

영구지반변형이 매설된 하수도관로 성능에 미치는 영향

전상수*

¹인제대학교 건설환경공학부

Permanent Ground Deformation Effects on Underground Wastewater Pipeline Performance

Sang-Soo Jeon^{1*}

¹Department of Civil & Environmental Engineering, Inje University

요약 최근 주요 사회기반시설물로 이루어진 뉴질랜드 Christchurch 지역에 상당히 큰 지반운동을 유발하고 짧은 기간에 연속적으로 발생한 지진충격의 전례 없는 사례가 발생하였으며 특히 액상화 지역에서 발생된 영구지반변형과 하수도관 손상에 관한 방대하고 정확한 자료가 수집되었다. 본 연구에서는 이 지역의 2011년 2월 22일 지진규모(M_w) 6.2 지진발생 후 얻어진 하수도관 길이 및 손상갯수와 영구지반변형지역에서 지진발생 전후에 얻어진 높은 해상도의 라이다데이터로부터 계산된 지반 각변형과 횡방향 지반변형률의 자료를 바탕으로 지리정보체계(GIS) 모델링과 선형회귀분석을 수행하여 도기와 콘크리트 하수도관의 손상율(손상갯수/1km)을 산정하였다. 연구 결과 두 매설관 모두 지반 각변형과 횡방향 지반변형률에 따라 유사한 경향으로 손상됨을 알 수 있으며 강성이 더 큰 콘크리트 하수도관의 손상이 더 작게 나타남을 알 수 있으며 이러한 선형회귀분석 결과는 추후 지진 시 발생할 수 있는 영구지반변형으로 인한 도기와 콘크리트 하수도관 손상율 예측에 유용하게 사용될 수 있다.

Abstract In recent years, the earthquake sequence in Christchurch, New Zealand (NZ) was unprecedented in terms of repeated earthquake shocks with substantial levels of ground motion affecting modern infrastructure, and in particular, broad and precise reports for liquefaction-induced permanent ground deformation (PGD) and repairs of wastewater (WW) pipelines were collected. In this study, a geographical information system (GIS) and linear regression analysis were performed using data for the length and repair points of earthenware (EW) and concrete (CONC) wastewater pipelines acquired after the MW 6.2 February 22, 2011 earthquake. The repair rates (repairs/km) for the EW and CONC wastewater pipelines were evaluated inside the areas of PGD, and both angular distortion of ground and lateral ground strain were calculated from the high resolution LiDAR data acquired before and after the seismic event. The research results showed that both pipelines have similar trends of damage but the CONC wastewater pipeline with higher stiffness showed less damage. The results of linear regression analyses can be used to predict the repair rates for EW and CONC wastewater pipelines inside the areas of PGD induced by future earthquakes

Keywords : Angular Distortion of Ground, Earthquake, Lateral Ground Strain, Repair Rate, Wastewater Pipeline

1. 서론

O'Rourke 등 [1,2]이 설명하였듯이 지진에 반응하는 매설된 하수도관 시스템은 두가지로 분류될 수 있다. 첫

째, 지반-구조물의 상호작용이며 둘째, 네트워크 시스템 성능 및 영구적 또는 일시적인 지반 변형의 시스템 요소이다. 하수도관 손상은 액상화, 산사태, 지표면의 단층운동에 의해 발생하는 영구지반변형과 밀접한 관계가 있

*Corresponding Author : Sang-Soo Jeon (Inje Univ.)

