기술기사 1 | 한국지반공학회지 | Vol.22, No.12 | pp.17~24

지진방재를 위한 매립지의 측방유동 예측법

송 병 웅*

1. 연구 배경과 목적

측방유동이라는 단어는 1995년 효고현 남부지진 (일명 한신대지진) 이후 알려진 단어이며, 지진에 의해 액상화가 발생하고 매우 완만한 경사지나 매립지에서 지반의 수평이동현상이 발생하는데 이를 측방유동 (Lateral Flow) 이라고 정의하였다 (岡, 1999; Song, 2003). 그 이전에는 영구변위 (Long-term displacement)라고 사용되었으나 1995년 효고현 남부지진 이후 측방유동이라는 이름으로 바뀌었다 (Song, 2003). 측방유동은 기초구조물 및 지하매설구조물의 피해에 막대한 피해의 원인으로 알려져 있다.

1964년 니이가타 지진의 경우 모래지반에서 액상화에 의한 대규모 피해가 보고되어 "액상화"라는 단어가 세상에 알려지게 되었는데 1995년 효고현 남부지진 이후에는 거의 평지에 가깝게 완만한 지반에서 측방유동 피해가 보고되어 과거 지진피해를 입은 1948년 후쿠이지진, 1964년 니이가타 지진 시 발생한 측방유동 피해가 재조사되었다 (濱田 등, 1986; Song, 2003). 1995년 효고현 남부지진 시 모래 및 화강풍화토 (일본명 마사토) 지반에서 호안의 이동에 동반한 대규모 측방유동이 발생하여 매립지 전역에서 배관계의 파손에 의한 액화석유탱크의 대량 유출 및 교각의 이동에 의한 교량상판의 낙하 등의 피해가 발생하였다 (Song 2003, Hamada et al. 1996). 그리고 2000년 톳토리현 서부지진에서는 비소성실트로 매립된 타케노우찌공단에서 액상화 피해도 보고되어 있다 (地盤工學會, 2002; Song, 2003). 이처럼 지진에 의한 지반 액상화 및 측방유동은 구조물의 기초 및 파이프라인에 심각한 피해를 입히며, 장기적으로 도시기능을 마비시킬 위험성이 매우 높을 것으로 판단된다.

이에 대하여 지금까지 많은 연구자들과 기술자들은 지진에 의한 호안의 측방유동량을 관측하여 다양한 예측법을 제안하였으며, 본 연구에서는 이미 알려진 방법들을 이용하여, 지진방재를 위한 하나의 방법으로서 매립된 호안에서의 측방유동과 그 배후

*WASEDA University, 외국인 특별연구원
(iacd05105@kurenai.waseda.jp)

지반에서의 측방유동 및 지반침하량에 관한 예측법을 평가하고자 한다.

2. 측방유동의 예측 방법

본 연구에서는 액상화 판정에 관하여 원칙적으로 "고압가스시설 등 내진설계기준"에 의거하여 수행하였다 (神奈川県 防災局工業保安課, 2002). 본 연구에서 계산 방법은 그림 1에 나타내었다. 지반 침하량은 액상화에 의해서 발생한 과잉간극수압의 소산에 의한 침하와 호안유동에 동반한 지반침하를 고려하였다 (Ishihara and Yoshimine, 1992; 石原등, 1997). 한편, 지반의 측방유동량은 경험식인 호안 이동량에 의한 수평이동량으로 고려하였다 (井合 등, 1997).

