

뉴질랜드 캔터베리 지역 연속지진에 의해 발생한 일시지반변형과 매설된 상수도관 성능평가

전상수*

¹인제대학교 건설환경공학부

Transient Ground Deformation induced by Sequential Earthquakes and Estimation of Underground Water Pipeline Performance in Canterbury, New Zealand

Sang-Soo Jeon^{1*}

¹Department of Civil & Environmental Engineering, Inje University

요약 본 연구는 최근 뉴질랜드 Canterbury 지역에서 연속적으로 일어난 지진의 지진계 기록과 지리정보체계(GIS)의 정규 크리깅을 이용하여 최대지반속도(PGV)와 기하평균최대지반속도(GMPGV) 컨투어를 생성하였고 이들의 공간적 패턴과 특징을 조사하였다. 지진발생 후 얻어진 데이터를 이용하여 지하의 상수도관 시스템의 성능에 주안점을 두고 연구를 수행하였다. 기하평균최대지반속도의 공간분포와 일시적인 지반거동으로 인하여 발생한 상수도관 시스템의 GIS 중첩과 비액상화지역의 기하평균최대지반속도와의 관계를 통하여 서로 다른 재질의 상수도관에 따른 1 km 당 매설된 상수도관 손상 개수로 산정되는 손상율을 산정하였다. 또한, 본 연구는 매설된 상수도관의 지진성능을 요약하여 설명하였다.

Abstract The spatial patterns and characteristics of these sequential earthquakes and ground motions induced by the earthquakes are examined by contours of peak ground velocity (PGV) and geometric mean peak ground velocity (GMPGV) using both ordinary kriging in geographical information system (GIS) and data, the records obtained from strong motion stations, acquired after recent sequential earthquakes in Canterbury, New Zealand (NZ). The performance of underground water pipeline system is examined by using data acquired after earthquakes. The spatial distribution of GMPGV is superimposed on water pipeline repairs throughout the water distribution system in areas affected principally by transient ground motion using GIS and then water pipeline repair rates, expressed as repairs/km, for different types of pipe are evaluated relative to the estimated GMPGV outside liquefaction areas. The earthquake performance of underground water pipeline systems is summarized in this study.

Key Words : Earthquake, Geometric Mean Peak Ground Velocity, GIS, Repair Rate, Water Pipeline

1. 서론

최근 뉴질랜드 Canterbury 지역의 2010년과 2011년 연속적으로 발생한 지진들은 Christchurch 지역의 일시 지반변형(transient ground deformation) 및 액상화를 포함한 영구지반변형(permanent ground deformation)을 발생시켰으며 이러한 지반변형은 심각한 사회기반시설

물 및 인명피해를 가져왔다. 본 연구를 통하여 연속적으로 발생한 지진의 특성을 조사하고 공간통계모델링 방법 중의 하나인 정규크리깅 알고리즘을 이용하여 지반운동의 특성을 산정하였다.

기존의 연구자들은 1994년 미국 LA Northridge 지진에 의해 발생하는 지반운동의 공간적 변화를 정규크리깅(ordinary kriging) 보간법을 이용한 기하평균최대지반속

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

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

Received January 14, 2015

Revised February 26, 2015

Accepted April 9, 2015

Published April 30, 2015

도(GMPGV) 컨투어 재생 및 가시화 그리고 이들의 상관관계를 규명하였다 [1,2].

본 연구에서는 지반운동 산정에 사용된 정규 크리깅의 일반적 개념과 지리정보체계(GIS) 정규크리깅 알고리즘을 사용하여 컨투어를 생성하는 과정을 모사하였다. 일반적으로 기하평균최대지반속도가 지진학자들에 의해 널리 사용되고 있으며 본 연구에서는 기하평균최대지반속도 생성에 초점을 두었다. 또한 뉴질랜드 Canterbury 지역의 지진계 기록을 통하여 연속적으로 발생한 지진들의 특성을 나타내었으며 이 지역의 일시지반변형을 조사하기 위하여 지진계에 기록된 데이터와 GIS 정규크리깅 보간법의 스페리컬 베리오그램 모델(spherical variogram model)을 이용하여 기하평균최대지반속도를 생성하였고 이들의 공간적 패턴과 특징을 기술하였다.

지진으로 인한 매설된 상수도관 시스템의 반응은 지반-구조물의 상호작용과 지형학적으로 넓게 분포된 네트워크 시스템 성능 및 영구적 또는 일시적인 지반 변형의 시스템 요소를 포함한다 [3,4]. 매설된 상수도관 손상은 액상화, 산사태, 지표면의 단층운동에 의해 발생하는 영구적지반변형 및 수 cm 또는 더 작은 길이의 잔류변형을 일으키는 일시적 지반변형과 밀접한 관계가 있다. 매설된 상수도관 시스템 반응은 크게 두 가지이며 첫째는 지진하중에 의한 지반-구조 상호작용에 대한 구조 성능에 대한 평가, 둘째는 네트워크 통합 거동에 대한 시스템 성능 평가이다. O'Rourke 등 [5]이 강조하였듯이 이 두 가지는 서로 매우 다르고 구조 및 시스템의 특징, 공간 다양성, 재료에 따른 불확실성, 손상상태, 네트워크 흐름 법칙 그리고 시스템의 작용 논리와 관계가 있다. 본 연구에서는 매설된 상수도관 반응을 시스템 관점에서 접근하였으며 Christchurch 지역에서 연속적으로 발생한 지진으로 인한 일시지반변형 및 상수도관 분포 네트워크 손상에 대한 영향 분석을 수행하였다. 최근 주요 사회기반 시설물로 이루어진 뉴질랜드의 Canterbury 지역 도시에 짧은 기간에 연속적으로 발생하고 상당히 큰 지반운동을 유발한 지진충격이라는 점에서 전례 없는 사례라고 볼 수 있다. 연속적인 지진에 의해 수집된 이러한 데이터는 지진계의 기록을 통한 지반운동 데이터와 각각의 매설된 상수도관 손상지점의 위치 및 수천 km 매설된 상수도관의 손상기록 등의 전례 없는 구체적이고 방대한 양의 정보를 제공하였다. 각각의 지진에 대하여 손상 개수/km로 표현되는 매설된 상수도관 손상은 기하평균최대지반

