

파이프형 앵커의 인발거동에 대한 연구

Study on Pullout Behavior of Pipe Anchor

배우석[†] · 이봉직¹⁾ · 권영철²⁾ · 이준대³⁾

Bae, Wooseok · Lee, Bongjik · Kwon, Youngcheul · Lee, Jundae

ABSTRACT : In this study, laboratory model test was performed to estimate pullout behavior of pipe type anchor with surface roughness, embedment and diameter. The design of buried pipe anchors in areas of vertical ground movement is governed, in part, by magnitude of the forces imposed on the pipe and displacements at which they are developed. In this paper, uplift resistance and displacement characteristics of pipe anchors caused by ground condition and embedment ratio, surface roughness, pipe diameter through the analysis of pipe anchor model test were compared and analyzed. The test results of the buried pipe showed that as the relative density increases, ultimate uplift resistance increase in 20%. When pipe anchor is failed with the relative density of the ground, the change of surface roughness, it was shown that the deformation increases as the ratio of penetration increases from 2 to 8 in five times approximately. And most anchor-based theories overestimate the breakout factor.

Keywords : Pipe anchor, Ultimate uplift resistance, Embedment ratio, Breakout factor

요지 : 본 연구에서는 표면거칠기와 근입비, 직경에 따른 파이프형 앵커의 인발거동을 평가하기 위하여 실내모형실험이 시행되었다. 수직방향의 지반 변형에서 매입된 파이프형 앵커의 설계는 파이프에 부과된 힘의 크기에 의해 지배받는다. 본 논문에서는 모형 실험의 분석을 통하여 파이프 직경과 표면 거칠기, 근입비와 지반상태로 야기된 파이프형 앵커의 변위 특성과 극한 저항력을 비교하고 평가하였다. 실험결과는 상대밀도의 증가에 따라 극한 인발력이 20%가량 증가하고 있음을 보여주고 있다. 지반의 상대밀도와 파이프의 지름, 표면거칠기의 변화에 따른 파이프형 앵커의 파괴시 변위는 근입비가 2에서 8로 증가함에 따라 약 5배 정도의 증가 경향을 보였다. 또한 앵커이론에 근거한 이론식들은 인발계수를 과대평가하는 것으로 나타났다.

주요어 : 파이프형 앵커, 극한인발저항, 근입비, 인발계수

1. 서론

말뚝기초는 상부구조물의 하중을 지반으로 전달하는 매개 구조물의 기능을 수행한다. 이에 반해 앵커는 상부에 작용하는 상향의 인발력이나 수평력에 저항하기 위한 기초 구조물이다. 기초 지반에 근입된 앵커는 연구와 시공과정에서 많은 기술적 문헌 연구가 이루어져 왔으며, 해저에서도 앵커의 중요성은 인식되어 많은 기술이 개발되어 왔다. 또한 인발력을 받는 기초 설계를 위하여 과거부터 여러 형태의 앵커가 사용되어 왔으며 여기에는 파이프 앵커, 판 앵커, 직접근입 앵커, 나선형 앵커, 그라우팅 앵커 등이 각종 건설 공사에 사용되고 있다. 그러나 국내의 경우 인발력을 받는 구조물의 종류가 많지 않고, 앵커의 사용이 대부분 흙막이 또는 옹벽의 전도와 활동을 방지하는 역할로만 인식되어 왔다.

그러나 풍력이나 파력에 저항하는 구조물이 매해 증가

함에 따라 인발력 또는 상향력에 저항하기 위한 앵커, 특히 부력의 영향을 고려해야 하는 매립지나 지하수위가 높은 지반에서의 파이프라인이나 수중구조물과 같은 다양한 구조물과 앵커기초에 대한 연구가 요구되고 있다.

파이프형 앵커에 대한 연구는 지금까지 방성택(2003) 등이 실내실험을 통하여 상대밀도와 근입비 등의 인자가 극한인발력에 미치는 영향에 대해 연구한 바 있으며, 박시삼(2005) 등은 나선형 무리앵커에 대한 인발시험을 실시하고 지반의 포화도와 앵커체의 설치간격에 따른 무리효과의 간섭영향을 평가하였다.

