

액상화·횡방향 영구지반변형을 받는 연속된 지중매설관로의 구조적 손상도곡선 도출

Fragility Curve of Continuous Buried Pipeline subjected to Transverse Permanent Ground Deformation due to Liquefaction

김태욱*

Kim, Tae Wook

임윤묵**

Lim Yun Mook

ABSTRACT

In this study, fragility curves of continuous buried pipelines subjected to transverse PGD (permanent ground deformation) due to liquefaction are proposed. For the waterworks system, continuous buried pipelines made of ductile iron, poly ethylene, and poly vinyl chloride are analyzed and fragility curves are drawn. Fragility curves are based on the repetitive analyses results and formulated with the dominant factors of behaviour of buried pipeline. With the use of fragility curves, engineers can estimate the status of damage of buried pipeline without overall knowledge of relevant features. Especially, fragility curves proposed in this study will act as a major module of earthquake loss estimation method. Moreover, critical value of magnitude and width of transverse PGD (by which the full damage status of buried pipelines are induced) are estimated. With the use of regression curves of these values, pre evaluation of seismic safety of buried pipelines located within liquefaction hazardous region will be possible.

1. 서론

지진과 같은 대규모 자연재해 발생시 송유관, 가스관, 상·하수도관 등으로 대표되는 지중 매설관망은 1차적으로 구조적인 손상을 입게 되며, 국부적인 손상부에 대한 복구의 지진이 전체 네트워크 차원의 기능적 마비로 연계되면서 막대한 규모의 2차적인 사회적·경제적 손실을 불러일으키게 되는 특징을 가지고 있다. 따라서 미국 및 일본과 같이 지진의 발생과 이로 인한 기반시설의 피해가 잦은 선진국의 경우에는 지진 발생으로 인한 지중매설관망의 손상위치 및 손상정도를 즉각적으로 파악하고 그에 따른 2차적인 피해를 산정한 후, 이에 기초하여 합리적인 복구 및 대응체계를 수립하고자 노력해왔다.

* 정회원 · 한국철도기술연구원 궤도구조연구팀 주임연구원

** 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

1980년대 이래로 기반시설과 관련된 전산 자료의 구축, 피해인자의 규명, 구조적인 손상을 정량화할 수 있는 해석기법의 개발 및 손상도곡선의 정립, 1차적인 손상도와 2차적인 손실정도를 연계시킬 수 있는 통계기법의 정립 등에 주력해 왔으며, 그간의 연구성과를 기초로 1990년대 이후에는 지진공학, 지반공학, 구조공학, 통계학과 같은 관련학문의 통합과 GIS 기술의 연계 하에 소위 지진피해평가기법을 정립하고 이를 지속적으로 적용시켜왔다.

반면 국내의 경우에는 제한된 국토조건에 따른 매립지반의 증가로 인해 액상화·연구지반 변형의 발생가능성이 증대되면서 1990년대 후반부터 지중매설관에 대한 피해인자의 규명, 해석모형의 개발, 해석식의 정립, 거동특성의 분석 등을 중심으로 의미있는 연구성과가 도출된 바 있으나 선진국과 동등한 수준의 지진피해평가기법을 자체적으로 개발하기 위해서는 다양한 형태의 문제점이 상존해 있다고 말할 수 있다. 특히 지중매설관의 1차적인 손상을 정량화할 수 있는 손상도곡선이 정립되지 못한 상황이며, 계기지진 피해자료의 절대적인 부족으로 인해 1차적인 손상도와 2차적인 손실정도와의 연계성도 구체화시킬 수 없는 상태이다.

이러한 측면에서 본 논문에서는 지중매설관에 대해 극한적인 상황을 유발하게 되는 횡방향의 액상화·연구지반변형을 대상으로 연속된 구조형식을 갖는 지중매설관로의 1차적인 구조적 손상정도를 정량화할 수 있는 손상도곡선을 제안하였다. 제안된 손상도곡선은 기존에 국내에서 개발된 해석식의 반복적 적용결과에 기초하고 있으며, 액상화·연구지반변형을 받는 매설관로의 거동특성을 지배하는 주요 인자들을 포함하고 있어 손상 메커니즘 및 해석기법에 대한 포괄적인 제반지식이 없는 상태라 하더라도 액상화·연구지반변형에 대한 지중매설관의 1차적인 구조적 손상정도를 즉각적으로 정량화할 수 있는 특징을 가지고 있다. 특히 본 논문에서 제안된 손상도곡선은 추후 국내에서 선진국 수준의 통합된 지진피해평가기법을 자체적으로 개발할 경우 주요 내부모듈로서 핵심적인 의미를 갖게 될 것으로 판단된다. 또한, 제안된 손상도곡선에 기초하여 연속된 구조형식을 갖는 지중매설관로의 손상을 유발하는 액상화·연구지반변형의 폭과 크기를 추정하고 이에 대한 회귀식을 제안함으로써, 액상화·연구지반변형이 발생가능한 지반에 매설되는 지중매설관로의 손상가능성을 설계단계에서 사전평가가 가능하도록 하였다.