속도에 따라 나타낼 수 있으며 특히 이들은 서로 다른 재질의 상수도관 종류에 따라 나타낼 수 있다. 이러한 연구결과는 추후에 모델링, 지역복구계획 및 지진영향을 고려한 시스템 개선 등에 이용될 수 있다.

본 연구에서는 지리정보체계를 이용하여 연속적으로 발생한 Canterbury 지진 시 매설된 상수도관 성능 분석 결과를 나타내었다. 상수도관 재질에 따른 손상은 비액상화지역에서 기하평균최대지반속도에 따라 평가가 이루어졌다.

2. 일시지반변형 특성

2.1 뉴질랜드 Canterbury 지역의 지진특성

지진규모(M_w) 7.1 크기의 Darfield 지진은 2010년 9월 4일에 발생하였으며 수천번의 지진규모(M_w) 6.2 크기 여진이 뉴질랜드의 Christchurch의 지역에서 기록되었다. 이러한 지진들은 Canterbury 지역에서 연속적으로 발생한 지진으로서 [6]이들의 두드러진 특징들에 대한 연구가 지진학적 그리고 지반공학적 관점에서 활발히 이루어졌다 [3-5,7-10].

Fig. 1은 GNS Science [6]에서 제공된 2010년 9월 4일 지진규모(M_w) 7.1의 Darfield 지진, 2011년 2월 22일 지진규모(M_w) 6.2의 Christchurch 지진, 2011년 6월 13일 지진규모(M_w) 6.0의 지진 및 Canterbury 지역의 단층과 진앙지를 나타낸다. 2011년 6월 13일의 지진규모(M_w) 6.0은 지진규모(M_w) 5.3 이후에 발생하였다. 본 연구에서는 처음에 일어난 이러한 세 개의 연속적인 지진에 초점을 두었다. 또한 GNS science [11]에 의해 Canterbury 지역의 연속적인 지진 시 매설된 40개의 지진계 위치 및 Christchurch 지역을 나타낸다. Darfield 지진과 두 개의 즉 Christchurch 와 2011년 6월 13일에 발생한 지진에 의해 58개와 50개의 지반운동 기록이 각각 얻어졌으며 Christchurch 지역의 각 지진 시 측정된 지진계는 약 11 km²에 1개의 지진계가 설치되어 Northridge 지진의 약 30 km²에 1개의 지진계 설치에 비해 상대적으로 매우 높은 밀도로 설치되었음을 알 수 있다.

최대지반속도(PGV)는 각 지진계에서 기록된 두 직각 방향의 수평방향 지반속도에서 최대값이며 기하평균최대지반속도(GMPGV)는 두 개의 최대 지반속도의 자연

로그 평균값으로 유도된다. Canterbury 지진 시 수평방향 지반속도 시간이력은 GNS Science [11]로부터 0.1-0.25 Hz와 24.5-25.5 Hz의 필터 밴드를 사용하여 데이터가 수집되었다.

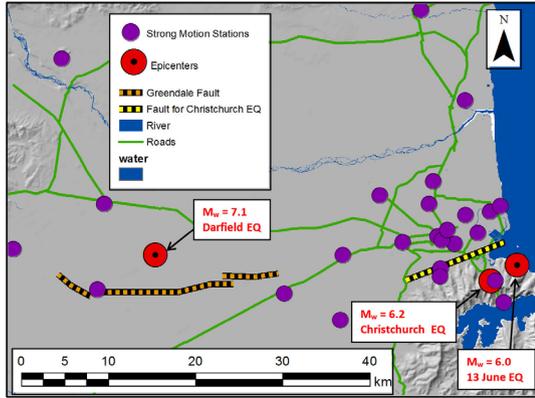


Fig. 1. Map of epicentral area affected by the Canterbury earthquakes

2.2 일시지반변형

GIS를 이용하여 최대지반속도 및 기하평균최대지반속도 지도를 생성할 때 Fig. 1에 나타난 40개의 지진계의 기록과 더불어 Darfield 지진과 두 개의 Christchurch 지진 및 2011년 6월 13일 지진의 경우 각각 추가적으로 18개와 10개의 지진계 기록을 이용하였다. 추가적인 기록은 Fig. 1에서와 같이 이 지역의 40 km이내의 지진계에 예측된 Geonet로부터 구할 수 있었다. 또한 이러한 기록들은 연구대상 지역의 경계근처에서 보간법 개선에도 이용되었다.

2.3 정규크리깅 보간 알고리즘

지진계로부터 얻은 기록으로부터 기하평균최대지반속도 컨투어선을 생성하였으며 이러한 선들은 보간 알고리즘을 이용하여 그림으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 이 보간 알고리즘의 하나인 크리깅(kriging) 보간법을 이용하였다. GIS 공간분석 적용과정을 설명하면 먼저 지진계가 위치한 연구대상지역에 직사각형 또는 정사각형의 그리드를 생성하고 각 지점에서의 값 또는 교차지점들의 값은 이미 존재하는 기존의 값들을 이용한 크리깅 분석에 의해 결정한다. 이렇게 그리드의 각 지점 값을 결정하고 컨투어를 생성한다.

