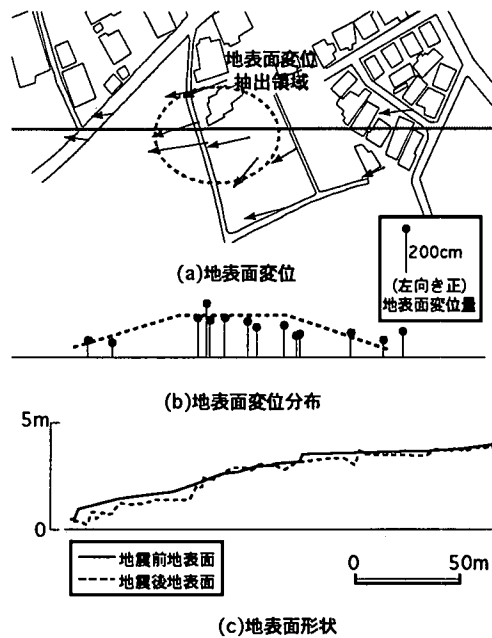


図-2 地表面変位と地表面形状（能代市、日本海中部地震）

タイプ1の分析対象地域は、能代市前山地区の他、新潟市大形地区（新潟地震）、福井市森田地区（福井地震）など、合計19事例である。これらの地区から得られた地表面変位および地形・土質データを表-1に示す。

表-1 傾斜地盤における側方流動の要因データ

地震名	地区名	液状化層厚 H (m)	非液状化層厚 (m)	地表面変位量 D (m)	地表面勾配 $\theta \times 10^2$	斜面長 L (m)
新潟地震	関屋田町	9.8	1.2	1.4	0.4	195
	白山浦	11.9	1.2	3.8	0.8	190
	水島町	12.4	0.2	2.6	0.9	348
	万代	10.6	2.3	3.3	0.6	208
	下山	6.5	0.1	6.3	1.3	263
	下山	4.7	0.9	5.7	1.3	145
	大形	6.0	2.2	6.5	1.0	140
	大形	8.1	1.8	5.3	0.7	130
	大形	6.3	1.3	5.3	1.1	175
	新川町	4.0	2.5	3.5	1.4	250
日本海中部地震	松美町	2.8	1.8	2.4	1.9	170
	昭南町	4.3	1.7	1.5	0.8	64
	昭南町	2.9	2.9	1.9	0.9	296
	前山	3.7	1.3	4.0	2.3	186
	十州崎	2.5	1.0	2.1	2.0	270
	新屋布	2.0	2.0	2.2	2.3	148
	田子向	2.6	1.2	1.7	0.8	312
福井地震	森田	6.3	2.6	2.5	1.3	—
	森田	7.4	3.1	3.1	1.0	—

新潟地震と日本海中部地震の事例では一律にN値15以下の飽和砂層を液状化層とみなした。一方、福井地震の森田地区には飽和砂層がほとんど存在せず地表付近より厚い砂礫層が堆積している。著者らの聞き込み調査によると地震の際に細礫が噴出したとの住民の証言があっ

たことから、飽和砂礫層を液状化層とした。ここで、地表面勾配 θ は、側方流動発生域の平均勾配で、図-2(c)に示すような地震前の地表面形状より算出している。図-3～図-6に地表面変位と液状化層厚、非液状化層厚、地表面勾配および斜面長との関係を示す。これらの結果のみからは、地表面変位といずれの要因との間に単独には明確な相関は見られない。

