

뉴질랜드 크라이스트처치 지진에 의해 발생된 영구지반변형과 매설된 상수도관 성능평가

전상수*

¹인제대학교 건설환경공학부

Permanent Ground Deformation induced by Christchurch Earthquake and Estimation of Underground Water Pipeline Performance in New Zealand

Sang-Soo Jeon^{1*}

¹Department of Civil & Environmental Engineering, Inje University

요약 본 연구에서는 최근 뉴질랜드의 Christchurch 지역의 2011년 2월 22일의 지진규모(Mw) 6.2 지진발생 후 얻어진 데이터를 이용하여 지진에 의한 지하 상수도관 시스템의 성능에 주안점을 두고 연구를 수행하였다. 이 논문은 액상화로 인하여 발생된 영구지반변형지역과 서로 다른 재질의 상수도관에 따라 1 km 당 손상갯수로 산정되는 손상율을 액상화 지역에서의 지진발생 전후에 얻어진 높은 해상도의 라이다데이터로부터 계산된 부등침하와 횡방향 지반변형률의 관계를 통하여 산정하였다. 본 연구에서는 영구지반변형에 따른 매설된 상수도관의 지진성능을 요약하여 설명하였으며 연구결과 연성이 매우 큰 폴리에틸렌 상수도관이 매우 우수한 지진성능을 가지고 있음을 알 수 있다.

Abstract In this study, the performance of underground water pipeline system affected by earthquakes is examined by using data acquired after MW 6.2 February 22, 2011 earthquake in Christchurch, NZ. Water pipeline repair rates, expressed as repairs/km, for different types of pipe are evaluated inside the areas of which liquefaction induced by permanent ground deformation was observed and assessed relative to differential settlement and lateral ground strain, calculated from high resolution LiDAR data acquired before and after each seismic event. The earthquake performance of underground water pipeline systems associated with permanent ground deformation is summarized in this paper. The results show that highly ductile polyethylene water pipelines has a high earthquake performance.

Key Words : Angular Distortion, Earthquake, Ground Strain, Repair Rate, Water Pipeline

1. 서론

O'Rourke 등 [1,2]이 설명하였듯이 지진에 반응하는 매설된 상수도관 시스템은 두가지로 분류될 수 있다. 첫째, 지반-구조물의 상호작용이며 둘째, 네트워크 시스템 성능 및 영구적 또는 일시적인 지반 변형의 시스템 요소이다. 상수도관 손상은 액상화, 산사태, 지표면의 단층운동에 의해 발생하는 영구지반변형과 밀접한 관계가 있다. 매설된 상수도관 시스템 반응은 지진하중에 의한 지

반-구조 상호작용에 대한 구조 성능에 대한 평가와 네트워크 통합 거동에 대한 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 상수도관 반응을 시스템 관점에서 접근하였으며 뉴질랜드 Christchurch 지역에서 연속적으로 발생한 지진으로 인한 영구지반변형 및 상수도관 분포 네트워크 손상에 대한 영향 분석을 수행하였다. 최근 주요 사회기반시설물로 이루어진 이

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

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

Received March 5, 2015

Revised (1st April 6, 2015, 2nd June 9, 2015)

Accepted June 11, 2015

Published June 30, 2015

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 상수도관에 영향을 주는 영구지반변형이 넓게 분포하며 심각한 수준의 액상화 현상 등 다양한 에피소드를 동반하고 있다. 연속적인 지진에 의해 수집된 이러한 데이터는 각 지진 전 후의 수평과 수직변위를 측정할 높은 해상도의 LiDAR 데이터와 각 상수도관 손상지점의 위치 및 수천 km 매설된 상수도관의 손상기록 등의 전례없는 구체적이고 방대한 양의 정보를 제공한다. 각각의 지진에 대하여 손상갯수/km로 표현되는 매설된 상수도관 손상은 액상화에 의해 발생하는 부등침하와 횡방향 지반변형률에 따라 나타낼 수 있으며 특히 이들은 서로 다른 재질의 상수도관 종류에 따라 나타낼 수 있다. 이러한 연구결과는 추후에 모델링, 지역복구계획 및 지진영향을 고려한 시스템 개선등에 이용될 수 있다. 게다가 지반변형의 무차원 값과 관련된 매설된 상수도관 손상은 홍수, 산사태, 터널링, 깊은굴착, 그리고 물배수 또는 광산과 석유생산과정에서의 미네랄과 유체 수급과정중에 발생하는 지반침하변형 및 횡방향 지반변형으로부터의 피해를 평가하는 손상정보를 제공한다.

