

주면고정액 배합비에 따른 암반매입 강관말뚝의 주면지지력 평가

문경태* · 박상렬**

Moon, Kyoungtae* · Park, Sangyeol**

Evaluation of the Shaft Resistance of Drilled-in Steel Tubular Pile in Rock Depending on the Proportion of Annulus Grouting Material

ABSTRACT

Foundation of tower structures such as wind turbine, pylon, and chimney have to resist considerably large overturning moment due to long distance from foundations to load point and large horizontal load. Pile foundations subjected to uplift force are needed to economically support such structure even in the case of rock layer. Therefore, this research performed the laboratory model tests with the variables, W/C ratio and sand proportion, to evaluate the effect of the mix proportion of grouting material on shaft resistance. In the case of cement paste, maximum and residual shaft resistance were distributed in uniform range irrespective of the changes of W/C ratio. However in the case of mortar, they were decreased with increasing W/C ratio, while they were increased and then decreased with increasing sand proportion. In the case of no sand, the maximum shaft resistance was about 540~560kPa regardless of the W/C ratio. When the sand proportion was 40%, it was about 770~870kPa depending on W/C ratio, which was about 40~50% higher than that without sand. The optimum proportion found in this research was around 40% of sand proportion and 80~100% of W/C ratio.

Key words : Drilled-in pile, Shaft resistance, Grouting material, Mix proportion, Cement paste, Mortar

초 록

풍력발전기, 송전탑, 굴뚝 등과 같은 타워 구조물의 기초는 기초에서부터 하중 작용점까지의 거리가 멀고 큰 수평하중이 작용하여 매우 큰 전도 모멘트에 저항해야 한다. 이러한 구조물을 경제적으로 지지하기 위해서는 암반층이라도 인발력을 받는 말뚝기초를 시공해야 한다. 따라서, 본 연구에서는 암반매입 강관말뚝에 사용되는 주면고정액의 배합비가 주면지지력에 미치는 영향을 평가하기 위하여 물/시멘트비와 잔골재의 배합비를 실험변수로 삼아 모형실험을 수행하였다. 잔골재를 배합하지 않은 시멘트풀의 경우 물/시멘트비의 변화에 관계없이 최대 주면지지력과 잔류 주면지지력은 일정한 범위에 분포하였고, 잔골재가 배합된 경우는 물/시멘트비의 증가에 따라서는 감소하였고 잔골재 배합비의 증가에 따라서는 증가하다 감소하는 경향을 나타내었다. 잔골재가 없는 경우 최대주면지지력은 물/시멘트비에 상관없이 약 540~560kPa을 나타내었고, 잔골재비가 40%인 경우 물/시멘트비에 따라 약 770~870kPa을 보여 잔골재가 없는 경우에 비하여 약 40~55% 증가되었다. 본 실험에서 찾은 최적배합은 잔골재비가 40% 정도, 물/시멘트비가 80~100% 이었다.

검색어 : 매입말뚝, 주면지지력, 주면고정액, 배합비, 시멘트풀, 모르타르

1. 서론

풍력발전기, 송전탑, 굴뚝 등과 같은 타워 구조물은 폭에 비하여 높이가 높은 구조물로서, 외력에 의해 전도모멘트가 크게 발생한다. 이러한 구조물을 지지하기 위해서는 상대적으로 크기가 큰 중력식 기초를 사용하거나 말뚝 기초를 사용해야 한다. 중력식 기초를

* 중신회원 · 제주대학교 토목공학과 박사과정 (Jeju National University · ktmoon@jejunu.ac.kr)

** 중신회원 · 교신저자 · 제주대학교 토목공학과 교수 (Corresponding Author · Jeju National University · sypark@jejunu.ac.kr)

Received August 3, 2017/ revised September 23, 2017/ accepted December 9, 2017

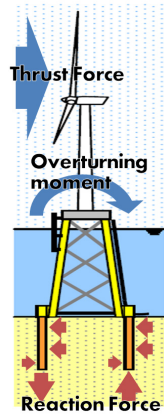


Fig. 1. Jacket for Offshore Wind Turbine

사용하기 위해서는 넓은 부지와 부지 굴착작업이 요구되는데, 기초 부지가 제한적이거나 지반이 암반으로 구성된 경우에는 중력식 기초에 막대한 공사비가 소요된다. 이러한 경우 말뚝기초는 차지하는 면적이 작고 경제적인 장점을 가지고 있다. 말뚝기초는 타워 구조물에 작용하는 전도모멘트에 대해 서로 떨어져 있는 말뚝의 압축력과 인발력, 그리고 수평력으로 저항하게 된다. 특히, 국내 해상풍력발전기의 경우 Fig. 1에 나타난 것과 같은 Jacket 구조물을 주로 채택하고 있으며, 큰 수평력과 큰 전도모멘트를 지지하기 위하여 3, 4개의 다리에 각각 암반매입 강관말뚝을 이용하여 지지하고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 하중작용점(로터)에서 지지점(해저면)까지의 거리는 수심으로 인해 더 멀어지게 되고, 이로 인해 상대적으로 더 큰 전도모멘트를 지지해야 한다. 또한 해상에서 작업이 이루어지므로 보다 안전하고 경제적인 시공을 위해서는 말뚝의 지지력을 정확하게 추정하여 말뚝을 설계하는 것이 필요한 실정이다. 특히, 인발력의 경우는 말뚝의 주면지지력만으로 결정되기 때문에 이에 대한 지지력 평가가 더욱 절실하다.

따라서, 본 연구에서는 암반에 매입된 강관말뚝의 주면지지력을 예측하기 위하여 모형실험을 수행하고 주면고정액의 배합비에 따른 영향을 평가하고자 한다.

2. 기존 연구 및 설계기준

말뚝의 지지력에 대한 연구는 오랜 기간 동안 수많은 연구자들에 의해 연구가 진행되어 왔으며, 토사지반의 경우 실험값을 토대로 기초설계 이론이 정립되어 있다. 또한, 암반에 근입된 말뚝에 대한 연구는 현장타설말뚝을 대상으로 한 연구가 주를 이루고 있으며, 암반에 근입된 현장타설말뚝의 극한지지력에 대한 식은 구조물기초설계기준(KGS, 2015)에서 Table 1과 같이 정리하고 있다. 또한 구조물기초설계기준(KGS, 2015)에서는 연암반에 근입된 강관말

Table 1. Side Resistance of Drilled Shafts in Rock (KGS, 2015)