3. 지진에 의한 지반침하와 측방유동의 예측법

(1) 호안이동량과 측방유동량의 추정

본 연구에서 예측계산은 일본측지계좌표를 수평직각좌표계로 변환해서 수행하였다. 지진에 의한 매립지에서 액상화 판정은 심도 20m까지의 지반에서 발생하는 것으로 가정하여 액상화 지수 PL치를 검토하였다 (岩崎등, 1980). 한편 본 연구에서는 대상지역을 50m×50m의 간격으로 잘라 수행하였으며, 대상지역의 지반조사 정보가 없는 경우에는 그림 2와 같이 주위에서 가장 가까운 세 곳의 지반 정보를 이용하여 식 (1)과 같이 거리에 비례하게 보간하여 계산하였다.

$$T=\sum_{i=1}^{n}(T_i/L_i)/\sum_{i=1}^{n}(1/L) \quad (1)$$

여기서, T는 어느 메시에서의 보간대상 데이터 (예를 들면, 액상화 대상층 두께, N치 등), T_i는 $_i$번째 보링지점의 보간대상 데이터, L_i는 지정 메시 중심점에서 i번째 보링지점까지의 거리(m)이다.

본 연구에서 고려한 지진동은 수도권 직하지진으

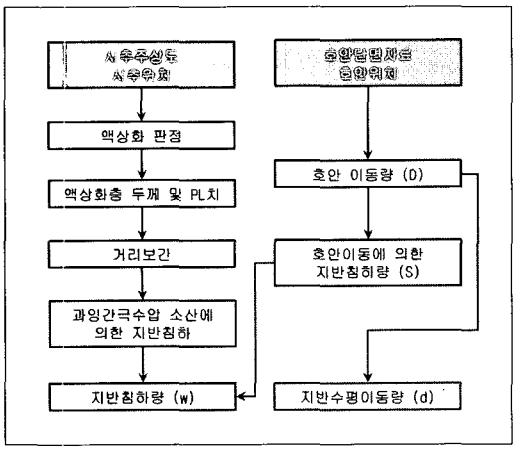


그림 1. 지반침하와 측방유동예측의 계산방법

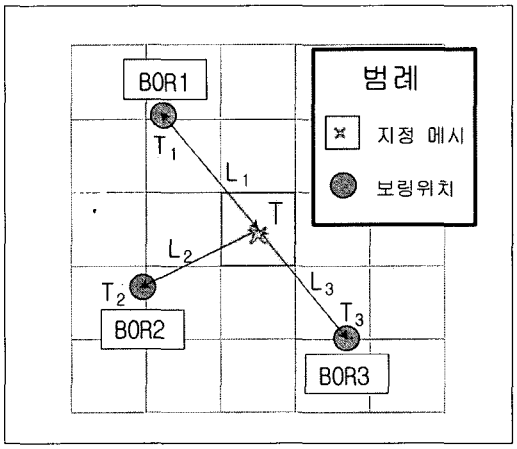


그림 2. 거리보간의 개념도

로 그 크기는 6.9이다 (일본 內閣府, 2006). 이것을 이용하여 지표면 최대가속도를 구한 결과 약 400Gal인 것을 알았다. 일본에서 레벨 2 (1995년 한신 대지진 규모) 지진동에 대해서 호안 배후지반 및 기초지반의 액상화를 검토하였다. 井合등(1997)은 지진에 의한 호안 측방유동량을 호안의 형식에 따라 표 1과 식 (2)와 같은 예측식을 제안하였다. 본 연구에서는 井合 등(1997)의 방법을 따라 호안의 수평이동량을 검토하였다.

$$\Delta = (F_d/100) \cdot H_w \quad (2)$$

여기서 Δ는 호안의 수평이동량 (m), F_d는 호안의 변형률(%), H_w는 호안의 높이(m)이다.

한편, 액상화가 발생하는 것으로 추정되는 층의 환산 N치 $(N_1)_{av}$와 식 (2)를 이용하여 식 (3)에서 유동범위 L을 추정할 수가 있다 (Ishihara et al., 1997).

$$L = 250 \cdot \Delta/(N_1)_{av} \quad (3)$$

(2) 지반침하량의 추정식

(4)는 그림 1에서 표시한 지반침하량의 산정법을 나타낸 것이다.

$$\omega = \varepsilon_v Z + S \quad (4)$$

여기서 ω는 호안에서 매립지의 어느 지점까지의 거리 (m), ε_v는 과잉간극수압의 소산에 의해 발생한 체적변형률, Z는 매립지의 어느 지점에서의 액상화층 두께 (m), S는 매립지의 어느 지점에서의 호안 이동에 따라 발생하는 지반침하량 (m)이다 (石原, 1997). 한편, 호안이동에 의한 지반침하량 S는 식 (5)와 같으며, X는 호안에서 매립지의 어느 지점까지의 거리 (m)를 나타낸다.