Tel: +82-(0)55-320-3651 email: ssj@inje.ac.kr

Received September 15, 2015

Revised November 20, 2015

Accepted January 5, 2016

Published January 31, 2016

다. 매설된 하수도관 시스템 반응은 지진하중에 의한 지반-구조 상호작용의 구조 성능평가와 네트워크 통합거동의 시스템 성능 평가이다. 이들은 구조 및 시스템의 특징, 공간 다양성, 재료에 따른 불확실성, 손상상태, 네트워크 흐름법칙 그리고 시스템의 작용 논리와 관계가 있다. 본 연구에서는 매설된 하수도관 반응을 시스템 관점에서 접근하였으며 뉴질랜드 Christchurch 지역에서 발생한 지진으로 인한 영구지반변형 및 하수도관 분포 네트워크 손상에 대한 영향분석을 수행하였다. 최근 주요 사회기반시설물로 이루어진 이 지역 도시에 상당히 큰 지반운동을 유발하고 짧은 기간에 연속적으로 발생한 지진충격이라는 점에서 전례 없는 사례라고 볼 수 있다. 더욱이 이 지진들은 각 지진에 따라 지하에 매설된 하수도관에 영향을 주는 영구지반변형이 넓게 분포하며 심각한 수준의 액상화 현상 등 다양한 형태의 지반변형이 일어났다. 연속적인 지진에 의해 수집된 이러한 데이터는 각 지진 전 후의 수평과 수직변위를 측정할 높은 해상도의 LiDAR 데이터와 각 하수도관 손상지점의 위치 및 수천 km 매설된 하수도관의 손상기록 등의 전례 없는 구체적인 방대한 양의 정보를 제공하였다. 지진에 대하여 손상갯수/km로 표현되는 매설된 하수도관 손상은 액상화에 의해 발생하는 지반 각변형과 횡방향 지반변형률에 따라 나타낼 수 있으며 특히 이들은 서로 다른 재질의 하수도관 종류에 따라 나타낼 수 있다. 이러한 연구결과는 추후에 모델링, 지역복구계획 및 지진영향을 고려한 시스템 개선등에 이용될 수 있다. 게다가 지반변형의 무차원 값과 관련된 매설된 하수도관 손상물은 홍수, 산사태, 터널링, 깊은굴착, 그리고 몰배수 또는 광산과 석유 생산과정에서의 미네랄과 유체수급 과정중에 발생하는 지반침하변형 및 횡방향 지반변형으로부터의 피해를 평가하는 손상정보를 제공한다.

본 연구에서는 지리정보체계(GIS)를 이용하여 연속적으로 발생한 Christchurch 지진 시 매설된 하수도관 성능분석 결과를 나타내었다. 하수도관 재질에 따른 액상화지역내에서의 손상율은 지진 전 후의 LiDAR 데이터로부터 계산된 지반 각변형과 횡방향 지반변형률에 따라 평가되었으며 시스템 성능에 있어서 도기(earthenware)와 콘크리트(concrete) 하수도관 성능 분석 결과를 기술하였다.

2. 하수도관 성능평가

2.1 영구지반변형과 하수도관 데이터베이스

본 연구에서는 GNS Science [3]에서 제공된 2011년 2월 22일 지진규모(M_w) 6.2의 Christchurch 지진으로 인한 Christchurch 지역에 넓게 분포한 액상화 현상과 동반하여 매설된 하수도관의 치명적인 손상을 평가하였다.

영구지반변형 관점에서의 매설된 하수도관 지진 성능평가의 일관성을 갖기 위해 영구지반변형으로 인한 Christchurch 지역에 매설된 하수도관 손상평가는 액상화 지역 안에서 수행하였으며 횡방향으로 넓게 분포한 지반변형, 지표면 부등침하, 모래 분출의 액상화 영향에 관한 체계적 지도 제작은 Christchurch 지역에서 발생한 지진 전 후로 수행되었으며 [4] 이러한 자료를 바탕으로 본 연구의 영구지반변형 지역을 산정하였다. 지도제작은 해당 지역의 지도제작 범위에 의해 한정되고 지반 깊이에 따른 액상화 또는 잠재적 액상화 가능 지역에 관계없이 가시화된 지표면 자료에 의해서만 이루어졌으며 각 지진 후 경험 많은 지반공학자와 지질학자들로 선별된 팀에 의해 이루어졌었다 [5].

각 지진 전의 하수도관의 위치 전자파일과 하수도관 손상정보는 Christchurch 도시 의회의 Christchurch 사회기반시설 재건축 팀 (SCIRT)에 의해 제공되었다 [5].