	Suggester	Empirical equations
Side resistance	NAVFAC (1982)	$f_s (kPa) = (6.0 - 7.9)f_w'^{0.5}$ $f_s (kPa) = (7.9 - 10.5)f_w'^{0.5}$
	FHWA (1999)	$f_s = 0.65p_a \left(\frac{q_u}{p_a}\right)^{0.5}$: smooth $f_s = 0.8 \left[\frac{\Delta r}{r} \left(\frac{L}{L}\right)\right]^{0.45}$: rough
	Canadian Foundation Eng. Manual (2006)	$f_s = \mu p_a \left(\frac{q_u}{p_a}\right)^{0.5}$, $f_s = 0.05f_c'$

q_u : Uniaxial compressive strength (UCS) of rock,
 p_a : Atmospheric pressure,
 f_w' : The smaller of UCS of rock and concrete,
 f_c' : UCS of concrete at 28-days,
 μ : Coefficient of friction
 L : Drilled shaft of length

뚝에 대한 극한선단지지력 산정식을 경험식으로 제시하였으며, 잔류 주면지지력은 선단지지력 값에 포함된 것으로 간주하고 있다. 따라서 현행 설계기준으로는 암반에 말뚝을 매입하고 주면을 그라우팅한 경우에 대해서 주면지지력을 평가할 수 없으며, 인발지지력에 대한 추정 또한 매우 어려운 상태이다.

암반매입말뚝의 주면지지력에 대한 연구는 매우 부족한 실정이며, 암반에 강관말뚝이 매입된 경우에 대해서 Maertens(2002)이 발표한 바 있다. Maertens(2002)는 풍화된 현무암에 강관말뚝을 설치한 경우 말뚝의 성능을 평가하고 시공 제원을 결정하기 위하여 현장시험(압축, 인발)을 수행하였으나, 적용현장에 대한 성능평가만 하였다는 한계가 있었다. Moon et al.(2014)은 암반매입 강관말뚝의 극한주면지지력은 강관과 주면고정액 사이의 부착력에 의해 결정된다고 발표한 바 있다. Moon et al.(2014)은 암반에 강관이 삽입된 경우 주면지지거동을 모형실험을 통해 평가하였으며, 약 1MPa의 부착강도를 나타냈다. Shakir-Khalil(1993a, 1993b)와 Nezamian et al.(2002)는 강관 속에 콘크리트가 채워졌을 때 콘크리트와 강관 사이의 부착강도에 대해 매입조건을 변수로 하여 실험연구를 수행하여 강관과 콘크리트의 부착거동에 대해 정리하였다.

기존 연구의 경우, 암반에 강관말뚝을 설치하여 지지성능을 평가하였으나 지지력에 미치는 영향인자에 대한 평가가 미흡하였다. 따라서, 본 연구에서는 주면고정액의 배합비가 암반매입 강관말뚝의 주면지지력에 미치는 영향을 평가하기 위하여 시멘트, 물, 잔골재(모래)의 배합비를 달리하여 모형실험을 수행하였으며, 그 결과를 분석하여 암반매입 강관말뚝의 주면지지력 산정의 기초자료로 제시하고자 한다.

3. 실험계획

3.1 암반매입말뚝의 주면파괴

암반에 매입된 강관말뚝의 주면파괴는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 4가지 형태로 나타날 수 있다. 먼저, 강관과 주면고정액 사이의 부착파괴, 주면고정액 자체의 전단파괴, 암반과 주면고정액 사이의 부착파괴, 마지막으로 암반 자체의 전단파괴이다. 각 부분의 저항력 중 가장 작은 값을 나타내는 부분에서 주면파괴가 발생할 것이다.

Moon et al.(2017)은 주면고정액의 물/시멘트비와 잔골재 배합비가 일축압축강도에 미치는 영향을 연구하였으며, 주면고정액의

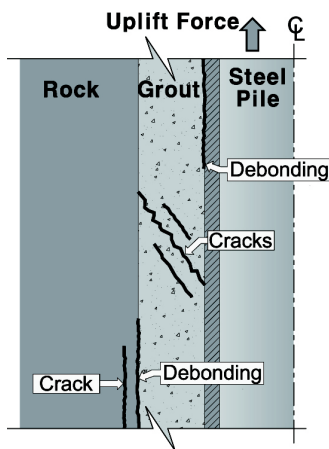


Fig. 2. Failure Mode

Table 2. Strength of Grouting Materials

	f_{ck}	f_t (by Eq. (1))	Bond strength
W06S0	18.74	1.08	0.55
W06S2	35.15	1.48	0.56
W06S4	35.65	1.49	0.80
W06S6	31.96	1.41	0.87
W08S0	21.2	1.15	0.56
W08S2	25.28	1.26	0.57
W08S4	27.21	1.30	0.87
W08S6	19.96	1.12	0.87
W10S0	13.96	0.93	0.55
W10S2	19.37	1.10	0.52
W10S4	16.15	1.00	0.86
W10S6	11.86	0.86	0.70
W12S0	12.77	0.89	0.54
W12S2	10.62	0.81	0.58
W12S4	13.75	0.93	0.77
W12S6	6.87	0.66	0.64

일축압축강도(28일)는 배합비에 따라 약 7~36MPa의 값을 나타내었다. Lee(2013)에 의하면 암석의 종류에 따라 일축압축강도는 큰 차이를 나타내고 있으며 응회암이나 셰일을 제외하면 51~320MPa의 범위에 분포하고 있다. 일반적으로 암석의 일축압축강도는 콘크리트보다 높은 값을 보이므로 암반 자체의 전단파괴가 발생하기 전에 주면고정액의 전단파괴가 나타날 것으로 사료된다. 일반 콘크리트의 직접인장강도는 일축압축강도와 Eq. (1)과 같은 상관관계를 가지고 있다. Table 2는 Moon et al.(2017)에 의한 주면고정액의 일축압축강도와 Eq. (1)에 의한 직접인장강도를 정리한 것으로 강관과 주면고정액 사이의 부착강도보다 큰 값을 나타내고 있어 암반매입 강관말뚝의 주면지지력은 강관과 주면고정액 사이의 부착강도에 의해 결정된다.

$$f_t = 0.25 \sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

여기서, f_t : 직접인장강도, f_{ck} : 일축압축강도

암반과 주면고정액 사이의 부착강도를 평가하기 위하여 암석에 구멍을 뚫고 주면고정액을 채운 후 주면고정액을 밀어내는 실험을 수행하였다. 암석은 제주도 현무암으로 기공이 적은 것(Basalt-1)과 기공이 많은 것(Basalt-2)을 사용하였으며, 주면고정액의 배합비는 Moon et al.(2017)의 연구결과에서 일축압축강도가 가장 크게 나타났던 W06S4와 가장 작았던 W12S6, 모래가 배합되지 않은 W08S0와 40% 배합된 W08S4, 총 4개의 배합비를 사용하였다. 암반과 주면고정액 사이의 부착강도는 Table 3과 같으며, Basalt-1에 W12S6을 사용한 경우, 0.95MPa로 가장 작은 값을 나타내었으며, Basalt-2에서는 배합비에 상관없이 약 2.0MPa의 값을 나타내었다. 동일한 주면고정액 배합비에서 암반과 주면고정액 사이의 부착강도가 강관과 주면고정액 사이의 부착강도보다 크게 나타나므로 암반에 매입된 강관말뚝의 주면지지력은 강관과 주면고정액 사이의 부착강도에 의해 결정된다. 이는 Moon et al.(2014a)가 암반에 매입된 강관말뚝의 주면지지력은 강관말뚝과 주면고정액 사이에서 결정되었던 것과 동일한 결과이다.

