

수평하중이 작용하는 단독말뚝의 배면지반의 저항거동 특성(II)

Behavior of Back Ground of the Laterally Loaded Single Pile (II)

배 종 순¹ Bae, Jong-Soon

김 지 성² Kim, Ji-Seong

김 성 호³ Kim, Sung-Ho

Abstract

In this study, we grasped the resistance state of the back ground which had a notable influence on computing the lateral resistance of the laterally loaded single pile in the homogeneous ground by the model test. In order to grasp a resistance behavior, we have to know the deformation area of the back ground and the side failure angle other than the rotation point of pile and vertical failure angle of back ground which were proposed by Bae & Kim in 2008. We found out in this test the characteristics of the behavior of the back ground in accordance with the shape and size of the pile and ground density. We examined the interrelationship of the relative density of sand, the size and the sectional shape of the pile as well.

요 지

본 연구에서는 모형실험을 통해 균질모래지반에 매설된 횡력을 받는 단독말뚝의 수평저항력을 산정하는데 가장 큰 영향을 주는 배면토의 저항형태를 파악하였다. 저항거동 상태를 파악하기 위해서는 기 발표된 논문(배종순과 김성호 ; 2008)에서 제안된 회전절점, 배면지반의 연직방향 파괴각 이외에 배면지반의 파괴영역의 평면면적과 말뚝측면의 평면 파괴각 등이 파악되어야 한다. 따라서 말뚝의 형상과 크기, 지반밀도 변화에 대한 배면지반의 거동 특성을 실험을 통하여 파악하였다. 또한 흙의 밀도와 말뚝의 단면형상에 따른 상관관계를 규명하였다.

Keywords : Deformation area, Laterally loaded pile, Model test, Side failure angle

1. 서 론

횡력을 받는 단독말뚝의 거동 특성에 관한 이론적 연구들은 활발히 진행되고 있다. 하지만 여러 가지 불분명한 요소, 즉 말뚝-흙 경계요소의 불확실성, 지반의 비균질성, 지하수 변동에 따른 미세 토립자들의 이동 등으로 인하여 많은 문제점을 안고 있다. 따라서 최근 연

구들에 의하면 이러한 문제점들을 극복하기 위하여 여러 가지 해석 모델을 제시하였고, 그 중 하나가 SW (Strain wedge) 모델이다.

SW 모델에 관한 연구는 Brown 등(1988)이 횡력이 작용하는 무리말뚝에서 말뚝 상호간의 간섭에 의한 하중저감효과를 설명하기 위하여 썬이 이론을 접목하였고 Ashour 등(1999, 2004)과 Ashour & Norris(2003)는 다층

1 정회원, 경상대학교 토목공학과 교수, 경상대학교 공학연구원 연구원 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Gyeongsang National Univ., Researcher, Eng. Research Institute)

2 경상대학교 토목공학과 박사과정, 경상대학교 공학연구원 연구원 (Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Gyeongsang National Univ., Researcher, Eng. Research Institute, sea166@naver.com, 교신저자)

3 정회원, 청경E&D 이사 (Member, Director of Chunggyung E&D)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

지반에 매설된 말뚝에 횡력이 작용할 경우 하중-변형 거동 특성을 썩기 이론을 접목하여 해석한 결과를 발표하였다. 그리고, Wang & Reese(1999)는 말뚝에 작용하는 횡력에 대한 저항 영역을 썩기 모델로 가정하여 극한상태의 수평저항력을 산출하는 식을 제안하였다. 하지만 대부분 제시된 SW모델은 토압론을 이론적 근거로 한 이론적 제시일 뿐 이에 대한 실험적인 검증은 확인이

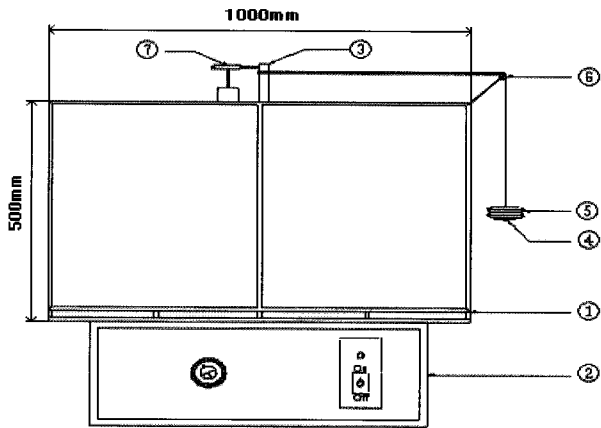


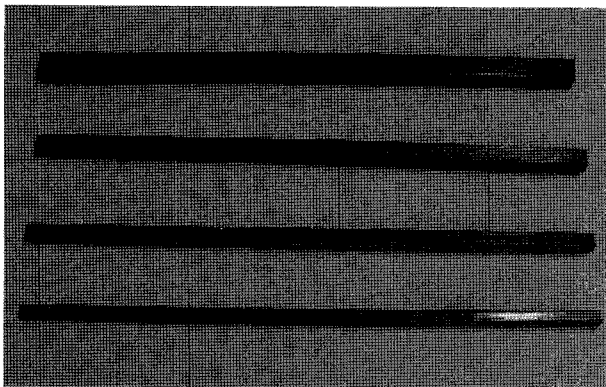
그림 1. 모형 실험장치

되지 않은 상태다. 따라서 SW모델에 관한 모형 실험(배종순과 김성호 2008)을 통해 말뚝과 썩기 파괴면이 이루는 경사각과 말뚝의 회전절점을 구할 수 있는 식을 산출하였다. 이에 본 연구에서는 말뚝 배면지반의 지표변형에 관한 모형실험을 통해 말뚝 배면지반의 변형면적(A_f)과 말뚝과 지반파괴 영역이 이루는 측면 경사각(β_s)을 말뚝의 단면형상(원형, 정사각형)과 지반의 밀도와의 상관관계에 관해 식을 산출하여 횡력이 작용하는 단독 말뚝의 배면지반의 저항 거동특성을 규명하고자 한다.

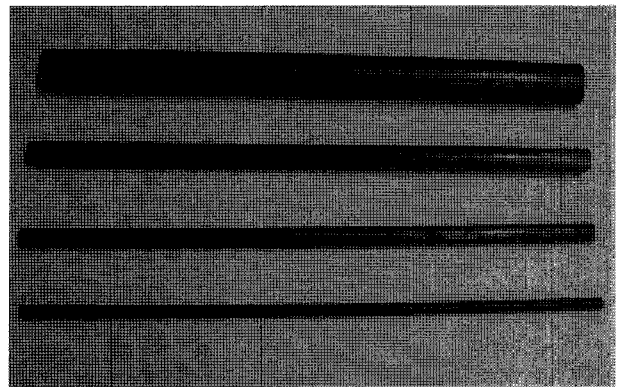
2. 모형실험

2.1 모형실험 장치 및 모형지반

횡력이 작용하는 단독말뚝 배면지반의 지표변형을 관찰하기 위한 모형실험 장치와 모형지반은 배종순과 김성호(2008)의 실험장치와 유사하며 원형 말뚝을 추가하였다. 그림 1 모형실험 장치에서 ①은 강체 토조(1000mm×200mm×500mm), ②는 모형지반 다짐 장치,



(a) Square pile



(b) Circle pile

그림 2. 모형 말뚝

표 1. 모형말뚝의 재원

Pile shape	L (Length) (mm)	D or B (Diameter or Breadth) (mm)	T (Thick) (mm)	E (Young's Modulus) (N/cm ²)	I Geometrical moment of inertial (cm ⁴)	EI (N·cm ²)
Square	550	7.0	1.27	1.24×10^7	0.016711	204848.01
		9.5			0.040162	492319.27
		11.5			0.092041	1128262.08
		16.5			0.301177	3691901.49
Circle	550	6.0	1.27	1.24×10^7	0.005655	69324.58
		10.0			0.033867	415154.47
		16.0			0.160497	1967417.74
		28.5			1.008626	12363984.76

③은 모형말뚝, ④는 재하 장치, ⑤는 하중(추), ⑥은 수평변환장치, ⑦은 변위계를 나타내며 모형 말뚝은 그림 2와 같이 동관으로 제작된 원형 말뚝과 사각 말뚝을 사

용하였다. 말뚝의 제원은 표 1과 같다. 모형지반의 제작에 사용된 재료는 주문진 표준사로 재료의 물리적 성질은 표 2와 같고 입도분포곡선은 그림 3과 같다. 모형지반은 강제토조 하부의 진동 다짐장치를 이용하여 진동 시간별 상대밀도를 표 3과 같이 제작하였다.