본 연구에서는 지리정보체계(GIS)를 이용하여 연속적으로 발생한 Christchurch 지진 시 매설된 상수도관 성능분석 결과를 나타내었다. 상수도관 재질에 따른 액상화지역내에서의 손상은 지진 전 후의 LiDAR 데이터로부터 계산된 부등침하와 횡방향 지반변형률에 따라 평가되었으며 시스템 성능에 있어서 연성이 매우 큰 polyvinly chloride (PVC) 상수도관 성능 분석 결과를 기술하였다.

2. 상수도관 성능평가

2.1 영구지반변형과 상수도관 데이터베이스

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

영구지반변형 관점에서의 매설된 상수도관 지진 성능 평가의 일관성을 갖기 위해 영구지반변형으로 인한 Christchurch 지역에 매설된 상수도관 손상평가는 액상

화 지역 안에서 수행하였다. 횡방향으로 넓게 분포한 지반변형, 지표면 부등침하, 모래 분출의 액상화 영향에 관한 체계적 지도 제작은 Christchurch 지역에서 발생한 지진 전 후로 수행되었다 [4]. 지도제작은 해당 지역의 지도제작 범위에 의해 한정되며 지반 깊이에 따른 액상화 또는 잠재적 액상화 가능 지역에 관계없이 가시화된 지표면 자료에 의해서만 이루어졌다. 지도제작은 각 지진 후 경험 많은 지반공학자와 지질학자들로 구성된 선별된 팀에 의해 이루어졌다.

각 지진 전의 약 1,700 km 길이의 상수도관의 위치 전자파일과 상수도관 손상정보는 Christchurch 도시 의회의 Christchurch 사회기반시설 재건축 팀 (SCIRT)에 의해 제공되었다. Christchurch 상수도관 시스템은 본관과 간선관으로 구분된다. 본관은 시스템의 가장 큰 흐름을 운송하는 상수도관으로서 전형적으로 75mm와 600mm 사이의 직경을 가지고 있으며 간선관은 그 보다 더 작은 관이며 본관에서 갈라져서 집으로 물을 공급하는 한정된 수의 상수도관을 말한다. 본 연구에서는 주로 본관의 손상에 중점을 두었다.

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

Fig. 1은 Christchurch 지진 시 관측된 액상화지역과 LiDAR 수직지반변위 측정지역 중첩을 보여주며 Fig. 2는 액상화지역과 LiDAR 횡방향 지반변형률, Fig. 3은 액상화지역과 상수도관 시스템 및 손상지점을 나타낸다. 또한, Fig. 4는 본 연구에서 분석한 각각 다른 상수도관 재질 (asbestos cement (AC), cast iron (CI), polyvinyl chloride (PVC))에 따른 손상을 계산에 사용된 상수도관 분포시스템과 손상지점을 나타낸다. 부등수직변위와 함께 손상을 관계는 이 그림에 묘사되었듯이 관측된 액상화 지역과 LiDAR 측정값들이 교차되는 지역에서 산정

되었다.

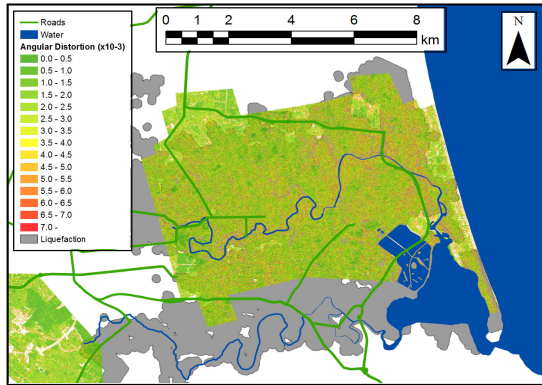


Fig. 1. Coverage of liquefaction and measured LiDAR vertical displacement for Christchurch earthquake