2. 지중매설관로 손상도곡선의 적용 의의

서론에서 약술한 바와 같이 지진의 발생으로 인해 지중매설관로 등과 같은 사회기반시설의 피해가 잦은 미국 및 일본과 같은 선진국에서는, 1980년대 이래 각 기반시설의 지진피해인자에 대한 공학적 규명과 적정 해석기법의 반복적용 및 계기지진 피해자료 분석결과 등에 기초하여 정립된 손상도곡선을 토대로, 지중매설관로의 1차적인 구조적 손상을 정량화하고 1차적인 손상에 따라 유발되는 2차적인 사회적·경제적 손실을 정량화할 수 있는 통합적 형태의 지진피해평가기법(Earthquake Loss Estimation Method)의 개발 및 적용에 주력해 왔다. 여기서 지중매설관로의 내진 손상도곡선은 최종적으로는 지진피해평가기법 내에서 하나의 핵심모듈로서 작용하게 되는 부분임에 주목할 필요가 있다. 즉, 임의 지역내에 매설된 지중매설관로를 대상으로 제반 자료가 전산화되어 있고 피해인자에 대한 정량적 규명과 각 피해인자에 대한 내진 손상도곡선이 정립되어 있는 경우, 가상지진 또는 실제지진에 따른

매설관로의 1차적인 구조적 손상정도의 평가는 기존에 정립된 손상도곡선에 대한 1대 1 대응을 통해 즉시적으로 수행될 수 있다는 것이다.

FEMA(Federal Emergency Management Agency)와 NIBS(National Institute of Building Science)의 주관하에 1990년대 이래 미국에서 개발 및 적용되어왔던 HAZUS를 기준으로 지진피해평가기법의 일반적인 적용절차와 손상도곡선의 적용의의를 다시 한 번 살펴보면 다음과 같다. 그림 1에서 보는 바와 같이 우선 피해평가가 요구되는 지역을 행정구역에 준하여 설정하고 매설지반 및 매설관로와 관련된 제반 물성, 제원 등의 전산 DB를 구축한다. 다음에는 평가지역에 발생가능한 가상지진 시나리오 또는 계기지진 시나리오를 설정하고 이에 상응하는 최대지반가속도, 최대지반속도, 영구지반변형의 폭 및 크기 등을 산정한다. 입력하중의 설정이 완료되면 평가자는 이 시점에서 평가기법 내부에 내장되어 있는 지중매설관로의 손상도곡선을 이용하여 1대 1 대응을 통해 매설관로의 1차적인 구조적 손상위치와 손상정도를 산정해낼 수 있으며, 2차적인 손실규모 및 정도와의 연계식이 정립되어 있는 경우에는 매설관로의 1차적 손상에 따른 2차적 손실의 규모와 정도를 추정해낼 수 있게 된다. 즉, 그림 1의 5번에서 표현된 직접적인 구조적 손상을 즉시적으로 평가하기 위해서는 지중매설관로에 대한 손상도곡선의 정립이 우선적으로 요구되는 것이다.