크리깅은 미지수값들을 예측할 때 기존의 지점값들

주위에서 서로 다른 가중값을 산정하며 가장 가까운 지점의 기존 값들이 가장 큰 가중값을 갖는다. 크리깅 가중값은 데이터의 공간 패턴을 수량화하여 개발되는 베리오그램으로부터 유도되며 크리깅 보간법의 과정에 대해 다음과 같이 간단하게 설명할 수 있다 [12].

$$Z(s) = \mu + \epsilon'(s) \quad (1)$$

여기에서 $s = (x, y)$ 는 지점이며 $Z(s)$ 는 그 지점에서의 값이다. 이 모델은 데이터의 일정한 평균값과, μ , 공간에 따라 달라지는 무작위 오차 $\epsilon'(s)$ 에 기초를 둔다. 무작위 과정의 $\epsilon'(s)$ 는 본질적으로 변화가 없는 것으로 가정하며 예측된 값은 데이터의 가중치 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{Z}(s_o) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \quad (2)$$

여기서 $Z(s_i)$ 는 i 번째 지점에서의 값, λ_i 는 i 번째 지점에서의 미지의 가중치, s_o 는 예측지점, N 은 기존에 존재하는 값의 지점 총 개수이다.

여러 지점에서 값을 예측할 때 몇몇 값들은 실제 값보다 약간 크거나 작다. 평균적으로 예측 값과 실제 값 사이의 차이가 없으므로 예측 값은 편중되지 않은 것으로 간주되며 가중치(λ_i)의 합은 1이어야 한다. 이러한 제한점을 사용하여 실제값($Z(s_o)$)과 예측치($\sum \lambda_i Z(s_i)$)와의 차이가 가능한 한 작아야 하며 이것은 크리깅 공식의 통계학적 기댓값($E(Z)$)을 최소화함에 의해 얻어진다.

$$E(Z) = \left[Z(s_o) - \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i) \right]^2 \quad (3)$$

기댓값 즉 평균값을 최소화함으로써 크리깅 예측치는 가능한 한 미지수값에 가까워진다. 이러한 최소화 과정은 다음과 같은 일반적인 수식으로 표현된다.

$$\Gamma \times \lambda = g \quad (4)$$

Γ 행렬은 모든 쌍으로 된 샘플 지점 사이에서 모델된 베리오그램 값을 포함하며 λ 는 크리깅 가중벡터를 나타낸다. 벡터 g 는 이미 존재하는 샘플 지점과 예측 지점

사이에서 모델된 값을 말한다.

본 연구에서 사용된 최대지반속도 그리드 셀의 미지의 지점값들을 예측하기 위한 네 단계의 정규크리깅 지구통계 계산과정은 다음과 같다.

1. 경험적 베리오그램 계산: 두 지점 사이의 거리와 최대지반속도 근의 차를 계산한다. 두 지점 사이의 거리는 유클리디언 (Euclidean) 거리로서 표현되며 다음으로 제곱 평균값 차이 [(지점 i 에서의 최대지반속도 - 지점 j 에서의 최대지반속도)²]에 0.5를 곱한 경험적 반분산을 계산한다. 데이터가 많은 경우에는 통제할 수 없을 정도로 많은 지점들이 증가하게 되므로 두 지점들의 쌍을 그룹화한 특정한 범위의 거리를 빈(bin)으로 정의한다.
2. 모델 적용: 빈의 평균거리와 평균 반분산을 그래프 상에 나타낸다 (경험적 베리오그램). 경험적 베리오그램 값들은 음의 값을 갖는 표준오차로 인하여 Γ 행렬에 직접 사용 될 수 없으므로 모델을 경험적 베리오그램에 적용시켜 다양한 거리에서의 베리오그램 값을 결정한다.
3. 행렬 계산: 정규크리깅에 대한 행렬에 대한 설명은 앞에서 설명하였듯이 Γ 행렬을 계산한 후 예측하려는 지점 주위에 이미 존재하는 샘플 값들의 가중치를 포함하는 λ 를 계산하는 것이 필요하다. 그러므로 다음과 같은 행렬 대수학을 수행한다.

$$\lambda = \Gamma^{-1} \times g \quad (5)$$

Γ^{-1} 는 Γ 의 샘플 역행렬이며 다음으로 g 벡터는 예측하려는 지점에서 만들어지며 예측하려는 지점과 기존에 존재하는 값 지점의 거리를 계산하고 반분산 수식으로부터 적절한 반분산을 결정하면 Γ 행렬과 g 벡터는 만들어지며 크리깅 가중 벡터(λ)를 계산할 수 있다.

4. 예측 값 결정: 기존에 존재하는 값의 가중치와 Z값들을 곱한 값을 합하여 예측하려는 지점의 Z값을 결정한다.

2.4 일시지반변형의 공간분포

본 연구에서는 Northridge 지진과 뉴질랜드 Canterbury 지진 데이터에 의해 생성된 최대지반속도와 기하평균최대지반속도와와의 상관관계를 비교·검토한 결과, Jeon

and O'Rourke [2]이 1994년 Northridge 지진 데이터로부터 계산한 최대지반속도 = 1.21 기하평균최대지반속도 회귀분석결과와 동일하였다.