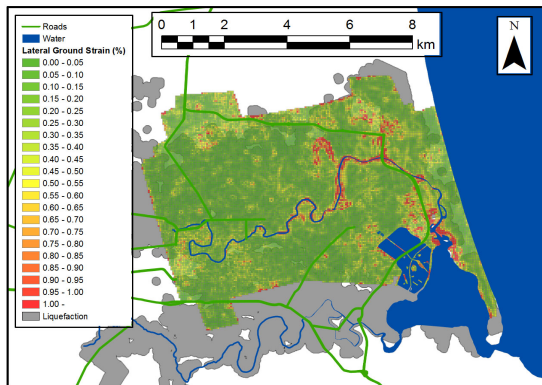


Fig. 2. Coverage of liquefaction and measured LiDAR Lateral ground strain for Christchurch earthquake

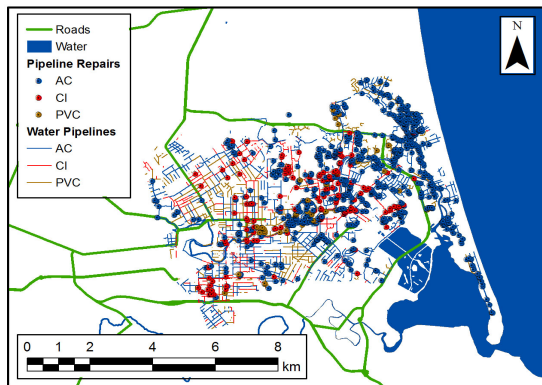


Fig. 3. Water pipeline distributions and repairs in both liquefaction areas and collected LiDAR data areas

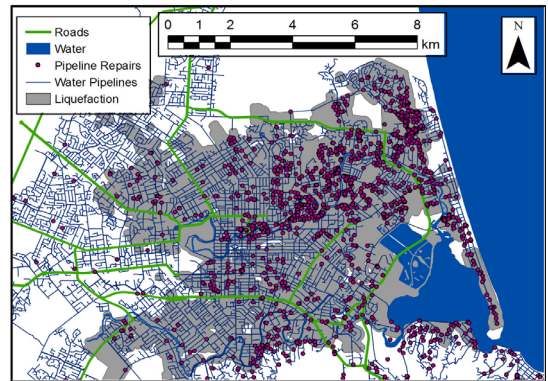


Fig. 4. AC, CI, and PVC water pipeline distributions and repairs in liquefaction areas or collected LiDAR data areas

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

2.2 매설된 상수도관 성능평가

O'Rourke 등 [1,2]이 설명하였듯이 매설된 상수도관 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. 지반변형에 관한 상수도관의 지반-구조 상호작용에 관한 기존 연구의 분석결과에 따르면 상당한 크기의 인발력이 지하에 매설된 상수도관 종방향으로 100 - 200 m 구간 전달됨을 알 수 있다 [5]. 액상화 지역 경계선 즉 전횡적으로 주택가 길 길이의 반 정도 되는 125 m 까지 액상화 지역으로 규명하여 영구지반변형에 따른 상수도관 손상을 평가하였다. 이것은 액상화 현상 표면증후의 경계면에 작용하는 인발력 전달 거리와도 일치한다.

위에서 언급한 데이터베이스와 필터링 과정들을 사용

하여 얻어진 Christchurch 지진의 통계 데이터는 AC, CI, PVC 재질의 상수도관에 관한 정보를 제공한다. 이러한 정보는 매설된 상수도관 길이, 전체 손상갯수, 액상화 지역과 LiDAR 데이터 지역에서의 매설된 상수도관 손상갯수, 액상화 및 LiDAR 데이터 지역 그리고 시스템에서의 상수도관 손상율을 제공한다. 각 지진 후 시스템 변화를 반영하는 상수도관 종류는 약간의 차이가 있다.