이러한 측면에서 볼 때, 국내의 경우에는 서론에서 약속한 바와 같이 현재 지중매설관로에 대한 피해인자의 규명, 해석기법의 개발, 거동특성의 분석 등과 같은 의미있는 연구성과가 도출된 바 있으나, 통합적인 지진피해평가기법 개발의 핵심이 되는 손상도곡선이 부재한 상태이므로 최근 들어 증가하고 있는 지진피해에 대한 사회적 관심과 지진피해평가기법의 개발 필요성 등을 고려할 때, 지중매설관로의 손상도곡선에 대한 정립이 요구되는 시점인 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 제한된 국토조건에 따른 매립지반의 증가와 이로 인한 지반의 액상화 발생 가능성의 증가를 고려하여, 액상화·영구지반변형을 매설관로의 주요 지진피해 메커니즘으로 상정한 상태에서, 지반변형에 대한 유연성이 상대적으로 적은 연속관의 내진 손상도곡선을 도출하였다. 특히 국내 계기지진 피해자료의 절대적인 부족을 고려할 때, 미국 및 일본과 같은 확률적 개념의 손상도곡선의 도출이 어려운 상황이므로, 본 논문에서는 기존에 정립된 영구지반변형에 대한 해석적 관계식의 반복적용을 통해 연속된 구조형식을 갖는 매설관로의 손상도곡선을 도출하였다. 도출된 회귀식은 액상화·횡방향 영구지반변형을 받는 연속된 지중매설관로의 주요 지배인자인 지반변형의 폭, 크기, 관경의 3변수 함수로써 표현되기에 액상화·영구지반변형에 대한 제반지식이 없는 사용자 하더라도 1대 1 대응을 통해 매설관로의 구조적인 손상을 즉각적으로 추정할 수 있는 특징을 가지고 있다. 또한 매설관로의 허용 횡변형률에 상응하는 최대변형률을 발생시키는 한계 지반변형의 폭과 크기를 추정하고 이에 대한 회귀식을 도출한 후 각각의 공학적인 의미를 분석하였다.

3. 액상화·횡방향의 영구지반변형을 받는 연속된 지중매설관로의 내진손상도 곡선

3.1 손상도곡선의 도출절차 및 대상

지중매설관로의 해석적 관계식 및 주요 지배인자 분석결과에 기초하여 액상화·횡방향 영구지반변형을 받는 연속된 지중매설관로의 손상도곡선을 다음과 같은 절차에 의거하여 도출

하였다.

먼저, 식 (1)과 같이 해석을 통해 도출된 최대변형률과 해석대상 관의 허용 휨변형률의 비를 손상도 비(Fragility Ratio : FR)로 정의하고 지배적 해석인자인 지반변형의 크기를 변화시켜가면서 다양한 환경에 대해 기본적인 손상도곡선을 도출하였다. 다음으로는 동일한 조건 하에서 지반변형의 폭을 변화시켜가면서 반복적으로 각 지반변형의 폭에 따른 손상도곡선을 도출하였다. 최종적으로는 이러한 방식으로 제시된 손상도곡선에 대한 회귀분석을 수행하고 지반변형의 폭과 크기 및 매설관로 환경의 3변수 함수로써 표현되는 단일한 형태의 회귀식을 도출하였다.

$$FR = \frac{\epsilon_{analytical}}{\epsilon_{allowable}} \quad (1)$$

if $FR < 1.0$ then serviceable state

if $FR \geq 1.0$ then possible damage state

제시된 손상도곡선에서 FR 값이 1.0 미만이라는 것은 관의 손상이 전혀 발생하지 않은 상태임을 나타내며 FR 값이 1.0 이라는 것은 액상화·횡방향 영구지반변형에 의해 발생한 관의 최대변형률이 해석대상 관의 허용 휨변형률과 동일하다는 것을 의미하게 된다. 만약 FR 값이 1.0 이상이 되면 액상화·횡방향 영구지반변형에 의해 관의 손상가능성이 우려되는 상태를 의미하게 된다. 각 관종별로 파괴상태의 변형률값 (ϵ_{ult} 또는 $\epsilon_{fracture}$)이 정량적으로 결정되어 있다면 보다 실질적인 의미의 FR 값을 정의할 수 있게 된다.

액상화영구지반변형의 영향을 받는 지중매설관로는 대표적으로 상·하수도관, 가스매설관, 송유관, 전력관 등으로 구분되는데, 본 논문에서는 액상화·영구지반변형으로 인한 매설관의 손상이 발생할 경우 사용용수의 공급중단으로 인해 상당한 규모의 2차적인 손실(화재진압의 지연, 긴급 생활용수의 공급 지연 등)을 유발시킬 수 있는 상수도관에 대한 손상도곡선 도출에 중점을 두었다. 상수도관의 경우 현재 국내에서 주로 사용되고 있는 관종은 덕타일주철관, 수도용 도복장강관, 폴리에틸렌관, 경질염화비닐관 등이며 각 관종별 탄성계수, 허용휨응력, 허용휨변형률은 표 1과 같다.

3.2 국내 상수도관(덕타일주철관)의 손상도곡선과 한계지반변형

전술했던 손상도곡선의 도출절차에 의거하여 국내에서 상수도관으로 주로 사용하고 있는 덕타일주철관 에 대한 손상도곡선 및 회귀식에 대한 도출결과를 정리하였다. 또한 매설관로의 손상도 (FR=1.0)을 기준으로 이를 유발하는 한계 지반변형의 폭과 크기를 추정하고 이에 대한 회귀식을 도출한 후 각각의 공학적인 의미를 분석하였다.