Canterbury 지역의 기하평균최대지반속도 공간분포는 Jeon and O'Rourke [2]이 Northridge 지진의 최대지반속도 공간분석 개발에 사용된 스펙트럴 베리오그램의 정규크리깅을 사용하여 산정하였다.

Figs. 2 - 4는 Darfield, Christchurch, 2011년 6월 13일 지진 시 지진계 기록과 정규크리깅을 이용하여 산정된 최대지반속도 및 기하평균최대지반속도의 지역적 분포를 나타낸다. 이 두 지반속도의 컨투어(contour) 간격은 10 cm/sec이고 최대지반속도 컨투어 사이의 지역은 색깔로 기하평균최대지반속도는 컨투어선으로 표시되었으며 최대지반속도가 클수록 진한색에 가까워진다. 두 지반속도의 컨투어는 상당히 흡사함을 알 수 있으며 Northridge 지진시의 두 지반속도 컨투어선의 차이와 흡사함을 알 수 있다.

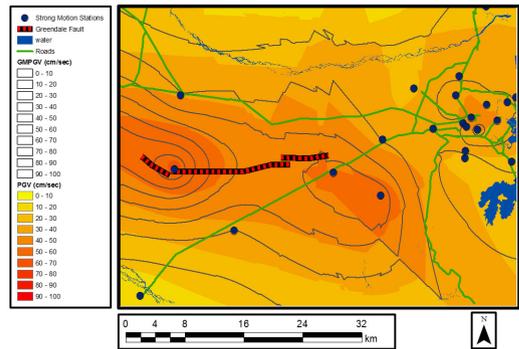


Fig. 2. Estimated spatial distribution of PGV and GMPGV in Canterbury region for Darfield earthquake

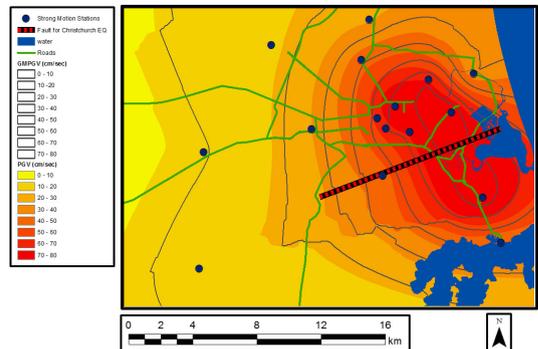


Fig. 3. Estimated spatial distribution of PGV and GMPGV Christchurch region for Christchurch earthquake

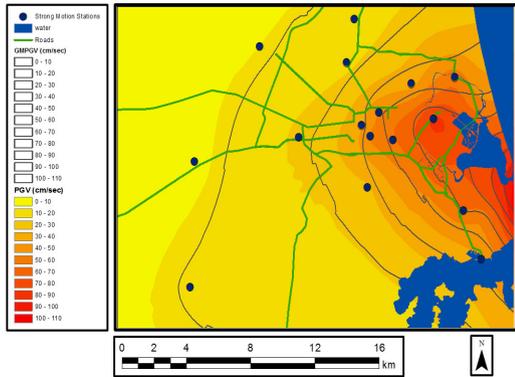


Fig. 4. Estimated spatial distribution of PGV and GMPGV in Christchurch region for 13 June earthquake

Fig. 2의 Darfield 지진에 의한 지반속도는 Greendale 단층대 지역부근에서 매우 크고 단층대에서 이격거리가 커질수록 작아짐을 알 수 있다. 특히 Christchurch 지역에서는 최대값이 40 cm/sec이며 아주 작은 지역에서 나타남을 알 수 있다. 마찬가지로 Fig. 3의 Christchurch 지진 시 단층대 주위로 큰 지반속도가 나타나며 2011년 6월 13일의 지진은 Christchurch로부터 약 10 km 떨어진 곳에서 발생하여 해안가에서 가장 큰 지반속도가 관찰됨을 Fig. 4를 통해서 알 수 있다.

3. 상수도관 성능평가

3.1 일시지반변형과 상수도관 데이터베이스

본 연구를 통하여 GNS Science [6]에서 제공된 2010년 9월 4일 지진규모(M_w) 7.1의 Darfield 지진, 2011년 2월 22일 지진규모(M_w) 6.2의 Christchurch 지진, 2011년 6월 13일의 지진규모(M_w) 6.0 지진으로 인한 Christchurch 지역에 위치한 지하 상수도관의 치명적인 손상을 평가하였다.

Darfield 지진과 Christchurch 지진 및 2013년 6월 13일에 발생한 지진에 의해 기록된 지반운동값을 이용하여 기하평균최대지반속도를 산정하였으며 이 값에 따른 상수도관 손상율의 상관관계를 분석하였다. Jeon and O'Rourke [2]은 1994년 Northridge 지진 시 지진계 기록의 지반운동으로부터 정규크리깅 스펙트럴 베리오그램 모델을 사용하여 기하평균최대지반속도와 상수도관 손상율의 상관관계를 분석하였다. 본 논문에서는 이 분석

결과와 Canterbury 지역 지진 시 산정된 상수도관 손상율의 상관관계를 비교·검토하였다.

일시지반변형 관점에서의 매설된 상수도관 지진 성능 평가의 일관성을 갖기 위해 Christchurch에 매설된 상수도관 손상의 일시지반변형 영향 산정은 비액상화 지역에서 수행하였다.