3.2 실험체 및 변수

주면고정액의 배합비에 따른 강관말뚝의 주면지지력을 평가하기 위하여 실험변수로 물/시멘트비와 잔골재비를 선택하였다. 물/시

Table 3. Max. Bond Strength (Rock vs Grout)

Rock type	Max. Bond Strength (MPa)				Porosity (%)
	W06S4	W08S0	W08S4	W12S6	
Basalt-1	2.07	1.90	1.79	0.95	3.12
Basalt-2	-	1.97	1.94	1.96	5.53

멘트비는 구조물기초설계기준(KGS, 2015)에서 주면고정액에 제시하는 83~100%의 범위를 확장시켜 60~120%의 범위에서 20% 간격으로 4개의 변수를 선정하였다. 또한 잔골재비는 시멘트풀과 잔골재가 배합된 모르타르의 특성을 비교, 검토하기 위하여 0~60%의 범위에서 20% 간격으로 4개의 변수를 사용하였다. 따라서 물/시멘트비와 잔골재비를 변화시켜 배합한 16개의 경우에 대해 시험하였으며 이를 Table 4에 정리하였고, 실험체 명은 Fig. 3에 정리한 것과 같이 물/시멘트비는 W, 60~120%의 범위를 06~12로 사용하였으며, 잔골재비는 S, 0~60%의 범위는 0~6으로 표시하였다. 각 변수 안에서 각각의 실험체를 구분하기 위하여 마지막에 번호를 붙여서 구분하였다.

실험에 사용된 강관은 D50mm인 구조용강관을 사용하였으며, 주면고정액을 채우기 위하여 D100mm의 PE관을 사용하였다. 바닥에는 150×150mm의 거푸집용 합판을 사용하여 마감하였으며, 주면고정액이 양생된 후 바닥면을 제거하여 시험하였다. 주면고정

Table 4. Experimental Parameter

S / (S+C)	0%	20%	40%	60%	Weight ratio
W / C	60%	80%	100%	120%	

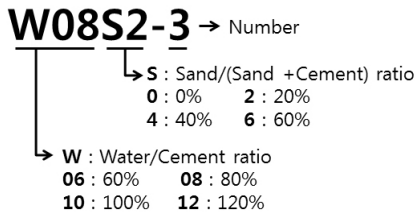


Fig. 3. Specimen I.D.



Fig. 4. Experimental Specimens for Shaft Resistance

액의 부착깊이는 300mm (6D)로 정하여 PE관은 300mm로, 강관은 500mm로 재단하여 실험체를 제작하였다. 실험체는 16개의 변수별로 5개씩 총 80개의 실험체를 제작하였으며, Fig. 4는 완성된 실험체를 보여주고 있다.

3.3 사용재료

실험체 제작시 시멘트는 국내 D사에서 제조한 포틀랜드 보통시멘트(Type I)를 사용하였으며, 잔골재는 서해 연안에서 채취하여 세척된 바다모래를 사용하였다. 모래는 배합 전에 100°C이상에서 24시간 이상 완전 건조시켰으며, 입도분포는 Fig. 5에 나타난 것과 같다. 본 연구에 사용된 모래의 물리적 특성은 Table 5에 정리하였으며, 비중은 2.64, 건조단위중량은 15.78kN/m³이다. 이 모래는 토질분류기준인 통일분류법(USCS)에 의하여 분류하면 SP로 분류된다.

3.4 실험방법 및 장치

실험방법은 말뚝의 정재하시험방법(KS F 2445)을 참조하였으며, 본 시험에서는 말뚝의 최대 부착력을 측정할 뿐만 아니라 그 이후의 주면마찰거동에 대해서도 평가하기 위하여 변위제어로, 재하속도를 1.0mm/min로 실험하였다. 실험은 최대부착력 이후 총 변위가 20mm되었을 때 종료하여 주면거동을 평가하였다. 본 실험에서는 모형 말뚝 두부에 작용하는 하중을 국내 C사에서 제작한 로드셀(CLS-50t)로 측정하였으며, 두부의 변위를 2개의 LVDT

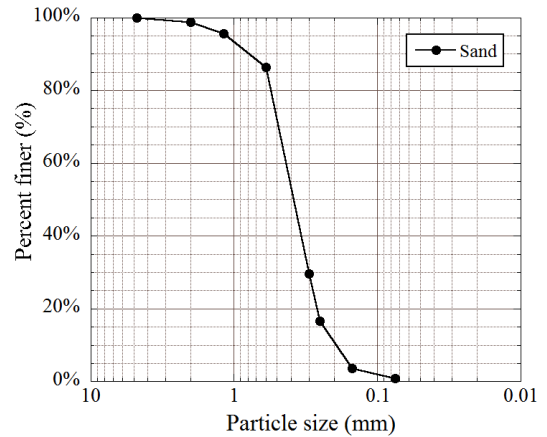


Fig. 5. Particle Size Distribution Curve of Sand

Table 5. Physical Properties of Sand

Specific gravity (Gs)		2.64
Unit weight (kN/m ³)		15.78
Grain size	Coefficient of uniformity, C _u	1.78
	Coefficient of curvature, C _c	0.77

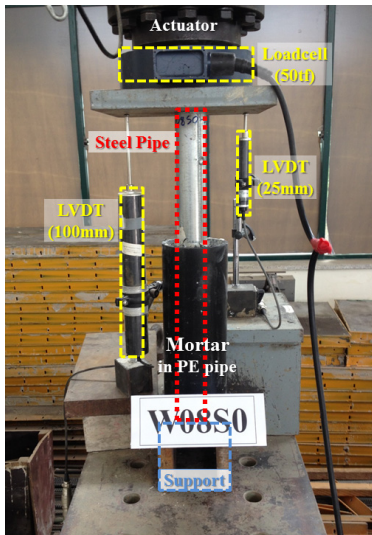


Fig. 6. Test Setup

CDP-50, CDP-25)를 사용하여 측정하였다. Fig. 6은 실험에 사용된 장비와 실험체를 설치한 모습을 나타내고 있다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 매입말뚝의 부착면적

