지진발생으로 인해 일어난 라이프라인 피해 특징을 살펴보면 진도가 7미만의 규모라 하더라도 밀집된 도심 라이프라인에 일단 손상이 발생하게 되면 라이프라인의 상호 연관성으로 인해 2차적으로 대규모의 경제 · 사회적 손실이 발생된다는 사실을 확인할수 있다.

김문겸 _ 연세대학교사회환경시스템공학부토목환경전공교수_ 02 - 2123 - 2803 _ applymkk@yonsei.ac.kr

지중 라이프라인 구조물의 내진설계

1. 서론

1.1 라이프라인이란?

라이프라인(Lifeline)이란 인간활동에가장 근간이 되는전력, 통신, 에너지, 상하수, 운송및교통망등 선(line)형태의구성을갖는사회기반시설을통칭하며, 인간사회의 발달과 함께 그 필요성이 급증되어 왔다. 도시의광역화와조밀화가동시에진행되는현대사회에서는보다다양하고복잡한형태의라이프라인이요구되고있다. 사회를하나의인체에비유한다면, [그림 1]에서 볼수있듯이전력/통신 라이프라인은 인간의 신경계에, 에너지/상 · 하수도/운송/교통라이프라인은인간의정 · 동맥으로생각할수 있으며, 이러한 시스템의 중요성 및 필요성은 따로 강조할필요가없다. 또한미래사회를정보화사회라 한다면, 이를 위한 전력/통신 라이프라인 시스템은 미래사회의가장중요한기반시설임에틀림이없다.

[그림1] 라이프라인의기능별종류

기본적으로네트워크의형태를갖는라이프라인은 상 · 하수도시설, 운송/교통망, 전력시설 및 통신시설 등의 형태로 전국에 걸쳐 광범위하게 분포되어 있으며, 대부분법령에의해지중에건설되고있다. 라이프라인관련기술은각시설을관리하는정부투자기관및민간기업에서광범위하게사용되고있으며국가경제와국민생활의중추적역할을담당하는 공공기술(public technology)로서중요성이크고핵심기술로서의수요도다양한상황이다.

1.2 라이프라인현황

2002년현재국내의라이프라인은운송/교통망에 해당하는라이프라인을제외한다하더라도<표 1>에 나타나있듯이가스관로, 전력구, 통신관로, 송유관, 광역상 · 하수도 등을 포함하여 총 연장이 약 220,000km 에이르고있다. 이렇게막대한양의라이프라인은 지금 현재도 새롭게 가설되고 있으며 2002년에만신규로가설되는라이프라인에대한국가예산이 약 1조 8천억원에 달하며 기존시설의 유지 · 보수를위한예산역시약5,000 억원에이른다.

<표1> 라이프라인유형별시설및국가예산규모

구분	2002년 시설현황	2002년 예산	관련기관
가스 · 송유관로	3,501km	2,143억원	한업자원부, 하녹가스공사, 송유관공사
전력구	17,892km	7,330억원	산업자원부, 한국전력공사
통신관로	126,178km	1,500억원	정보통신부, 한국통신
광역상수도	3,078km	4,153억원	환경부, 한국수자원공사
하수도	68,194km	8,078억원	환경부, 지방자치단체, 한국토지공사
도시지하철	569km	8,534억원	건설교통부, 지방자치단체, 지하철공사
합계	219,412km	3조 1,738억원	

2. 지진에 의한 라이프라인의 피해

2.1 라이프라인의지진재해사례

라이프라인은지진발생시1차적으로구조적인손상을받을수있으며, 이로인한기능성의상실과함께 사회적 · 경제적으로 엄청난 규모의 2차적인 피해를일으키게되는특성을가지고있다. 과거의지진재해사례를살펴보면이와같은특성들을확인할 수 있는데, 대표적인 지진들은 다음과 같으며 특히 1989년 Loma Prieta 지진(진도 6.9), 1994년 Northridge 지진(진도6.7), 1995년효고현남부지진(진도 6.9) 등은 상당한 규모의 라이프라인 피해가보고되었던지진이다.