매설된 하수도관 손상 지점과 관찰된 액상화 지역을 나타내는 Christchurch 하수도관 분포 시스템 지도의 데이터는 액상화지역과 LiDAR 부등침하 및 횡방향 지반변위 GIS 파일로 통합되었다. 하수도관의 GIS 데이터베이스를 사용한 지도들은 관측된 액상화 지역의 하수도관 시스템 및 손상지점을 나타내도록 개발되었다. 매설된 하수도관과 손상 지점을 이용하여 주어진 지반 각변형과 횡방향 지반변형률에 대한 손상율은 특정한 재질의 매설된 하수도관에 따른 손상갯수를 액상화지역내에서의 지반각변형과 횡방향 지반변형률 그리드 안에 있는 관의 길이(km)로 나누어 산정하였다.

Fig. 1은 GNS Science [3]에서 제공된 2011년 2월 22일 지진규모(M_w) 6.2 Christchurch 지진의 단층과 하수도관 분포시스템을 나타내며 Fig. 2는 액상화지역과 LiDAR 부등수직지반변위에 따른 지반 각변형과 [5], Fig. 3은 액상화지역과 LiDAR 횡방향 지반변형률 [5]을 나타낸다. Fig. 4는 하수도관 재질(earthenware (EW), concrete (CONC))에 따른 손상을 평가에 사용된 하수도관 분포시스템과 손상지점을 나타낸다. 지반 각변형과

횡방향 지반변형율과 매설된 하수도관의 손상을 관계는 이 그림에 묘사되었듯이 관측된 액상화 지역과 LiDAR 측정값들이 교차되는 지역에서 산정되었다.

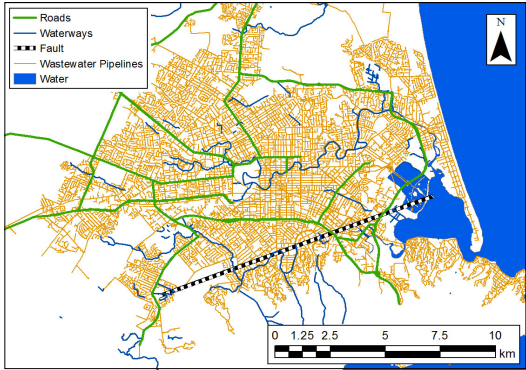


Fig. 1. Map of fault and wastewater pipeline distributions for Christchurch earthquake

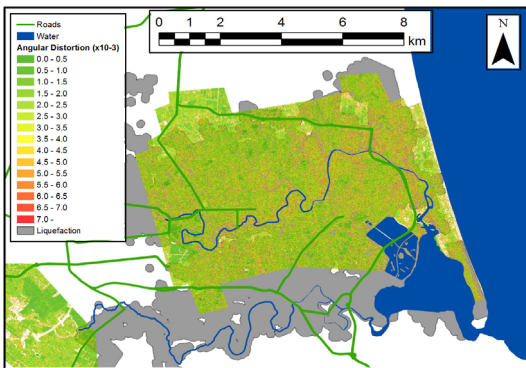


Fig. 2. Coverage of liquefaction and angular distortion calculated from measured LiDAR vertical displacement for Christchurch earthquake (Jeon, 2015)

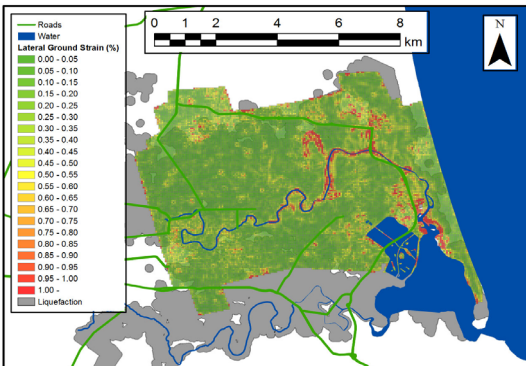


Fig. 3. Coverage of liquefaction and measured LiDAR lateral ground strain for Christchurch earthquake (Jeon, 2015)