통계학적으로 각 상수도관에 따라 큰 차이점이 있으며 먼저 매설된 AC와 CI 상수도관의 손상율은 PVC 상수도관 보다 2배에서 4배까지 손상율이 컸다. 이러한 손상율은 손상갯수를 상수도관 길이로 나누어 표현되며 손상율의 크기를 통하여 상수도관 재질에 따른 상대적 취약성을 알 수 있다. 상수도관 손상율은 일반적으로 비액상화지역에서의 영향에 비해 액상화가 관측된 지역에서 10배에서 30배까지 컸다.

매설된 상수도관은 영구지반변형 영향에 의해 손상을 받게 되므로 본 연구를 통하여 부등침하와 횡방향 지반변형율에 따른 상수도관 손상평가를 수행하였다. 영구지반변형 평가는 부등수직지반변위와 횡방향 지반변형율에 따른 손상을 상관관계를 통하여 이루어졌으며 이러한 상관관계를 개발하는 과정들과 회귀분석 결과들을 아래와 같이 기술할 수 있다.

부등수직지반변위와 횡방향 지반변형율에 따른 손상을 관계를 평가하기 위하여 액상화 지역안에 있는 특정한 상수도관의 총 손상갯수를 그리드 셀 안에 분포한 상수도관의 총 길이로 나누어 손상율을 계산하였다. 손상율 통계 결과의 정확도는 각 그리드 셀 간격 샘플의 상수도관 길이에 민감함을 알 수 있으며 의미 있는 상관관계를 갖는 충분한 상수도관 길이를 선택하기 위하여 기존의 연구자들에 의해 채택된 모델은 Poisson 분포를 가정하였다 [6]. O'Rourke 등 [2]이 설명하였듯이 O'Rourke and Deyoe [7]가 제안한 것과 Poission 분포를 이용한 표본길이 기준은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(1-\alpha)p \leq (RR)x \leq (1+\alpha)p \quad (1)$$

여기서 p 는 “실제(true)” 손상갯수이며 α 는 실제(p)의 %이다. RR 은 손상율이며 x 는 표본길이이다. Poission 분포에서 평균값, $\mu = (RR)x$, 그리고 표준편차, $\sigma = [(RR)x]^{1/2}$ 이다.

표본손상갯수가 실제값의 $\pm \alpha$ 안에 있을 확률(예, 신

뢰도)은 표본손상갯수의 중심극한정리에 부합한 정규분포에 의해 결정된다. β_c 의 신뢰도 간격과 그에 상응한 표준정규분포, $\phi^{-1}(\beta_c)$ 를 갖는 공식 (1)의 하계(lower bound)는 다음과 같이 나타낼 수 있으며

$$\mu - \phi^{-1}(\beta_c)\sigma = (1-\alpha)p \quad (2)$$

그리고 상계(upper bound)는 아래와 같이 기술할 수 있다.

$$\mu + \phi^{-1}(\beta_c)\sigma = (1+\alpha)p \quad (3)$$

공식 (1)에서 (3)까지를 통합하고 $p = (RR)x$ 를 적용하면 다음과 같은 표본길이, x 를 얻을 수 있다.

$$x \geq [\phi^{-1}(\beta_c)]^2/\alpha^2(RR) \quad (4)$$

매설된 상수도관의 손상을 데이터는 75 ~ 95% 신뢰도, $\alpha = 50\%$ 와 공식 (4)를 사용하여 스크리닝 하였다. 예를 들자면, 75% 신뢰도, $\alpha = 50\%$, $RR = 1 \text{ repair/km}$ 를 갖는 최소 표본길이를 결정하는 경우 $\phi^{-1}(75\%) = 1.151$ 그리고 공식 (4)를 이용하여 5.299 km를 얻는다. 데이터 스크리닝을 통하여 특정한 범위의 영구지반변형에 상응하는 매설된 상수도관의 특정한 길이를 얻을 수 있다. 얻어진 특정길이의 상수도관 내의 손상갯수는 $RR = 1 \text{ repair/km}$ 결과를 가져오며 표본기준은 표본길이가 5.299 km 보다 같거나 커야한다.

모든 데이터에 대한 상수도관 손상율과 부등수직변위의 상관관계를 나타내는 회귀분석선과 수식은 신뢰도 75 ~ 95%와 $\alpha = 50\%$ 로 계산되었다.