각각 지진발생전 약 1,700 km 길이의 상수도관의 위치 전자파일과 상수도관 손상정보는 Christchurch 도시의회인 Christchurch 사회기반시설 재건축 팀 (SCIRT)에 의해 제공되었다. Christchurch 지역의 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 비액상화 지역을 나타내는 Christchurch 지역의 상수도관 분포 지도의 데이터는 기하평균최대지반속도의 공간분포를 포함하는 GIS 파일로 통합되었다. 상수도관의 GIS 데이터베이스를 사용한 지도들은 관측된 비액상화 지역의 상수도관 시스템 및 손상 지점을 나타내도록 개발되었다. 매설된 상수도관과 손상 지점을 이용하여 주어진 기하평균최대지반속도에 대한 손상율은 10 cm/sec의 컨투어 간격안에 있는 특정한 재질의 매설된 상수도관 손상 개수를 관의 길이(km)로 나누어 계산하였으며 이러한 과정은 Darfield, Christchurch, 2011년 6월 13일 지진의 경우 모두 적용하였다.

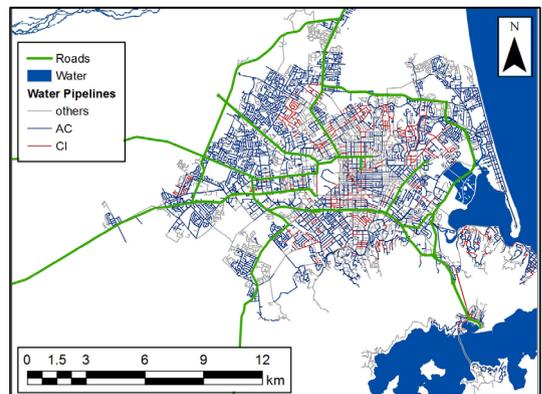


Fig. 5. Water pipeline distributions affected by Canterbury earthquakes

Fig. 5는 Canterbury 연속적인 지진에 의해 손상을 받은 매설된 상수도관의 분포를 보여준다. 이 그림에 나타나듯이 미국 캘리포니아 LA지역에 매설된 상수도관은 CI 상수도관이 주가 [1] 되는 반면에 이 지역에서는 AC 상수도관이 넓게 분포하고 CI 상수도관은 상대적으로 작게 분포함을 알 수 있다.

Fig. 6은 AC와 CI 분포 시스템의 분포를 포함한 Darfield 지진에 대한 기하평균최대지반속도 컨투어, 상수도관, 비액상화 지역의 상수도관 Figs. 7과 8은 유사한 방법으로 Christchurch 지진과 13 June 지진에 대한 지도를 나타낸다.

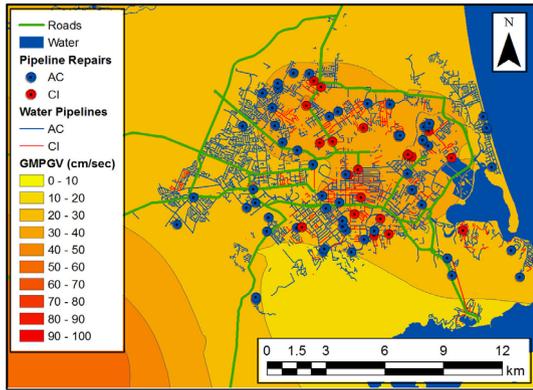


Fig. 6. Darfield earthquake AC and CI water pipeline layouts and repairs; map of GMPGV is the background

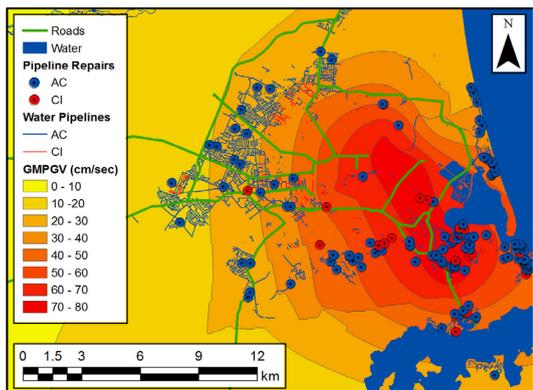


Fig. 7. Christchurch earthquake AC and CI water pipeline layouts and repairs; map of GMPGV is the background

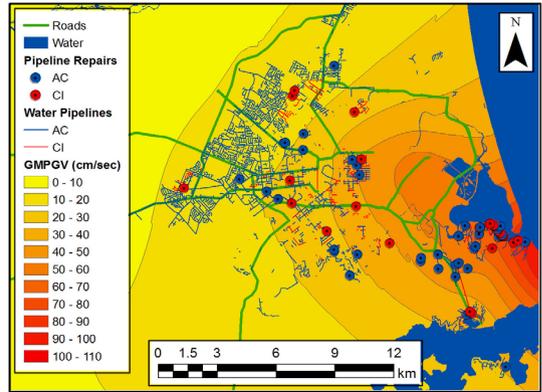


Fig. 8. 13 June earthquake AC and CI water pipeline layouts and repairs; map of GMPGV is the background

Figs. 6-8에 나타나듯이 관찰된 비액상화지역에서 매설된 상수도관과 손상 지점을 기하평균최대지반속도 컨투어와 같이 나타내었다. 이 컨투어는 Fig. 1에 나타나있는 지진계를 통하여 얻어진 최대지반속도 데이터를 이용하여 기하평균최대지반속도를 계산하고 정규크리깅을 사용하여 컨투어를 재생하였다. 이 Figs. 6-8은 데이터를 어떻게 스크린 하였는지 그 과정의 기초적인 개념을 잘 표현하고 있다. 또한 상수도관 손상을 기하평균최대지반속도와와의 관계로 나타내기 위하여 특정한 재질의 상수도관에 대한 기하평균최대지반속도와 비액상화지역의 상수도관 길이와 손상 개수를 사용하며 GIS를 이용하여 이러한 과정의 수치계산을 자동적으로 수행하였다.