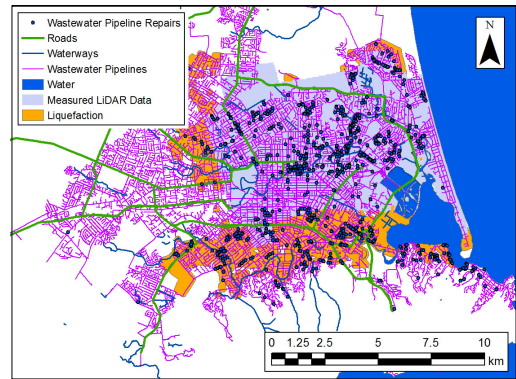


Fig. 4. Wastewater pipeline distributions and repairs in both liquefaction areas

이러한 그림들은 데이터를 어떻게 스크린 하였는지 그 과정의 기초적인 개념을 잘 표현하고 있다. 또한 하수도관 손상율을 영구지반변형과의 관계로 나타내기 위하여 특정한 재질의 하수도관에 대한 영구지반변형과 액상화지역의 하수도관 길이와 손상갯수를 사용한다. GIS를 이용하여 이러한 과정의 수치계산을 자동적으로 수행할 수 있다.

2.2 매설된 하수도관 성능평가

O'Rourke 등 [1,2]이 설명하였듯이 매설된 하수도관 성능은 GIS를 이용하여 영구지반변형을 초래하는 액상화가 관측된 지역에서의 손상을 평가가 이루어졌다. Christchurch 지진으로 인하여 발생되고 관측된 액상화 지역의 GIS 파일은 액상화와 비액상화의 경계지역의 영향을 고려하여 수정되었다. 앞에서 기술하였듯이 지표면에 나타난 액상화의 흔적으로 지표면이하의 액상화 영향을 받은 지역이라고 규명하기에는 어려우므로 지도화된 액상화 경계를 약간 확장하여 계산하였다. 액상화 지역 경계선 즉 전형적으로 주택가 길 길이의 반 정도 되는 125 m 까지 액상화가 발생한 지역으로 규명하여 영구지반변형에 따른 하수도관 손상을 평가하였다. 이것은 액상화 현상 표면증후의 경계면에 작용하는 인발력 전달 거리와도 일치한다 [5].

위에서 언급한 데이터베이스와 필터링 과정들을 사용하여 얻어진 Christchurch 지진의 통계 데이터는 EW, CONC 재질의 하수도관에 관한 정보를 제공한다. 이러한 정보는 매설된 하수도관 길이, 전체 손상갯수, 액상화 지역과 LiDAR 데이터 지역에서의 매설된 하수도관 손

상갯수, 액상화 및 LiDAR 데이터 지역 그리고 시스템에서의 하수도관 손상율을 제공한다.

매설된 하수도관은 영구지반변형 영향에 의해 손상을 받게 되므로 본 연구를 통하여 부등침하에 의한 지반 각 변형과 횡방향 지반변형률에 따른 하수도관 손상평가를 수행하였다. 영구지반변형 평가는 지반 각 변형과 횡방향 지반변형률에 따른 손상을 상관관계를 통하여 이루어졌으며 이러한 상관관계를 개발하는 과정들과 회귀분석 결과들을 아래와 같이 기술할 수 있다.

지반 각 변형과 횡방향 지반변형률에 따른 손상을 관계를 평가하기 위하여 액상화 지역안에 있는 특정한 하수도관의 총 손상갯수를 그리드 셀 안에 분포한 하수도관의 총 길이로 나누어 손상율을 계산하였다. 손상율 통계 결과의 정확도는 각 그리드 셀 간격 샘플의 하수도관 길이에 민감함을 알 수 있으며 의미 있는 상관관계를 갖는 충분한 하수도관 길이를 선택하기 위하여 기존의 연구자들에 의해 채택된 모델은 Poisson 분포를 가정하였다 [6]. O'Rourke 등 [1]이 설명하였듯이 Poission 분포를 이용한 표본길이 기준은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P(r \geq 1) = 1 - e^{-(RR)x} \quad (1)$$

여기서 RR 은 손상율이며 x 는 표본길이이다. 적어도 한 개의 손상을 발견할 수 있는 충분한 샘플의 크기를 갖기 위하여 $P(r \geq 1) = 0.99$ 를 선택할 수 있다.

$$x > -\ln(0.01)/RR \quad (2)$$

여기서 x 는 적어도 한 개의 손상이 발견될 확률이 99%인 샘플의 최소길이이다. 매설된 하수도관의 손상을 데이터는 공식 (2)를 사용하여 스크리닝 하였다. 이러한 스크리닝 기준을 사용하여 높은 확률($P(r \geq 2) = 0.94$)을 갖는 다수의 손상갯수를 발견 할 수 있다.