표 2. 지반재료의 물리적 특성

Property	Value
최대 건조밀도(r_{dmax}) (kN/m^3)	15.69
최소 건조밀도(r_{dmin}) (kN/m^3)	14.02
비중(G_s)	2.57
유효경(D_{10}) (mm)	0.32
균등계수(C_u)	1.438
곡률계수(C_g)	0.930

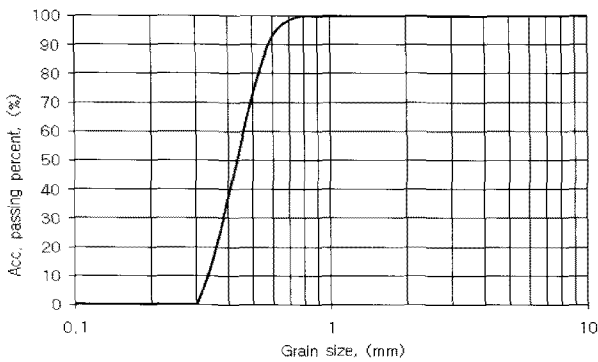


그림 3. 지반 재료의 입도분포곡선

2.2 모형실험 방법

그림 4는 횡력이 작용하는 말뚝 배면지반의 지표변형을 관찰하기 위한 실험을 단계별로 나타낸 것이다.

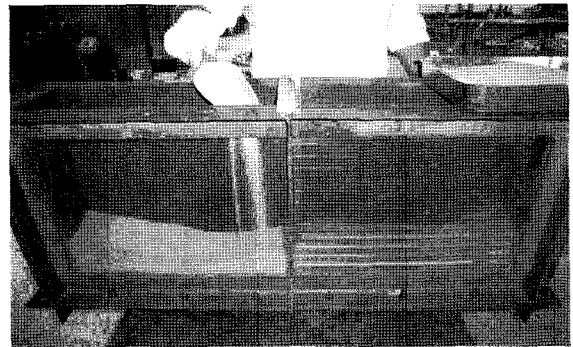
그림 4(a)와 같이 모형 말뚝을 일정한 위치에 설치하고 그림 4(b)와 같이 모래의 낙하에 따른 다짐을 방지하기 위하여 모래가 토조 전면판을 타고 흘러내리도록 조심하여 살포한다. 그리고 주어진 조건에 따라 진동 다짐을 실시하고 지표면과 토조의 높이가 일치하도록 정리

표 3. 모형지반의 상대밀도

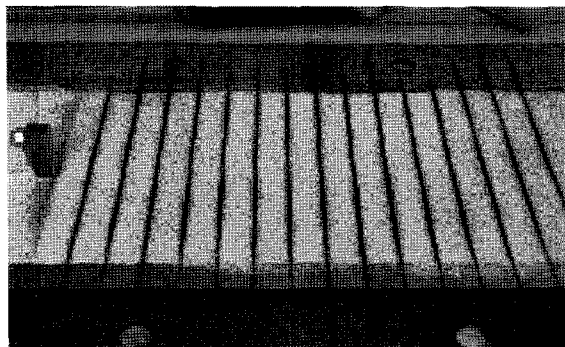
Vibrating time (sec.)	Range of D_r (%)	Ave. D_r (%)	Classification
30	37 ~ 39	37	loose
60	53 ~ 56	54	medium
300	69 ~ 71	70	dense



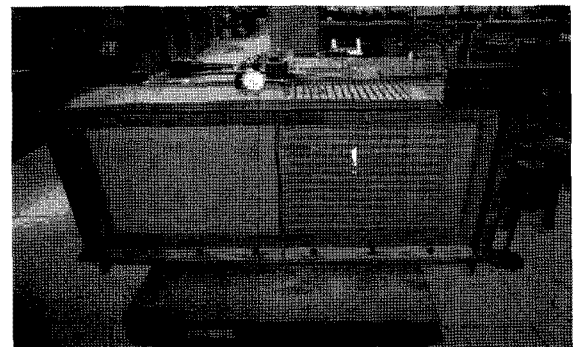
(a) 모형말뚝 설치



(b) 모래 살포



(c) 줄눈 제작

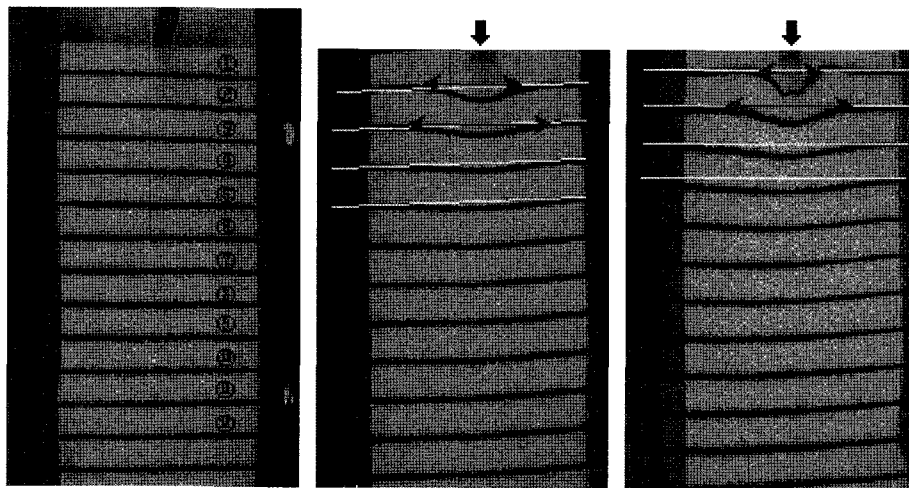


(d) 설치 후 전경

그림 4. 모형실험 방법

표 4. 모형실험 계획

Shape	Pile		Relative density D_r , %	Test name
	Diameter or Breadth mm	Length mm		
Square	7.0×7.0	550	54	GD-S070-DR54
	9.5×9.5	550	54	GD-S095-DR54
	11.5×11.5	550	37	GD-S115-DR37
			54	GD-S115-DR54
			70	GD-S115-DR70
16.5×16.5	550	54	GD-S165-DR54	
Circle	6.0	550	54	GD-C060-DR54
	10.0	550	54	GD-C100-DR54
	16.0	550	54	GD-C160-DR54
	28.5	550	54	GD-C285-DR54



(a) 지표변화전 (b) 원형말뚝의 지표변화 후 (c) 사각말뚝의 지표변화 후

그림 5. 말뚝 배면지반의 재하에 따른 지반변형 형상

한 후, 그림 4(c)와 같이 배면지반의 지반 변형을 관찰하기 위해 지표면에 줄눈을 제작한다. 그림 4(d)와 같이 말뚝 두부의 변위를 계측하기 위해 변위계와 말뚝에 힘을 작용할 하중 변환장치를 거쳐 말뚝에 연결한다. 모형실험은 말뚝 두부의 구속조건은 자유, 지하수는 불고려, 말뚝의 지지형식은 마찰말뚝으로 행하여졌다. 하중은 하중제어 방식으로 가하여 실험을 행하였으며 실험 종류는 표 4와 같다. 표 4의 실험명은 말뚝의 단면치수와 해당 지반의 상대밀도를 동시 표현해 나타내었다. 예로 GD-S095-DR54는 말뚝 단면 치수 9.5mm 사각(S)형에 상대밀도 54(DR54)%를 나타낸다.