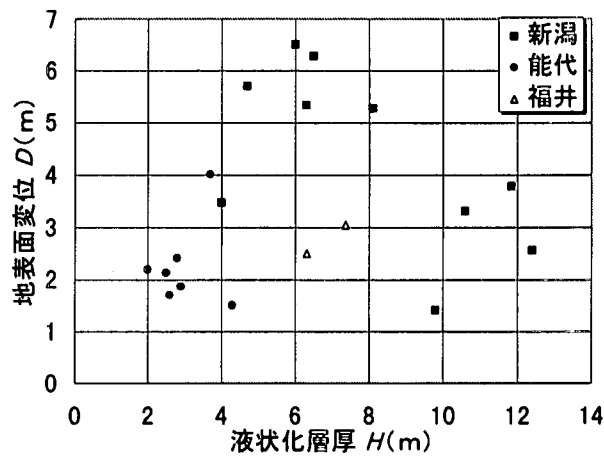


図-3 液状化層厚と地表面変位の関係

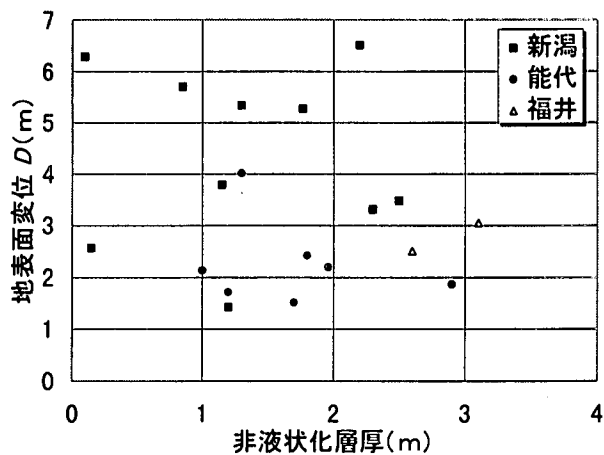


図-4 非液状化層厚と地表面変位の関係

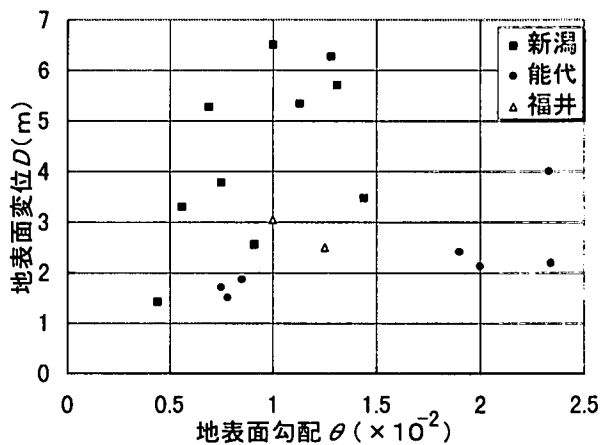


図-5 地表面勾配と地表面変位の関係

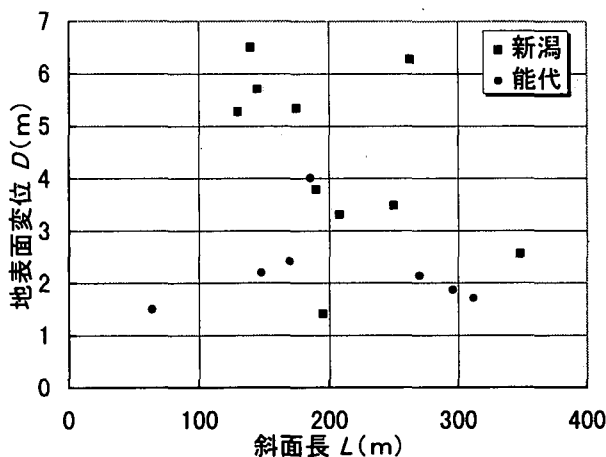


図-6 斜面長と地表面変位の関係

図-7 には地表面変位と液状化層厚の比 (D/H) と地表面勾配の関係を示す。地表面変位と液状化層厚の比は側方流動によって生ずる地盤の深さ方向の平均的なせん断ひずみと考えることが出来る。以後これをせん断ひずみと呼ぶ。

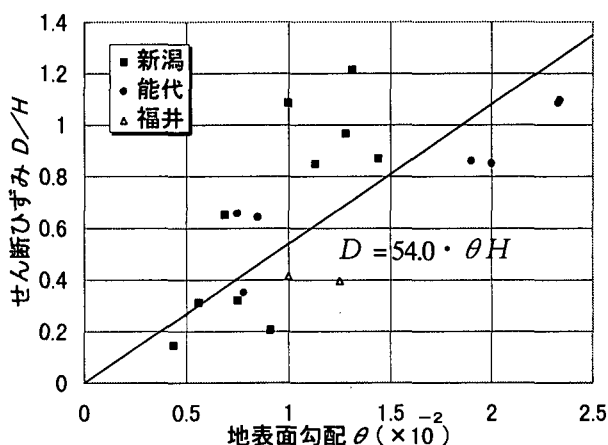


図-7 地表面勾配とせん断ひずみの関係

図-7 に示すように地表面勾配とせん断ひずみとの間には、若干のばらつきがあるもののほぼ線形的な相関性が認められる。これを原点を通る直線で近似すれば、図中に示したような関係式が得られる。すなわち地表面変位は地表面勾配と液状化層厚の積に比例して増加している。既往の経験式¹⁾では地表面変位が地表面勾配の三乗根に比例するなど地表面勾配の影響が小さく評価されていた。図中の式では地表面変位が地表面勾配に比例しており、既往の経験式と比較し、より理解し易いものになっている。

5. 護岸移動に伴う側方流動 (タイプ2)