2.2.1 지반 각 변형에 의한 손상을

관측된 액상화 지역에서의 부등수직지반변위는 높은 해상도의 LiDAR 수직변위 데이터를 이용하여 구해졌으며 이는 Canterbury 지진복구관리기관(CERA, 2012)을 통하여 얻어졌다 [7]. 하수도관 손상을 상관관계를 개발하기 위하여 사용된 LiDAR 수직변위 데이터는 각 지진 전 후의 항공측량으로부터 얻어졌고 이는 LiDAR 측량을 통하여 표고를 측정할 수 있었으며 지진 전 후의

LiDAR 표고의 차를 구함으로써 수직변위지도도를 작성하였다. 지진복구관리기관을 통하여 얻어진 수직변위는 5m 간격으로 제공되었으며 지질구조상의 용기와 침하를 고려하여 계산되었고 수직 LiDAR 데이터는 ± 70 mm 와 ± 150 mm 사이의 정확도를 갖는다 [4,5].

지반의 각 변형(β)은 두 개의 인접한 LiDAR 지점의 부등수직변위($d_{v1} - d_{v2}$)를 두 점을 분리하는 수평거리 (l)로 나눈 값, 즉 $\beta = (d_{v1} - d_{v2})/l$ 로 정의된다. 하수도관 손상에 대한 이러한 각 변형을 사용한 경우 몇 가지의 잇점이 있는데 먼저 이 변수는 적절한 차원으로 축척될 수 있는 무차원이며 두 개의 인접한 지점의 수직변위의 차를 구함으로써 LiDAR 표고와 관계된 시스템 오차를 제거할 수 있다. 그리고 각 변형은 지반공학 차원에서 빌딩에 미치는 지반변형 영향 평가로 사용할 수 있는 변수이기도 하다 [5,8,9].

각각의 LiDAR 측정값과 관련된 5-m 셀의 각 변형은 Horn [10]에 의해 제안된 유한차분법을 사용하여 계산되었다. 이 방법은 LiDAR 지점의 β 를 계산하기 위하여 Borrough and McDonnell [11]에 의해 언급되었듯이 x (동-서)와 y (북-남) 방향에서 8개의 근접한 지점의 LiDAR 데이터를 유한차분 알고리즘에 적용하였다 [5].

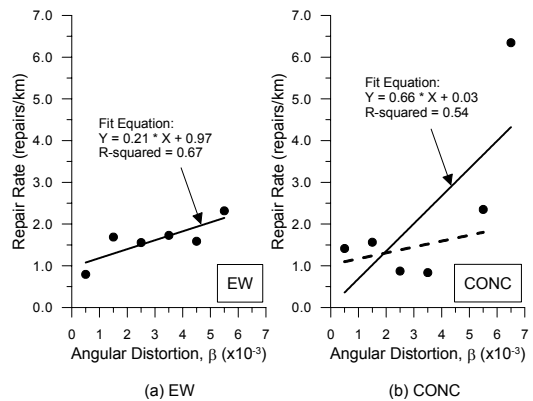


Fig. 5. Repair Rate vs. Angular Distortions for EW and CONC pipelines

특정한 재질의 하수도관과 β 에 대한 손상율의 상관관계 계산과정은 다음과 같다. 먼저 각각 5-m 셀에 있는 하수도관에 대한 손상갯수와 길이를 산정하고 1×10^{-3} 의 간격을 갖는 β 와 관련된 손상율을 계산하며 앞에서 언급한 똑같은 필터링 기술을 Fig. 5와 같이 회귀분석선과 수식 개발에 적용하였다. 이 그림에서 실선은 EW와

CONC 하수도관이 지반 각변형에 의한 손상을 나타내며 Fig. 5(b)의 CONC 손상을 나타내는 점선을 Fig. 5(a)의 EW의 손상을 나타내는 실선과 비교하면 동일한 지반 각변형의 범위내에서는 EW와 CONC 손상정도가 유사하거나 CONC 손상이 다소 작음을 알 수 있다.