2.2.1 부등수직지반변위에 의한 손상을

관측된 액상화 지역에서의 부등수직지반변위는 높은 해상도의 LiDAR 수직변위 데이터이며 이는 Canterbury 지진복구관리기관(CERA, 2012)을 통하여 얻어졌다 [8]. 상수도관 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. 지진복구관리기

관을 통하여 얻어진 수직변위는 5m 간격으로 제공되었으며 지질구조상의 용기와 침하를 고려하여 계산되었고 수직 LiDAR 데이터는 ±70 mm와 ±150 mm 사이의 정확도를 갖는다 [4].

지반의 각변형(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. 상수도관 손상에 대한 이러한 각 변형을 사용한 경우 몇 가지의 잇점이 있는데 먼저 이 변수는 적절한 차원으로 측정될 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 [9,10].

각각의 LiDAR 측정값과 관련된 5-m 셀의 각 변형은 Horn [11]에 의해 제안된 유한차분법을 사용하여 계산되었다. 이 방법은 LiDAR 지점의 β 를 계산하기 위하여 Borrough and McDonnell [12]에 의해 언급되었듯이 x (동-서)와 y (북-남) 방향에서 8개의 근접한 지점의 LiDAR 데이터를 유한차분 알고리즘에 적용하였다.

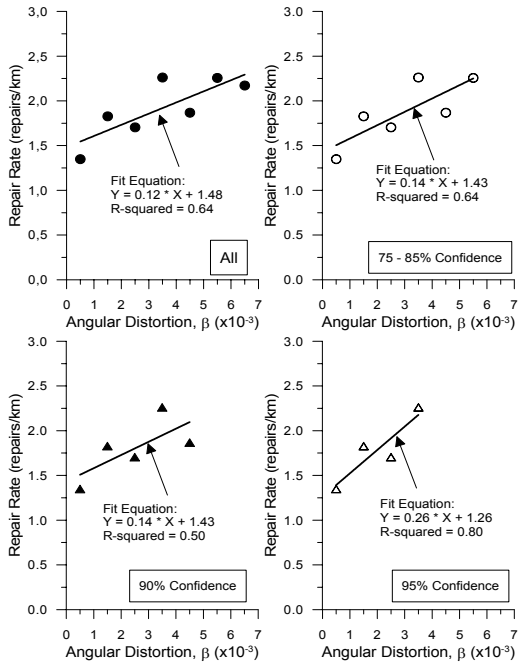


Fig. 5. Repair Rate vs. Angular Distortions for AC pipelines associated with different confidence levels

특정한 재료의 상수도관과 β 에 대한 손상율의 상관 관계 계산과정은 다음과 같다. 먼저 각각 5-m 셀에 있는 상수도관에 대한 손상갯수와 길이를 산정하고 1×10^{-3} 의 간격을 갖는 β 와 관련된 손상율을 계산하며 앞에서 언급한 똑같은 필터링 기술을 Figs. 5-7과 같이 회귀분석선과 수식 개발에 적용하였다. 여기에서 회귀분석선과 수식은 산술 스케일이며 이 그림에 나타났듯이 매설된 PVC 상수도관에 비해 AC와 CI 상수도관은 쉽게 부서지고 상대적으로 작은 부등수직변위에서의 급격한 손상을 받기 쉽다는 것을 알 수 있다. 회귀분석 결과 통계학적으로 신뢰도가 높은 r^2 임을 알 수 있다.

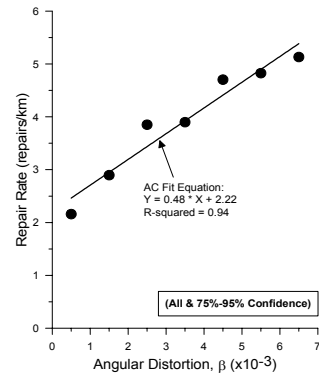


Fig. 6. Repair Rate vs. Angular Distortions for CI pipelines associated with different confidence levels