兵庫県南部地震および新潟地震の合計 18 事例について分析した。分析に用いたデータを表-2 に示す。図-8

表-2 護岸移動に伴う側方流動の要因データ

地震名	地区名	液状化層厚 H (m)	地表面変位量 D (m)	護岸移動量 Dq (m)
新潟地震	臨港町	6.3	3.0	4.9
	下大川	11.1	3.6	8.6
	川畑	14.0	4.1	7.3
	幸西	11.7	1.9	4.2
	白山	11.5	4.7	6.7
	山岸	10.0	3.7	6.2
	関新町	10.0	6.6	13.1
兵庫県南部地震	メリケンパーク	6.9	0.7	2.1
	ポート北部	10.8	0.9	3.8
	ポート北公園	11.0	2.1	2.5
	魚崎浜東部	10.4	1.9	3.8
	魚崎浜西部	10.7	0.7	3.0
	六甲北岸	15.0	1.4	3.2
	芦屋浜西部	7.7	1.4	2.2
	芦屋浜東部	7.8	1.9	2.4
	西宮浜南中部	8.4	1.2	1.4
	西宮浜南西部	9.0	1.4	1.7
	西宮浜東部	7.8	1.6	2.7

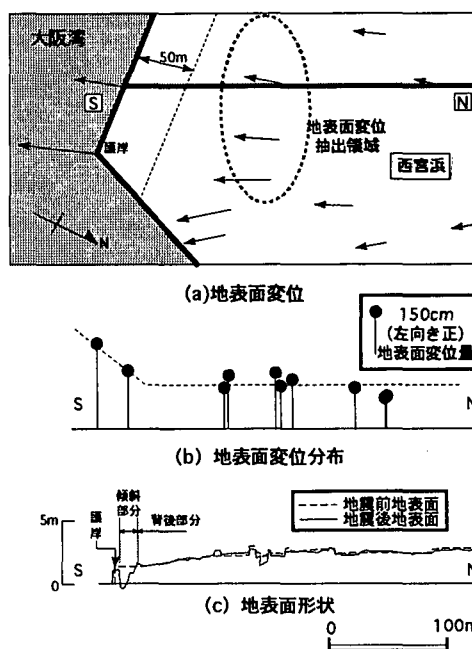


図-8 地表面変位と地表面形状 (西宮浜、兵庫県南部地震)

に、タイプ2の護岸移動に伴う側方流動の一例として西宮浜 (兵庫県南部地震) における地表面変位ベクトルおよび地震前後の地表面形状を示す。図-8 (c) に示すように護岸の移動により護岸背後には地表面が傾斜している部分が出てくるが、本解析の対象とした地表面変位は傾斜部分よりさらに背後の領域の地表面変位である。この領域では地表面がほぼ一様に沈下し、地表面形状がほとんど変化していない。

図-9、10 に地表面変位と液状化層厚および護岸移動量との関係を示す。図-9 より、地表面変位と液状化層厚の間にはほとんど相関性は認められない。しかし図-10 に示すように、兵庫県南部地震におけるデータはかなりのばらつきがあるものの新潟地震のデータと合わせて考えれば、地表面変位と護岸移動量との間にはほぼ線形的な関係が認められ、これを原点を通る直線で近似すれば、図中の式となる。