3. 실험 결과 및 고찰

그림 5는 횡력이 작용하는 단독말뚝 배면지반의 지표

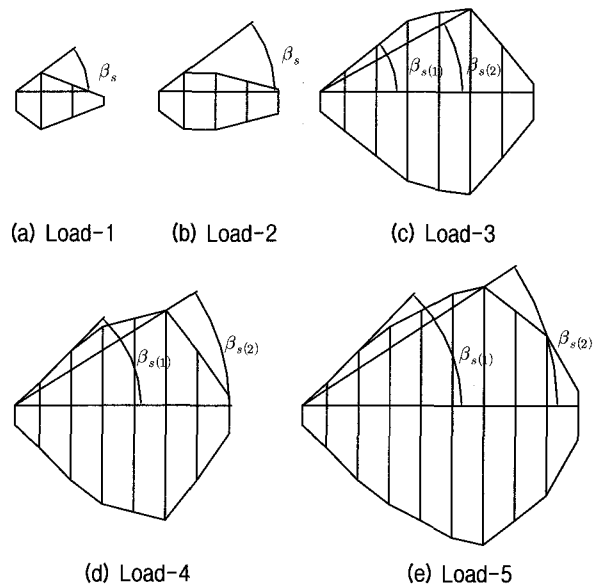


그림 6. 배면지반의 수평저항력의 면적 변화

변형형상을 나타낸 사진이다. 그림 5(a)는 말뚝에 횡력을 가하기 전 지표의 상태를 나타내고 있고 그림 5(b), (c)는 원형, 사각말뚝에 수평하중이 작용한 후 지표가 거동된 모습을 나타내고 있다. 여기서 횡력이 작용하는 단독말뚝의 말뚝 두부 변위에 따른 말뚝 배면지반 각각의 지시선에서 지표부분의 수평저항영역을 면적으로 나타낸 결과는 그림 6과 같다. 여기서 각각의 말뚝 두부 변위에 따른 배면지반의 지표면 변형영역을 수평저항

영역면적(A_f) 이라 하고 말뚝과 변형영역이 이루는 경사각을 측면경사각(β_s) 이라 하며 말뚝에 하중을 재할 때 각 하중 증가 단계를 Load-1, Load-2, ... 이라 정의한다. 표 5, 6, 7에서 δ 는 말뚝 두부의 변위를 D와 B는 말뚝의 직경 또는 폭을 나타낸다. 말뚝 두부의 변위비 δ/B (또는 δ/D)는 말뚝 두부의 변위(δ)를 말뚝의 직경(D) 또는 폭(B)로 나눈 비를 말하며, 말뚝 배면지반의 변형영역비(R_{fa})는 말뚝 두부의 변위에 따른 말뚝 배면

표 5. 말뚝 폭이 일정할 때 변위비(δ/B)와 변형영역비(R_{fa})

Test No. GD-S115-DR37			Test No. GD-S115-DR54			Test No. GD-S115-DR70		
δ/B	A_f	R_{fa}	δ/B	A_f	R_{fa}	δ/B	A_f	R_{fa}
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.13	7.33	5.54	0.15	11.98	8.98	0.17	25.02	18.92
0.28	18.08	13.67	0.29	26.25	19.68	0.41	55.67	42.10
0.62	44.28	33.48	0.47	44.08	33.04	0.70	86.98	65.77
1.20	77.70	58.75	0.76	68.25	51.16	1.03	108.65	82.16
2.35	101.61	76.83	1.04	88.25	66.15	1.80	143.73	108.68
			1.50	107.45	80.55			
			1.94	120.66	90.45			

표 6. 사각말뚝에서 변위비(δ/B)와 변형영역비(R_{fa})

Test No. GD-S070-DR54			Test No. GD-S095-DR54			Test No. GD-S115-DR54			Test No. GD-S165-DR54		
δ/B	A_f	R_{fa}	δ/B	A_f	R_{fa}	δ/B	A_f	R_{fa}	δ/B	A_f	R_{fa}
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.29	2.92	5.19	0.05	2.52	2.79	0.15	11.98	8.98	0.09	26.00	9.55
0.76	7.03	12.49	0.08	5.11	5.66	0.29	26.25	19.68	0.24	84.86	31.17
1.52	11.80	20.97	0.15	7.62	8.45	0.47	44.08	33.04	0.47	164.59	60.46
2.66	17.53	31.17	0.33	15.20	16.84	0.76	68.25	51.16	0.72	233.36	85.71
			0.62	23.71	26.27	1.04	88.25	66.15	1.03	306.41	112.55
			1.27	36.69	40.66	1.50	107.45	80.55			
			2.03	47.34	52.46	1.94	120.66	90.45			

표 7. 원형말뚝에서 변위비(δ/D)와 변형영역비(R_{fa})

Test No. GD-C060-DR54			Test No. GD-C100-DR54			Test No. GD-C160-DR54			Test No. GD-C285-DR54		
δ/D	A_f	R_{fa}	δ/D	A_f	R_{fa}	δ/D	A_f	R_{fa}	δ/D	A_f	R_{fa}
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.94	13.60	48.12	0.08	6.48	8.25	0.03	12.95	6.44	0.01	48.06	7.54
2.04	24.37	86.22	0.41	37.90	48.29	0.11	53.79	26.77	0.03	101.84	15.97
3.32	31.95	113.04	0.88	66.49	84.70	0.22	106.25	52.87	0.05	234.42	36.77
			1.36	89.10	113.50	0.41	184.45	91.79	0.08	381.40	59.82
			2.14	115.80	147.51	0.71	285.25	141.95	0.13	621.79	97.52
						0.98	360.60	179.44	0.20	923.06	144.77
									0.30	1241.91	194.77

지반에서 발생된 지반 변형영역면적(A_f)을 말뚝의 단면적(A_p)으로 나눈 비를 말하며, 식 (1)과 같다.

$$R_{fa} = \frac{A_f}{A_p} \quad (1)$$

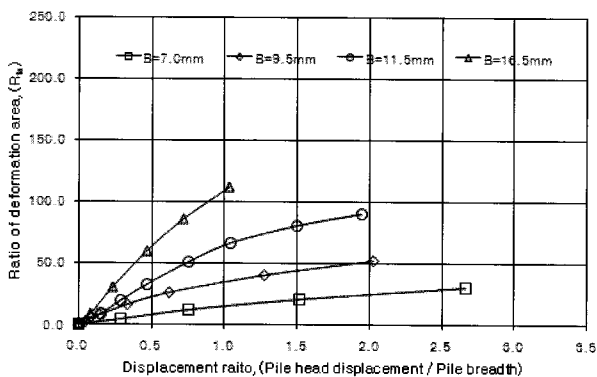
표 5는 말뚝의 폭이 일정한 상태(11.5mm)에서 지반의 상대밀도가 다를 때의 각각 상대밀도에 대한 δ/B 와 R_{fa} 를 나타낸 것이며 표 6, 7은 사각말뚝과 원형말뚝에 대해서 말뚝의 단면 크기가 다르고 상대밀도는 일정할 때의 δ/B 에 대한 R_{fa} 를 나타낸 것이다.

3.1 말뚝의 형상에 따른 영향

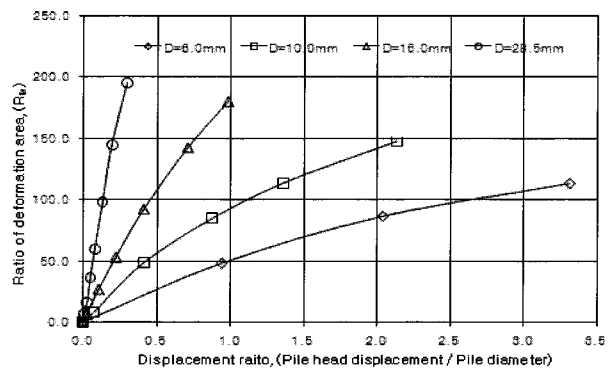
그림 7은 지반의 상대밀도가 54%로 일정한 지반에서 말뚝 두부의 변위비와 변형영역비(R_{fa})의 변화 관계를 각각의 말뚝 형상별로 나타낸 그림이다. 그림 7에서, 말뚝의 형상에 상관없이 말뚝의 변위비가 증가할수록 지반의 변형영역 초기에는 거의 선형적인 증가양상을 나타내지만 이후 말뚝 두부의 변위가 더욱 커지면서 지반

의 변형영역은 점차 일정한 영역을 유지하는 양상을 나타내고, 말뚝의 직경(또는 폭)이 증가할수록 지반의 변형영역도 증가함을 알 수 있다. 이는 말뚝의 직경(또는 폭)이 증가할수록 말뚝에 가해진 하중이 지반에 전달되는 면적이 넓어지고 이에 반해 발생하는 지반반력의 영향범위도 증가하기 때문이다. 그리고 일정한 말뚝 두부의 변위에서 원형 말뚝이 사각 말뚝보다 지반의 변형영역이 더 크게 나타나고 있다. 이는 말뚝과 지반의 경계면에서 말뚝의 변형에 따라 사각말뚝에서는 상향의 마찰저항만 작용하지만, 원형말뚝의 경우 상향의 마찰저항 및 측면으로 지반을 밀어내려고 하는 썩기저항력까지 모두 작용하기 때문이라 생각된다.