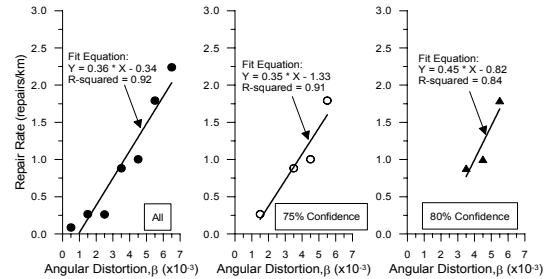


Fig. 7. Repair Rate vs. Angular Distortions for PVC pipelines associated with different confidence levels

Fig. 8은 상수도관 재료와 가장 큰 r^2 값을 갖는 AC, CI, PVC 상수도관 손상율과 각 변형 회귀분석결과를 비교하였으며 AC 상수도관이 CI 상수도관보다 약 2배의 손상율로서 부등수직변위에 특별히 취약함을 보여준다.

이러한 취약성은 상수도관 접합부분이 상대적으로 약한 AC 상수도관 이음고리에 기인한 것이다. AC 상수도관 이음고리는 부등침하로 인하여 상수도관의 상대적 회전각에 의해 균열이 발생하기 쉬우나 반면에 CI 상수도

관은 플러그 이음부에서 벨 끝에 추가적인 두께의 벽체가 있어 상대적 회전각에 의해 발생한 응력집중에 대해 상대적으로 매우 큰 저항력을 갖는다.

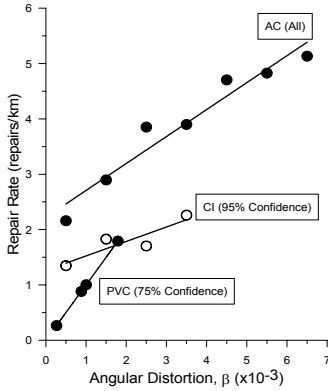


Fig. 8. Repair Rate vs. Angular Distortions for AC, CI, PVC pipelines associated with statistically high r^2 values

2.2.2 횡방향 지반변형률에 의한 손상률

O'Rourke 등 [1,2]이 설명하였듯이 LiDAR 측량으로부터 유도된 횡방향 지반거동에 대한 정보는 CERA [8]를 통해서 동-서와 북-남 방향 56 m 간격으로 얻을 수 있다. LiDAR 데이터의 수평공간정밀도는 약 ± 400 mm와 ± 500 mm [8] 이다. 본 연구에서 사용된 데이터는 CERA [8]에서 제공된 텍타닉 거동으로부터 얻어졌다. 수평방향 변형률 계산은 정사각형 요소의 각 코너에서 수평변위 데이터를 이용하여 얻어지며 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다.

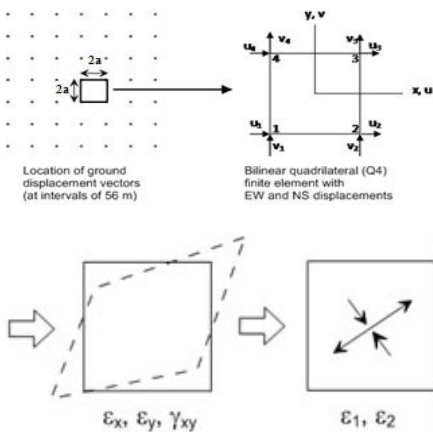


Fig. 9. Procedure of calculating ground strains from horizontal ground displacements

정사각형요소의 그리드는 2중 선형 사변형 요소를 갖는 유한요소로 간주된다. 각 코너의 좌표와 그에 상응하는 변위, 동-서와 북-남 방향의 변형률(각각 ϵ_x 와 ϵ_y), 전단변형률(γ_{xy})은 선형보간법을 이용한 변위의 공간미분에 의해 얻어진다. 따라서 Cook [13]에서 설명되었듯이 각 요소의 중앙에서 수평지반변형률이 결정된다. 변형률 매트릭스는 다음과 같이 56 m x 56 m 셀 변위로부터 계산된다.

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{4a^2} \begin{bmatrix} -(a-y) & 0 & (a-y) & 0 & \dots \\ 0 & -(a-x) & 0 & -(a+x) & \dots \\ -(a-x) & -(a-y) & -(a+x) & (a-y) & \dots \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \vdots \\ u_4 \\ v_4 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

여기서, $u_1, v_1, u_2, \dots, u_4$ 는 Fig. 9에서 정의된 각 코너의 변위이다. x 와 y 는 이차원 공간에서의 좌표이며 a 는 정사각형 셀 길이, 56 m, 의 반이다.