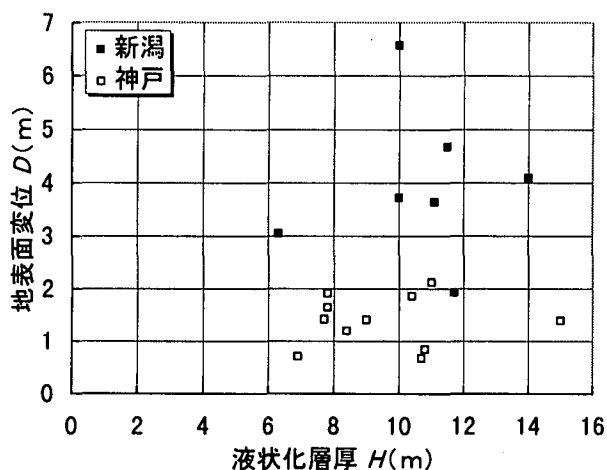


図-9 液状化層厚と地表面変位の関係

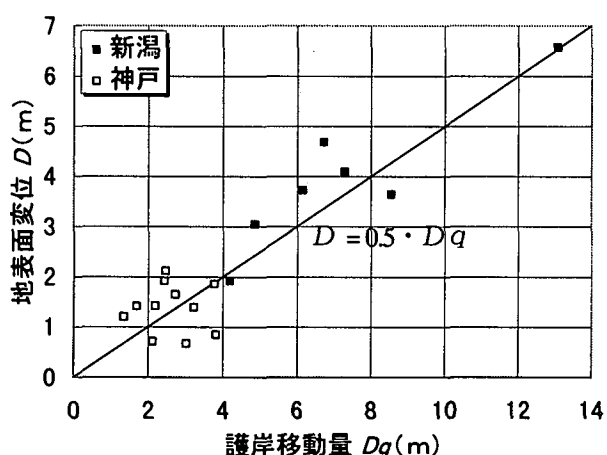


図-10 護岸移動量と地表面変位の関係

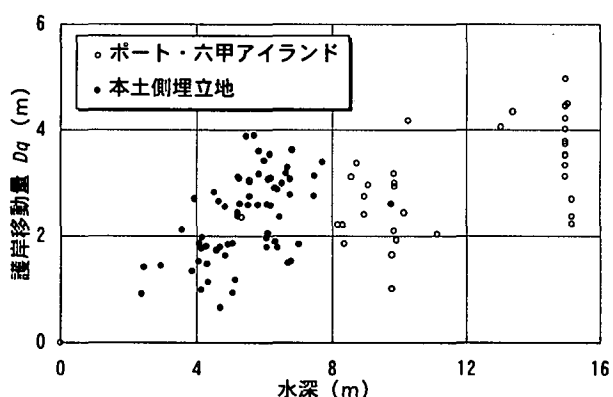


図-11 水深と護岸移動量の関係

図10の結果は、護岸背後の地表面変位は護岸移動量に支配されていることを表しており、地表面変位を推定するには精度の高い護岸移動量の推定が前提となることが分かる。図-11は兵庫県南部地震におけるケーソン護岸の移動量と水深の関係を示したものである。ばらつきはあるものの水深が増大すると護岸移動量も増大している。地震による護岸移動量の推定方法については兵庫県南部地震前および地震後にもいくつかの方法が提案されてい

る。^{5)～7)}護岸移動量の推定にはこれらの方法を用いることが考えられる。図-12に護岸からの離れによる地表面変位の減衰を示す。地表面変位は護岸より50～100mの範囲で減少するが、その後はほぼ一定となり地表面変位の発生領域は数100mにも及んでいる。地表面変位の発生領域の長さは構築物の有無、改良地盤の存在などに影響されると考えられる。事例分析の対象とした地盤は構築物の基礎杭など地中構築物の影響のないことを条件に選定されているため、広範囲に亘って地表面変位が生じたものと考えられる。

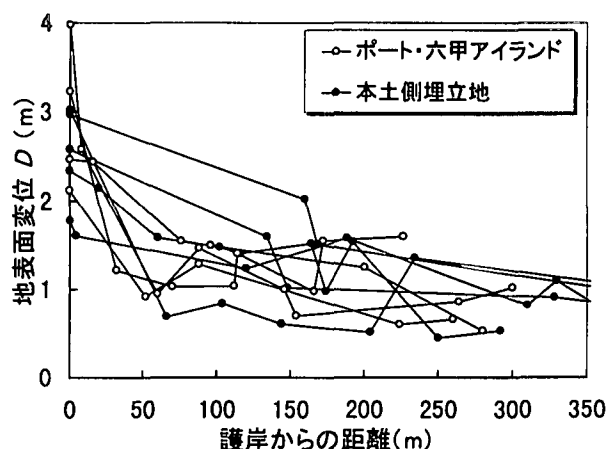


図-12 護岸からの離れによる地盤変位の減衰

6. まとめ

- 1) 傾斜地盤での地表面変位は液状化層厚と地表面勾配の積に比例する傾向が認められた。
- 2) 護岸背後地盤の地表面変位は護岸の移動量に比例しており、兵庫県南部地震と新潟地震の事例では護岸変位量の約2分の1の地表面変位が生じている。
- 3) 事例分析の対象とした地盤では、護岸の背後地盤の地表面変位は護岸から数100m背後にまで及んでいる。

参考文献

- 1) 濱田、安田、磯山、恵本：液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究、土木学会論文集 第376号/Ⅲ-6, pp.221-229, 1986.
- 2) Bartlett, S. and Youd, T.L.: Empirical prediction of lateral spread displacement, 4th Japan-US Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction, Vol.1, pp.351-365, 1992.
- 3) Hamada, M. and O'Rourke, T.D. (Eds.): Case study of liquefaction and lifeline performance during past earthquake, Vol.1 Japanese case studies, Technical Report NCEER-92-001, 1992.
- 4) Hamada, M., Ito, Y., and Wakamatsu, K.: The 1995 Hyogoken-nanbu (Kobe) Earthquake Liquefaction, Ground Displacement and Soil Condition in Hanshin Area, 地震予知総合研究振興会, 1995.
- 5) 上部：地震被災事例に基づく重力式および矢板式係船岸の被災変形量と被災額の推定、港湾技術資料 No. 473, 1983.
- 6) 井合、一井、森田、佐藤：既往の地震事例にみられる液状化時の護岸変形量について、第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp. 259-264, 1997.
- 7) 井合、一井、森田：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察（その7）ケーソン式岸壁の有効応力解析、港湾技術資料 No. 813, pp. 253-279, 1995.