$$S = \Delta \cdot 0.8\exp\left(-6.37\frac{X}{L}\right) \quad (5)$$

(3) 지반의 측방유동량의 산정

측방유동량은 그림 1에서 나타낸 것과 같이 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 고려하였다. 식 (6)에서 대상지점의 지반 수평이동량은 호안의 측방유동량에 동반한 지반이동량으로서 1995년 효고현 남부지진 시 지반 변위량을 조사한 결과에 근거하여 제안한 것이다 (石原 등, 1997).

$$\delta = \Delta \cdot \exp(-3.35/L) \quad (6)$$

표 1. 기존 지진사례에 의한 액상화 시 안벽 및 호안의 변형량 개략치 (井合 등, 1997)

구조형식	지진동 레벨	지반조건		변형률 F_d (%)
중력식안벽 · 호안	레벨 1	호안배후만 느슨한 사질토		5 ~ 10
		호안배후 및 기초지반 모두 느슨한 사질토		10 ~ 20
	레벨 2	호안배후만 느슨한 사질토		10 ~ 20
		호안배후 및 기초지반 모두 느슨한 사질토		20 ~ 40
널말뚝식 안벽 · 호안	레벨 1	호안배후만 느슨한 사질토	앵커보강된 부근은 견고한 지반	5 ~ 15
			앵커보강된 부근도 느슨한 사질토	15 ~ 25
		호안배후 · 앵커부근 · 기초지반 모두 느슨한 사질토		25 ~ 50

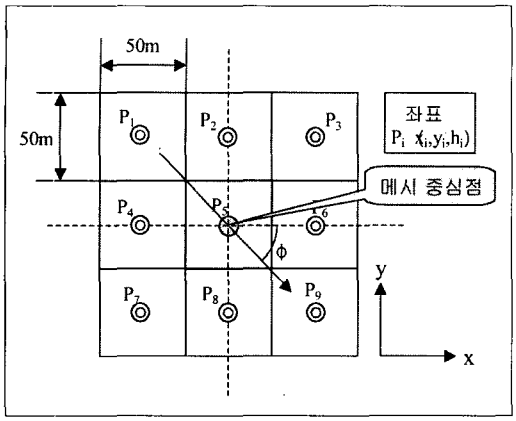


그림 3. 평면구배 산출법

(4) 지표면 구배의 산출법

지표면 구배를 산출하기 위하여 9개 메시에 의한 평면보간을 행하였는데 그림 3과 같은 50m×50m의 메시에서 지표고를 이용하였으며 평면의 식은 식(7)과 같이 나타냈다.

$$h(x, y) = ax+by+c \quad (7)$$

여기서 a, b, c는 정수, h는 표고(m), x는 x 좌표(m), y는 y 좌표(m)이다. 식(7)과 같은 평면식을 가정하여 최소자승법을 이용하면 a, b, c값이 구해지는 평면이 결정된다. 따라서 최대구배의 크기 및 그 방향을 식 (8)과 (9)처럼 구할 수 있다.

$$|\theta| = \sqrt{a^2+b^2} \quad (8)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{a}{b}\right), \tan^{-1}\left(\frac{a}{b}\right)+180^\circ \quad (9)$$

여기서 θ는 최대구배의 크기, ϕ는 최대구배의 방향이다.