공식 (5)에서 사용된 변형률을 사용하면 주변형률(ϵ_1, ϵ_2)은 다음과 같은 변형률 변환공식으로부터 계산된다.

$$\epsilon_{1,2} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (6)$$

Fig. 10은 신뢰도에 따른 AC 상수도관 손상률(RR)과 횡방향 지반변형률에 대한 회귀식을 나타낸다. 횡방향변형률은 지반변형률의 가장 큰 절대값, ϵ_{HP} , 으로서 공식 (6)에 의해 계산된다. 상수도관 손상률은 먼저 기술된 β 와 같이 사용된 값들과 유사한 과정으로 스크리닝되었다.

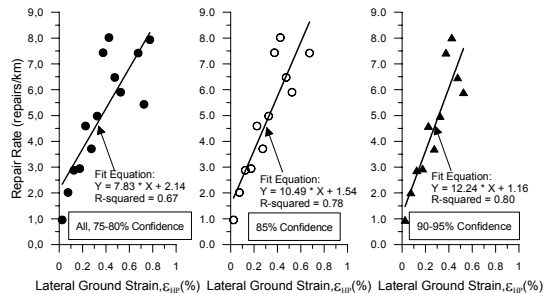


Fig. 10. Repair Rate vs. Lateral Ground Strain for AC pipelines associated with different confidence levels

손상률의 선형회귀식을 나타낼 수 있는 AC 상수도관의 스크리닝된 충분한 데이터는 회귀분석 수행을 가능하게 하며 그림에 나타나듯이 매설된 상수도관의 손상과 횡

방향 지반변형의 밀접한 상관관계는 통계적으로 높은 r^2 값을 통해 알 수 있다.

3. 결론

본 연구를 통하여 2011년 2월에 발생한 Christchurch 지진정보와 지반공간분석을 통하여 주요하게 발견된 점들을 다음과 같이 요약 할 수 있다. Christchurch 지역에 매설된 AC와 CI 상수도관의 손상율은 PVC 상수도관보다 2배에서 4배 큼을 알 수 있다. 상수도관 손상율과 지반 각 변형의 상관관계 회귀분석 결과는 통계적으로 신뢰성이 높아 추후에 발생할 수 있는 지진의 경우 부등수 직변위 및 횡방향 지반변형율의 영구지반변형으로 인한 매설된 AC, CI, PVC 상수도관 손상율을 예측할 수 있다. Christchurch 지진으로 인하여 발생한 약 1 km당 1개의 손상은 예외적으로 매우 높은 상수도관 손상율이며 총 1645개의 손상을 가져왔다. 상수도관을 매우 높은 수준으로 용접한 경우에는 상수도관 단면과 용접 이음부 사이에 연성이 생겨 상수도관 손상율을 감소시킬수 있다. 본 연구를 통하여 중간 또는 높은 밀도의 PVC 상수도관은 높은 인장변형율을 갖으므로 상수도관 손상이 작게 나타남을 알 수 있다.

References

[1] T.D. O'Rourke, S.-S. Jeon, S. Toprak, M. Cubrinovsk, 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. Cubrinovsk, 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.

[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] M.J. O'Rourke, X. Liu, "Response of buried pipelines subject to earthquake effects". *Monograph No. 3, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research*, Buffalo, NY, USA. 272 p., 1999.

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

[7] M. O'Rourke, E. Deyoe, "Seismic Damage to Segmented Buried Pipe", *Earthquake Spectra*, Vol. 20, No. 4, pp. 439-470, 2004.

[8] 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)

[9] 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.

[10] 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.

[11] B.K.P. Horn, "Hill shading and the reflectance map", *Proc. of the IEEE*, Vol. 69, No. 1, pp. 14-47, 1981.

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

[13] 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 : 한국 도로공사 도로교통기술원 책임연구원
- 2005년 3월 ~ 현재 : 인제대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>
지반, 지진, GIS