영구지반변형의 폭을 20m 에서 300m 로, 그 크기를 1m 에서 10m 로 변화시켜가면서 매설심도 2m, 지반의 단위중량 $1.5t/m^3$, 전단마찰각 30도를 기준으로 덕타일주철관의 환경을 고려하여 각 경우에 대한 손상도곡선을 도출하였다. 그림 2는 지반변형의 폭 100m 에 대해, 그림 3은 지반변형의 폭 300m 에 대한 손상도곡선을 각각 나타내고 있다. 환경이 증가할수록 동일 크기의 지반변형에 대해 손상을 입을 확률이 증가된다는 것을 다시 한 번 확

인할 수 있으며, 200m 이상의 폭을 갖는 지반변형에 대해서는 지반변형의 크기나 관의 직경과는 무관하게 국내에서 사용되는 덕타일주철관의 경우 허용 휨변형률을 초과하지 않는 정도의 최대변형률이 발생한다는 사실을 알 수 있다. 이는 국내에서 사용되는 덕타일주철관의 경우, 200m 이하의 폭을 갖는 지반변형에 대해서는 관 또는 지반의 보강이 설계측면에서 검토되어야 한다는 것을 의미한다.

또한 반복해석을 통해 손상도곡선 결과들을 회귀분석하면 다음 식과 같이 영구지반변형의 크기, 폭, 관의 직경의 3변수로 구성되는 다중 회귀식을 얻을 수 있다. 여기서 δ 는 영구지반변형의 크기, W 는 영구지반변형의 폭, D 는 관의 직경이며 각각의 단위는 m 이다.

$$FR = \alpha \cdot \delta + \beta \quad (2)$$

$$\alpha = 2868.88 W^{-1.9627} D + 234.67 W^{-2.2774}$$

$$\beta = 7.30 W^{-2.9372} D - 0.15 W^{-2.682}$$

제안된 손상도곡선에 기초하여 관의 손상도 즉 FR 값이 1.0 이상이 되는 지반변형의 폭과 크기를 산정하였다. 그림 4는 지반변형의 폭이 100m 이하인 경우를, 그림 5는 지반변형의 폭이 100m 를 초과하는 경우를 각각 나타내고 있으며, 각각의 수치들을 표로 정리하면 표 2와 같다. 표 2를 상세하게 검토하면, 국내에서 발생가능한 최대 지반변형의 크기를 10m 로 가정할 경우, 200m 이상의 폭을 갖는 지반변형에 대해서는 지반변형의 크기나 관의 직경과는 무관하게 국내에서 사용되는 덕타일주철관의 경우 허용변형률을 초과하지 않는 정도의 최대변형률이 발생한다는 사실을 재확인할 수 있다.

또한 그림 4를 기준으로 FR 값 1.0에 상응하는 한계지반변형의 크기에 대한 해석결과들을 회귀분석하면 다음 식과 같이 폭과 관경의 2변수로 구성되는 다중 회귀식을 얻을 수 있다. 여기서 δ 는 FR 값 1.0에 상응하는 한계 영구지반변형의 크기, W 는 영구지반변형의 폭, D 는 관의 직경이며 각각의 단위는 m 이다.

$$\delta = \gamma \cdot W^2 - 0.0002 W + 0.0149 \quad (3)$$

$$\gamma = 0.0003 D^{-0.933}$$

4. 결 론

본 논문에서는 지중매설관에 대해 극한적인 상황을 유발하게 되는 횡방향의 액상화-영구지반변형을 대상으로 연속된 구조형식을 갖는 지중매설관로의 1차적인 구조적 손상정도를 정량화할 수 있는 손상도곡선을 제안하였다. 본 논문을 통해 도출된 세부 결론은 다음과 같다.

- 1) 횡방향의 액상화-영구지반변형을 받는 연속관에 대한 해석식의 적용을 통해 도출된 최대 변형률과 해석대상 관의 허용 휨변형률의 비를 손상도 비(Fragility Ratio : FR)로 정의하고 지배적 해석인자인 지반변형의 크기와 폭을 변화시켜가면서 국내에서 상수도관으로

주로 사용되는 덕타일주철관, 폴리에틸렌관, 경질염화비닐관을 대상으로 다양한 환경에 대한 손상도곡선을 도출하였다. 또한 이러한 방식으로 제시된 손상도곡선에 대한 회귀분석을 수행하고 지반변형의 폭과 크기 및 매설관로 환경의 3변수 함수로서 표현되는 단일한 형태의 회귀식을 도출하였다.