국외에서는 Kulhawy(1985)가 얇은 앵커 기초의 인발 거동에 대한 연구를 통해 기본적인 앵커의 형태와 일반적인 설치 방법, 이에 따른 앵커의 인발 거동을 조사하였으며, Das(1990)는 각 앵커 형태의 설계와 지반조건에 따른 분석을 통하여 앵커 기초에 의한 지반의 파괴 형태를 설명한 바 있다.

† 정회원, 충주대학교 토목환경공학과 전임강사(E-mail : wsbae@cju.ac.kr)

1) 정회원, 충주대학교 토목공학부 교수

2) 정회원, 충주대학교 토목공학과 연구교수

3) 정회원, 세명대학교 토목공학과 교수

또한, Trautmann(1985) 등이 실험을 통하여 연구한 결과에 의하면 K값은 느슨한 모래에 근입된 파이프앵커의 경우 0.5, 중간조밀정도의 모래는 0.65, 조밀한 모래에 근입된 경우에는 0.75정도의 값을 제안하고 있다.

파이프형 앵커는 어스 앵커의 일종으로 앵커축 끝부분에 원형의 파이프를 부착하여 지반의 상향 인발력에 저항하도록 고안된 구조물로 알려져 있다. 그러나 지중에 매입된 파이프나 파이프 앵커에 대한 거동규명이나 이에 대한 이론적인 접근이 매우 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 파이프 앵커의 인발하중-변위 거동을 고찰하고, 근입비와 상대밀도에 따른 상대변위를 통하여 극한인발력과 인발계수의 변화를 평가하였으며, 제안된 여러 이론식과 비교하여 기존 이론식의 적용성을 평가하였다.

2. 이론적 배경

지금까지 대부분의 이론적인 해석은 앵커 상부의 흙을 통하여 파괴면 확장을 가정하고 있다. 낮은 근입비에 대해 Meyerhof와 Adams(1968)는 $K=0.95$ 로 가정하고 다음과 같이 극한인발력 예측식을 제안하였다.

$$F_u = \left(1 + \left(\frac{2H}{D} - \frac{H_c}{D} \right) \left(\frac{H_c}{H} \right) K \tan \phi_{ps} \right) \gamma' HD \quad (1)$$

여기서, D 는 파이프의 직경, ϕ_{ps} 는 평면변형률 하에서의 흙의 마찰각을 나타내며, H_c 는 ϕ_{ps} 와 D 에 의존하는 파괴면에 대해 수직적으로 확장된 높이를 말한다.

Murray와 Geddes(1987)는 평형관계를 이용한 접근을 통해 다음과 같은 대안식을 제안하였다.

$$F_u = \left(1 + \left(\frac{H}{D} \right) (\sin \phi_{ps} + \sin \phi_{ps}/2) \right) \gamma' HD \quad (2)$$

여기서, Rowe(1969)가 제안하는 응력과 다일러턴시 관계는 ϕ_{ps} 와 ϕ_{cv} 로부터 다일러턴시각 ψ 를 결정할 수 있다. 여기서, ϕ_{cv} 는 일정체적마찰각을 나타낸다.

다양한 인자들에 의한 인발력의 비교를 용이하게 하기 위해서 무차원 함수인 인발계수를 다음과 같이 사용하였다.

$$N_u = \frac{F_u}{\gamma \cdot D \cdot L \cdot H} \quad (3)$$

여기서, L 은 파이프의 길이, H 는 근입심도를 나타낸다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 지반의 조성

모형지반의 조성을 위해 본 연구에서 사용된 시료는 2.0mm 체를 통과하고 0.074mm체에 남은 모래를 자연 건조시켜 사용하였으며, 시료의 특성을 파악하기 위해 실내실험을 실시한 결과 최대·최소건조단위중량은 각각 17.01kN/m^3 과 13.55kN/m^3 , 비중은 2.6인 것으로 나타났다.

모형 지반은 실험인자의 변화에 따라 다짐도를 변화시킬 수 있도록 지반의 상대밀도를 바꾸어 가면서 지반을 조성하였으며, 지반의 조성은 일정한 다짐에너지를 유지하기 위해 강사장치를 이용하여 균등한 밀도를 가질 수 있도록 하였다. 모형지반의 상대밀도는 중간조밀의 지반을 모사하여 평균 45%, 조밀한 지반을 모사하여 평균 80%로 각각 조성하였다.

3.2 실험장치 및 방법

모형토조는 앵커의 주변영향 범위를 유지하기 위하여 $60 \times 50 \times 50\text{cm}$ 의 크기를 두께 3mm의 강재판으로 제작하였으며, 파이프 앵커는 지름 50mm인 앵커 강봉과 강봉에 부착된 파이프로 구성되었다. 파이프의 지름은 19.1mm와 25.6mm인 스테인레스를 사용하였으며, 파이프 표면의 거칠기를 조절하기 위하여 #50의 샌드페이퍼를 파이프 표면에 부착하였다.

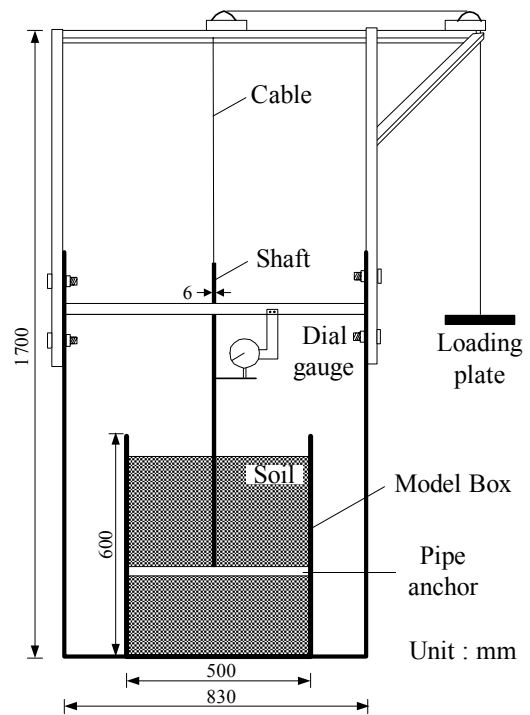


그림 1. 인발시험장치

인발시 앵커의 상향 변위는 하중계와 연결된 0.01mm~50mm 용량의 다이얼게이지를 이용하여 측정하였다. 앵커체의 인발은 두 개의 도르래를 통과하여 앵커강봉의 끝부분과 하중재하판에 연결된 지름 5mm의 강선을 통하여 이루어진다. 또한 하중은 하중재하판을 이용하여 단계적으로 재하하였다.

본 연구는 모래지반내의 파이프 앵커의 인발특성을 고찰하기 위해 흙의 다짐정도에 따라 중간조밀 지반($D_{r(AVE)}=45\%$), 조밀한 지반($D_{r(AVE)}=80\%$)에서 파이프의 지름에 따른 인발실험을 실시하였다. 또한 각각의 지반에 대한 실험은 앵커의 근입비를 2, 4, 6, 8로 변화시키면서 실험을 실시하고 파이프 표면의 거칠기에 따른 인발 거동을 평가하기 위해 파이프의 표면 조도를 변경시킨 후 지반의 상대밀도 및 근입비에 따른 인발실험을 실시하였다.

인발실험은 하중재하판을 통하여 하중을 파괴가 발생될 때까지 단계적으로 가하여 인발이 종료될 때까지 시행되었으며, 모형토조의 전면은 투명한 아크릴판을 사용하였다. 본 실험에서 적용된 실험인자는 표 1과 같다. 여기서, D는 근입된 말뚝의 직경, H는 근입된 심도를 말한다.

4. 실험결과 및 분석

모래 지반에 근입된 파이프형 앵커의 하중-변위특성과 극한인발력의 변화 등 인발거동 특성을 규명하기 위하여 지반의 상대밀도, 파이프의 지름, 근입비, 표면조도 등의 영향인자들을 변화시켜 총 32회의 모형실험을 실시하였다.

4.1 하중-상향변위 관계

하중-변위 곡선 상에서 파괴점은 완전히 인발되어 더 이상 지지를 못하거나 미끄러짐 변위가 크게 발생하는 지점으로 결정하였다.