그림 8은 지반의 상대밀도가 54%로 일정한 지반의 경우, 모형실험에서 획득한 말뚝 두부의 변위비와 변형영역비(R_{fa})의 변화 곡선과 예측된 변화 곡선의 관계를 나타내고 있다. 여기서 예측 곡선은 모형실험의 결과를 바탕으로 y 절편이 0인 2차 다항식으로 가정하여 회귀분석 하였고, 이때 결정된 예측곡선식은 식 (2)와 같다.

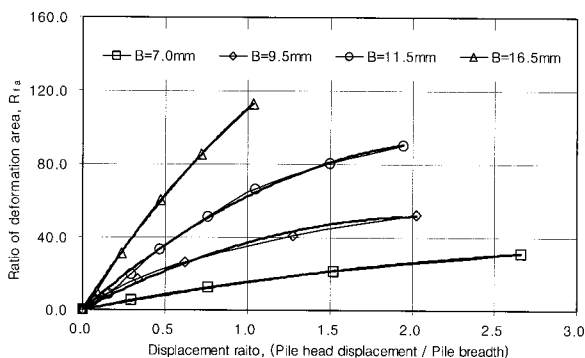


(a) Pile shape = square, $D_r = 54\%$

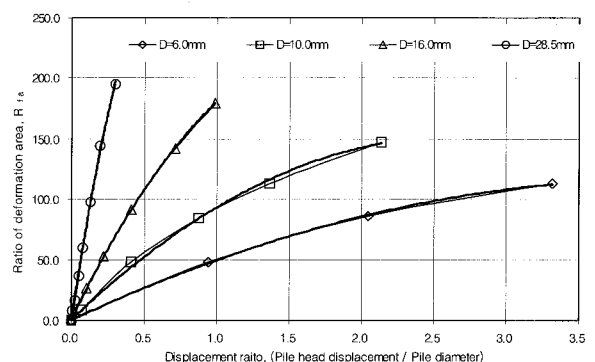


(b) Pile shape = circle, $D_r = 54\%$

그림 7. 변위비와 변형영역비의 관계



(a) Square pile



(b) Circle pile

그림 8. 실험 곡선과 추정 곡선의 관계

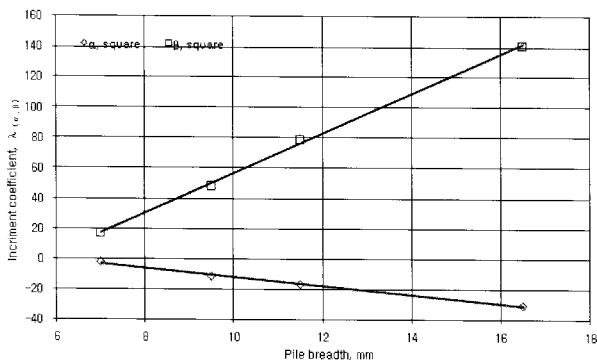
$$R_{fa} = \alpha \cdot \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 + \beta \cdot \left(\frac{\delta}{D}\right) \quad (2)$$

그림 8에서 보면 실측 곡선과 예측 곡선은 거의 일치하고 있으며, 각각의 말뚝 두부 변위비에서 실측 값과 예측 값의 최대오차가 말뚝 형상에 상관없이 5%미만으로 매우 정도 높은 근접성을 나타냈다. 식 (2)에서 α 와 β 는 서로 독립적인 함수로 말뚝의 직경 또는 폭의 변화에 따라 서로 다른 값들을 지니며, 그 결과는 표 8과 같다.

그림 9는 표 8에서 구한 결과를 바탕으로 말뚝 폭 또는 직경의 변화에 따른 계수 α 와 β 의 변화관계를 나타낸 그림이다. 그림 9에서, 말뚝 형상에 상관없이 말뚝의 폭 또는 직경이 증가할수록 계수 α 값은 감소, 계수 β 값은 증가하는 경향을 나타내고 있다. 하지만 말뚝의 형상이 사각말뚝인 경우 계수 α 와 β 의 변화 관계가 거의 선형적인 변화에 가깝게 나타나고 있지만, 말뚝의 형상이 원형말뚝인 경우 계수 α 와 β 의 변화관계는 포물선적인 변화 형태로 나타나고 있다. 따라서 말뚝 배면지반의 변형영역비(R_{fa})의 말뚝 폭 또는 직경에 대한 영향을 고려하기 위하여 그림 9에서 사각말뚝인 경우 선형

표 8. α 와 β

Pile		α	β
Square	7.0mm	-2.185	17.472
	9.5mm	-11.228	48.208
	11.5mm	-16.819	79.343
	16.5mm	-30.644	141.060
Circle	6.0mm	-6.765	56.448
	10.0mm	-22.075	115.710
	16.0mm	-70.750	251.640
	28.5mm	-524.650	814.650



(a) Square pile

회귀분석을, 원형말뚝인 2차 다항식의 회귀분석을 하였고, 그 결과는 식 (3), (4)와 같이 나타났고, 여기서 계수 α' , α'' , β' , β'' , β_c 은 각기 독립적으로 계수 α 와 β 에 의하여 결정되며, 그 결과는 표 9, 10과 같다.

사각 말뚝

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha'_\alpha & \beta'_\alpha \\ \alpha'_\beta & \beta'_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

원형 말뚝

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha''_\alpha & \beta''_\alpha & \beta_{c(\alpha)} \\ \alpha''_\beta & \beta''_\beta & \beta_{c(\beta)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D^2 \\ D \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

이상의 결과를 바탕으로 수평하중이 작용하는 말뚝 배면지반의 변형영역비는 사각, 원형인 경우 각각 식 (5), (6)과 같으며

$$R_{fa} = (\alpha'_\alpha B + \beta'_\alpha) \left(\frac{\delta}{B}\right)^2 + (\alpha'_\beta B + \beta'_\beta) \left(\frac{\delta}{B}\right) \quad (5)$$

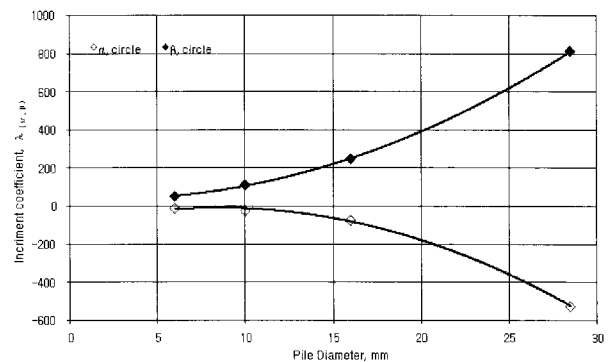
$$R_{fa} = (\alpha''_\alpha D^2 + \beta''_\alpha D + \beta_{c(\alpha)}) \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 + (\alpha''_\beta D^2 + \beta''_\beta D + \beta_{c(\beta)}) \left(\frac{\delta}{D}\right) \quad (6)$$

표 9. α' 와 β'

	α'	β'
α	-2.9527	17.630
β	13.0950	-74.156

표 10. α'' , β'' 및 β_c

Pile	α''	β''	β_c
α	-1.2910	21.8710	-98.177
β	1.1193	-5.0545	49.070



(b) Circle pile

그림 9. 증가계수 $\lambda_{(\alpha, \beta)}$ 와 말뚝 폭의 관계

변형영역 A_f 는 사각, 원형인 경우 식 (7), (8)과 같이 정리된다.

$$A_f = (\alpha'_\alpha B + \beta'_\alpha) \left(\frac{\delta}{B}\right)^2 A_p + (\alpha'_\beta B + \beta'_\beta) \left(\frac{\delta}{B}\right) A_p \quad (7)$$

$$A_f = (\alpha''_\alpha D^2 + \beta''_\alpha D + \beta_{c(\alpha)}) \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 A_p + (\alpha''_\beta D^2 + \beta''_\beta D + \beta_{c(\beta)}) \left(\frac{\delta}{D}\right) A_p \quad (8)$$

3.2 말뚝 폭에 따른 말뚝의 변형영역 산출

그림 10은 말뚝 형상의 변화에 따른 계수 λ_α , λ_β 와 말뚝 직경의 변화관계를 나타낸 그림이다.