- 2) 국내에서 상수도관으로 주로 사용되고 있는 덕타일주철관의 경우, 200m 이하의 폭을 갖는 지반변형에 대해서는 지반변형의 크기나 관의 직경과는 무관하게 허용변형률을 초과하는 정도의 최대변형률이 발생한다는 것을 규명하였다. 따라서 국내에서 사용되는 덕타일주철관의 경우, 200m 이하의 폭을 갖는 지반변형에 대해서는 관 또는 지반의 보강이 설계측면에서 검토되어야 하는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2005년도 지진공학연구센터 연구과제 수행을 통해 도출된 연구성과로서 지진공학연구센터의 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김태욱 (1999) 횡영구지반변형에 의한 라이프라인 구조물의 동적 거동 해석, 석사학위논문, 연세대학교.
2. 장재원 (2000) 종방향 영구지반변형에 의한 매설관로의 거동 특성 해석, 석사학위논문, 연세대학교.
3. 장성희 (2002) 영구지반변형과 구조물의 상호작용을 고려한 지중 라이프라인의 내진설계연구, 석사학위논문, 연세대학교.
4. FEMA (1999) HAZUS99 Technical Manual, HAZUS99 User's Manual.

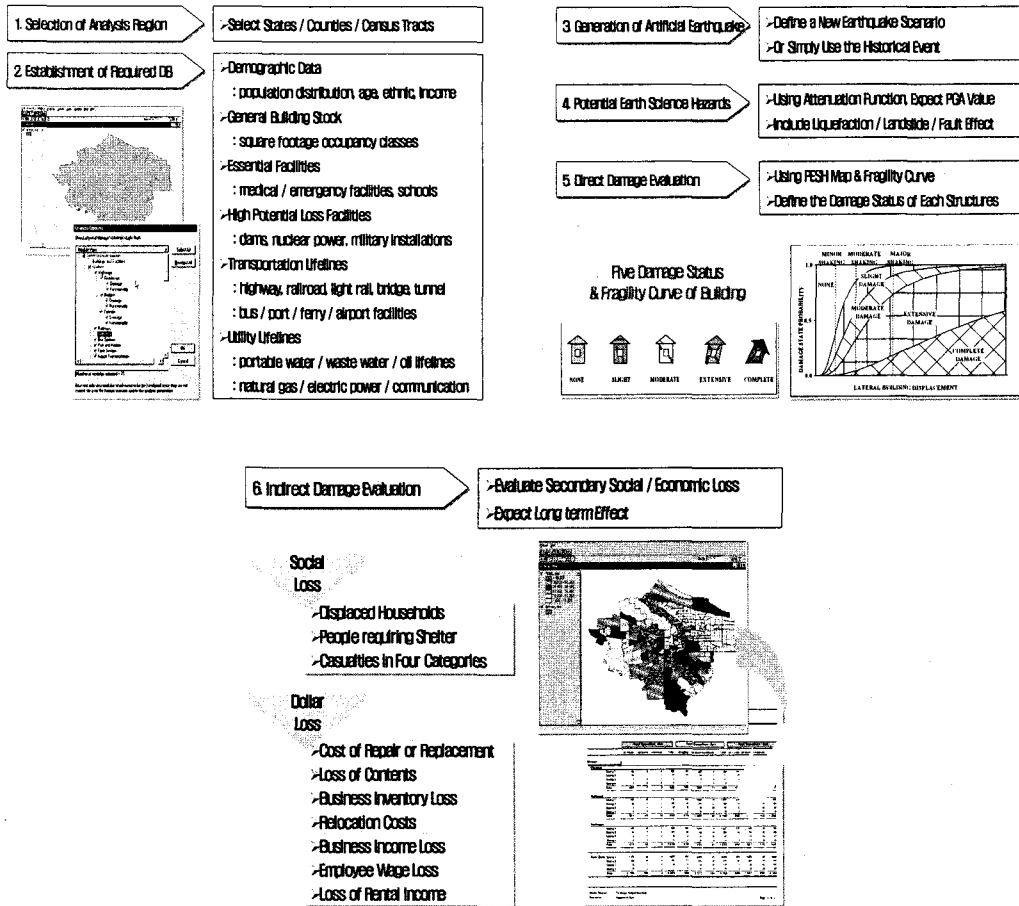


그림 1. 지진피해평가기법의 일반적 적용절차

표 1. 각 관종별 탄성계수, 허용휨응력, 허용휨변형률

관의 종류	탄성계수(kgf/m^2)	허용휨응력(kgf/cm^2)	허용휨변형률
덕타일주철관	1.60×10^{10}	2750	1.72×10^{-3}
폴리에틸렌관	7.50×10^5	100	1.33×10^0
경질염화비닐관	3.40×10^8	740	2.18×10^{-2}