최대지반속도는 각 지진계에서 기록된 두 직각방향의 수평방향 지반속도에서 최대값이며 기하평균최대지반속도는 두 개의 최대 지반속도의 자연로그 평균값으로 유도된다. Canterbury 지진 시 수평방향 지반속도 시간이력은 GNS Science [11]로부터 0.1-0.25 Hz와 24.5-25.5 Hz의 필터 밴드를 사용하여 데이터를 수집하였다.

기존 연구를 살펴보면 상수도관 손상을과 지진매개변수의 하나인 최대지반속도와의 상관관계가 가장 통계학적으로 신뢰성이 있음을 보여주었으나 [2,13] 본 연구에서는 지진학자들에게 널리 사용되는 기하평균최대지반속도에 중점을 두어 기하평균최대지반속도에 따른 상수도관 손상을 산정하였다.

3.2 매설된 상수도관 성능평가

매설된 상수도관 성능은 GIS를 이용하여 일시지반변형이 주요 손상원인인 비액상화지역에서의 손상을 평가

가 이루어졌다.

위에서 언급한 데이터베이스와 필터링 과정들을 사용하여 얻어진 Darfield, Christchurch, 2011년 6월 13일 지진의 통계 데이터는 각 지진의 경우 Asbestos Cement (AC), Cast Iron (CI) 재질의 상수도관에 관한 정보를 제공한다. 이러한 정보는 매설된 상수도관 길이, 전체 손상 개수, 비액상화 지역에서의 매설된 상수도관 손상 개수, 시스템에서의 상수도관 손상율을 제공한다. 각 지진 후 시스템 변화를 반영하는 상수도관 종류는 약간의 차이가 있다. 이러한 손상율은 손상 개수를 상수도관 길이로 나누어 표현되며 손상율의 크기를 통하여 상수도관 재질에 따른 상대적 취약성을 알 수 있다.

매설된 상수도관은 크게 일시지반변형과 영구지반변형 영향에 의해 손상을 받으며 본 연구에서는 일시지반변형 영향평가를 수행하였다. 일시지반변형 영향은 기하평균최대지반속도에 따른 손상을 상관관계를 통하여 평가할 수 있다. 이러한 상관관계를 개발하는 과정들과 회귀분석 결과들을 아래와 같이 기술할 수 있다.

기하평균최대지반속도와 손상을 관계를 평가하기 위하여 지진 영향지역을 분리하여 지진으로 인한 비액상화 지역에서는 기하평균최대지반속도 컨투어 10 cm/sec 간격 안에 있는 특정한 상수도관의 총 손상 개수를 컨투어 안에 분포한 상수도관의 총 길이로 나누어 손상율을 계산하였다. 손상을 통계 결과의 정확도는 각 컨투어 간격 샘플의 상수도관 길이에 민감함을 알 수 있으며 의미 있는 상관관계를 갖는 충분한 상수도관 길이를 선택하기 위하여 기존의 연구자들에 의해 채택된 모델은 Poisson 분포를 따르는 것을 가정하였다 [14]. O'Rourke 등 [4]이 설명하였듯이 O'Rourke and Deyoe [15]가 제안한 것과 Poisson 분포를 이용한 표본길이 기준은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(1-\alpha)p \leq (RR)x \leq (1+\alpha)p \tag{6}$$

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

표본손상 개수가 실제값의 $\pm\alpha$ 안에 있을 확률(예, 신뢰도)은 표본손상 개수가 중심극한정리에 부합한 정규분포에 의해 결정된다. β_c 의 신뢰도 간격과 그에 상응한

표준정규분포, $\phi^{-1}(\beta_c)$ 를 갖는 공식 (6)의 하계(lower bound)는 다음과 같이 나타낼 수 있으며

$$\mu - \phi^{-1}(\beta_c)\sigma = (1-\alpha)p \tag{7}$$

그리고 상계(upper bound)는 아래와 같이 기술할 수 있다.

$$\mu + \phi^{-1}(\beta_c)\sigma = (1+\alpha)p \tag{8}$$

공식 (6)에서 (8)까지를 통합하고 $p = (RR)x$ 를 적용하면 다음과 같은 표본길이, x 를 얻을 수 있다.

$$x \geq [\phi^{-1}(\beta_c)]^2 / \alpha^2 (RR) \tag{9}$$

이때 x 는 표본길이이다.

이러한 표현은 1 km 표본간격을 갖는 이항분포라고 가정하는 O'Rourke and Deyoe [15]의 접근방법을 확장한 것이다. 이항분포의 적용은 $RR \leq 1/km$ 인 경우이며 RR 이 표본간격 1 km에 한 개 이상의 손상 개수가 존재하는 경우에는 적용할 수 없다. 표본간격이 0에 가까워질 때 공식 (9)의 이항분포는 Poisson 분포에 가까워지므로 공식 (9)에 나타난 표본기준은 표본간격과 무관하며 일시지반변형에 의한 상대적으로 작은 RRs 와 영구지반변형에 의한 상대적으로 큰 어떠한 RR 에도 적용이 가능하다.