4. 예측법의 적용과 문제점

(1) 대상지역의 특성

그림 1에 나타낸 측방유동의 예측법의 적용성을 검토하기 위하여 동경만의 카와사키(川崎) 부근의 지역에서 시추주상도와 호안 데이터를 수집하여 검토하여 보았다. 그림 4는 동경만 매립지의 조성시기를 나타내고 있다. 그림 4에 의하면 동경만의 개발은 1945년 이전부터 동경(東京) 중심으로 개발이 시작되어 1966년 이후에는 치바(千葉) 방면을 포함하여 동경만 전체의 개발이 활발히 이루어진 것을 알 수 있다. 그림 4에 의하면 일본에서 액상화는 1964년 니이가타지진 이후 알려진 것으로서 1966년 이전의 매립지에서는 액상화 대책이 수립되지 않았고, 측방유동에 의한 피해도 1995년 효고현 남부지진 이후 주목받은 현상으로 이에 대한 대책도 수립되지 않았을 것으로 예상된다. 이에 따라 본 연구에서는 이와 같은 지역에서의 측방유동 발생 가능성을 평가해야 할 필요가 있다고 판단하였다.

그림 5는 본 연구 범위내의 호안 및 보링조사결과

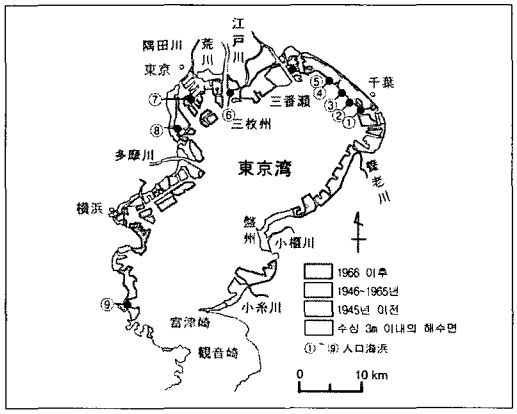
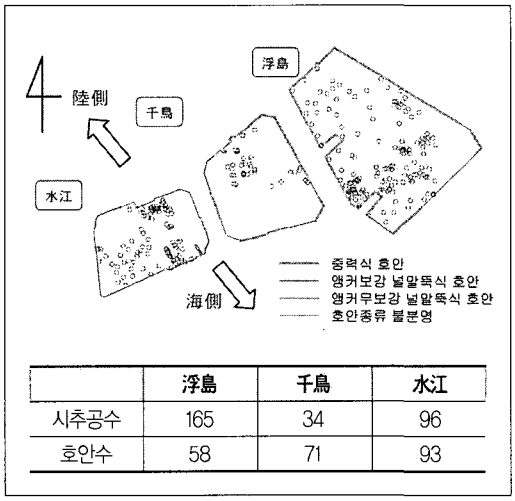


그림 4. 동경만의 매립지 조성시기(貝塚, 1997 加筆)



	浮島	千鳥	水江
시추공수	165	34	96
호안수	58	71	93

그림 5. 연구범위 및 호안과 시추위치도

의 위치도를 나타내고 있다. 연구대상지역은 석유저장탱크가 설치되어 있는 우끼시마(浮島), 치도리(千鳥), 미즈에(水江)이다. 과업구간의 시추공데이터와 호안 데이터 수가 그림 5에 나타나 있다. 우끼시마나 미즈에와 비하여 치도리에서의 보링데이터 수가 많이 부족하여 예측결과의 신뢰성이 많이 떨어질 것으로 예상된다. 그리고 우끼시마나 미즈에의 일부 지역에서도 보링데이터가 없는 부분이 있어 이 지역에서도 계산결과에 대한 신뢰성 저하가 우려된다. 한편, 호안은 중력식, 앵커보강 콘크리트 널말뚝식, 콘크리트 널말뚝식 호안의 세 종류로 시공 되었다. 일부 구간에서는 호안단면에 대한 정보가 없어 이 부분에 대한 측방유동평가는 수행되지 않았다.

그림 6은 연구 대상 지역에서 액상화 발생 가능한 층의 두께를 나타낸 그림이다. 그림 6에서 우끼시마, 치도리와 미즈에에서 액상화층의 평균 두께는 14m, 10.8m, 15.5m이다. 전체적으로 미즈에는 액상화층 두께가 다른 지역보다 두껍고, 치도리에서는 얇은 것으로 나타났다. 하지만, 치도리의 경우 다른 지역보다 시추공이 많이 부족한 점을 고려하여야 한다.