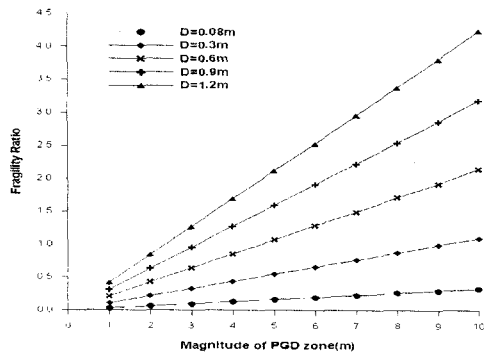


그림 2. 지반변형의 폭이 100m 인 경우
덕타일주철관의 손상도곡선

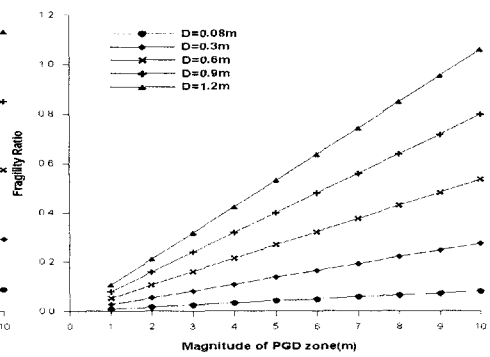


그림 3. 지반변형의 폭이 300m 인 경우
덕타일주철관의 손상도곡선

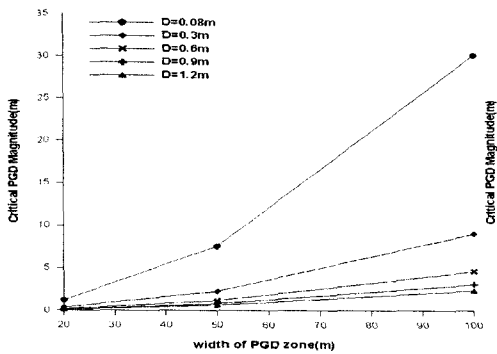


그림 4. 한계지반변형 크기
(지반변형폭 100m 이하)

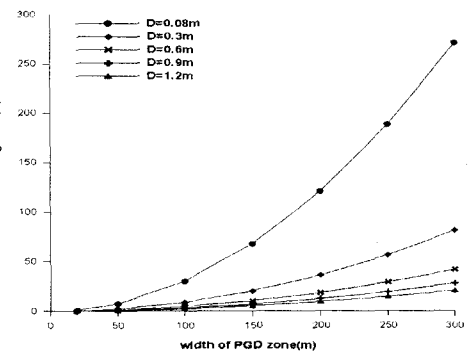


그림 5. 한계지반변형 크기
(지반변형폭 100m 초과)

표 2. 덕타일주철관의 FR 값이 1.0이 될 경우 영구지반변형의 크기(m)

PGD폭 관경	20m	50m	100m	150m	200m	250m	300m
0.08m	1.22	7.55	30.16	67.85	120.63	188.47	271.37
0.1m	1.01	6.27	25.05	26.35	100.18	156.52	225.38
0.2m	0.54	3.34	13.32	29.96	53.25	83.20	119.80
0.3m	0.37	2.27	9.07	20.40	36.26	56.66	81.59
0.4m	0.29	1.73	6.89	15.50	27.56	43.06	62.00
0.5m	0.23	1.40	5.56	12.50	22.22	34.72	50.00
0.6m	0.20	1.17	4.66	10.48	18.619	29.09	41.89
0.7m	0.17	1.01	4.01	9.01	16.02	25.03	36.04
0.8m	0.15	0.88	3.51	7.90	14.04	21.94	31.59
0.9m	0.14	0.79	3.13	7.04	12.51	19.55	28.15
1.0m	0.12	0.71	2.82	6.35	11.28	17.63	25.38
1.1m	0.11	0.65	2.59	5.82	10.34	16.15	23.25
1.2m	0.11	0.60	2.36	5.30	9.42	14.72	21.20