일반적인 콘크리트 배합에서는 완전한 수화작용을 위해 중량비로 약 25%의 물/시멘트비가 소요되고, 유동성을 확보하기 위해 35~40%의 물/시멘트비를 사용하게 된다(Min, 2016). 매입말뚝의 주변고정액으로 사용되는 시멘트 풀은 일반적인 콘크리트에 사용되는 시멘트 풀의 2배 이상의 물/시멘트비를 사용하여 물의 잔여량이 매우 많아 재료분리가 발생하였으며, 잉여수의 증발로 실제 부착면적이 감소하였다. 매입말뚝의 실부착면적을 계산하기 위해 실험체 제작과정에서 나타난 블리딩, 건조수축으로 인한 주변고정액이 감소한 깊이를 측정하였다. Fig. 7에 나타난 것과 같이 주변고정액을 PE관의 300mm 높이에 맞게 타설하였으며, 모래와 시멘트가 혼합되어 가라앉고(l_1) 잔여수가 고이게 된다. 잔여수에 부유하고 있던 시멘트와 모래의 미세입자들이 시간 차이를 두고 가라앉으므로 모르타르층(l_1) 위에 10~14mm 두께의 시멘트층(l_2)을 형성하였다(Fig. 8). 실험체의 부착면적은 Fig. 7에 나타난 것과 같이 부착길이($l_1 + l_2$)에 강관의 둘레를 곱하였으며, 실부착면적과 계획면적의 비를 부착면적의 잔여율로 정하였다.

Figs. 9 and 10은 물/시멘트비와 잔골재 배합비에 따른 부착면적의 잔여율을 나타낸 것이다. Fig 9를 보면 예상한 바와 같이 물/시멘트비가 증가함에 따라 부착면적의 잔여율은 선형적으로 감소하고 있다. 그러나 잔골재 배합비가 증가함에 따라 가울기 값이 감소하여

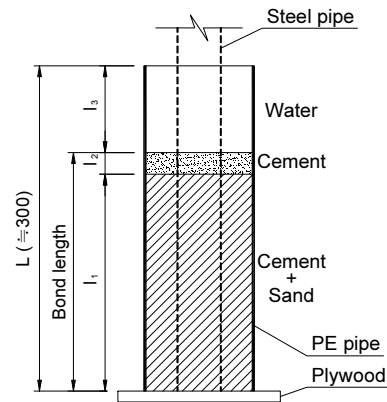


Fig. 7. Bond Length



Fig. 8. Longitudinal Section (W08S6)

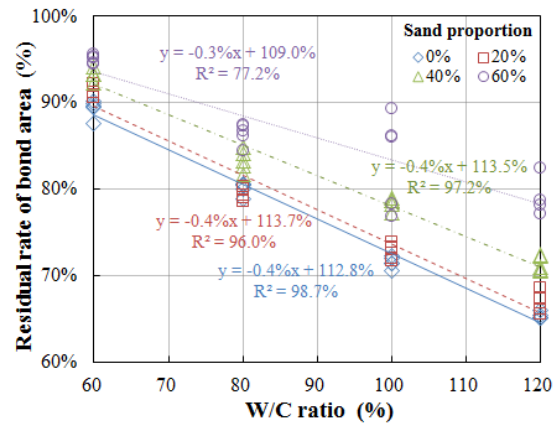


Fig. 9. Effect of W/C Ratio on Bond Area

감소폭이 둔화되고 있어 잔골재 배합이 실부착면적의 감소를 완화하는 역할을 하고 있음이 확인된다. Fig. 10은 잔골재비에 대한 부착면적의 잔여율을 나타낸 것으로, 앞에서 언급한 바와 같이 잔골재비가 증가함에 따라 부착면적의 잔여율은 증가하고 있다. 또한 물/시멘트비가 작을수록 잔여율이 큰 값을 나타내고 있으나, 물/시멘트비가 증가함에 따라 잔골재 배합비의 변화에 의한 부착면

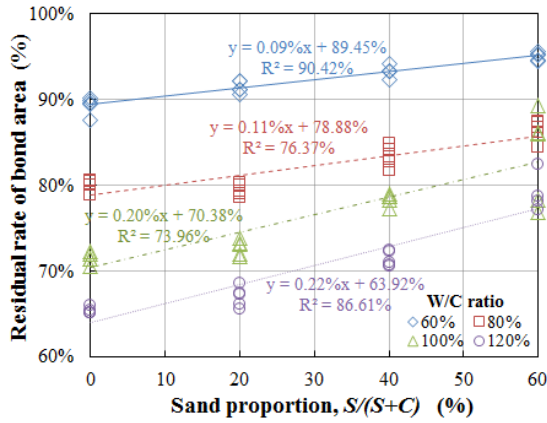


Fig. 10. Effect of Sand Proportion on Bond Area

적의 변화폭이 커지고 있다. 이는 잔골재가 배합됨에 따라 시멘트 풀의 배합양이 상대적으로 감소하므로 물의 양이 줄어들기 때문에 이러한 경향이 나타나는 것으로 판단된다.

4.2 매입말뚝의 주면지지거동

주면고정액의 배합비에 따라 실무착면적에 차이를 나타내므로 실험데이터는 실무착면적을 기준으로 정리하였다. Fig. 11은 모형

말뚝의 주면지지력과 변위의 관계를 각 변수별로 대표되는 실험체를 선정하여 도식한 것으로 물/시멘트비로 구분하여 그래프를 정리하였으며, 각 그래프 내에서는 잔골재 배합비에 따라 도식하였다. Fig. 11에 나타난 바와 같이 초기에는 주면지지력과 변위가 선형적으로 비례하여 증가하다가 0.5~1.5mm의 변위에서 최댓값을 보이고, 최대 주면지지력 이후에는 지지력이 급격히 감소하는 거동을 하고 있다. 또한, 최댓값 이후에는 지지력에 큰 변화없이 변위만 증가하는 형태의 거동을 모든 실험체에서 동일하게 나타내었다. 최대 주면지지력은 강관표면과 주면고정액 사이의 화학적 부착력과 물리적 맞물림에 의해 나타나는 값(Nezamian et al., 2002)이며, 최대 주면지지력 이후 지지력이 급격히 감소하여 거의 일정한 값에서 변위만 증가하는 구간의 지지력은 강관표면과 주면고정액 사이의 마찰에 의해 발생하는 것으로 잔류 주면지지력이라 표현하였다.