그림 7은 岩崎 등(1980)이 제안한 방법을 이용하

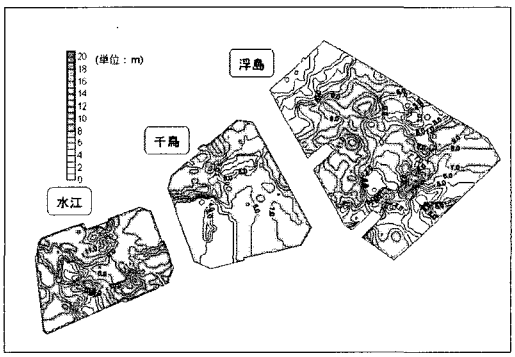


그림 6. 액상화층 두께

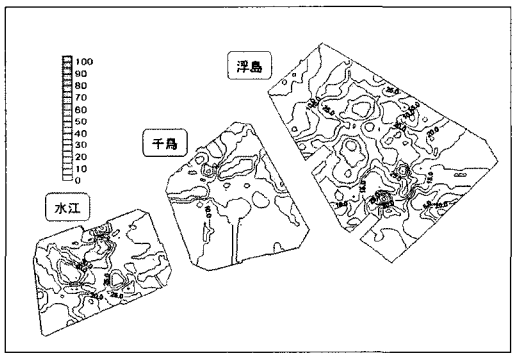


그림 7. PL치

표 2. PL치 판정법 (岩崎 등, 1980 加筆)

PL치	판정법
0	액상화 위험도가 거의 없음. 액상화에 대한 상세 조사 불필요.
5 이하	액상화 위험도가 낮음. 특히 중요한 구조물 설계 시 보다 상세한 조사 필요.
15 이하	액상화 위험도가 높음. 중요 구조물에 대한 상세 조사와 액상화 대책 필요.
15 이상	액상화 위험도가 매우 높음. 액상화에 대한 상세 조사와 액상화 대책 불가피.

여 과업구간에서의 PL치를 계산하고 이를 나타낸 그림이다. 그림 6과 비교하여 보면 액상화층 두께가 클수록 대체적으로 PL치의 크기가 큰 것을 알 수 있다. 표 2는 岩崎 등 (1980)이 제안한 PL치의 판정방법을 정리한 것이다. 岩崎 등 (1980)에 의하면 중요구조물의 경우 PL치가 0을 넘으면 모두 액상화에 대한 상세조사가 필요한 것으로 판단된다. 본 과업구간의 대부분 지역에는 중요한 국가시설인 석유저장탱크가 설치되어 운영되고 있는 곳으로 PL치에 의한 액상화 판정법에 따르면 과업구간 전 지역에서 액상화 발생에 대한 상세 조사 및 대책이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

(2) 측방유동과 침하량

그림 8~10은 그림 1에 나타난 순서도에 따라 평가한 카와사키 지역에서 매립지의 측방유동과 이에 따라 발생하는 지반침하를 평가하여 나타내었다. 그림 8과 9은 각각 식 (2)와 (6)에 따라 예측한 호안과 지반의 측방유동량을 표시하였다. 호안의 최대측방유동량은 미즈에에서 약 7 m, 지반이동량은 약 6.5 m 발생할 것으로 예상되었다. 그림 7에서 PL치는 치도리와 미즈에에서 크지만, 치도리의 경우 중력식 호안이 많은 관계로 호안의 측방유동량이 미즈에보다 작게 평가되었는데 그 원인은 표 1에 나타나 있다. 표 1에서 지진에 의한 호안의 측방유동 피해를 입은 지역에서 관측한 결과 널말뚝식 호안이 중력식 호안보다 큰 측방유동량 피해를 입은 것으로 나타나 본 연구결과에서도 널말뚝식 호안이 주류를 이루고 있는 미즈에에서 큰 측방유동 피해가 예상된다. 한편, 그림 9에서 지반의 측방유동량은 식 (6)에서 호안의 측방유동량에 따라 결정되므로 호안에서 가까울수록