2.2.2 횡방향 지반변형에 의한 손상

O'Rourke 등 [1,2]이 설명하였듯이 LiDAR 측량으로부터 유도된 횡방향 지반거동에 대한 정보는 CERA [7]를 통해서 동-서와 북-남 방향 56 m 간격으로 얻을 수 있다. LiDAR 데이터의 수평공간정밀도는 약 ±400 mm와 ±500 mm [7] 이다. 본 연구에서 사용된 데이터는 CERA [7]에서 제공된 택타닉 거동으로부터 얻어졌다. 수평방향 변형을 계산은 정사각형 요소의 각 코너에서 수평변위 데이터를 이용하여 얻어지며 Fig. 6와 같이 나타낼 수 있다 [5].

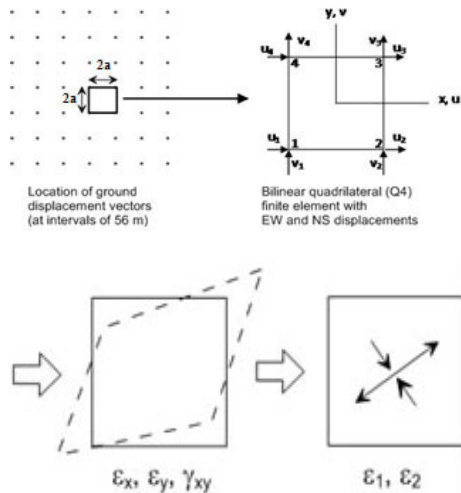


Fig. 6. Procedure of calculating ground strains from horizontal ground displacements (Jeon, 2015)

정사각형요소의 그리드는 2중 선형 사변형 요소를 갖는 유한요소로 간주된다. 각 코너의 좌표와 그에 상응하는 변위, 동-서와 북-남 방향의 변형을 (각각 ϵ_x 와 ϵ_y), 전단변형률(γ_{xy})은 선형보간법을 이용한 변위의 공간미분에 의해 얻어진다. 따라서 Cook [12]에서 설명되었듯이 각 요소의 중앙에서 수평지반변형율이 결정된다. 변형율 매트릭스는 다음과 같이 56 m x 56 m 셀 변위로부터 계산된다 [1,2,5].

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{4a^2} \begin{bmatrix} -(a-y) & 0 & (a-y) & 0 & \dots \\ 0 & -(a-x) & 0 & -(a+x) & \dots \\ -(a-x) & -(a-y) & -(a+x) & (a-y) & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ u_4 \\ v_4 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서, $u_1, v_1, u_2, \dots, v_4$ 는 Fig. 6에서 정의된 각 코너의 변위이다. x 와 y 는 이차원 공간에서의 좌표이며 a 는 정사각형 셀 길이, 56 m, 의 반이다. 공식 (3)에서 사용된 변형율을 사용하면 주변형률(ϵ_1, ϵ_2)은 다음과 같은 변형율 변환공식으로부터 계산된다 [1,2,5].

$$\epsilon_{1,2} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (4)$$

Fig. 7은 EW와 CONC 하수도관 손상율(RR)과 횡방향 지반변형에 대한 회귀식을 나타낸다. 횡방향변형율은 지반변형율의 가장 큰 절대값, ϵ_{HP} 으로서 공식 (4)에 의해 계산된다. 하수도관 손상은 먼저 기술된 β 와 같이 사용된 값들과 유사한 과정으로 스크리닝되었다. 손상의 선형회귀식을 나타낼 수 있는 하수도관의 스크리닝 충분한 데이터는 회귀분석 수행을 가능하게하며 그림에 나타나듯이 매설된 하수도관이 강성이 상대적으로 큰 CONC 하수도관에 비해 횡방향 지반변형에 의한 손상이 크나 손상의 추이는 서로 유사함을 알 수 있다.