최대 주면지지력에 있어서 잔골재를 배합하는 것(20~60%)이 배합하지 않은 것(0%)보다 크게 나타나고 있다. 또한 물/시멘트비의 증가가 잔골재 배합에 따른 지지력의 편차에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있는데, 이는 잔골재 배합과 물/시멘트비의 증가가 시멘트의 양을 상대적으로 감소시켜 고정액의 결합력을 저하시키기 때문으로 판단된다.

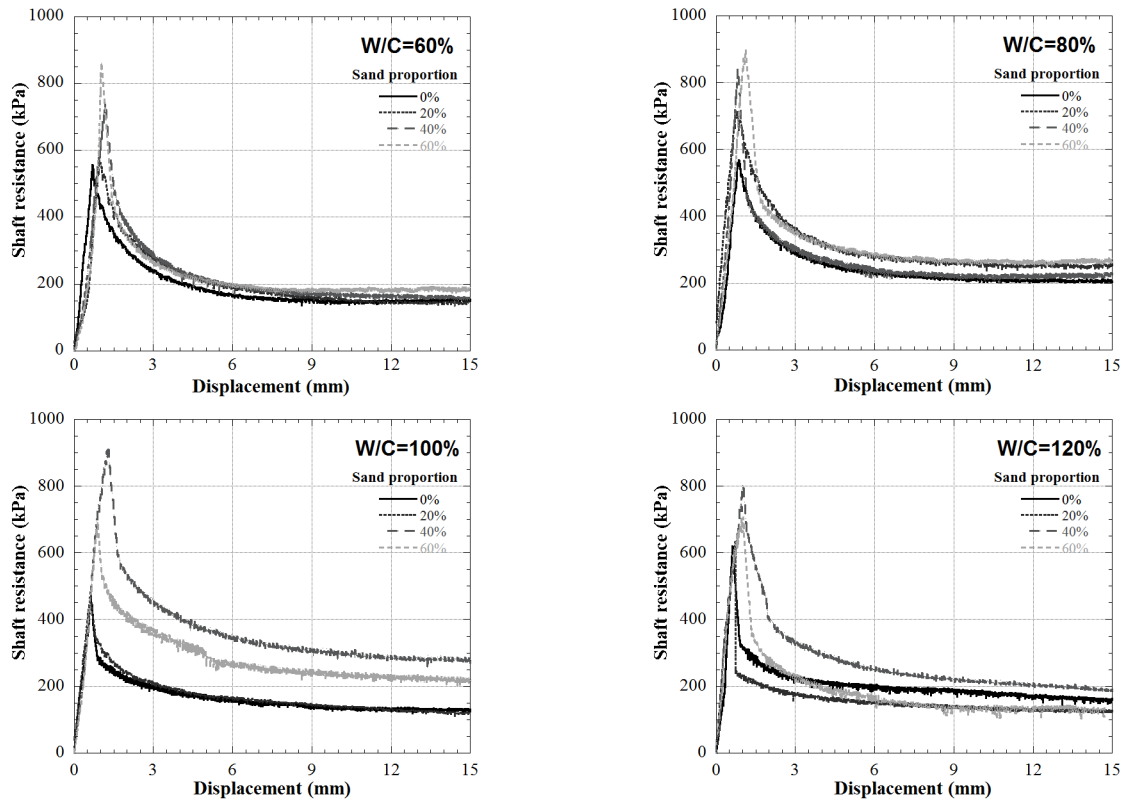


Fig. 11. Shaft Resistance-Displacement Curves

4.3 배합비에 따른 최대 주면지지력

Fig. 12는 물/시멘트비와 잔골재 배합비에 따른 최대 주면지지력을 도식한 것으로 각 변수 내에서 값의 편차가 300kPa의 범위로

다소 크게 나타났다. Fig. 12(a)는 최대 주면지지력에 대한 물/시멘트비의 영향을 나타낸 것으로 잔골재가 배합되지 않은 경우는 물/시멘트비의 변화와 무관하게 약 350~650kPa의 범위에 분포하