여기서 $\Delta\lambda_\alpha$, $\Delta\lambda_\beta$ 는 원형 말뚝의 증가계수 α , β 와 사각 말뚝의 증가계수 α , β 와의 차이를 나타낸다. 그림 10에서 말뚝 직경이 증가할수록 계수차 $\Delta\alpha$ 는 감소하고, 계수차 $\Delta\beta$ 는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 여기서 계수차 $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ 의 변화관계를 $\Delta\lambda$ 로 명시하고, 이때 말뚝 직경의 변화에 따른 계수차 $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ 의 변화관계를 회귀분석한 결과 모두 2차 곡선식으로 표현이 가능하며, 그 결과는 아래의 식 (9)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_\alpha \\ \Delta\lambda_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_{\Delta\alpha_1} & \zeta_{\Delta\alpha_2} & \zeta_{\Delta\alpha_3} \\ \zeta_{\Delta\beta_1} & \zeta_{\Delta\beta_2} & \zeta_{\Delta\beta_3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B^2 \\ B \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서, $\zeta_{\Delta\alpha_1}$, $\zeta_{\Delta\alpha_2}$, $\zeta_{\Delta\alpha_3}$, $\zeta_{\Delta\beta_1}$, $\zeta_{\Delta\beta_2}$, $\zeta_{\Delta\beta_3}$ 는 각기 독립적인 변수를 나타내며, 그 값은 표 11과 같다.

식 (9)에서 $\Delta\lambda_\alpha$, $\Delta\lambda_\beta$ 가 의미하는 바는 동일한 폭을 가진 사각말뚝과 원형말뚝의 형상에 따른 증가계수 α 와 β 의 차를 말하며, 따라서 식 (9)를 식 (5), (7)에 대입 정리하면 식 (10)과 같이 나타나고 이때 식 (10)은 횡력이 작용하는 원형말뚝의 배면지반 변형영역을 원형말

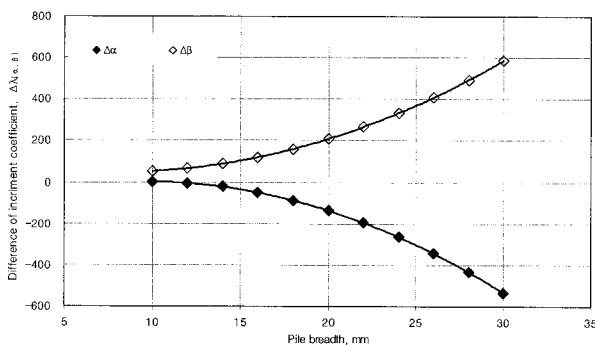


그림 10. 말뚝 폭과 $\Delta\lambda_\alpha$, $\Delta\lambda_\beta$ 의 관계

뚝의 직경을 사각말뚝의 폭으로 대치하여 구하는 식으로 표현하였으며, 이때 식 (10)은 횡력이 작용하는 단뚝 말뚝에서 말뚝의 형상 및 scale effect를 고려한 말뚝 배면지반의 변형영역 산출식이 된다.

$$R_{fa} = \frac{A_f}{A_p} = (\lambda_\alpha + \Delta\lambda_\alpha) \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 + (\lambda_{\beta a} + \Delta\lambda_\beta) \left(\frac{\delta}{D}\right) = \left\{ \zeta_{\Delta\alpha_1} \cdot D^2 + (\alpha'_\alpha + \zeta_{\Delta\alpha_2}) \cdot D + (\beta'_\alpha + \zeta_{\Delta\alpha_3}) \right\} \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 + \left\{ \zeta_{\Delta\beta_1} \cdot D^2 + (\alpha'_\beta + \zeta_{\Delta\beta_2}) \cdot D + (\beta'_\beta + \zeta_{\Delta\beta_3}) \right\} \left(\frac{\delta}{D}\right) = \Gamma_\alpha \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 + \Gamma_\beta \left(\frac{\delta}{D}\right) \therefore A_f = \Gamma_\alpha \cdot A_p \cdot \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 + \Gamma_\beta \cdot A_p \cdot \left(\frac{\delta}{D}\right) \quad (10)$$

여기서,

$$\Gamma_\alpha = \left\{ \zeta_{\Delta\alpha_1} \cdot D^2 + (\alpha'_\alpha + \zeta_{\Delta\alpha_2}) \cdot D + (\beta'_\alpha + \zeta_{\Delta\alpha_3}) \right\} \quad (11)$$

$$\Gamma_\beta = \left\{ \zeta_{\Delta\beta_1} \cdot D^2 + (\alpha'_\beta + \zeta_{\Delta\beta_2}) \cdot D + (\beta'_\beta + \zeta_{\Delta\beta_3}) \right\} \quad (12)$$

를 나타내며, 식 (11), (12)에서 말뚝의 형상이 사각말뚝인 경우 $\zeta_{\Delta\alpha}$, $\zeta_{\Delta\beta}$ 항은 모두 소거하여 해석한다.

3.3 지반의 상대밀도 변화에 따른 영향

그림 11은 말뚝의 폭이 일정할 때 지반의 상대밀도 변화에 따른 말뚝의 변위비와 변형영역비(R_{fa})의 관계를 나타낸 그림이다. 여기서 사용된 말뚝의 형상은 사각 말뚝이며, 말뚝의 폭은 11.5mm이다. 그림 11에서, 지반의 상대밀도가 일정할 때 말뚝 두부의 변위가 증가함에 따라 말뚝 배면지반의 변형영역비(R_{fa})는 앞서 그림 7에서 설명한 바와 같이 증가하는 양상을 나타내고 있고, 말뚝 두부 변위가 일정할 때 지반의 상대밀도가 증가할수록 배면지반의 변형영역비(R_{fa})도 증가하는 양상을 나타내고 있다. 이는 지반의 상대밀도가 증가할수록 지반의 유효응력은 증가하고, 유효응력의 증가로 인하여 지반의 마찰 저항력도 증가하여 지반의 변형영역도 증가한다고 생각된다.

그림 12는 그림 11에서 말뚝 두부의 변위비 변화에

표 11. $\zeta_{\Delta\alpha_1}$, $\zeta_{\Delta\alpha_2}$, $\zeta_{\Delta\alpha_3}$, $\zeta_{\Delta\beta_1}$, $\zeta_{\Delta\beta_2}$ 와 $\zeta_{\Delta\beta_3}$

Pile	ζ_1	ζ_2	ζ_3
$\Delta\alpha$	-1.291	24.824	-115.81
$\Delta\beta$	1.1193	-18.15	123.23

다른 변형영역비(R_{fa})의 관계곡선을 회귀분석한 결과이다. 여기서, 말뚝 두부의 변위비에 대한 말뚝 배면지반의 변위비 관계를 회귀분석한 결과 식 (13)과 같이 절편이 0인 2차 다항식으로 표현이 가능하며, 여기서 α_{D_r} , β_{D_r} 는 상 대밀도의 변화에 따른 각각 독립적인 함수를 나타내며, 그 결과는 표 12와 같다.

$$R_{fa} = \alpha_{D_r} \cdot \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 + \beta_{D_r} \cdot \left(\frac{\delta}{D}\right) \quad (13)$$

그림 13은 표 12의 결과에서 지반의 상대밀도 변화에 따른 증가계수 α_{D_r} , β_{D_r} 의 변화 관계를 λ_α , λ_β 의 함수로 나타낸 그림이다.