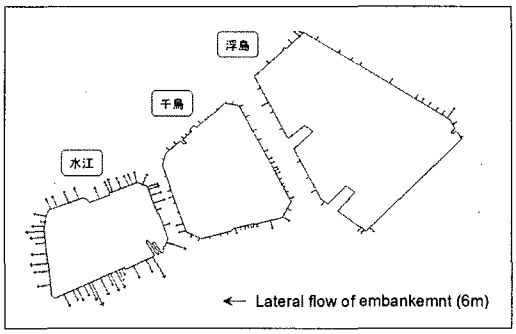


그림 8. 호안의 측방유동

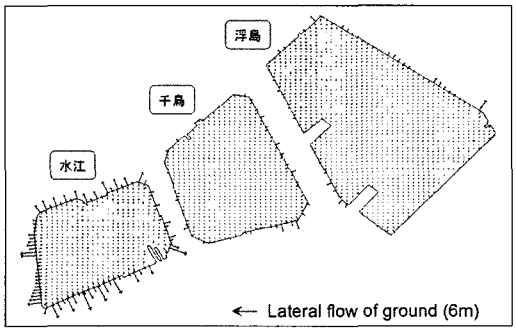


그림 9. 지반의 측방유동

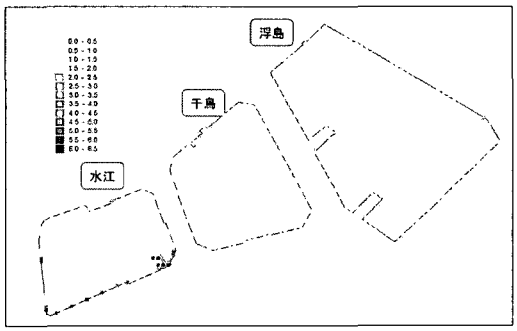


그림 10. 지반의 침하량

지반의 측방유동량은 크게 평가되었다.

그림 10은 지반의 침하량을 나타낸 그림으로서 식 (4)와 (5)에 따라 평가되었다. 식 (4)에서 1항은 과잉간극수압의 소산에 의한 지반침하를 나타내는 항목으로서 계산 결과 최대 약 400 mm 정도 발생하는

것으로 나타났으며, 2항은 식 (5)로 표현되며 호안에서 가까울수록 지반침하량은 큰 것으로 나타나 그림 10과 같이 호안의 측방유동이 심한 곳에서 지반침하량도 크게 나타났다.

(3) 측방유동의 예측에 관한 문제점

본 연구에서는 앞에서 언급한 연구결과들을 이용하여 측방유동의 예측법을 작성하였다. 하지만 이 방법들 중에 몇 가지 문제점들이 있어 정리하여 보았다.

① 호안의 변형률은 레벨 1과 레벨 2의 지진동과 호안의 종류를 고려하여 판단한다. 하지만, 이 방법으로는 지진동의 크기에 따라 호안 변형률을 결정하는데 정량화되어 있지 않아 선택되는 변형률에 따라 호안의 측방유동량이 크게 달라질 수 있다.

② 보링데이터는 호안건설 시와 지반 매립 시의 오래전 자료일 가능성이 크고 현재 지반과 어느 정도 유사한지 알 수가 없다. 그리고 매립 후 60년 이상 지난 지금 매립지반이 매우 다져진 상황으로 판단된다.

③ 조사 당시에는 미개량 지반이었지만, 현재 석유탱크저장 시설을 운용하고 있는 상황이므로 이러한 지반에 대해서 시설 운용 전 지반개량이 이루어졌을 것으로 판단되지만 이에 대한 자료를 구하기 어렵다.

④ 매립지 운용 중 호안의 보수 · 보강에 대한 정보가 없다.

⑤ 보링데이터가 없는 지역에 대한 지반 정보 예측은 근처 최단 거리 세 지점의 지반 정보를 이용하여 이루어지지만 그 세 지점이 일렬로 정렬되어 있는 경우에는 보간 정보의 신뢰성이 크게 떨어진다.