매설된 상수도관의 손상을 데이터는 75% 신뢰도, $\alpha = 50\%$ 와 공식 (9)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 (9)를 이용하여 5.299 km를 얻는다. 데이터 스크리닝을 통하여 특정범위의 기하평균최대지반속도에 상응하는 매설된 상수도관의 특정한 길이를 얻을 수 있다. 얻어진 특정길이의 상수도관내의 손상 개수는 $RR = 1 \text{ repair/km}$ 의 결과를 가져오며 표본기준은 표본길이가 5.299 km 보다 같거나 커야한다.

Christchurch 지진 시 산사태나 암반 낙하의 영향으로 손상된 상수도관은 GIS 분석과정을 통하여 분석 대상 데이터에서 제외시켰다. 또한 GIS를 이용하여 산사태

영구지반변형이 일어난 Port Hills의 50 m 이상 표고에 매설된 상수도관은 기하평균최대지반속도와 상수도관 손상율을 계산 데이터에서 제외시켰다.

이러한 스크린 기술을 이용한 기하평균최대지반속도로 인한 AC 상수도관 손상율은 Darfield, Christchurch, 2011년 6월 13일의 지진과 1994년 미국의 캘리포니아 로스엔젤레스(LA)에서 발생한 Northridge 지진 시의 GIS 분석결과[1]와 유사하였다. 모든 데이터에 대한 회귀분석선과 수식은 신뢰도 75%와 $\alpha = 50%$ 로 계산되었으며 Fig. 9에 나타나 있다. Northridge 지진 데이터에 대한 회귀분석선은 점선으로 나타나 있다. 여기에서 나타나듯이 Canterbury 지진 데이터는 Northridge 지진 데이터와 경향이 잘 일치함을 알 수 있다. Canterbury 지진의 회귀분석 결과 $r^2 = 0.91$ 으로서 통계학적으로 신뢰도가 높음을 알 수 있다.

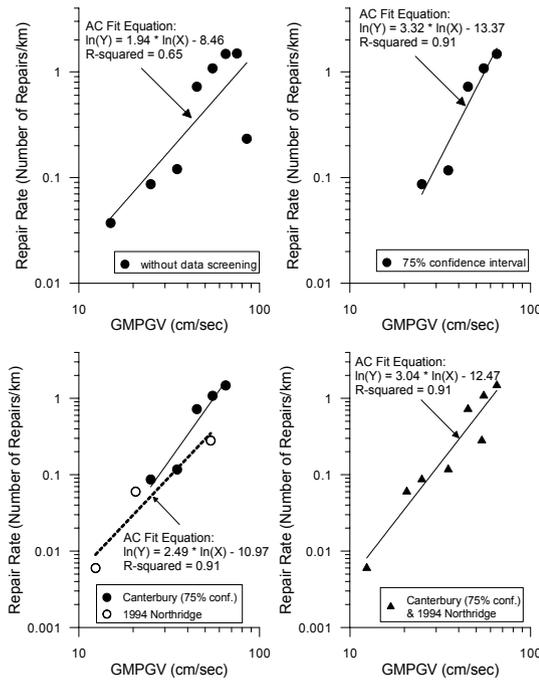


Fig. 9. Repair Rate vs. GMPGV for AC pipelines

같은 방법의 필터링 과정을 통하여 매설된 CI 상수도관에 대한 데이터를 이용하여 기하평균최대지반속도에 따른 상수도관의 손상율을 산정하였으며 Fig. 10에 나타내었다. Figs. 7과 8에 나타나듯이 Christchurch와 2011년 6월 13일 지진은 매우 큰 액상화 지역을 유발하여 위에서 언급한 필터링 기준을 통과하지 못할 정도로 매우

작은 길이의 CI 상수도관이 비액상화 지역에 매설되어 있음을 알 수 있다.

Jeon and O'Rourke [2]에 의해 발표된 Northridge 지진 데이터와 Canterbury 지진 데이터를 이용한 상수도관 손상율을 살펴보면 Northridge 지진에 의해 손상된 상수도관 회귀분석 결과는 점선으로 나타난 반면에 두 지진의 데이터를 모두 이용한 회귀분석 결과는 마지막 그림에 실선으로 나타내었다.

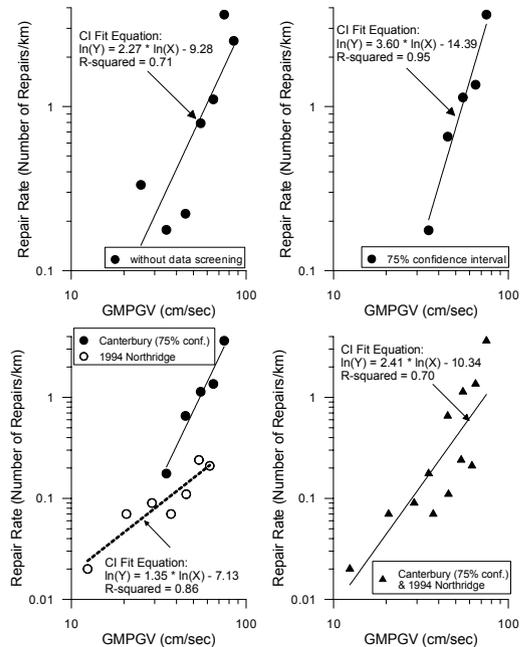


Fig. 10. Repair Rate vs. GMPGV for CI pipelines

4. 결론

본 연구에서는 2010년 9월 4일 지진규모(M_w) 7.1의 Darfield 지진, 2011년 2월 22일 지진규모(M_w) 6.2의 Christchurch 지진과 2011년 6월 13일 지진규모(M_w) 6.0의 연속적으로 발생한 지진의 지진계 기록을 이용하여 지반운동 컨투어를 생성하고 이러한 일시지반변형에 따른 매설된 상수도관 손상율을 평가하였다.