그림 13에서 지반의 상대밀도가 증가할수록 증가계수 α_{D_r} 은 포물선 적으로 감소하는 경향을, 증가계수 β_{D_r} 은 포물선 적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다.

따라서 증가계수 α_{D_r} , β_{D_r} 와 지반의 상대밀도 변화관

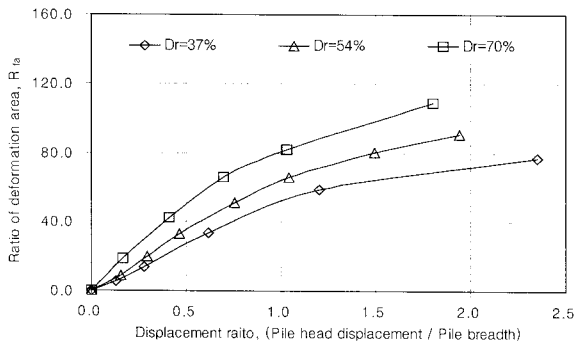


그림 11. 변위비와 변형영역비의 관계

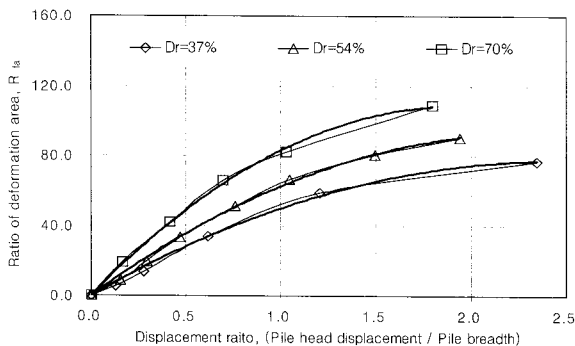


그림 12. 실험값과 추정값의 관계

표 12. α_{D_r} 와 β_{D_r}

	Relative density, D_r (%)		
	37	54	70
α_{D_r}	-12.600	-16.819	-28.863
β_{D_r}	62.477	79.343	112.01

계를 2차 다항식으로 회귀분석을 실시하였고, 그 결과는 식 (14)와 같다.

$$R_{fa} = \lambda_{\alpha(D_r)} \cdot \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 + \lambda_{\beta(D_r)} \cdot \left(\frac{\delta}{D}\right) \quad (14)$$

식 (14)에서

$$\lambda_{\alpha(D_r)} \text{ 또는 } \lambda_{\beta(D_r)} = \alpha'_{D_r} \cdot D_r^2 + \beta'_{D_r} \cdot D_r + \beta''_{D_r} \quad (15)$$

와 같다. 식 (15)에서 α'_{D_r} , β'_{D_r} , β''_{D_r} 은 α_{D_r} , β_{D_r} 에 대한 독립적인 함수이며, 그 결과는 표 13과 같다.

식 (14)에서 함수 $\lambda_{\alpha(D_r)}$, $\lambda_{\beta(D_r)}$ 를 Γ' 의 함수로 표현하면 식 (16), (17)과 같이 나타나고, 이 때 함수 Γ'_α , Γ'_β 를 구한 조건은 지반의 상대밀도가 54%, 말뚝의 직경은 11.5mm이다.

$$\Gamma'_\alpha = \lambda_{\alpha(D_r)} \quad (16)$$

$$\Gamma'_\beta = \lambda_{\beta(D_r)} \quad (17)$$

식 (16), (17)을 식 (14)에 대입 정리하면

$$R_{fa} = \Gamma'_\alpha \cdot \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 + \Gamma'_\beta \cdot \left(\frac{\delta}{D}\right) \quad (18)$$

과 같이 나타난다. 여기서 식 (18)은 지반의 상대밀도 변화를 고려한 변형영역비를 나타낸다. 식 (10), (18)에서 함수 Γ'_α , Γ'_β 는 말뚝의 형상 및 말뚝의 scale effect를

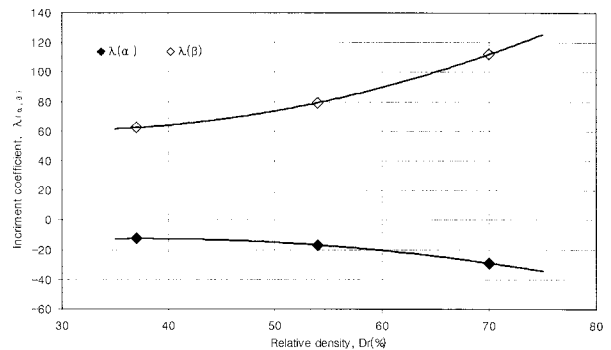


그림 13. D_r 과 $\lambda_{(\alpha, \beta)}$ 의 관계

표 13. α'_{D_r} , β'_{D_r} 및 β''_{D_r}

	α'_{D_r}	β'_{D_r}	β''_{D_r}
$\lambda_{\alpha_{D_r}}$	-0.0153	1.1432	-33.967
$\lambda_{\beta_{D_r}}$	0.0318	-1.9022	89.315

고려한 함수이고, 함수 $\Gamma'_\alpha, \Gamma'_\beta$ 는 지반의 상대밀도 변화를 고려한 함수이다. 따라서 지반의 상대밀도, 말뚝의 형상 및 scale effect를 모두 고려한 지반의 변형영역비를 구하는 식은 식 (19)와 같다.

$$R_{fa} = \Gamma''_\alpha \cdot \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 + \Gamma''_\beta \cdot \left(\frac{\delta}{D}\right) \quad (19)$$

식 (19)에서 함수 $\Gamma''_\alpha, \Gamma''_\beta$ 는 함수 $\Gamma_\alpha, \Gamma_\beta$ 가 지반의 상대밀도가 54%일 경우, 말뚝의 형상 및 scale effect를 고려한 함수이므로 다음과 같이 된다.

$$\Gamma''_\alpha = \Gamma_\alpha \times \frac{\Gamma'_{\alpha(D_r)}}{\Gamma'_{\alpha(D_r=54\%)}} \quad (20)$$

$$\Gamma''_\beta = \Gamma_\beta \times \frac{\Gamma'_{\beta(D_r)}}{\Gamma'_{\beta(D_r=54\%)}} \quad (21)$$

와 같이 나타나고, 식 (19)를 말뚝 배면지반의 변형면적으로 나타내면

$$R_{fa} = \frac{A_f}{A_p} = \Gamma''_\alpha \cdot \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 + \Gamma''_\beta \cdot \left(\frac{\delta}{D}\right)$$

$$\therefore A_f = \Gamma''_\alpha \cdot A_p \cdot \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 + \Gamma''_\beta \cdot A_p \cdot \left(\frac{\delta}{D}\right) \quad (22)$$

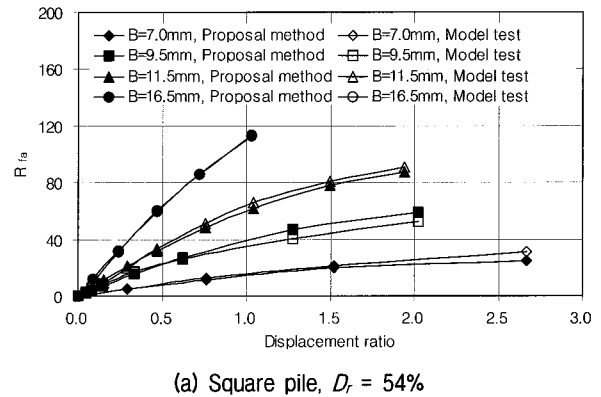
와 같이 표현된다. 여기서 식 (22)는 횡력이 작용하는 단독말뚝에서 말뚝의 형상, scale effect, 지반의 상대밀도를 모두 고려한 횡력이 작용하는 말뚝 배면지반의 변형면적을 구하는 식이 된다.