이러한 불명한 부분을 내포한 상황에서 예측한 결과이므로 신뢰도 저하가 예상되지만, 여러 연구자들이 연구하여 제안한 많은 방법들을 이용하여 지진 시 매립지에서 발생될 측방유동량을 예측하고 시각화 할 수 있다는 것을 알았다.

5. 결론

본 연구에서는 "액상화"와 "측방유동"이라는 단어가 알려지기 전에 건설된 카와사키 지역의 매립지에 대하여, 여러 연구자들이 연구하여 제안한 많은 방법들을 이용하여 호안의 측방유동과 지반의 측방유동 및 침하량을 평가하여 보았다. 그 결과 전 지역에서 액상화 발생 가능성은 높고 호안의 이동량, 배후지반의 이동량과 침하량도 크게 발생할 것으로 예상된다.

그러나, 본 연구에서 이용한 호안의 변형률을 결정하는 판정법, 지반조사 데이터와 호안 데이터의 정확성, 그리고 지반조사결과가 없는 지역에서의 지반정보 예측방법 등 여러 가지 부분에 대한 수정이 필요할 것으로 판단된다. 또한 오래된 지반 정보나 불분명한 조사결과도 내포하고 있는 자료에 근거하여 평가가 이루어져서 실무에 적용할 경우 신중한 판단이 필요할 것으로 보인다.

본 연구에서는 광역매립지에서 지진방재대책의 일환으로 측방유동에 의한 피해예방에 대한 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단한다.

참고문헌

1. 岡二三生 (1999), 土木ミニ知識-側方流動-液状化に伴う地盤の流動, 土木学会誌, Vol. 84, Sept. pp. 108.
2. Song, B. (2003), Evaluation for lateral flow of non-plastic silt induced by earthquakes, Doctoral dissertation of Ibaraki University.
3. 濱田政則, 安田進, 磯山龍二, 恵本克利 (1986), "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, 第376号/III-6, pp. 211-220.
4. Hamada, M., Isoyama, R., and Wakamatsu, K. (1996), Liquefaction-induced ground displacement and its related damage to lifeline facilities. Soils and Foundations. Special Issue on Geotechnical Aspects of the Jan. 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, pp. 81-97.
5. 地盤工學會 (2002), 平成12年鳥取県西部地震災害調査報告書, 地盤工学会 (CD-ROM).
6. 神奈川県防災局工業保安課 (2002), 高圧ガス施設等耐震設計基準, 神奈川県防災局工業保安課.
7. 井合進, 一井康二, 森田年一, 佐藤幸博(1997). 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, 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演論文集, pp.229-264.
8. 岩崎敏男, 龍岡文夫, 常田賢一, 安田進 (1980), 地震時地盤液状化の程度の予測について, 土と基礎, Vol.28, No.4, pp.23-29.
9. 内閣府 (2006), http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/taisaku_syuto/pdf/gaiyou/gaiyou.pdf.
10. Ishihara, K., Yoshida, K., and Kato. M (1997). Lateral Spreading of Liquefaction Deposits during the 1995 Kobe Earthquake, KIG Forum'97, Geotechnical Engineering in Recovery from Urban Earthquake Disaster, pp.31-50.
11. 濱田政則, 若松加寿江 (1998). 液状化による地盤の水平変位の研究. 土木学会論文集. No. 596, III-43, pp. 189-208.
12. 安田進, 石原研而, 原田健二, 野村博之 (1997). 液状化による護岸背後地盤の側方範囲の調査. 第32回地盤工学会研究発表会, pp. 773-774.
13. Ishihara, K. and Yoshimine, M. (1992). Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soils and Foundations. Vol. 32, No. 1, pp. 173?188.
14. 石原研二, 安田進, 井合進 (1997). 液状化に伴う岸壁・護岸背後地盤の流動の簡易予測方法. 第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 541-544.
15. 貝塚爽平 (1997), 東京湾の地形・地質と水, 築地書館.

[칼라 데이타가 필요하신 분은 저자에게 이메일로 요청하시면 됩니다.]