표 1. 실험상세

Soil condition	Pile diameter (D, mm)	Surface condition	Embedded ratio(H/D)	Test case
Dense sand	19.1	Rough	2, 4, 6, 8	A
		Smooth	2, 4, 6, 8	B
	25.6	Rough	2, 4, 6, 8	C
		Smooth	2, 4, 6, 8	D
Medium sand	19.1	Rough	2, 4, 6, 8	E
		Smooth	2, 4, 6, 8	F
	25.6	Rough	2, 4, 6, 8	G
		Smooth	2, 4, 6, 8	H

그림 2와 3에 보여지는 바와 같이 파이프의 지름이 증가할수록 모래지반과 접하는 주면이 증가하여 파괴에 이르기까지 변위도 증가하는 경향을 보이며, 표면이 거칠고 지반이 조밀할수록 심화되고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 파이프형 앵커의 최대인발하중은 파이프의 직경이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 지반의 밀도와 근입비의 증가에 따라 최대인발하중과 상대변위가 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 또한 지반이 느슨해질수록 초기변위가 증가하고 Slip 파괴 유형을 보이며, 근입비의 증가에 따라 일정 비율로 최대인발하중이 상승하는 경향을 보이고 있는 것으로 나타났다.

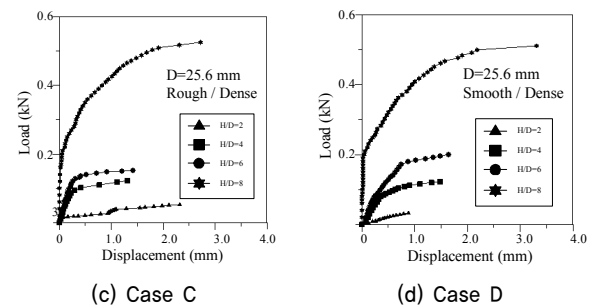
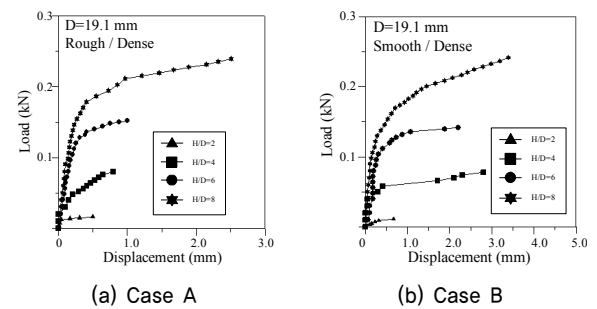


그림 2. 근입비에 따른 하중변위곡선의 변화(조밀한 지반)

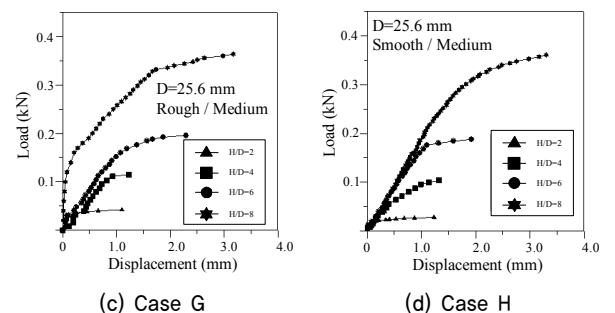
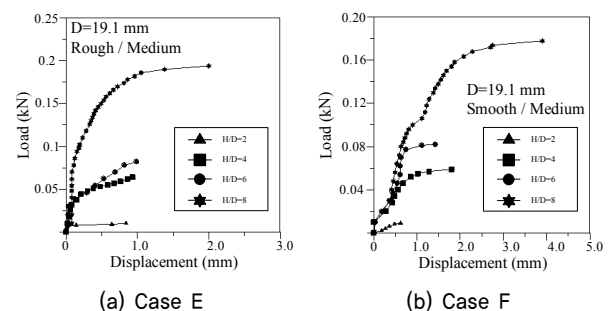


그림 3. 근입비에 따른 하중변위곡선의 변화(중간 조밀한 지반)

파이프형 앵커의 변위는 파이프의 직경으로 정규화하였으며, 분석결과 직경이 작고 앵커체의 표면 조도가 매끄러울수록 파괴 시까지의 상대변형이 큰 것으로 나타났다. 또한 상대적인 파괴변위량은 근입비가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내고 있다.

4.2 극한인발력의 변화

표면이 거친 파이프의 경우 조밀한 지반의 극한인발력이 중간조밀 지반의 경우보다 약 20%정도 높은 값을 나타내며, 파이프 지름이 25.6mm로 증가한 경우에는 조밀한

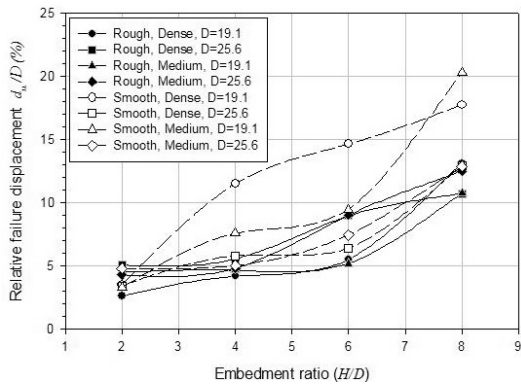
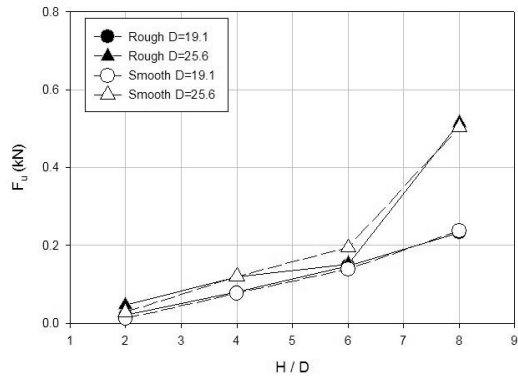
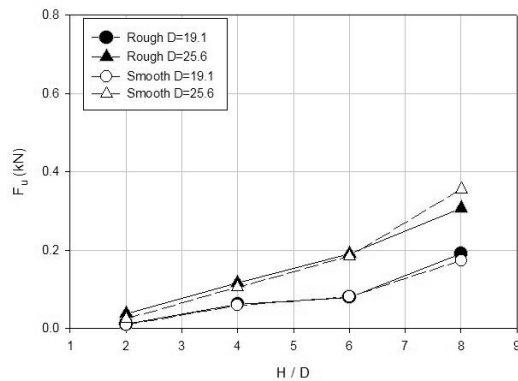


그림 4. 근입비에 따른 상대변위의 변화



(a) 조밀 지반



(b) 중간조밀 지반

그림 5. 표면조도에 따른 극한인발력의 변화

지반이 중간조밀 지반의 경우보다 약 30%정도 높은 값을 나타내고 있다.

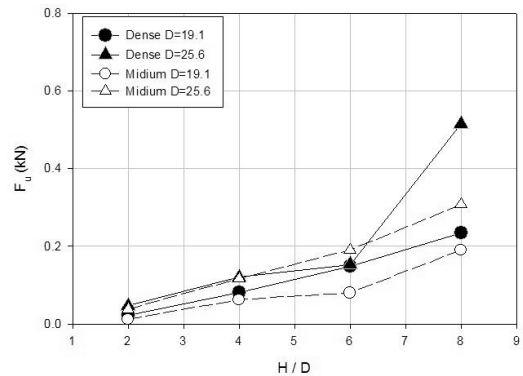
표면이 매끄러운 파이프 앵커의 경우 조밀한 지반이 중간조밀 지반의 경우보다 약 16%정도 높은 값을 나타내고 있으며, 파이프 지름이 25.6mm인 경우에는 조밀한 지반이 중간조밀 지반의 경우보다 약 30%정도 높은 값을 나타내고 있다.

따라서 극한인발력은 Dickin(1994)이 주장한 바와 같이 표면의 거칠기보다는 앵커의 직경이나 지반의 구성 상태에 의해 더 큰 영향을 받고 있으며 근입비에 비례하고 있음을 알 수 있다.