3.4 제안식의 검증

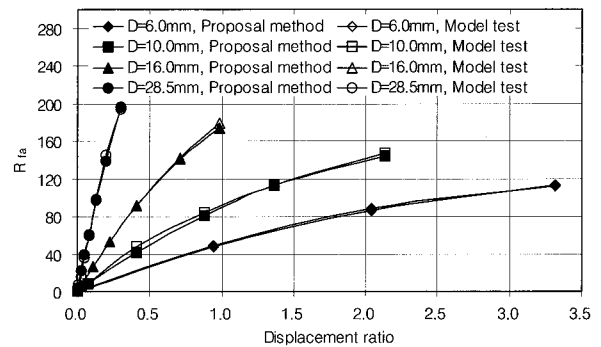
그림 14, 15는 횡력이 작용하는 단독말뚝 배면지반의 변형영역비(R_{fa})와 말뚝 두부의 변위의 변화관계를 식 (22)의 제안식을 이용하여 구한 결과와 모형실험을 통하여 구해진 결과를 비교분석한 그림이다.

그림 14에서 말뚝의 형상, 말뚝의 폭 또는 직경 및 지반의 상대밀도에 상관없이 제안식으로 구한 결과와 모형실험을 통해 구해진 결과를 비교 분석한 결과, 말뚝의 형상이 원형말뚝인 경우 제안식을 이용하여 구한 변위비와 변형영역비(R_{fa})의 관계곡선은 모형실험을 통하여 구한 변위비와 변형영역비(R_{fa})의 관계곡선과 매우 잘 일치하고, 말뚝의 형상이 사각말뚝인 경우 제안식을 이용하여 구한 변위비와 변형영역비(R_{fa})의 관계곡선은

모형실험을 통하여 구한 변위비와 변형영역비(R_{fa})의 관계곡선이 말뚝의 폭이 작아질수록 오차의 범위가 조금씩 증가하고 있음을 알 수 있다. 그리고 지반의 상대밀도 변화에 따라 제안식을 이용하여 구한 변위비와 변형영역비(R_{fa})의 관계곡선은 모형실험을 통하여 구한 변위비와 변형영역비(R_{fa})의 관계곡선보다 말뚝 두부의 변위가 작을 때는 상당히 잘 일치하고, 말뚝 두부의 변위가 증가할수록 그 차는 조금씩 증가하지만 그 오차는 대부분 5% 미만으로 나타나고 있어 제안식을 사용함에 어느 정도의 신뢰성은 있다고 생각 된다(그림 15 참조).



(a) Square pile, $D_r = 54\%$



(b) Circle pile, $D_r = 54\%$

그림 14. 상대밀도가 일정할 때 제안식과 모형실험과의 비교

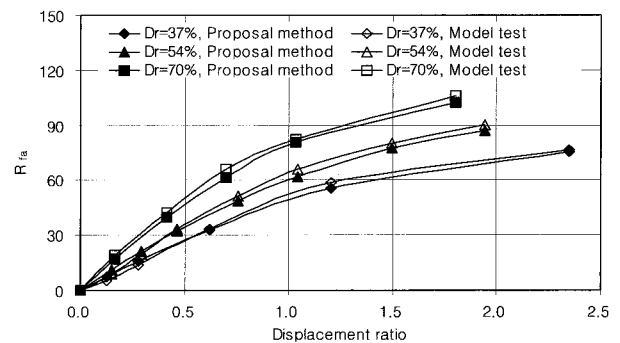


그림 15. 말뚝 폭이 일정할 때 제안식과 모형실험과의 비교

3.5 썩기 측면 날개각, β_s

그림 16은 말뚝 두부의 변위에 따른 지표 파괴면의 말뚝과 측면이 이루는 경사각(β_s)을 각각의 말뚝 직경 또는 폭으로 나타낸 그림이다. 여기서 적용된 지반의 상대밀도(D_r)는 54%로 일정하다. 그림 16에서 말뚝 직경 또는 폭의 증가에 상관없이 말뚝 두부의 변위가 증가할수록 말뚝과 지반의 파괴면이 이루는 측면 경사각(β_s)은 조금씩 증가하고 있음을 알 수 있다. 하지만 동일한 말뚝의 형상에서 말뚝의 직경 또는 폭의 증가에 따른 말뚝과 지반의 파괴면이 이루는 측면 경사각(β_s)의 차는 거의 없는 것으로 나타나고 있어, 측면 경사각(β_s)은 말뚝 직경 또는 폭의 변화에 상관없이 말뚝 두부의 변위 변화에 따른 함수임을 알 수 있다.

그림 17은 각각의 말뚝 형상에서 말뚝 두부의 변위에 따른 말뚝과 지반의 파괴면이 이루는 측면 경사각(β_s)의 변화관계를 유추한 곡선이다. 여기서 말뚝의 직경 또는 폭은 고려하지 않았으며, 적용된 지반의 상대밀도는 앞서 밝혔듯이 54%로 일정하다. 그림에서 측면 경사각(β_s)과 말뚝 두부의 변위(δ)의 관계를 2차 다항식으로 가정하여 회귀분석을 실시하였고, 그 결과 식 (23)과 같

이 나타났다.

$$\beta_s = \alpha_{\beta_s} \cdot \delta^2 + \alpha_{\beta_s}' \cdot \delta + \alpha_{\beta_s}'' \quad (23)$$

식 (23)에서 α_{β_s} , α_{β_s}' , α_{β_s}'' 은 서로 독립적인 함수이며, 표 14와 같은 값을 지닌다. 그리고 식 (23)에서 말뚝 두부의 변위(δ)가 50mm 이상이 되면 측면 경사각(β_s)의 값은 말뚝 두부의 변위에 상관없이 원형 말뚝 사각 말뚝 각각 49°, 47°로 일정한 값을 나타낸다.

그림 18은 말뚝 두부의 변위에 따른 지표 파괴면의 말뚝과 측면이 이루는 측면 경사각(β_s)을 각각의 상대 밀도별로 나타낸 그림이다. 여기서 적용된 말뚝은 사각 말뚝으로 폭은 11.5mm를 적용하였다. 그림 18에서 말뚝 두부의 변위(δ)가 증가할수록 측면 경사각(β_s)도 증가를 하고, 말뚝 두부의 변위(δ)가 일정할 때 지반의 상대밀도가 증가할수록 측면 경사각(β_s)도 증가하고 있음을 알 수 있다. 따라서 말뚝 두부의 변위와 지반의 상대

표 14. α_{β_s} , α_{β_s}' 및 α_{β_s}''

	α_{β_s}	α_{β_s}'	α_{β_s}''
Circle	-0.0055	0.3946	41.705
Square	-0.0085	0.5842	36.954