- 1906년San Francisco, Manson
- 1933년Long Beach Wood
- 1952년Kern County
- 1964년Alaska 지진
- 1964년Niigata 지진
- 1971년San Fernando 지진
- 1976년Guatemala 지진
- 1976년Tangshan 지진
- 1979년Imperial Valley 지진
- 1983년Coalinga 지진
- 1983년Nihonkai-Chubu 지진
- 1987년Whittier Narrows 지진
- 1989년Loma Prieta 지진
- 1991년Coasta Rica 지진
- 1993년Kushiro-Oki 지진
- 1994년Northridge 지진
- 1995년Hyogoken-Nanbu 지진

지진발생으로 인해 일어난 라이프라인 피해 특징을살펴보면진도가7미만의규모라하더라도밀집된 도심 라이프라인에 일단 손상이 발생하게 되면 라이프라인의 상호 연관성으로 인해 2차적으로 대규모의경제 · 사회적손실이발생된다는사실을확인할수있다.

2.2 라이프라인의파괴형태

지진피해사례의분석으로부터라이프라인의파괴원인은크게지진파전파와영구지반변형에의한피해로구분될수있으며실제적인파괴양상은연속관의경우[그림 2]와같이크게휨파괴, 압축파괴, 인장파괴로나타나게된다.

분절관의경우는다양한파괴양상을보이게되는데 대부분의 경우 조인트 부분에서의 충격에 의한 파괴로나타나게된다.

결국, 라이프라인의 파괴형태는 관의형태, 즉 연속관이냐분절관이냐의구분과파괴원인, 즉영구지반변형과지진파전파의구분에따라분류되므로라이프라인의 내진설계를 위해서는 크게 4가지 방향에서의접근이요구된다.

즉, 영구지반변형에대한연속관의거동과영구지반변형에 대한분절관의 거동, 지진파 전파에 대한 연속관의거동과지진파전파에대한분절관의거동 각각에대한이해를토대로적정한해석방법이설정되어야한다.

[그림2] 라이프라인의대표적인파괴양상

a) 휨파괴 (b) 압축파괴 (c) 인장파괴

3. 국내 · 외 라이프라인 내진설계기술 현황

라이프라인의내진설계와관련하여현재까지진행되어온 국내 및 각국의 기술수준을 살펴보았다. 전세계적으로라이프라인에대한설계기준정립및관련기술개발이활발하게이뤄지고있는것을고려한다면국내의경우에도각종형태의라이프라인과관련하여적정한 내진설계기법및 절차에관한연구가시급하다고사료된다.

3.1 국내현황

국내의경우, 현재까지라이프라인시설의규모에 비하여 연구투자가 미약할 뿐 아니라 각 기관별로 부분적인연구가수행되고있을뿐종합적인연구가 미흡한실정이다. 국내관련연구의시작은 1970년대후반으로라이프라인과관련된수치해석에대한 연구가 진행되었으나 구성요소의 예상피해 규명 · 기능수행능력평가 및경제적요소 등의고려가결여된단편적인해석기술에제한되어왔다. 특히, 각 유형별로개별적 · 산발적으로기술개발을진행함으로인해 총괄적재해대응대책에 관한연구는매우 미비한실정이다. 이후 1990년대중반부터일부국내학계의라이프라인의중요성에대한인식과함께 라이프라인의개념정립, 안정성확보에필요한거동메커니즘 규명, 경제성과 관련된 연구와 같은 기초연구가수행되어왔다.

3.2 국외기술현황

(1) ISO 3010

ISO 3010은 종합적인 내진설계규준으로서 터널 · 전력 · 설비시설 등의 라이프라인에 대한 규준을 제시하고 있다. 설계의 원칙은 크게 극한한계상태와 사용한계상태로 구분되는데 극한한계상태의 경우 대규모 지진 발생을 기준으로 구조물의 붕괴방지와인명피해방지에중점을두고있는반면, 사용한계상태의경우중진발생을기준으로비구조적인손상은허용하되구조적인손상의발생을방지하는데중점을두고있다.

(2) 일본

일본의경우에는 1978년Miyagi-Ken Oki 지진발생이후라이프라인내진설계가구체적으로체계화되기시작했다. 지진발생중또는지진발생후라이프라인의 피해를 조사한 후 구조물 자체의 피해외에전체라이프라인시스템의상호연관관계를분석함으로써 1989년 관의 적극적인 주도하에각 시설물의복구시스템이구축되기시작하였다. 현재각 시설물별관리기관과의협의를통해정보의공유가 이뤄지고있으며이를통해각시설물별로내진성능의 향상을 도모하고있다. 이로부터 터널 표준시방서, 수도시설 설계지침, 가스협회, 도로협회, 건설성, 콘크리트표준시방서별로 내진기준 설정을 달리하고있다.