미국 캘리포니아 LA 지역의 1994년 Northridge 지진의 경우에는 약 30 km^2 에 1개의 지진계가 설치되어 있는 반면에 Christchurch 지역의 지진계는 약 11 km^2 에 1개의 지진계가 설치되어 매우 높은 밀도로 설치되었음을 알 수 있으며 본 연구의 최대지반속도와 기하평균최대지

반속도 상관관계의 경험적관계식은 1994년 Northridge 지진 데이터로부터 계산한 최대지반속도 = 1.21 기하평균최대지반속도 회귀분석결과와 동일함을 알 수 있다.

Canterbury 연속지진 시 지진계로부터 얻은 최대지반가속도를 바탕으로 정규크리깅 보간 알고리즘을 이용하여 기하평균최대지반속도 컨투어를 생성하였으며 Darfield, Christchurch, 2011년 6월 13일 지진 시 두 지반속도의 지역적 분포를 살펴보면 Darfield 지진에 의한 지반속도는 Greendale 단층대 지역부근에서 매우 크고 단층대에서 거리가 멀어질수록 작아지며 Christchurch 지역에서는 최대값이 40 cm/sec로 부분적으로 나타남을 알 수 있다. 마찬가지로 Christchurch 지진 시 단층대 주위로 큰 지반속도가 나타나며 2011년 6월 13일의 지진은 Christchurch로부터 약 10 km 떨어진 곳에서 발생하여 해안가에서 가장 큰 지반속도가 관찰됨을 알 수 있다.

Christchurch 지역에 매설된 AC 상수도관 손상은 1994년 미국 LA Northridge 지진 데이터에 바탕을 둔 손상율과 유사하나 CI 상수도관 손상은 Northridge 지진의 매설관 손상율에 비해 크게 나타남을 알 수 있다. Christchurch 지진 시 상수도관 손상율과 기하평균최대지반속도와의 상관관계는 상수도관 지진성능에 관한 미래 취약도 분석 시 신뢰성 높은 회귀분석결과를 제공하며 상수도관 손상을 상관관계 회귀분석 결과는 통계적으로 신뢰성이 높아 추후에 발생할 수 있는 지진의 경우 일시지반변형으로 인한 매설된 AC, CI 상수도관 손상을 예측할 수 있다.

References

- [1] S.-S. Jeon *Earthquake Performance of Pipelines and Residential Buildings and Rehabilitation with Cast-in-place Pipe Lining Systems*, Ph.D. dissertation, Cornell University, Ithaca, NY, USA. 416 p. 2002.
- [2] S.-S. Jeon, T.D. O'Rourke, "Northridge Earthquake Effects on Pipelines and Residential Buildings", *Bulletin of the Seismological Society of America*. Vol. 95, No. 1, pp. 294-318. 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1785/0120040020>
- [3] 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.
- [4] 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>
- [5] T.D. O'Rourke, N.A. Jezerski, T. Olson, A.L. Bonneau, M.C. Palmer, H.E. Stewart, M.J. O'Rourke, T. Abdoun, "Geotechnics of Pipeline System Response to Earthquakes", *Proc. of Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV (GEESD)*, Sacramento, CA, USA., pp. 1-38, 2008.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/40975\(318\)193](http://dx.doi.org/10.1061/40975(318)193)
- [6] 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.
- [7] B. Bradley, "Strong Ground Motion Characteristics Observed in the 4 September 2010 Darfield, New Zealand Earthquake", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 42, pp. 32-46, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.06.004>
- [8] B. Bradley, M. Cubrinovski, "Near-source Strong Ground Motions Observed in the 22 February Earthquake", *Seismological Research Letters*, Vol. 82, No. 6, pp. 853-865, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1785/gssrl.82.6.853>
- [9] M. Cubrinovski, J.D. Bray, M. Taylor, S. Giorgini, L. Wotherspoon, J. Zupan, "Soil Liquefaction Effects in the Central Business District during the February 2011 Christchurch Earthquake", *Seismological Research Letters*, Vol. 82, No. 6, pp. 893-904, 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1785/gssrl.82.6.893>
- [10] M. Cubrinovski, B. Bradley, L. Wotherspoon, R. Green, J. Bray, C. Wood, M. Pender, J. Allen, A. Bradshaw, G. Rix, M. Taylor, K. Robinson, D. Henderson, S. Giorgini, K. Ma, A. Winkley, J. Zupan, T.D. O'Rourke, G. Pascale, D. Wells, "Geotechnical Aspects of the 22 February 2011 Christchurch earthquake", *Bulletin of the New Zealand Society of Earthquake Engineering*, Vol. 44, No. 4, pp. 205-226, 2011a
- [11] Geonet. Processed Strong Ground Motions. [Internet]. [cited Aug. 2011], Available from: <http://ftp.geonet.org.nz/strong/processed/Proc/2011/> (accessed Jan. 17, 2012)
- [12] ESRI. *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*, Environmental Systems Research Institute, Inc., Redlands, C, USA., 306

- p., 2001.
- [13] T.D. O'Rourke, S. Toprak, "GIS Assessment of Water Supply Damage from the Northridge Earthquake", *Geotechnical special publication*, ASCE, pp. 117-131, 1997.
- [14] 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.
- [15] M. O'Rourke, E. Deyoe, "Seismic Damage to Segmented Buried Pipe", *Earthquake Spectra*, Vol. 20, No. 4, pp. 439-470, 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1193/1.1808143>
-

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