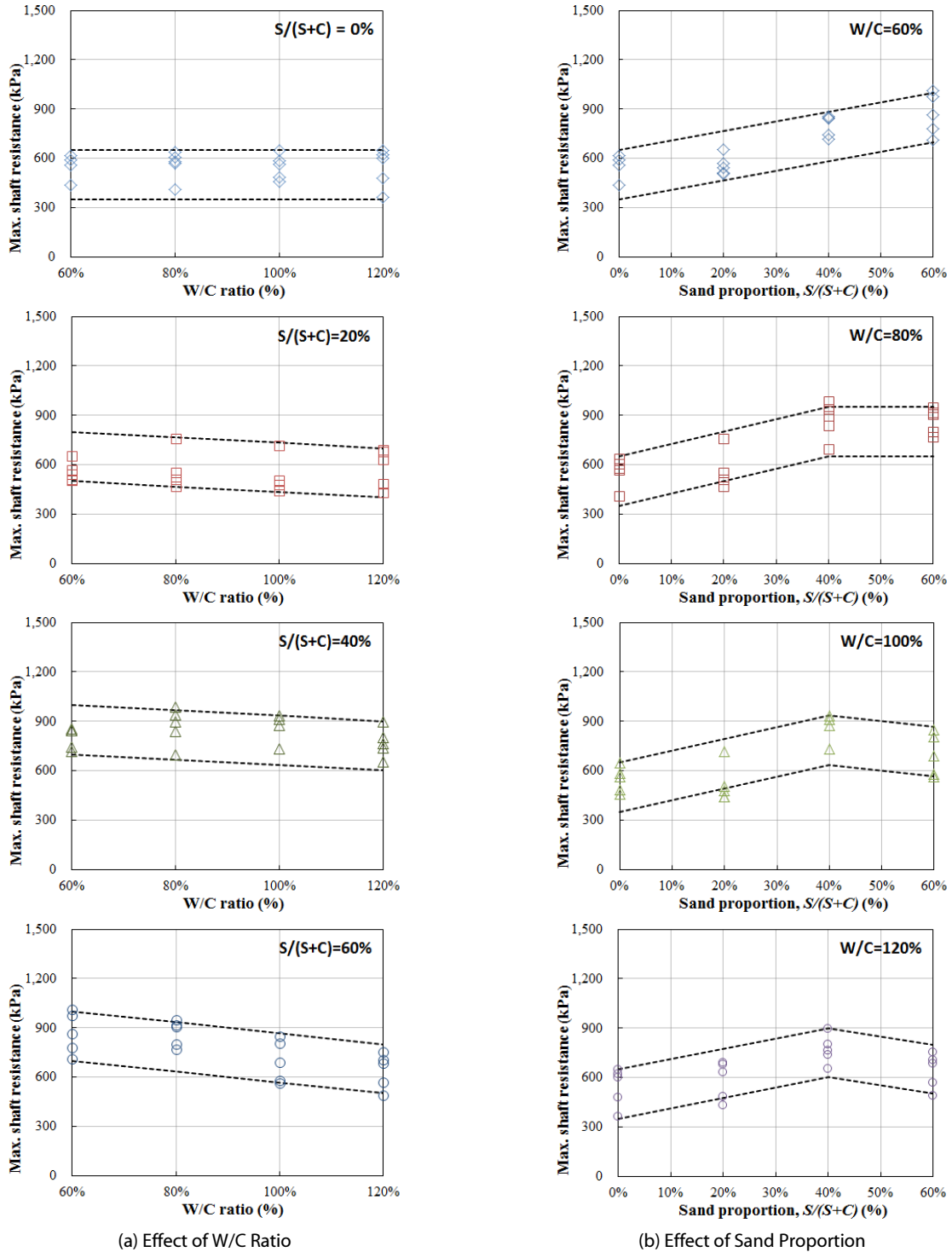


Fig. 12. Effect of the Proportion of Grouting Material on Maximum Shaft Resistance

고 있으며, 잔골재가 배합되는 경우 물/시멘트비의 증가에 따라 최대 주면지지력이 감소하는 경향을 보이고 있으며, 잔골재 배합비가 증가함에 따라 감소폭이 증가하고 있다. 잔골재가 배합되지 않은 경우는 앞서서도 언급한 바와 같이 수화작용에 필요한 물은 시멘트의 약 25%이며, 본 실험에 사용된 물/시멘트비는 수화작용에 매우 충분하므로 물/시멘트비의 변화가 시멘트풀의 강도 변화에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다. 반면, 잔골재가 배합된 경우, 물/시멘트비가 증가함에 따라 최대 주면지지력이 감소하는 것은 물/시멘트비와 잔골재 배합비의 증가가 잔골재를 결합시키는 시멘트의 양을 상대적으로 감소시켜 골재사이의 결합력을 저하시키기 때문으로 판단된다.

Fig. 12(b)는 잔골재 배합비에 따른 최대 주면지지력의 영향을 나타낸 것으로 잔골재 배합비가 증가함에 따라 최대 주면지지력은 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 잔골재가 배합된 경우 강관말뚝의 표면과 주면고정액 사이에서 시멘트풀에 의한 부착력과 더불어 맞물림 효과가 발생하여 최대 주면지지력을 증진시키는 효과가 있는 것으로 사료된다. 그러나 물/시멘트비가 80~120%인 경우, 잔골재를 60% 배합하였을 때, 배합비가 40%인 것과 비슷하거나 감소된 값을 나타내었다. 이는 물/시멘트비가 크고, 잔골재를 60% 배합한 경우 시멘트의 양이 상대적으로 부족하여 잔골재 사이의 결합력이 저하되므로 오히려 부착강도가 저하되는 것으로 추측된다.

4.4 배합비에 따른 잔류 주면지지력

Fig. 13은 배합비에 따른 잔류 주면지지력을 도식한 것으로 변수별로 최대 주면지지력과 유사한 경향성을 나타내었다.

Fig. 13(a)는 물/시멘트비에 따른 잔류 주면지지력을 나타낸 것으로 잔골재를 배합하지 않은 시멘트풀은 물/시멘트비가 잔류 주면지지력에 영향을 주지 않았으며 100~250kPa의 범위에 분포하였다. 잔골재가 배합된 경우 물/시멘트비의 증가는 잔류 주면지지력을 저하시켰으며, 잔골재 배합비가 증가할수록 그 영향은 크게 나타났다. 이는 잔골재 배합비와 물/시멘트비가 증가함에 따라 잔골재를 결합시키는 시멘트양이 상대적으로 감소하기 때문으로 여겨진다.

Fig. 13(b)는 잔골재 배합비가 잔류 주면지지력에 미치는 영향을 도식한 것으로, 부착강도와 유사한 경향을 나타내고 있다. 잔골재의 증가는 강관표면과 주면고정액 사이에 부착되는 입자의 양을 증가시키므로 두 접촉면이 미끄러질 때 접촉면 사이의 물리적 맞물림 효과에 의해 잔류 주면지지력이 증가되는 것으로 사료된다. 다만, 물/시멘트비가 80%이상이고, 잔골재 배합비가 60%인 경우에는 값이 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이는 잔골재의 증가로 인하여 상대적으로 시멘트의 양이 감소하므로 잔골재를 결합시키는 결합력이 저하되어 잔류 주면지지력이 저하되는 것으로 판단된다.

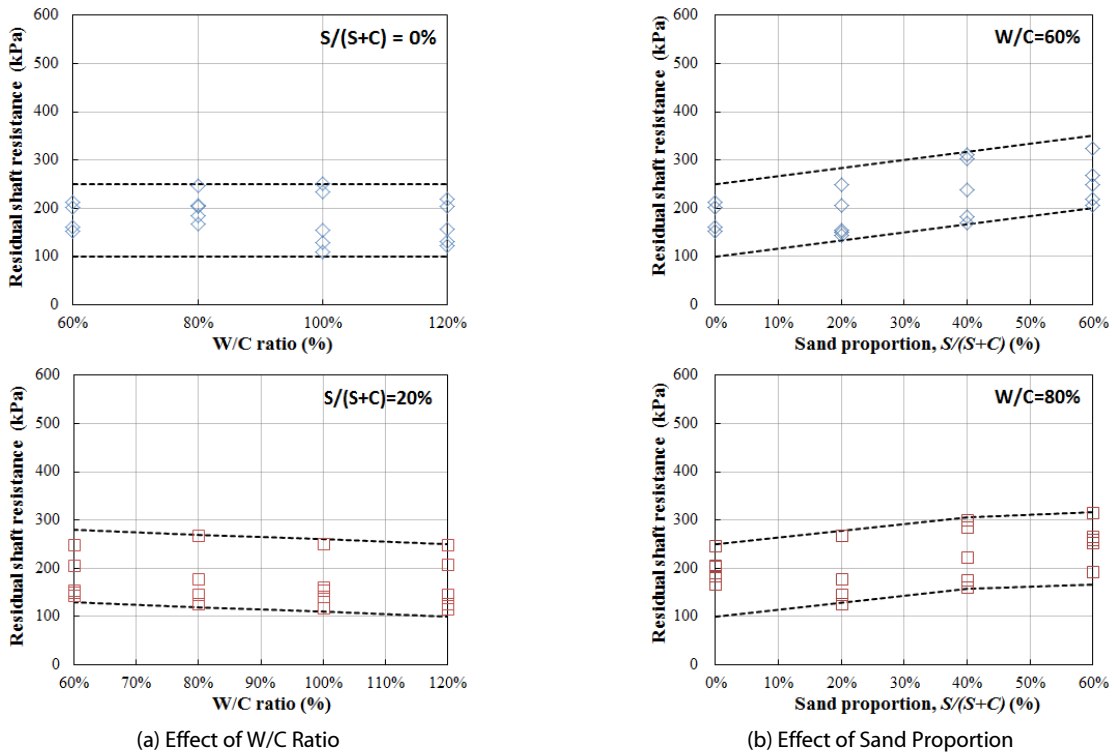


Fig. 13. Effect of the Proportion of Grouting Material on Residual Shaft Resistance