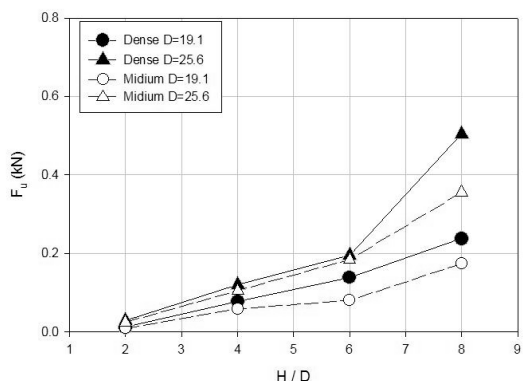
4.3 인발계수의 변화

4.3.1 지반상태에 따른 변화

인발계수는 앵커체 상부의 전단강도와 근입비의 함수로서 그림 7과 같이 표면의 조도에 보다는 앵커체 상부의 상대밀도에 따라 변화하며 이러한 경향은 근입비가 증가할수록 두드러지고 있음을 알 수 있다. 또한 낮은 근입비에서는 직경에 관계없이 유사한 값을 나타내거나 혼조양상을 보이고 있으나 근입비가 증가할수록 직경에 비례하는 값을 나타내고 있다.

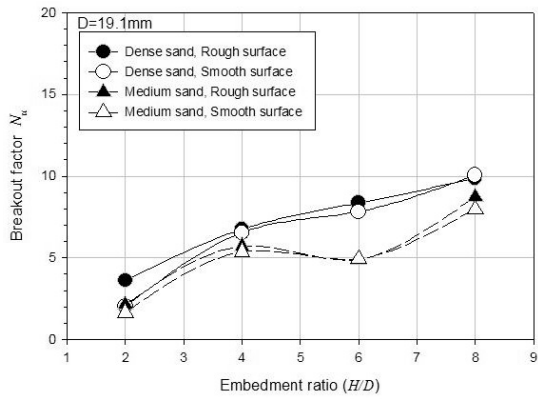


(a) 거친 파이프

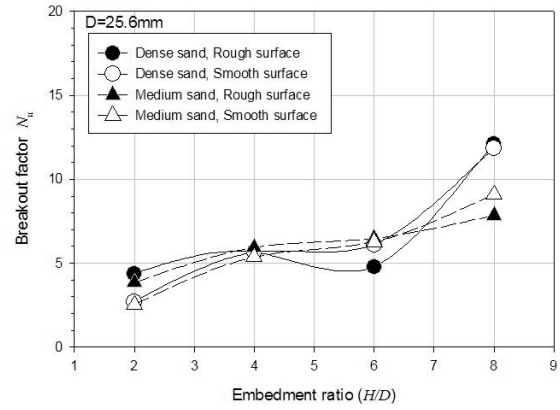


(b) 매끄러운 파이프

그림 6. 지반의 상태에 따른 극한인발력의 변화



(a) D=19.1mm



(b) D=25.6mm

그림 7. 근입비에 따른 인발계수의 변화

표 2. 실험결과

Soil condition	Diameter	Surface condition	H/D	d/D (%)	Pullout load (kN)	Nu
Dense	19.1mm	Rough	2	2.62	0.02138	3.62
			4	4.19	0.07983	6.76
			6	5.50	0.14818	8.36
			8	13.14	0.23320	9.87
		Smooth	2	3.51	0.01206	2.04
			4	11.52	0.07737	6.55
	25.6mm	Rough	2	5.08	0.04658	4.39
			4	5.55	0.11994	5.65
			6	8.98	0.15210	4.78
			8	10.74	0.51475	12.12
		Smooth	2	3.44	0.02864	2.70
			4	5.82	0.11974	5.64
Medium	19.1mm	Rough	2	4.50	0.01157	2.12
			4	4.66	0.06227	5.72
			6	5.18	0.07973	4.88
			8	10.73	0.19005	8.72
		Smooth	2	3.30	0.00902	1.66
			4	7.59	0.05845	5.37
	25.6mm	Rough	2	4.30	0.03756	3.84
			4	4.80	0.11611	5.93
			6	9.02	0.18986	6.47
			8	12.50	0.30724	7.85
		Smooth	2	4.80	0.02461	2.52
			4	5.04	0.10513	5.37
6	7.46	0.18397	6.27			
	8	12.89	0.35569	9.09		

4.3.2 직경에 따른 거동변화

그림 8에 보여지는 바와 같이 인발계수는 조밀한 지반의 경우 파이프의 직경이 증가함에 따라 감소하고 있는 것으로 나타났으며, 지반의 상태가 느슨할수록 직경에 관계없이 유사한 값을 보이고 있음을 알 수 있다.