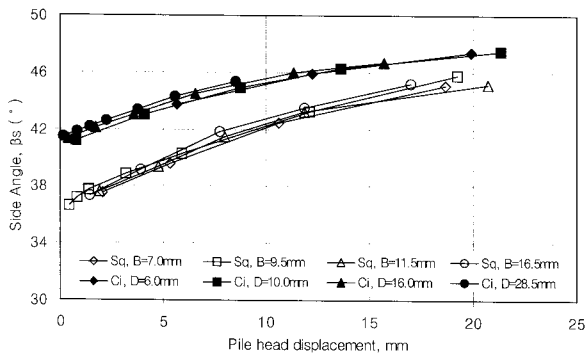


그림 16. δ 와 β_s 의 관계 곡선

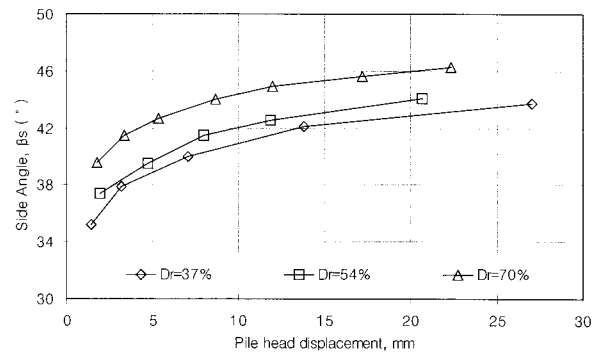


그림 18. δ 와 β_s 의 관계 곡선

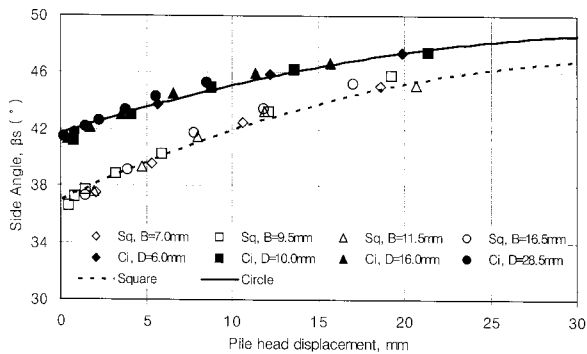


그림 17. δ 와 β_s 의 추정 곡선

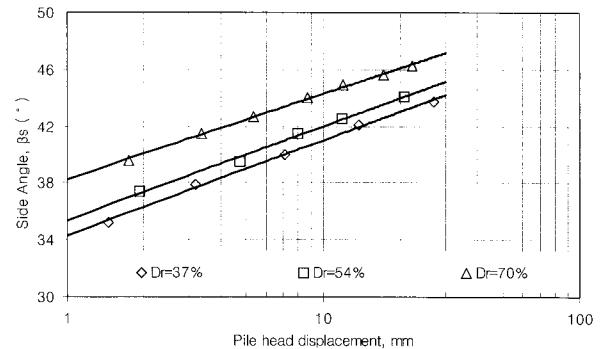


그림 19. 그림 18의 회귀곡선

밀도(D_r)의 변화에 따른 측면 경사각(β_s)의 변화관계를 예측하기 위하여 그림 19와 같이 해석하였고, 그 결과는 식 (24)와 같이 나타났다.

$$\beta_s' = a_{\beta(s)} \cdot \ln(\delta) + b_{\beta(s)} \quad (24)$$

식 (24)에서 $a_{\beta(s)}$, $b_{\beta(s)}$ 은 서로 독립적인 함수이며, 각기 서로 다른 값을 지니며, 그 값은 표 15와 같다.

그림 20은 표 16의 결과를 도시한 결과이다. 그림 20에서 지반의 상대밀도가 증가할수록 독립변수인 $a_{\beta(s)}$ 는 거의 일정한 값을 나타내고, $b_{\beta(s)}$ 는 조금씩 증가하고 있다. 따라서 독립변수 $a_{\beta(s)}$ 는 평균값을 적용하였고, $b_{\beta(s)}$ 의 변화관계는 지반의 상대밀도 변화에 따른 일차 함수로 보고 회귀분석을 실시하였고, 그 결과 식 (25)와 같이 나타났다.

$$\lambda_{b_{\beta(s)}} = a'_{b_{\beta(s)}} \cdot D_r + b'_{b_{\beta(s)}} \quad (25)$$

식 (25)에서 $a'_{b_{\beta(s)}}$, $b'_{b_{\beta(s)}}$ 는 서로 독립적인 함수이며, 그 결과는 표 16과 같다.

따라서 식 (23), (24), (25)에 의하여 횡력이 작용하는 말뚝에서 말뚝배면지반에서 발생하는 말뚝과 말뚝 배

표 15. $a_{\beta(s)}$ 와 $b_{\beta(s)}$

Relative density, D_r (%)	$a_{\beta(s)}$	$b_{\beta(s)}$
37	2.9119	34.308
54	2.8720	35.379
70	2.6165	38.262

표 16. $a'_{\beta(s)}$ 와 $b'_{\beta(s)}$

	$a'_{\beta(s)}$	$b'_{\beta(s)}$
$a_{\beta(s)}$	Ave. = 2.8001	
$b_{\beta(s)}$	0.1192	29.584

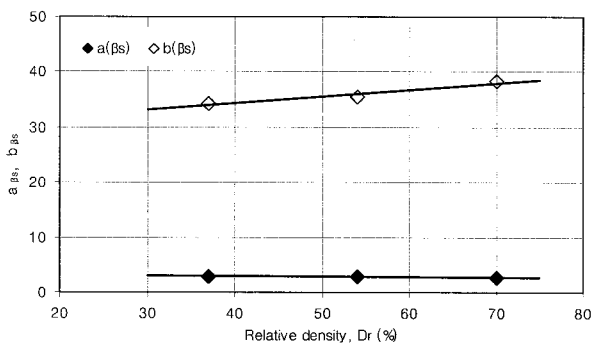


그림 20. $a'_{\beta(s)}$, $b'_{\beta(s)}$ 의 추정곡선

면지반의 변형영역이 이루는 측면 경사각(β_s)의 함수는 다음과 같이 된다.

$$\Gamma_{\beta(s)} = \frac{\beta_s(D_r)}{\beta_s(D_r=54\%)} \times \beta_s \quad (26)$$

식 (26)에서 Γ_{β_s} 은 횡력이 작용하는 말뚝에서 말뚝과 지반과괴 영역이 이루는 측면 경사각(β_s)을 말뚝의 형상 및 지반의 상대밀도를 모두 고려한 함수이며, β_s' 는 다음과 같다.

$$\beta_s' = a_{\beta(s)Ave.} \cdot \ln(\delta) + \lambda_{(b_{\beta(s)})} \quad (27)$$

4. 결론

모래지반에 매설된 단독말뚝에 횡력이 작용할 때 말뚝 배면지반의 저항력 산정과 지반변형 거동상태를 관찰하기 위한 모형실험을 수행하였다. 그 결과 지반변형의 상태를 다음과 같이 이상화 시킬 수 있었다.

- (1) 횡력을 받는 말뚝의 배면지반에서 지표 평면 변형 영역은 말뚝의 수평변위에 대해 식 (7), (8)과 같이 포물선 형태로 증가함을 나타냈다.
- (2) 횡력이 작용하는 단독말뚝 배면지반의 변형면적(A_f)은 말뚝의 형상, scale effect, 지반의 상대밀도의 변화에 따라 다양한 결과를 나타내었고, 이들을 모두 고려한 변형면적(A_f)을 식 (22)와 같이 제시하였다.
- (3) 제안식 (22)를 모형실험을 통해 검증해본 결과 오차 범위가 5% 이내로 나타나 제안식을 사용함에 어느 정도의 신뢰성은 있다고 생각된다.
- (4) 횡력이 작용하는 말뚝에서 말뚝과 지반과괴 영역이 이루는 측면 경사각(β_s)을 말뚝의 형상 및 지반의 상대밀도에 따른 함수임을 확인하였고, 그 결과 식 (27)과 같이 제시하였다.

참고 문헌

1. 배중순, 김성호 (2008), “수평하중이 작용하는 단독말뚝의 배면지반의 저항거동 특성”, *한국지반공학학회논문집*, 제 24권, 8호, pp.53-60.
2. Brown D. A., Morrison C., and Reese, L.C. (1988), “Lateral Load Behavior of Pile Group in Sand”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.114, No.11, pp.1261-1276.
3. M. Ashour, G. Norris, and P. Pilling (1999), “Lateral Loading of

- a Pile in Layered Soil Using the Strain Wedge Model”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.124, No.4, pp.303-315.
4. M. Ashour, and G. Norris (2003), “Lateral Loaded Pile Response in Liquefiable Soil”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.129, No.6, pp.404-414.
5. M. Ashour, P. Pilling, and G. Norris (2004), “Lateral Behavior of Pile Groups in Layered Soils”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.130, No.6, pp.580-592.
6. Wang and Reese, L.C. (1999), *Geotechnical Engineering Circular No. 4, Ground Anchor and Anchored Systems*, Federal Highway Administration, pp.272-278.

(접수일자 2009. 8. 5, 심사완료일 2009. 11. 16)