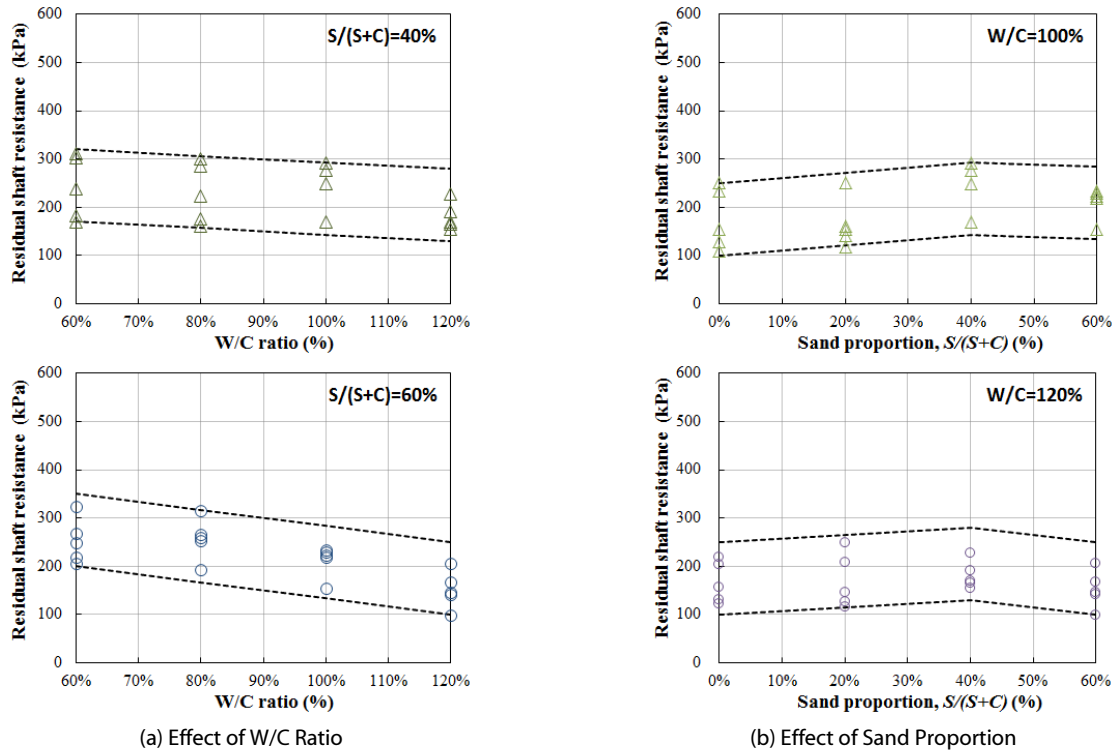


Fig. 13. Effect of the Proportion of Grouting Material on Residual Shaft Resistance (Continue)

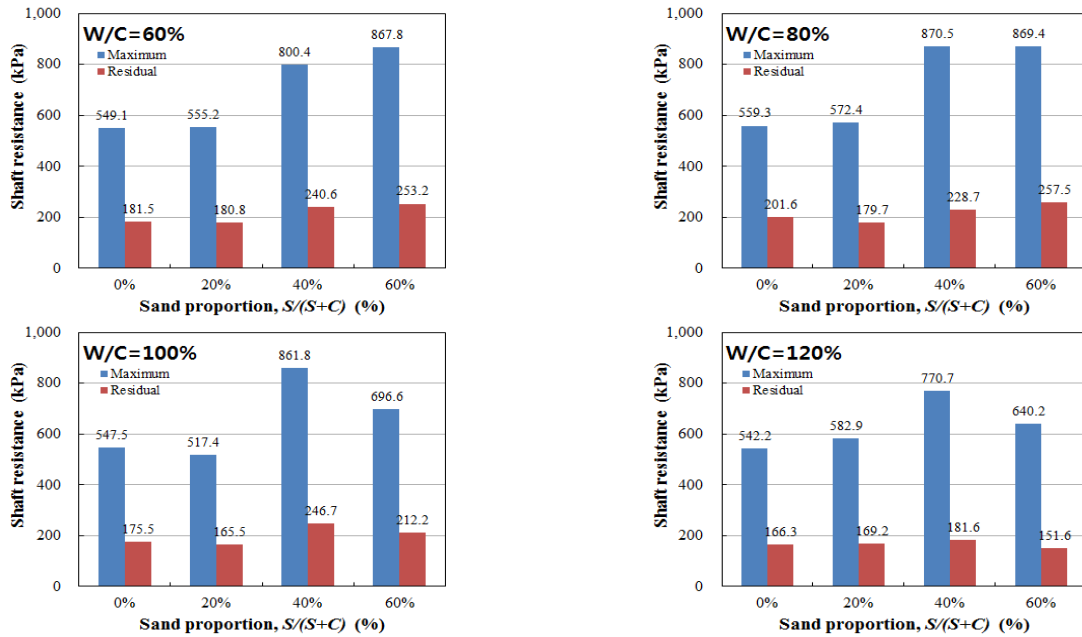


Fig. 14. Average Value of Maximum and Residual Shaft Resistance

4.5 최대 주면지지력 vs. 잔류 주면지지력

Fig. 14는 각 변수별 최대 주면지지력과 잔류 주면지지력의 평균값을 배합비에 따라 그린 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 잔골재

를 배합하는 것이 최대 주면지지력과 잔류 주면지지력을 증진시키는 효과가 있음을 그림을 통해서 확인할 수 있다. 잔골재가 없는 경우 최대부착력과 잔류 주면지지력은 물/시멘트비에 상관없이