또한 그림 9에 나타난 바와 같이 파이프의 직경에 대한 상대변위는 지반의 상태와 무관하게 파이프의 표면상태에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 즉 표면이 거친 경우의 상대변위는 직경에 관계없이 유사한 값을 보이고 있으며, 표면이 매끄러운 경우에는 직경의 증가에 따라 상대적인 변위량도 감소하고 있음을 알 수 있다.

4.4 이론식과의 비교

이론식에 의한 값을 인발시험결과와 비교해본 결과 인발계수는 조밀한 지반에서 근입비에 따라 선형적으로 비례하고 있으며, 근입비가 낮은 경우에 비해 근입비가 큰 경우 실험결과와의 오차율이 커지는 경향을 보이고 있어 기존의 이론식이 주로 낮은 근입비에 적합한 것으로 평가되었다. 기존에 제안된 이론식 중에서는 최대평면마찰각의 개념을 사용하고 있는 Meyerhof & Adams의 제안식이 낮은 근입비를 중심으로 가장 유사한 값을 보이고 있으며, Murray & Geddes의 제안식이나 Vermeer & Sutjiadi의 제안식은 실험값에 비해 50% 이상의 오차율을 보이고 있음을 알 수 있다.

실험결과와의 오차율은 지반의 상태가 느슨해질수록 더욱 커지는 경향을 보이고 있으며 조밀한 지반과 마찬가지로 Meyerhof & Adams의 제안식이 실험결과와 가장 부합하고 있는 것으로 평가되었다.

이와 같이 기존의 제안식은 근입비와 지반의 상태에 따라 많은 차이를 보이고 있는 것으로 나타났으며, 파이프 표면의 상태나 파이프의 직경과 같은 인자를 충분히 반영하지 못하고 있는 것으로 평가되었다.

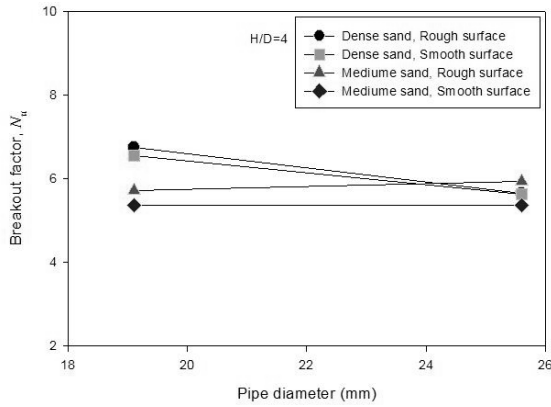


그림 8. 직경의 변화에 따른 인발계수의 변화

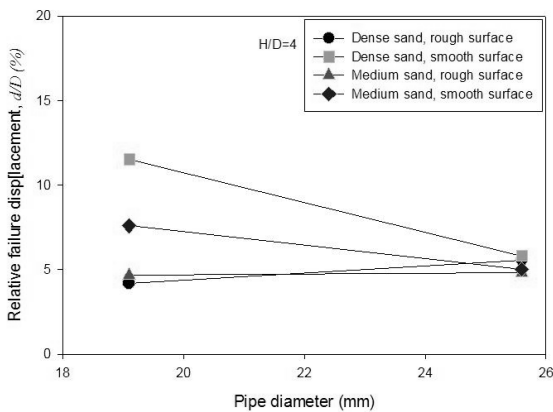


그림 9. 직경의 변화에 따른 상대변위의 변화

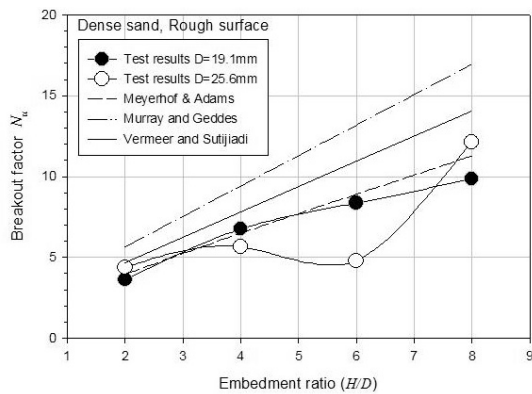


그림 10. 이론식과의 비교(조밀한 지반)