(3) 미국

미국의 경우는 1964년 알래스카 지진 이후 TCLEE(Technical Council of Lifeline Earthquake Engineering)와MCEER(Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research)을중심으로 라이프라인 내진설계가 체계화되기 시작했으며 ATC (Applied Technology Council) 25 에주안하여 경제적인설계를위한다양한지진해석이수행되어왔다. ATC는 미국 캘리포니아 구조공학회를 중심으로 1971년설립된이래자연재해경감을위한다양한연구를수행하고있으며특히구조물의지진설계와관련된다양한가이드라인을제시해오고있다. 미국의경우라이프라인구조물은크게 전력및통신시설, 가스및송유시설, 교통시설, 상 · 하수도시설로구분하고있으며, ATC 25를기준으로살펴보면 관망자료를 수집한 후 각 관망의 지진취약성을 분석하고실제지진자료를중심으로위험도해석을 수행한후전체적인피해액을추정하고있다.

(4) 뉴질랜드및유럽

뉴질랜드의 경우는 1989년 Wellington Project를 중심으로 라이프라인의 내진설계가 체계화되기 시작했다. 프로젝트의추진목적은라이프라인의손상가능성을평가하고이에적합한재해방지책및대책을 수립한후웰링톤 및뉴질랜드지역의 관련기술자와 일반인에대한홍보를 유도하는데중점을 두었다. 반면유럽은Eurocode 8 part 4에서유체저장구조물과배관에대한내진설계기준을제시하고있으나실질적으로는ASCE 기준을거의채택하고있는상황이다.

4. 라이프라인의 내진설계

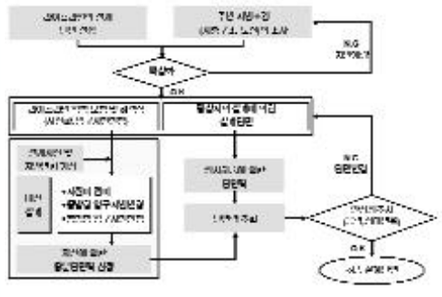
라이프라인의 내진설계는 지진시 지반의 진동 및 변형에의한라이프라인의거동을파악하고이를통해추가로발생하는지진단면력을산정하여지진에 의한 라이프라인의 손상을 방지하므로서 1차적인 구조적안전확보뿐만아니라2차적인사회적 · 경제적손실을최소화하는것을목적으로한다.

따라서, 라이프라인에 내진설계개념을 적용하여 상시하중 상태에서뿐만 아니라 지진상태에서도 붕괴가 일어나지 않도록 설계가 수행되어야 한다. 이를 위하여지진시지반의 변형을예측하기위한 액상화평가를병행함으로서지반의안전성검토를수행한다.

4.1 라이프라인의내진설계절차

라이프라인이 매우 중요한 지점에 위치하거나 라이프라인의 손상이 심각한 규모의 2차적인 재해를 유발할수있는가능성이있다고판단될경우, [그림 3]과같은절차를이용하여기본적인내진설계를수행할수있다. 지진발생시라이프라인의파괴원인을 고려하여 구조물의 내진설계에 필요한 지진파전파에의한라이프라인의거동과영구지반변형에의한 라이프라인의거동을예측하고, 이를상시하중하의 설계단면에추가의하중효과로더하여줌으로서내진성능을만족하는설계를수행하도록한다.

[그림3] 라이프라인의내진설계절차



4.2 지진파에대한라이프라인지진해석

지진파는근본적으로체적파인압축변형을유발하는P파와전단변형을유발하는S파, 표면파인역방향타원운동을하는 Rayleigh파와진행형타원운동을하는 Love파로구분될수있다.

지진파 전파에 의한 라이프라인의 거동특성은근본적으로 지진파의 위상차와 지반의 단기 변형률(transient strain)로 특징지어질 수 있으며 라이프라인자체가상대적으로얕은깊이에매설되기때문에표면파인Rayleigh 파에의한효과가지배적으로 작용하게된다.

지진파 전파에 의한 라이프라인의 실질적인 파괴양상은연속관의경우보다분절관에서보다명확하게나타나며특히연결부의인발및파쇄등의형태로나타나게된다. 영구지반변형에의한파괴양상과

명확하게구분되는특징은지진파전파의경우피해지역자체는광범위하게나타나나피해의정도는상대적으로경미하다는점을들수있다.

(1) 설계고려인자

지진파 전파에 대한 라이프라인의 내진설계를 수행하기위해서는다음과같은설계인자를고려해야한다.

①지반변형률의산정

지진 발생시 라이프라인의 거동은 지진파 전파로 인한지반운동의위상차로인해발생하는지반변형률에지배적인영향을받게된다. 따라서라이프라인의 거동을 보다 정확하게 파악하기 위해서는 동적해석이실시되어야하나, 라이프라인의관성은주변지반의 높은 구속력과 감쇠효과로 인해 그 영향이 미흡하므로 일반적으로 정적해석이 많이 수행되고 있다.

지반변형률을산정하는방법으로는최대지반속도와지진파전파속도를이용하여산정하는방법과지진시지반변위와지진파의파장을이용하여산정하는 방법이 있다. 최대 지반속도는 지진특성과 지반특성을 고려한 경험식을 사용하여 쉽게 산정할 수 있으며표면파의분산곡선을사용할경우보다정확한최대 지반속도를산정할수는 있으나각지반조건과지진특성을고려한분산곡선을산정하는작업은다소 복잡한절차를수반하게 되는단점을가지고있다.

②지반반력계수산정

지진 발생밟 라이프라인에 대한 주변지반의 구속효과를 표현하기 위해서는 합리적인 지반반력계수의 산정이 주요한 변수로 작용하게 된다. 실질적으로 이 부분에 대해서는 국내외적으로 많은 종류의 경험식과 이론식이 제시되었으며 최근 ASCE에서는 각 지반 조건에 적합한 지반반력계수를 제시한 바있다. 대표적으로는지반전단탄성계수와의비례식형태로지반반력계수를표현할수있다.

(2) 지진해석방법

지진파 전파에 대한 라이프라인의 거동을 해석하는방법은크게해석적방법과수치해석적방법으로 나뉘어진다. 먼저, 해석적 방법은 기반암에서 전파되어오는 지진파에 의하여 라이프라인에 발생하는 응력및변형률을간단한내진설계식을이용하여산정하는것으로서지진시지반에발생한변형률이지반반력계수로 표현되는 지반-라이프라인의 거동관계를통해라이프라인에발생시키는변형률을수학적으로산정하고이를통해라이프라인의거동을해석하는방법이다.

수치해석적 방법의 경우 지반변형률과 지반반력계수가결정되면실제라이프라인의수치해석모형화를 통해 지진해석을 수행하게 된다. 라이프라인의수치해석모형화는탄성지반위에위치한보이론에기초하여수행되며지반의반력은지반반력계수를 고유 물성으로 갖는 지반스프링으로 표현될 수있다. 또한, 단부효과를고려하기위하여이음부 강성은 일반강성의 2배 내지 3배를 적용하며 지반변형률 자체를 입력 지진하중으로서 사용한다. 이러한수치해석모형을통해라이프라인에발생하는 응력 및 변형률을 산정하여 내진설계에 활용하게 된다.

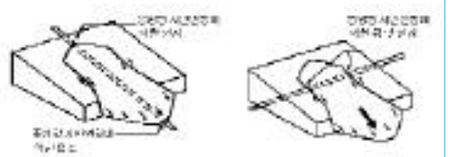
4.3 영구지반변형에대한라이프라인지진해석

영구지반변형은회복될수없는지반의대규모변형을지칭하는말로서직접적인발생원인은산사태, 단층운동, 액상화등으로구분된다. 영구지반변형에 의한 라이프라인의 대표적인 지진피해사례로는 1983년 일본에서 발생된 Nihonkai Chubu 지진을 들수있으며항공사진측정결과3 ~ 5m 정도의영구지반변형이발생되었으며그결과라이프라인연결부의손상, 축방향의관파열등과같이다양한형태의피해가야기되었음이확인되었다.

실제적으로영구지반변형은광범위한지역을대상으로발생되기에전체지반변형량의크기와방향을 평균하여표현해야하며라이프라인의주축과평행한방향의지반변형을종방향의영구지반변형으로, 라이프라인의주축과수직인방향의지반변형을횡방향의영구지반변형으로정의한다.

이러한점에서라이프라인의거동특성은지반변형의 방향에도 크게 좌우되는데, [그림 4(a)]와 같은 종방향의 영구지반변형이 발생될 경우 지반변형이 시작되는부분에서는인장력을, 지반변형이종결되는부분에서는압축력을받게되는반면[그림 4(b)]와같은횡방향의영구지반변형이발생될경우에는 전체적으로휨및인장력을받게된다.

[그림4] 영구지반변형에의한라이프라인의거동특성



(a) 종방향영구지반변형 (b) 횡방향영구지반변형

(1) 설계고려인자

영구지반변형에대한라이프라인의내진설계를수행하기위해서는다음과같은설계인자를고려해야한다.

①영구지반변형의폭및크기

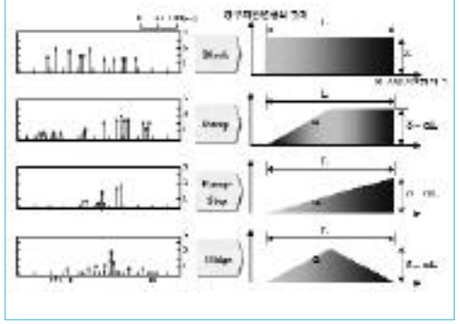
영구지반변형의폭과크기는지반조건(간극비, 상대밀도, 초기응력등), 지층의형상, 지진특성(강도, 지속시간, 주파수특성) 등과같은다양한요소에좌우되므로현재로서는정량화가매우어려운시점이나지진피해사례가빈번한미국이나일본의경우영구지반변형현상에대한실측결과를바탕으로다양한형태의경험식을제시하고있다.

②영구지반변형의형상

영구지반변형의형상은영구지반변형의폭과크기와마찬가지로라이프라인의지진해석에있어서매우 주요한 요소로서 고려되어야 하나 지진 발생시 영구지반변형의발생형상을유추한다는문제는영구지반변형의 폭과 크기를 추정하는 것보다 더 큰 불확실성을 내포하게 되는 문제점을 가지고 있다. 따라서, 현재까지는관측된영구지반변형의형태를 최대한단순화시켜서적용하고있는상태이며이중 대표적인이상화형태를[그림 5]에나타내었다.

[그림5]의좌측에표시된것은실제관측된영구지반변형이며우측은이를이상화시켜표현한것이다. 이상화된영구지반변형의형태는상단에서부터각각 Block 형태, Ramp 형태, Ramp-Step 형태, Ridge 형태를나타내며, 여기서L은측방유동발생지역의길이를, &는영구지반변형의크기를나타낸다.

[그림5] 영구지반변형형상의이상화



③지반반력계수

액상화에 의한 영구지반변형이 발생되는 경우 지반반력계수는 일반적인 지반반력계수와는 다소 상

이한특징을갖고있다. 즉, 라이프라인이위치하는 지반(액상화가발생되는지반과액상화가발생되지 않는지반)에따라변화하며 지반변형의방향에따라서도변화하게된다. 미국의경우 M.O`Rourke를 중심으로다양한실내실험결과를통해지반변형방향과지반조건에따른지반반력계수가제안된바있으며 영구지반변형에 대한 라이프라인의 지진해석 시각지반조건에적합한지반반력계수를사용할수는있으나아직국내지반조건에적합한지반반력계수가제안되지는못하고있는실정이다.

(2) 지진해석방법

영구지반변형을받는라이프라인의경우거동해석은 크게 영구지반변형의 형태(종방향 및횡방향)에 따라 구분되며, 라이프라인의 형식(연속관과 분절관)에따라구분된다. 이때영구지반변형의크기와 형상이 영구지반변형에 대한 라이프라인의 거동을 해석하는 데 있어서 가장 주요한 인자로 고려되는데, 현재로서는그크기와형상을추정할수없기에 영구지반변형의 크기는 최대 1m 정도를 고려하는 것이적절하며형상은Block 형상또는Sine 형상을 사용하는것이적절한것으로알려져있다.

①종방향영구지반변형에대한거동해석

종방향 영구지반변형을 받는 라이프라인의 경우 그거동특성을다음과같은식으로표현할수있다.

$$\varepsilon = \begin{cases} \dfrac{\alpha L}{2L_{em}} & L < 4L_{em} \\ \dfrac{\alpha L}{\sqrt{LL_{em}}} & L > 4L_{em} \end{cases} \quad \cdots\cdots(1)$$

식 (1)은Nordberg 등이 1992년관과지반사이의 하중및변위에대한탄-소성관계식에기초하여제안한해석식으로서 ε은관의축방향최대변형률이며 Lem은 영구지반변형지역의 영향길이를 의미한다. 관의최대변형률을산정하기위해서는먼저 Lem을 결정해야하는데이때다음식을사용한다.

$$L_{em} = \frac{\alpha EA}{t_u} \quad \cdots\cdots(2)$$

식 (2)에서E는파이프의탄성계수, A는파이프의 면적, L은종방향 영구지반변형이발생된길이로서 가정해야 하는 값이다. 식 (2)를 보면 알 수있듯이 Lem은 t_u에의해산정될수있는데여기서 t_u는마찰에의한최대저항력으로서다음식으로표현된다.

$$t_u = \frac{\pi}{2} DYH(1+k_0)\tan\phi \quad : 사질토지반 \cdots(3)$$

$$t_u = \pi D\alpha S_u \quad : 점토질지반 \cdots\cdots(4)$$

식 (3)과 (4)에서 γ는흙의유효단위중량, H는관의중심을기준으로한매설깊이, φ는모래의전단저항각이며, k_0는 비점착 정규압밀토의 경우 0.35 ~ 0.5를사용하고, D는관경, S_u는비배수전단강도, α는 S_u에따라변화하는점착계수이다.

②횡방향영구지반변형에대한거동해석

[그림6]과같은횡방향영구지반변형을받는라이프라인의경우 거동해석은크게두 가지로다시구분될 수 있다. 즉, 영구지반변형의 폭이 큰 경우와 작은경우이다.

먼저, 영구지반변형의 폭이 큰 경우 지반변형에 대해 라이프라인은 비교적 유연한 거동을 보이며 관의 횡방향 변위는 지반의 변위와 거의 동일하다고가정하게된다. 또한관의변형률은최대휨변형률과평균적인축방향인장변형률로구분될수있으며전체관의변형률은두개의합으로나타나게 된다.

반면, 영구지반변형의 폭이 작은 경우 관 자체가 비교적강성 거동을보이며관의 횡방향변위는지반의 변위보다 훨씬 작아지게 되고 관의 변형률은 주로지반과관의상호작용에의해발생된다. 이경우 축방향 변형률은 무시하게 된다. 그러므로 최대 변형률은휨변형률과동일하게되며다음과같은식으로표현된다.

$$\varepsilon = \varepsilon_b = \pm \frac{p_u W^2}{3\pi EtD^2} \quad \cdots\cdots(5)$$

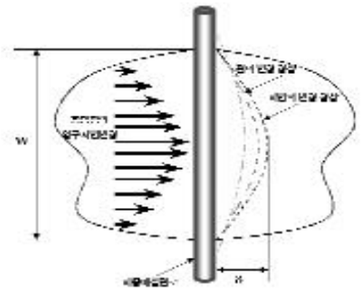
여기서, t는관의두께를의미하고 Pu는 단위길이 당작용하게되는지반-관상호작용력으로서다음과 같이표현된다.

$$p_u = \gamma H N_{qh} D \quad : 사질토지반 \cdots\cdots(6)$$

$$p_u = S_u N_{ch} D \quad : 점토질지반 \cdots\cdots(7)$$

여기서, N_{qh}와 N_{ch}는사질토지반과점토질 지반에대한수평지지력계수이다.

[그림6] 횡방향영구지반변형을받는라이프라인의거동



5. 결론

라이프라인관련해석및설계는단일라이프라인 구조물을대상으로주변지반의정적토압및기본적인제원 · 재료특성등만을고려한상태에서상시하중에대한 설계만이 수행되어 왔으나 지진발생 후, 라이프라인구조물의역할이가지는중요성을인식하게됨에따라내진설계가병행되는추세이다.

현재까지는라이프라인의피해를유발시키는하중인자와형상인자에따라직선관에대한내진설계가 이루어지고있는실정이다.

라이프라인은 일반적인 구조물과는 달리 일정한 공간에서다양한구조물들이연결된네트워크의형태로나타난다.

그러므로, 라이프라인의공간적특성(매설위치에 따른 지반 및 인접구조물과의 상호작용변화)과 구조적 특성(연결형태 및 구조 · 기능적 연계성) 및 시공단계별 변화 등을 합리적으로 반영할 수 있는 진보된 개념의 구조 해석 및 설계기법을 요구하고 있다.

그러므로 지반-구조물 상호작용 반영, 네트워크 거동특성 및 시공단계별 거동특성에 대한 인자 반영, 해석및설계기법의표준화와자동화등을통해서라이프라인구조해석및설계기법의통합화 · 표준화 · 자동화를포괄하는 라이프라인시스템구조해석및설계기법의개발이필요하다.

참고문헌

①단지조성에따른시설물의내진연구, 한국토지공사, 2001.
②라이프라인의내진설계와내진성능향상, 과학기술부, 2000.
③상수도시설기준, 한국수도협회, 1997.
④日本道路協會, 共同構設計指針, 1986.
⑤Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe, ASCE, 2001.
⑥Pipeline Research Needs, ASCE, 1996.
⑦Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects, MCEER, 1999.