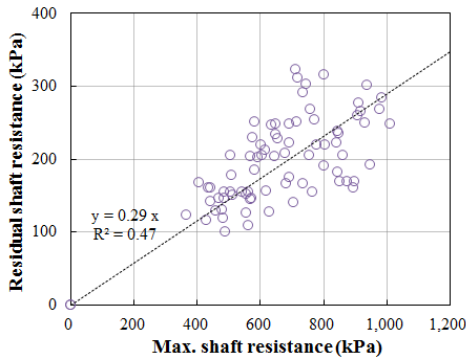


Fig. 15. Relationship of Max. and Residual Shaft Resistance

각각 약 540~560kPa, 약 170~200kPa의 값을 나타내었다. 잔골재 비가 40%인 경우에는 최대부착력과 잔류 주면지지력이 물/시멘트 비에 따라 각각 약 770~870kPa, 약 180~250kPa의 값을 나타내고 있다. 다만 잔골재를 20% 배합한 경우, 배합하지 않은 것보다 성능이 크게 향상되지 않았으나, 40% 배합하였을 때 최대부착력은 물/시멘트비에 따라 약 40~55% 증가되었고, 잔류 주면지지력은 약 10~40% 증가되었다. 잔골재 60%의 배합은 물/시멘트비가 80% 이상에서 성능을 저하시키기 때문에 본 실험에서 검증한 배합에서는 잔골재를 40% 정도 배합하는 것이 가장 우수한 성능을 나타내고 있다. 물/시멘트비에 있어서는 80~100%의 값을 사용할 때 주면지지력이 가장 크게 나타났다.

Fig. 15는 최대 주면지지력과 잔류 주면지지력의 상관성을 분석하기 위하여 사용된 모든 시험체의 결과를 도식한 것으로 최대 주면지지력이 증가함에 따라 잔류 주면지지력도 선형적으로 증가하는 양상을 나타내고 있다. 실험데이터를 통한 최대 주면지지력과 잔류 주면지지력 사이의 상관식은 Eq. (2)과 같으며, 잔류 주면지지력은 최대 주면지지력의 약 30%의 값을 보이는 것으로 분석되었다. 상관식의 결정계수(R^2)는 0.47로 최대 주면지지력과 잔류 주면지지력 사이에 상관성은 있어 보이나 그 편차가 크게 나타났다.

$$f_f = 0.29f_{m,b} \quad R^2 = 0.47 \quad (2)$$

여기서, $f_{m,b}$: 최대 주면지지력, f_f : 잔류 주면지지력

5. 결론

주면고정액의 배합비에 따른 암반매입 강관말뚝의 주면지지력을 평가하기 위하여 물/시멘트비와 잔골재비를 변화시켜 모형실험을 수행하여 그 결과를 분석한 결론은 다음과 같다.

(1) 매입말뚝의 주면고정액은 타설 후 입자의 중량 차이로 인해

가장 먼저 모래와 시멘트가 혼합된 형태로 침강하여 모르타르 층을 형성하고, 잉여수에 부유하던 시멘트와 모래의 미세입자가 2차로 침강하여 시멘트층을 형성하고 그 위에 잉여수가 분포한다. 입자 침강 후 잉여수는 모두 증발하므로 배합비에 따라 입자의 양 차이로 인해 실제 부착길이가 변수별로 상이하다.

(2) 매입말뚝 부착면적은 물/시멘트비가 감소하고 잔골재 배합비가 증가할수록 크게 나타나며, 부착면적의 잔여율에는 잔골재 배합비보다 물/시멘트비의 영향이 더 크게 나타난다. 지하수위가 존재하는 현장에서는 설계된 주면고정액의 배합비와 달리 물/시멘트비가 변화될 가능성이 있어 부착면적 산정시 충분한 고려가 요구된다.

(3) 매입말뚝의 주면지지거동은 초기 주면지지력이 거의 선형적으로 변위의 증가에 따라 증가하다 최대 주면지지력에 도달하면 강관표면과 주면고정재 사이의 부착력이 상실되어 지지력이 급격히 떨어진 후 거의 일정한 지지력에서 변위만 증가하는 마찰거동을 한다.

(4) 잔골재가 배합되지 않은 시멘트풀의 경우는 최대 주면지지력과 잔류 주면지지력은 물/시멘트비의 변화에 관계없이 거의 일정한 값을 나타내고, 잔골재가 배합되는 경우는 물/시멘트비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나 잔골재 배합비가 60%이고, 물/시멘트비가 80% 이상인 경우 최대 주면지지력과 잔류 주면지지력은 오히려 감소하는데, 이는 상대적으로 시멘트양이 감소하여 골재사이의 결합력이 저하되기 때문으로 해석된다.

(5) 잔골재가 없는 경우 최대부착력과 잔류 주면지지력은 물/시멘트비에 상관없이 각각 약 540~560kPa, 약 170~200kPa의 값을 나타내었다. 잔골재비가 40%인 경우에는 최대부착력과 잔류 주면지지력이 물/시멘트비에 따라 각각 약 770~870kPa, 약 180~250kPa의 값을 나타내고 있다. 즉, 최대부착력은 물/시멘트비에 따라 약 40~55% 증가되었고, 잔류 주면지지력은 약 10~40% 증가되었다. 본 실험에서 검증한 배합에서는 잔골재비를 40% 정도, 물/시멘트비를 80~100% 사용할 때 주면지지력이 가장 크게 나타났다.

(6) 본 실험에서 얻은 데이터를 가지고 잔류 주면지지력과 최대 주면지지력의 관계를 회귀분석 한 결과, 잔류 주면지지력은 최대 주면지지력의 약 30%의 값을 보였다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 제주대학교 교원성과지원사업에 의하여 연구되었음.

References

- Korean Geotechnical Society (KGS) (2015). *Code requirements for structural foundation design*, CIR press (in Korean).
- Lee, I. (2013). *Fundamental of rock mechanics (2nd edition)*, CIR press (in Korean).
- Maertens, L. (2002). "Design and installation of steel open end piles in weathered basalt." *International Deep Foundations Congress 2002*, Orlando, USA, pp. 1-16.
- Min, C. (2016). *Reinforced Concrete Design(3rd)*, GoomiBook (in Korean).
- Moon, K., Park, S. and Heo, J. (2014a). "A study on the skin friction of steel pile embedded in rock." *Proc. of the 2014 Korean Society of Civil Engineers Conf.*, KSCE, Daegu, Korea, pp. 1647-1648 (in Korean).
- Moon, K., Park, S. and Shin, M. (2017). "Mechanical properties of filling materials for bored pile in rock." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 4, pp. 637-645 (in Korean).
- Moon, K., Park, S., Kim, Y. and Yang, S. (2014b). "Mechanical characteristics of basalt in Jeju island with relation to porosity." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 4, pp. 1215-1225 (in Korean).
- Nezamian, A., Al-Mahaidi, R., Grundy, P. and O'Loughlin, B. (2002). "Push-out strength of concrete plugs in tubular steel piles." *Proc. of the Twelfth (2002) Intl. Offshore and Polar Engineering Conf.*, ISOPE, