

경량채움재를 활용한 지반영구변위에 대한 지중관 시스템의 개량기법 Remediation of buried pipeline system subject to ground rupture using low-density backfill

추연욱¹⁾, Yun-Wook Choo, TH Abdoun²⁾, MJ O'Rourke³⁾, D. Ha⁴⁾

- 1) 한국과학기술원, 건설및환경공학과 연구교수, Research Professor, Dept. of Civil and Env. Engineering, KAIST
- 2) Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute
- 3) Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute
- 4) Post-doctoral researcher, Department of Civil and Environmental Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute

SYNOPSIS : A remediation technique for buried pipeline system subject to permanent ground deformation is proposed. Specifically, EPS (expanded polystyrene) geofoam blocks are used as low density backfill, thereby reducing soil restraint and pipeline strains. In order to evaluate this remediation technique, a series of 12 centrifuge model tests with HDPE pipe were performed. The amount or spatial extent of the low density backfill was varied, as well as the orientation of the pipe with respect to the fault offset. Specifically, in the -63.5° test, the orientation was such that the pipe was placed in flexure and axial tension. The -85° orientation placed the pipe mainly in flexure. In all cases, the behavior of the remediated pipe was compared to that for the unremediated pipe. The geofoam backfill was successful in improving pipe behavior for two of the three pipe/fault orientations. However, for the 60° orientation, the pipe buckled in compression irrespective of the geofoam backfill.

Key words : pipeline, permanent ground deformation, remediation, centrifuge modeling, low density backfill, EPS geofoam

1. 서 론

영구 지반 변형(permanent ground deformation)은 기본적으로 지표 단층, 산사태, 및 지진 액상화로 인한 침하 및 측방변위 등에 의해 발생한다. 영구 지반 변형은 많은 사회 시설물에 큰 위협이 되고, 인간 사회 및 산업활동에 생명선이 되는 전기, 수도, 가스, 하수 관로 등에 치명적이다. 지반변형에 의해 관로에 나타나는 피해는 관로와 지반변위의 형태에 따라 다양하게 나타난다. 그림 1에서와 같이 정단층(그림 1b)과 주향이동단층(그림 1a)의 단층면의 이동방향과 관로의 반향이 만나는 각도가 (-)각인 경우, 축방향 인장과 휨변형이 발생하고, 역단층(그림 1c)과 주향이동단층의 관로-단층면각이 (+)인 경우, 축방향 압축 및 휨변형을 가지게 된다. 특히, 대부분의 경우, 단층 변위가 발생하는 영역이 제한적이지만, 관로에 미치는 변형률의 크기가 매우 크기 때문에 잠재적인 피해가 매우 심각하다.

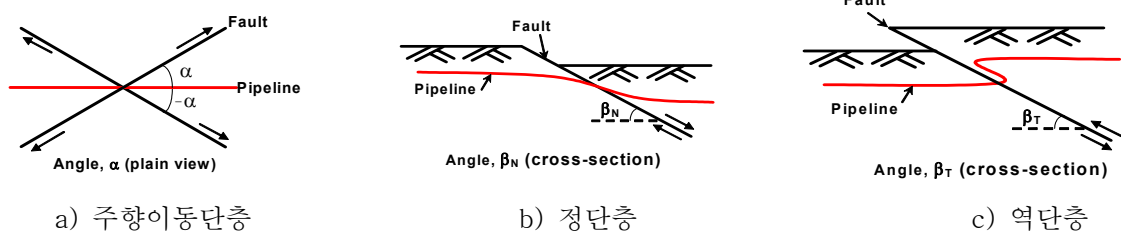


그림 1. 단층에 의한 관로의 거동

영구지반변형에 의한 지중매설관로의 피해를 경감시키기 위하여 다양한 연구들이 발표되었다. 고강도 및 고연성 재료의 관로, 팽창/수축 강화 조인트, 회전성 조인트의 적용, 피해 예상 지역으로 부터의 격리 또는 재매설 기법 등이 있다.

재매설 및 재배치는 대규모 지반의 변형이 예상되는 지역을 단순하게 피해가는 방식으로, 상대적으로 설계시기 및 새로운 관로를 매설하는 시기에 적용하기 매우 쉬운 기법이고, 기존의 관로에도 적용이 가능하나, 일정기간 동안의 사용중지가 필수적인 단점을 지닌다. 또한, Bukovansky 등(1985)은 약 365m의 관로를 재배치를 위하여 약 1백만 달러의 경비가 소요되었다고 보고하였다. 재해위험지역을 가로지르는 관로의 경우, 수직적인 관로 위치의 조정을 통하여 지반 변형으로부터 관로를 격리할 수 있다. 일례로, 알래스카로부터 이어지는 관로의 경우 단층지역을 가로지르는 지역에서 ‘축구대’ 형태의 지지대 위에 관로를 위치시킴으로서 단층 위험으로부터 격리하였다. 반면, 측방유동과 같은 대부분 지표면에 변형이 집중되는 경우, 지중 깊이 천공을 통하여 재해위험지역 아래로 관로를 배치함으로써 피해를 경감시키고자 하였다. 그러나, 이와 같은 재매설 및 재배치는 위험지역에 대한 대안위치가 제한적이고, 초기 매설단계 이외에는 적용하기가 힘들고 많은 경비를 소요하기는 단점을 가지고 있다.