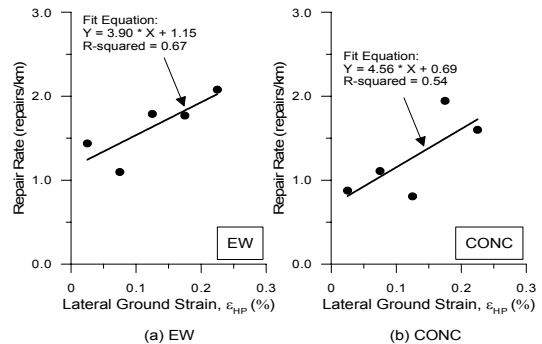


Fig. 7. Repair Rate vs. Lateral Ground Strain for EW and CONC pipelines

3. 결론

본 연구를 통하여 뉴질랜드의 2011년 2월에 발생한 Christchurch 지진정보와 지반공간분석을 통하여 주요하

게 발견된 점들을 다음과 같이 요약 할 수 있다. Christchurch 지역에 매설된 EW와 CONC 재질로 된 하수도관은 지반 각변형과 횡방향 지반변형률에 따라 유사한 경향으로 손상됨을 알 수 있으며 강성이 더 큰 CONC 하수도관의 손상이 작게 나타남을 알 수 있다. 또한, 본 연구의 하수도관 손상을 회귀분석 결과는 추후에 발생할 수 있는 지진의 경우 지반 각변형 및 횡방향 지반변형률의 영구지반변형으로 인한 매설된 EW, CONC 하수도관 손상율을 예측할 수 있다.

References

[1] T.D. O'Rourke, S.-S. Jeon, S. Toprak, M. Cubrinovski, J.K. Jung, "Underground Lifeline System Performance during Canterbury Earthquake Sequence", Proc. of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, pp. 1-24, 2012.

[2] T.D. O'Rourke, S.-S. Jeon, S. Toprak, M. Cubrinovski, M. Huges, D.M. van Ballegooy, D. Bouziou, "Earthquake Response of Underground Pipeline Networks in Christchurch, NZ", Earthquake Spectra, Vol. 30, No. 1, pp. 183-204, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1193/030413EQS062M>

[3] GNS Science. The Canterbury earthquake sequence and implications for seismic design levels. GNS Science Consultancy Report 2011/183, commissioned by the Canterbury Earthquakes Royal Commission. 92 p., 2011.

[4] Tonkin and Taylor. Personal communications with Tonkin and Taylor staff about LiDAR and observed liquefaction databases, 2012.

[5] S.-S. Jeon, "Permanent Ground Deformation induced by Christchurch Earthquake and Estimation of Underground Water Pipeline Performance in New Zealand", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 16, No. 6, pp. 4201-4207, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.6.4201>

[6] C.H., Trautmann, T.D. O'Rourke, M.D. Grigoriu, M.M. Khater, Systems Model for wastewater Supply Following Earthquakes, Lifeline Seismic Risk Analysis-Case Studies, Eguchi, R.Ed., ASCE, pp. 30-50, 1986.

[7] Canterbury Earthquake Recovery Authority [CERA] Geotechnical database for Canterbury earthquake sequence. [cited Jan. 17, 2012] Available from <https://canterburygeotechnicaldatabase.projectorbit.com> (accessed Feb. 15, 2012)

[8] M.D. Boscardin, E.J. Cording. "Building response to excavation-induced settlement", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 1, pp. 1-21, 1989.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1989\)115:1\(1\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1989)115:1(1))

[9] G.W. Clough, T.D. O'Rourke, "Construction induced movements of in-situ walls", Proc. of Specialty Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures, ASCE, pp. 439-470., 1990.

[10] B.K.P. Horn, "Hill shading and the reflectance map", Proc. of the IEEE, Vol. 69, No. 1, pp. 14-47, 1981.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/PROC.1981.11918>

[11] P.A. Burroughs, R.A. McDonnell, Principles of geographical information systems. Oxford University Press, Oxford, U.K., 333 p., 1998.

[12] Cook, R.D. Finite Element Modeling for Stress Analysis, John Wiley and Sons. 1995.

전 상 수(Sang-Soo Jeon)

[정회원]



- 1992년 6월 : Oregon State University (해양공학석사)
- 1996년 12월 : University of Colorado, Boulder (지반공학석사)
- 2002년 1월 : Cornell University (지반공학박사)
- 2002년 3월 ~ 2005년 2월 : 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원
- 2005년 3월 ~ 현재 : 인제대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>

지반, 지진, GIS