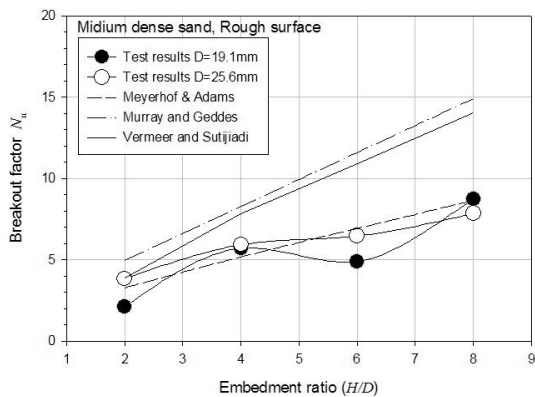


그림 11. 이론식과의 비교(중간 조밀한 지반)

5. 결 론

- (1) 모형지반의 상대밀도를 조밀($D_r=80\%$)과 중간조밀($D_r=45\%$)로 결정하고 인발시험을 실시한 결과 파괴가 발생하는 극한 인발하중은 상대밀도가 증가할수록 극한 인발력이 20% 정도 증가하였고 근입비가 증가할수록 더욱 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다.
- (2) 인발계수는 앵커체 상부의 지반 상태와 앵커체의 직경에 영향을 받고 있으나 일정 근입비 이상의 심도에서는 앵커체 표면의 조도에 의한 영향은 미미한 것으로 나타났다.
- (3) 근입비가 4 이하인 경우 극한인발력은 파이프 위의 상재하중에 비해 표면 거칠기에 더 의존적이나 근입비가 4를 초과하면 파이프 표면의 거칠기 보다는 파이프 위에 상재한 모래의 하중에 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.
- (4) 기존의 제안식은 대부분 과대평가하고 있으며 근입비가 증가하고 지반이 느슨할수록 오차율이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 표면의 상태나 직경과 같은 인자를 충분히 반영하지 못하고 있는 것으로 평가되었다.

참 고 문 헌

1. 박시삼, 이형규(2005), 나선형 앵커의 실내인발시험을 이용한 무리효과 평가기법, *한국지반공학회논문집*, Vol. 21, No. 10, pp. 123 ~ 131.
2. 방성택, 김영진, 김정목, 김제구(2003), 사질토 지반에 근입된 파이프 앵커의 인발거동, *한국지반환경공학회 2003년도 학술 발표회논문집*, 한국지반환경공학회, pp. 219 ~ 225.
3. Das, B.M.(1990), *Earth Anchors*, Developments in Geotechnical Engineering, Vol. 50, pp. 1 ~ 6.
4. Dickin, E. A.(1994), Uplift Resistance of Buried Pipelines in Sand, *Soil And Foundation*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 34, No 2, pp. 41 ~ 48.
5. Kulhawy, F.H.(1985), Uplift Behavior of Shallow Soil Anchors an Overview, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 104, No. 6, pp. 1 ~ 25.
6. Meyerhof, G. G., and Adams, J. I.,(1968), The Ultimate Uplift Capacity of Foundation, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 5, No. 4, pp. 225 ~ 244.
7. Murray, E. J., and Geddes, J. D.,(1987), Uplift of Anchor Plates in Sand, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 113, No. 3, pp. 202 ~ 215.
8. Rowe, P. W.,(1969), The Relationship between the Shear Strength of Sands in Triaxial Compression, Plane Strain and Direct Shear, *Geotechnique*, Vol. 19, No. 1, pp. 75 ~ 86.
9. Trautman, C. H., O'Rourke, T. D., and Kulhawy, F. H.(1985), Uplift Force-displacement Response of Buried Pipe, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 111, No. 9, pp. 1061 ~ 1076.
10. Vermeer, P. A., and Sutjiadi, W.,(1985), The Uplift Resistance of Shallow embedded Anchors, *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 3, pp. 1635 ~ 1638.

(접수일: 2007. 11. 1 심사일: 2007. 11. 12 심사완료일: 2007. 12. 18)