연속 관로의 경우, 고강성 또는 두꺼운 관두계를 적용하여 내진성능을 향상시킬 수 있고, 특히, 측방향 변형률이 지배적인 경우, 효과적이다. 반대로, 보다 유연한 재료를 이용하여 매설관로의 내진성능을 향상시키는 기법이 지속적으로 제안되고, 이슈화 되어 왔다. Ballantyne (1992), Wang (1994), Isenberg 등 (1989)은 유연성 접합부의 이용이 PGD의 피해를 경감시킬 수 있다고 제안하였고, 실제로, 유연성 접합부가 상대적인 변위 및 지반의 변형을 흡수하여 관로의 나머지 부분에서 응력이 이완되는 효과를 보였다. 단층 및 지반변형의 보다 상세한 정보를 바탕으로, 유연성 접합부를 단층이 발생하는 지점에 가장 가깝게 배치할 수 있다. 유연성 접합부는 큰 신장 및 수축기능이 요구되어, 지반의 변형 및 단층의 크기가 유연성 접합부의 허용범위 이상으로 작용하는 경우, 본 기능성 접합부가 취약점이 되는 단점을 내포하고 있다.

영구지반변형에 의한 관로의 변형률은 지반-관로의 접촉면에 발생하는 상호작용에 의하여 발생하고, 측방향 변형률은 이론적으로 관로 매설 변수(β_p)에 대하여 증가하는 관계를 가진다(O'Rourke 등, 1999).

$$\beta_p = \frac{\mu\gamma H}{t} \quad (1)$$

측방향 변형률은 뒤채움 되는 매설깊이, 지반-관로 마찰계수의 최소화 및 뒤채움재의 경량화를 통하여 감소될 수 있다. 비슷한 논리가 지반의 횡방향 구속 및 굽힘 변형률에도 적용될 수 있다. 일반적으로 매설깊이는 동결·융기에 대한 보호를 위하여 일정깊이가 유지되어야 되어야 하기 때문에 본 연구에서는 EPS(expanded polystyrene) 지오포름을 뒤채움재로 활용하여, 관로에 작용되는 지반상호 작용력을 최대한 감소시키는 방법을 제안하였다. 또한, 원심모형시험을 이용하여 제안된 개량기법을 모델하여 거동을 평가하고, 개량이 적용되지 않은 지반-관로 모델의 결과와 비교·검토하였다.

2. 경량재 EPS지오폐를 이용한 관로시스템의 개량

EPS 지오폐는 지반 매립 공사에서 하부 지반 및 구조물에 대한 하중을 줄이기 위하여 개발된 경량 채움 재료이다 (Koener 2005). EPS 지오폐는 발포성 플라스틱 재료로서, 상대적으로 강하고 매우 가벼운 밀도(모래의 약 1-3%)를 가진다. 본 연구에서 사용된 지오폐는 ASTM D 6817에 준하여 제작되고, $11-48\text{kg/m}^3$ 의 표준 밀도 범위를 가진다. 지오폐의 경량 매립, 압축성 재료, 단열 재료, 배수재로서 주되게 사용된다. EPS 지오폐는 화학적 저항성 및 생물학적 침식에 대하여 매우 좋은 내구성을 보이지만, 가연성이고 자외선에 침식되는 단점을 가진다. 본 연구의 적용에서는, 최종적으로 지오폐의 뒤채움 이후, 얇은 지반 보호층을 염두에 두고 있기 때문에 크게 고려되지 않았다.

지반의 관로에 대한 영향 영역을 분석하여 그림 2와 같은 4가지 지반개량 안을 제안하였다. 이들 모델 계획은 전형적인 횡방향 단층 변형을 모사하고 있고, 그림 2a-c는 축방향 인장 및 휨변형이 유발되고, 그림 2d는 축방향 압축 및 휨변형이 유발되는 것을 모사한다. 그림 2a, b, d는 정상적인 개량을 시도하였고, 모델 5와 6은 부분 개량을 시도하였다.

지반개량은 우선적으로 횡방향 지반-구조물의 상호작용력을 줄이도록 계획하였다. 중간 깊이의 매설 관로의 경우, 단층변위에 따른 최대 횡방향 지반 반력은 관로의 수동영역의 쉐기꼴의 부분의 무게와 밀접한 관계를 가지고 있다. 본 연구에서 제안되는 기법은 관로위의 영향영역 쉐기부분을 경량 지오폐 블록으로 치환하는 것을 핵심으로 하고 있다. 단층의 위치를 정확히 예측할 수 있다면, 관로로부터 정확히 수동영역(남북 방향 단층에 대한 관로의 북서쪽 영역과 남동쪽 영역)만을 치환하는 것이 경제적이다. 그러나 지표에서 단층의 발생 위치를 정확하게 예측하기는 어려운 관계로, 본 연구에서 제안되는 개량 기법에서는 관로를 중심으로 양쪽 면 모두를 치환하고자 하였다.

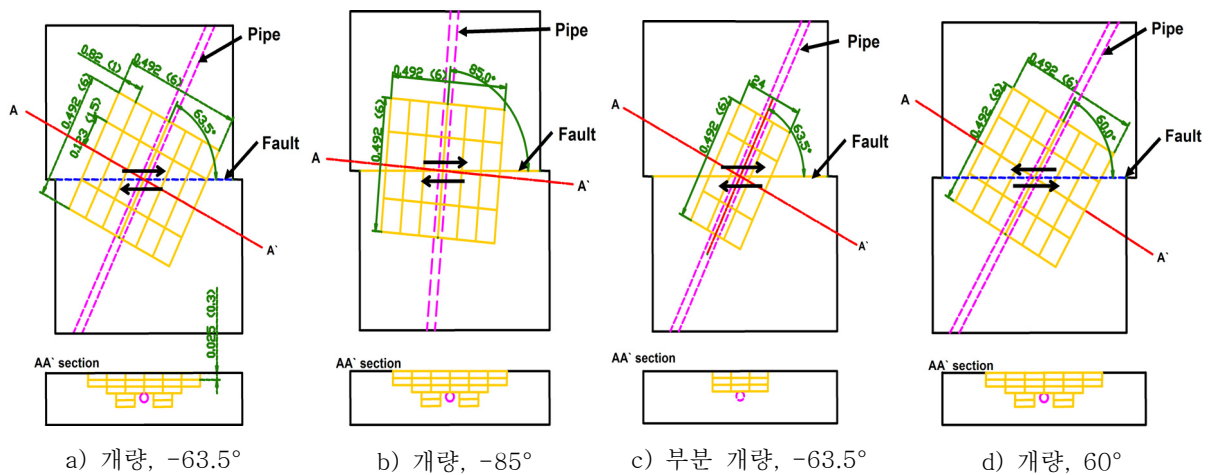


그림 2. 지반 개량 모델의 평면도 및 단면도

본 연구에서 사용된 지오폐 블록은 단위 중량이 0.237kN/m^3 이고, 모래의 약 2% 단위중량이다. 모델 지오폐 블록의 치수는 폭 8.2cm, 길이 12.3cm, 두께 2.5cm으로, 모사모델(프로토 타입) 크기는 12.2g 하에서 폭 1m, 길이 1.5m, 두께 0.305m의 지오폐를 모사한다. 그림 3은 모든 모델 관로 및 블록들이 배열되고, 원심모형시험을 위한 모델의 제작후 모습이다. 전부분 개량의 경우, 관로의 양옆으로부터 관로 위부분을 대체하여, 실제모사모델 크기에서 1.5m 깊이로부터 5층의 지오폐 블록이 위치한다. 반면, 일부분 개량의 경우, 관로의 위부분만을 대체하여 실제모사모델에서 0.9m 깊이로부터 3층의 지오폐 블록이 위치한다.

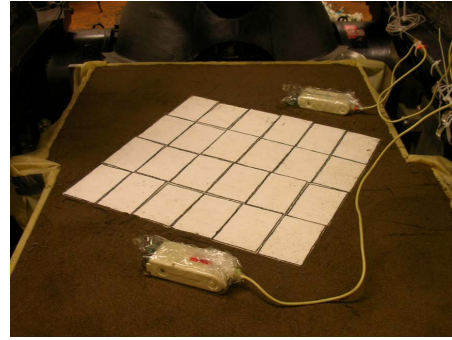


그림 3. 지오포름 모델 블록 및 제작 완료 후 원심모형시험의 모델

3. 경량재 개량기법의 원심모형시험 검증

지반개량기법을 검증하기 위하여 원심모형시험 기술을 이용하였다. 먼저, 영구 지반 변형을 모사하기 위하여, 2단면 스플릿 박스를 PVL Technologies사로부터 제작된 장비를 사용하였다. 두개의 개별적인 박스 통과하여 모형 관이 놓이고, 관 주위로 모형 지반을 조성하고, 각 박스는 각각에 대하여 상대적인 변위를 유발하여 단층에 대한 지중 매질관을 모사 할 수 있도록 설계되었다. 한쪽 단면 박스는 수평으로, 다른 한 단면의 박스는 수직으로 이동하여, 수직단층, 수평이동단층(주향이동단층) 및 조합단층(oblique)을 모사할 수 있다. 스플릿 박스의 최대 수평 이동 범위는 $\pm 4\text{cm}$ 로, 본 연구에서는 12.2g에서 약 1m의 단층 변위를 구현하였다. 본 연구에서는 수평 이동 모사만을 활용하였고, 자세한 정보는 Da 등 (2005)에 발표되었다.

개량기법의 효과를 검증하기 위하여, 고밀도 폴리에틸렌 (HDPE) 관을 대상으로 적용하였고, HDPE관은 AWWA 기준 C901의 수자원 수송에 사용된다. 모델관의 외경은 33.4mm (OD), 관두께는 1.96mm으로, 12.2g의 원심모형시험에서는 외경 407.5mm, 관두께 24.0mm의 관을 대표한다. 개량 영향 평가를 위하여 전장에서 제안된 개량계획에 따라 개량을 적용한 모델과 비교를 위하여 개량을 시행하지 않은 지반-파이프만 존재하는 미개량 모델을 추가로 제작하여 원심모형시험을 수행하고 제안된 개량기술의 영향을 평가하였다. 수행된 원형모형시험은 표 1에 정리된 바와 같이 12개의 단층 모사 시험이 수행되었다. 관재질, 직경, 두께, 매립깊이, 단층 모사 최대변위 및 변위 속도는 모든 시험이 동일하게 이루어졌다. 개량이 적용된 모델의 경우, 개량 계획은 그림 2에 계획된 바와 같이, 관로 주변영역을 지오포름 블록으로 치환하였다. 3개의 관로-단층 초기 교차각이 계획되었고, 각 조건에서 지반 개량 결과와 미적용 결과와 비교하여 개량 효과를 평가하였다.

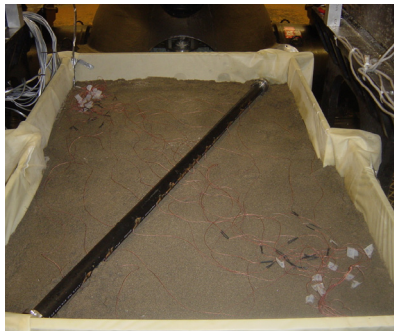
단층변위에 대한 관로의 거동을 예측하기 위하여 스트레인게이지와 tactile센서의 2가지 측정기기가 적용되었다. 관로의 변형률 분포를 구하기 위하여 반력 스프링 선을 따라 주동 및 수동 측에 스트레인 게이지를 부착하고, 쿼터 브리지를 통하여 축방향 및 휨변형률을 측정하였다. 또한, TEKSCAN사의 tactile 압력 센서를 설치하였고, 압력 센서의 측정부위는 유연한 종이형태로 모델 관로에 말아 설치하고, 관로와 지반 사이에 부착되어 관로-지반 사이에 발생하는 수직응력을 측정하게 된다. 그림 4는 tactile 센서가 설치되는 모델의 제작 도중을 모습이다. 스플릿 컨테이너의 이동측 부분은 수평방향으로 최대 실제 모사 모형 크기에서 1.06m의 단층의 변위를 모사하였다.

본 연구에서는 뒤채움 지반재료는 입자 크기의 영향이 나타나지 않는 범위를 고려되었다. 원심모형시험을 위해 사용된 시료는 빙하 충적에 의해 생성된 입도가 양호한 모래로부터 원심모형시험이 적합하도록 40번체(0.42mm)를 통과하고 200번체(0.075mm)에 잔류하는 모래를 채취하여 모델 뒤채움 지반재료로서 사용하였다. 체가름을 통하여 $D_{50}=0.29$ 의 균등한 모래를 구성하였다. 관외경 대 중간입경 비 (OD/D_{50})가 115이고, Ovesen(1981)와 Dickin과 Leung (1983)이 원심모형 실험 결과를 바탕으로 TC2 (2005)에서 의해 제안된 기준 $OD/D_{50} \geq 48$ 에 적합한다. 모델에서 뒤채움재로 사용된 모래시료는 4-5%의 함수비로 조성되었고, 현장의 일반적인 조건을 모사하도록 하였다. 건조 단위 중량은 14.7kN/m^3 로 마찰계수가 40° 에 해당하고, 뒤채움 높이 대 관경 비(H/D)는 2.8로 모델이 제작되었다. 모래의 뒤채움

및 다짐은 층단위로 반복적으로 수행되었고, 햄머 다짐에 의하여 모델이 제작되었다. 사용된 모래시료의 자세한 물성은 Da 등 (2005)에 발표되었다.

표 1. 시험 모델 조건 (실제 모사 모델 기준)

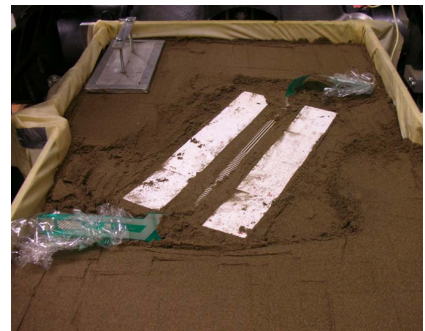
모델	관로-단층 교차각	개량 종류	계측	관직경, m	관두께, m	매설깊이, m	윅셋 속도, m/s	최대 윅셋, m
1	-63.5	개량	스트레인	0.408	0.024	1.124	0.318	1.06
2	-63.5	개량	Tactile	0.408	0.024	1.124	0.318	1.06
3	-85	개량	스트레인	0.408	0.024	1.124	0.318	1.06
4	-85	개량	Tactile	0.408	0.024	1.124	0.318	1.06
5	-63.5	부분 개량	스트레인	0.408	0.024	1.124	0.318	1.06
6	-63.5	부분 개량	Tactile	0.408	0.024	1.124	0.318	1.06
7	60	개량	Tactile	0.408	0.024	1.124	0.318	1.06
8	-63.5°	미개량	스트레인	0.408	0.024	1.124	0.318	1.06
9	-63.5°	미개량	Tactile	0.408	0.024	1.124	0.318	1.06
10	-85°	미개량	스트레인	0.408	0.024	1.124	0.318	1.06
11	-85°	미개량	Tactile	0.408	0.024	1.124	0.318	1.06
12	60°	미개량	Tactile	0.408	0.024	1.124	0.318	1.06



스트레인게이지 설치(뒤채움전)



tactile센서 설치(뒤채움전)



부분 제작된 모델

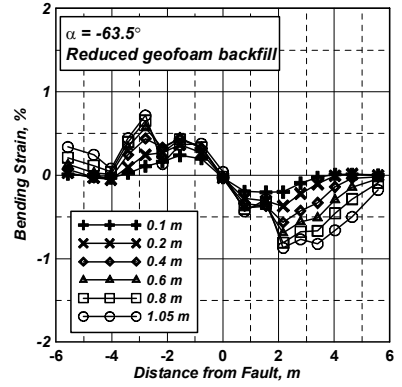
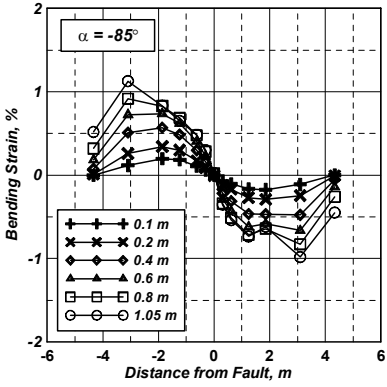
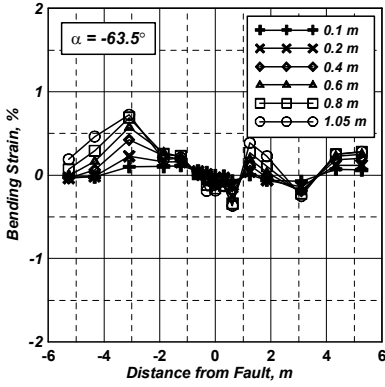
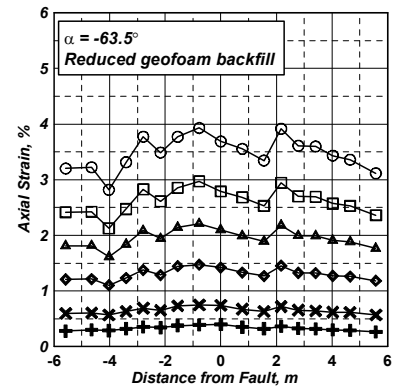
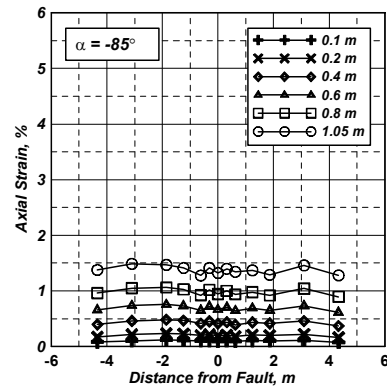
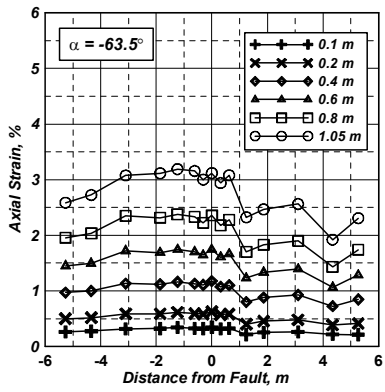
그림 4. 제작단계의 원심모형

4. 경량재 개량기법의 개량 효과

4.1 인장하의 관로에 대한 개량 효과

4.1.1 관 변형률의 개량기법의 영향

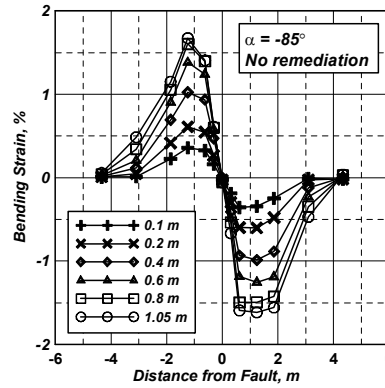
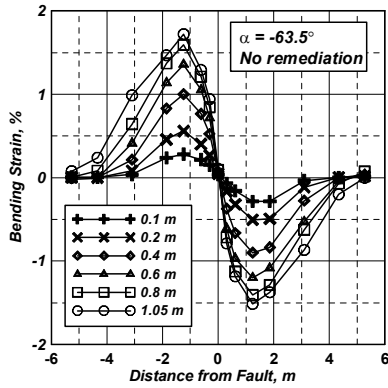
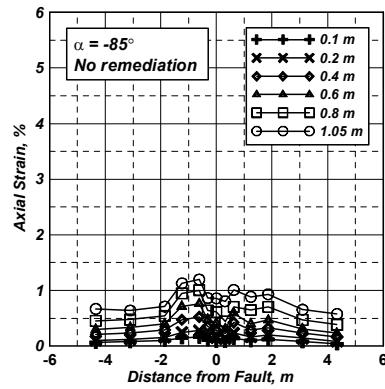
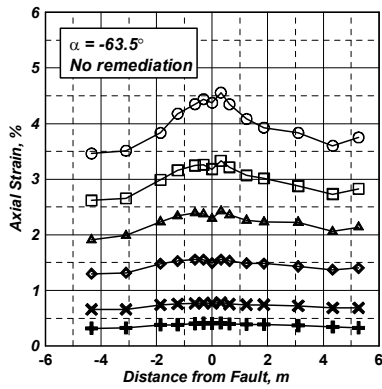
그림 5는 인장을 받는 개량 및 미개량 모델의 단층변위에 의해 유발되는 관로의 축방향 변형률 및 휨 변형률을 나타낸다. 미개량 모델들의 경우(그림 5d, 5e), 축방향 변형률 및 휨변형률 모두 단층면을 중심으로 매우 동일한 대칭구조를 보인다. 작은 변위에서는, 관로 재료가 탄성적인 거동을 보이기 때문에, 단층면으로 부터의 거리에 따라 축방향 변형률이 선형적으로 감소하는 경향을 보인다. 지반-관로 경계면에 작용하는 단위길이 길이방향 마찰계수가 일정하기 때문으로 해석된다. 변위가 커짐에 따라, 관로의 재료가 비선형성을 보이고, 축방향 변형률 및 단층면으로 부터의 거리간의 관계가 보다 복잡해진다. 특정 단층 변위에서, 휨변형률은 관에 발생하는 곡률에 비례하기 때문에, 대칭을 이루면서, 한편은 볼록하고 한편은 오목한 결과를 보인다. 반면, 지오폴 개량에 의해 단층면에 대한 대칭 특성이 사라졌다. 특히 모델 1(그림 5a, 개량, $\alpha=-63.5^\circ$),의 휨변형률은 4개의 극점을 가지고, 축방향 변형률에서는 오른쪽의 크기가 상대적으로 작게 나타났다. 모델 5(그림 5c, 부분 개량, $\alpha=-63.5^\circ$)은 비대칭성이 경향이 약해졌고, 또한, 모델 3(그림 5b, 개량, $\alpha=-85^\circ$)의 경우 대칭 경향이 나타난다.



a) 개량, -63.5°

b) 개량, -85°

c) 부분 개량, -63.5°



d) 미개량, -63.5°

e) 미개량, -85°

그림 5. 개량 및 미개량 모델의 축방향 및 휨변형률

이러한 비대칭적인 거동은 그림 6에 보여진 바와 같이, 단층면에 걸쳐있는 지오폴 블록들의 크기가 상대적으로 커서, 지반 변위에 의해 변형되는 관로에 대해 직접적인 영향을 준다. 단층 변위에 의한 단

층면에 걸쳐 있는 지오폴 블록의 움직임은, 보이는 바와 같이, 단층 변위에 의해 시계방향으로 회전하게 되고, 우측의 블록의 상단 모서리는 관로로부터 멀어지는 반면, 우측 블록의 하단 모서리는 관로를 향해 접근하면서 관로를 밀게 된다. 이로 인해, 추가적인 곡률이 관로에 발생하게 되고, 부분 개량된 경우, 관로 주변에 지오폴이 존재하지 않는 모델 5의 경우 다소 대칭적인 모습을 나타내게 된다. 또한, 단층면이 지오폴 블록들 사이를 가로질러 가는 모델 3의 경우, 대칭성이 확연해짐을 확인할 수 있다.

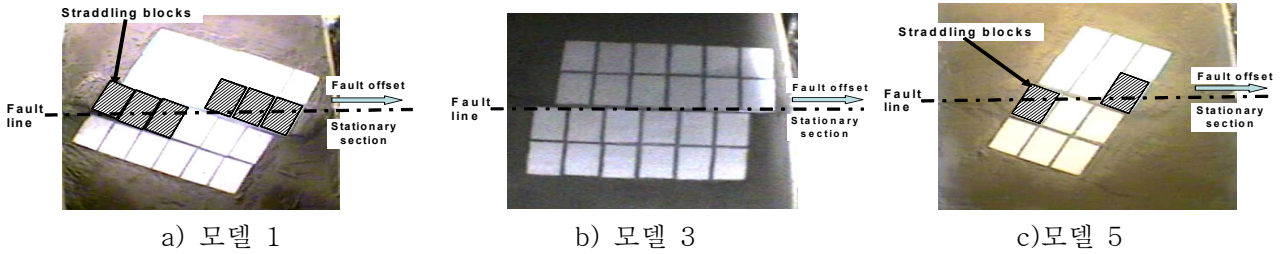


그림 6. 모델 1, 3, 5의 지표면 사진

단층 변위는 매설된 관로반향에 대하여 관로 축방향과 수직방향 성분으로 나눌 수 있고, 각 변위 성분들은 축방향 변형률과 횡변형률에 직접적인 영향인자가 된다. 성분에 따른 영향을 독립적으로 분석하기 위하여 최대 축방향과 횡 변형률을 각각 단층 변위의 길이방향 성분과 수직성분에 대하여 그림 7에 나타내었다. 모델 8 (미개량, $\alpha=-63.5^\circ$)과 모델 10 (미개량, $\alpha=-85^\circ$)의 최대 축방향 변형률 곡선과 최대 횡변형률 곡선이 일치하는 결과를 보였다. 모델 10의 최대 횡변형률은 모델 8보다 약간 큰 값을 보이고, 관로상에서 단층면으로부터 1.2m에서 발생하였다. 최대 횡변형률은 단층변위에 대하여 비선형성을 보이고, 특히, 0.73m 이상의 변위에서 횡변형률의 증가가 거의 나타나지 않았다.

제안된 경량 뒤채움재 기법에 의해 횡변형률 및 축방향 변형률 모두 큰 감소효과를 얻었다. -63.5° 와 -85° 의 전부분 개량 모델의 경우, 45-60%의 횡변형률 감소 효과를 보였고, 부분 개량의 경우, 29-49%의 감소효과를 보였다.

종합적으로, 축방향 변형률에 대하여 큰 효과를 보이지 않았고, 축방향 변형률이 뚜렷이 나타난 모델 1(개량, $\alpha=-63.5^\circ$)의 경우, 17-30%의 감소를, 부분 개량(모델 5)의 경우, 4-14%의 개량을 보였다. 실제 관로에 유발되는 축방향 변형률의 크기가 작은 -85° 의 경우, 약간 증가하는 결과를 보였다.

경량 뒤채움재 기법은 상대적으로 횡 변형률에 대하여 뛰어난 효과를 보이고, 이는 지오폴 블록들로 치환된 영역이 횡변형이 발생하는 단층면 근처에 집중되었기 때문으로 판단된다. 축방향 변형률에 대하여 개량효과가 떨어지는 이유는 관로 전체에 걸쳐 축방향 변형률이 유발되는 반면, 지오폴 블록은 단층면 근처에만 위치하기 때문으로 판단된다.

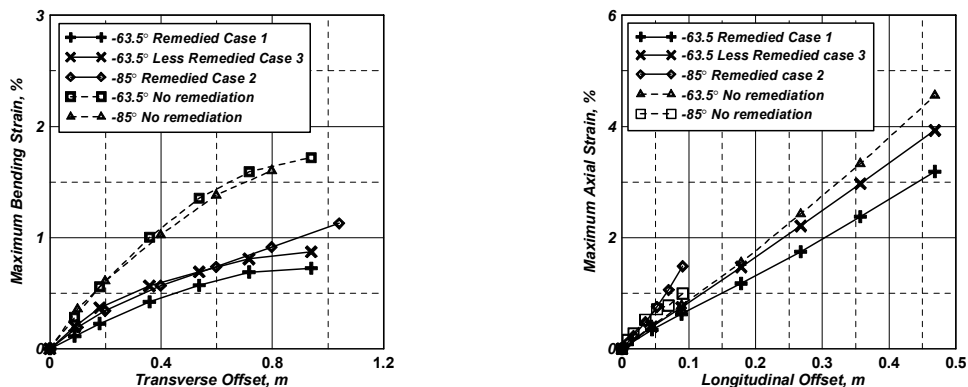
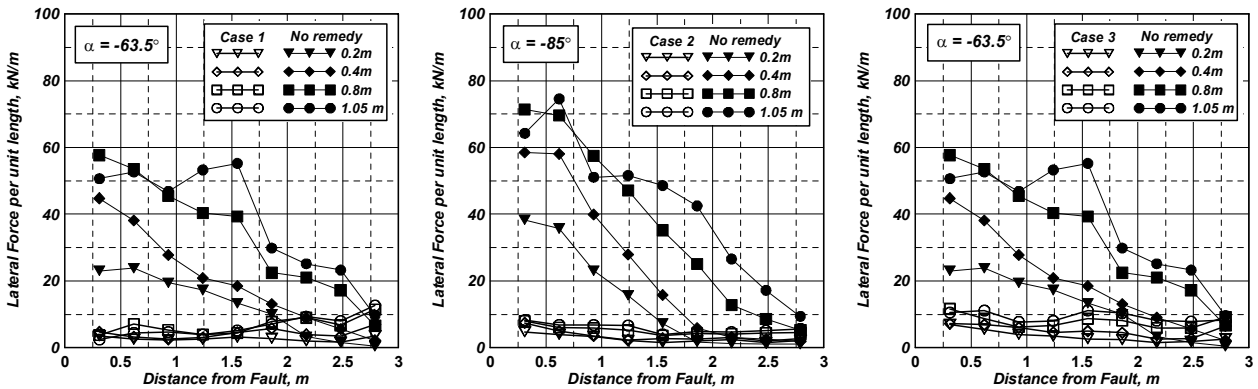


그림 7. 최대 횡변형률 및 축방향 변형률 비교

본 연구에서 제안된 전부분 개량안은 부분 개량안에 비하여 두배 이상의 지오폴을 필요로 하나, 휨변형률에 대한 효과가 비슷하다. 그러므로, 휨방향 변형률이 주되게 예상되는 경우, 부분 개량안이 경제적인 이점을 가진다. 축방향 변형률이 주되게 예상되는 경우, 단층으로부터 관로 방향으로 전부분 개량이 보다 넓게 적용되어야 한다.

4.1.2 지반반력에 대한 개량기법의 영향

모델 2, 4, 6에서 tactile센서를 통하여 측정된 지반-관로 경계면 응력으로부터, 지반 개량에 의한 횡방향 수직반력의 변화를 관찰하였다. 그림 8은 지반의 수평반력 나타내고, 각 경우에 대하여 개량되지 않은 경우와 비교하였다. 개량되지 않은 경우, 수평 반력은 일반적으로 단층면으로부터 멀어짐에 따라 감소한다. 개량된 경우, 전부분 및 부분 개량 모두 수평 반력이 전 길이에 걸쳐 매우 작은 값을 보인다.



a) 모델 2 vs 모델 8 (-63.5°) b) 모델 4 vs 모델 10 (-85°) c) 모델 6(부분개량) vs 모델 8
그림 8. 개량모델과 미개량모델의 횡방향 지반 반력 비교

-63.5°와 -85°의 경우, 개량의 결과가 미개량 결과의 단지 8-9%이고(90%의 감소), 부분 개량의 경우, 약간 작은 80%의 감소효과를 보였다. 즉, 전부분 개량 기법에 의하여 지반-관로 경계면에 발생하는 수평 반력에 거의 90%의 감소를 가져왔고, 이는 결론적으로 50%의 휨변형률 감소를 가져왔다. 상대적인 감소율의 차이는 (90% 대 50%)는 지반-관로 시스템의 복잡한 비선형성으로부터 기인된다고 판단되고, 또한, 개량되지 않은 -63.5°의 경우에서, 0.8m에서 1.05m로 25%의 단층변위가 발생함에도 불구하고, 관로의 휨변형률에서는 증가를 보이지 않는 것으로부터 지반-관로 시스템의 비선형성 거동을 다시 확인 할 수 있다.

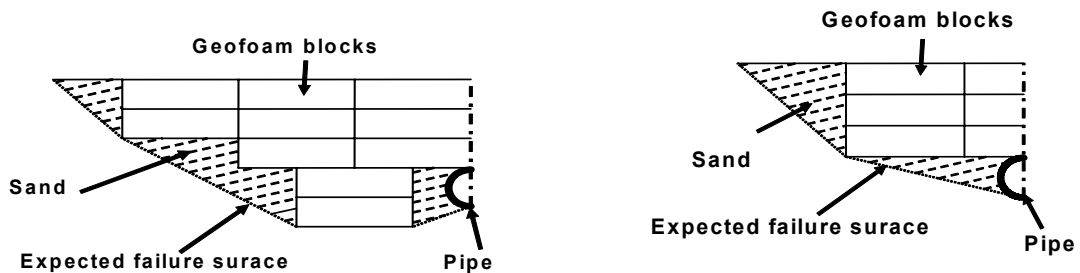


그림 9. 정상개량과 부분개량 기법의 예상 파괴면

수평반력의 감소를 이해하기 위하여, 그림 9와 같이 파괴면을 가정하여 평균 단위 중량을 고려하면 표 2와 같다. 전부분 개량에서 추정되는 파괴영역의 평균 단위 중량이 미개량 경우의 25%이고, 부분 개량의 경우 38%이다. 평균 밀도에서 감소는 지반 수평 반력의 감소 정도에 직접적으로 상응하지 않고 있다. 지반 수평 반력의 감소는 평균 밀도의 감소에서 직접적으로 설명되지는 못하지만, 일정정도 비례

하고 있음을 확인할 수 있고, 지오폴의 블록 형태의 거동과 지반거동의 차이, 파괴면 상의 마찰거동이 제대로 유발되지 않는 등으로부터 현상을 유추할 수 있다.

표 2. 최대 지반반력 및 평균 밀도의 감소 비율

	최대 횡방향 지반반력, P_u (측정값)	평균 밀도 (추정값)
정상 개량	8%~9%	25%
부분 개량	19%	38%
미개량	100%	100%

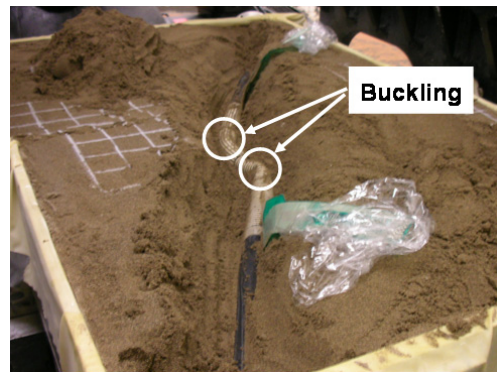
4.2 압축변형하의 관로에 대한 개량 효과

축방향 압축을 받는 관로에 대한 경량 뒤채움재 기법을 적용성을 평가하였다. 12.2g하에서 모델에 단층을 유발하고, 1g상태에서 굴착을 통하여 HDPE과의 거동을 관찰하였다(그림 10). 압축력을 받았던 두 경우 모두, 단층 변위 도중 관로에 좌굴이 발생하였고, 지오폴이 적용되지 않았던 경우, 2곳에서 단층면으로부터 대칭되는 위치에서 좌굴이 발생하였고, 지오폴이 적용된 경우, 1곳에서 좌굴이 발생하였다. 좌굴이 발생한 지점은 적어도 50%이상의 단면 손실을 보였고, 이는 관로의 전송능력의 큰 저하를 가져올 것으로 유추할 수 있었다. 결론적으로, 압축 조건하의 관로에 대해서는 경량 뒤채움재 기법이 어떠한 이점을 가지지 못함을 확인할 수 있었고, 관로에 압축변형이 예상되는 경우, 압축 조건을 피하기 위하여 설계단계에서부터 초기 관로-단층면 교차각을 조절하여 설계·매설하여야 할 것으로 판단된다.

경량 뒤채움재에 의한 관로는 단층 변위 0.7m에서 발생하였고, 개량이 적용되지 않은 관로의 경우 0.8m에서 발생하였다. 경량 뒤채움재에 의해 압축을 받는 관로가 약화되었고, 이는 관로를 구속하는 주변 응력이 감소에 의해 발생하였음을 확인할 수 있다.



a) 지오폴 지반 개량 적용



b) 지반 개량 미적용

그림 10. 단층 모사 이후 굴착에 의한 관로 관찰

5 결론 및 요약

본 논문에서 단층과 같은 영구지반변형에 의한 관망의 피해를 경감시키기 위하여 경량재를 활용한 지반개량기법을 제안하였다. 경량채움재로 EPS 지오폴 블록을 사용하였다. 경량채움재를 통하여 지반변위에 의해 지중관에 작용하는 지반반력 및 지중관의 변형률을 경감시켰다. 제안되는 기법의 효용성을 검증하기 위하여 12개의 원심모형시험이 수행되었다. 일련의 시험에서, 단층변위와 지중관의 3가지 다른 교차각의 경우에 대한 개량기법의 영향을 평가하였다. 지중관의 교차각이 -63.5° 로 휨과 인장변형이 동시에 유발되는 경우와 -85° 로 휨변형이 지배적으로 나타나는 경우, 마지막으로 교차각이 60° 로 압축변형을 받는 경우, 모두에 대하여, 경량채움재로 개량되지 않은 지중관의 경우와 비교하여 제안된 기법

의 효용성을 검토하였다. 또한, 경량채움재의 치환범위의 영향도 고려되었다. 원심모형시험결과, 지오폴 채움재는 인장변형 및 휨변형에 대하여 성공적인 개량효과를 보였다. 반면, 압축변형의 경우, 경량재의 사용에도 불구하고 지중관에 좌굴이 발생하는 결과를 얻어, 결론적으로 압축변형의 경우 지중관과 단층 변위면 교차각이 압축변위를 피하도록 설계시에 고려하도록 추천된다.

감사의글

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구이고(KRF-2005-214-D00373), 또한, 미국 NSF의 the George E. Brown, Jr. Network for Earthquake Engineering Simulation (NEES) Program의 부분적 지원을 받아 수행되었고 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ballantyne, D.(1992) "Thoughts on a pipeline design standard incorporating countermeasure for permanent ground deformation". *Proc of 4th Japan-US Workshop on Earth. Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction*, Honolulu, Hawaii, pp. 875~887.
2. Bukovansky, M, Greenwood, J.H., and Major, G.(1985), "Maintaining Natural Gas Pipeline in Active Landslides", *Proc of 1st Inter. Conf. of Advances in Underground Pipe Eng.*, ASCE, pp. 438~448.
3. Dickin, E.A., and Leung, C.F.(1983), "Centrifugal model tests on vertical anchor plates", *Journal of Geotechnical Eng.*, ASCE, Vol.109, No.2, pp.1503~1525.
4. Ford, D.B.(1983), "Joint design for pipelines subjected to large ground deformation", *Earth. Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment*, PVP-77, ASME, New York, pp. 160-165.
5. Ha D, Abdoun T, O'Rourke M, Van Laak P, O'Rourke T, Stewart H.(2006), "Split-containers for centrifuge modeling of permanent ground deformation effects on buried pipeline systems", *Proc of 6th Inter. Conf. on Physical Modeling in Geotechnics*, Hong Kong, China, pp. 729~734.
6. Isenberg J., Richardson E.(1989), "Countermeasures to Mitigate Damage to Pipelines", *Proc of 2nd US-Japan Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifelines*, Buffalo, New York, pp. 468-482.
7. Koerner, R.M.(2005), *Designing With Geosynthetics*, Prentice Hall, New Jersey.
8. Nagamachi, S.(1990), "Analysis of liquefaction damages and seismic countermeasures for conduits", *Proc of 3rd Japan-US Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures for Soil Liquefaction*, San Francisco, USA, pp.77~91.
9. O'Rourke, M., Liu, X.(1999), *Response of Buried Pipelines Subject to earthquake Effects*, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Monograph Series. No. 3.
10. Ovesen, N.K.(1981), "Centrifuge tests of the uplift capacity of anchors", *Proc of 10th Inter. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Stockholm, Sweden, pp. 717~722.
11. Technical Committee TC2.(2005), Catalogue of scaling laws and similitude questions in centrifuge modeling. <<http://geo.citg.tudelft.nl/allersma/tc2/TC2%20Scaling.pdf>>.
12. Wang, L.R.L.(1994), "Essence of repair and rehabilitation of buried lifeline systems", *Proc of 2nd China-Japan-US Trilateral Symp. on Lifeline Earthquake Eng.*, Xi'an, China, pp.247~254.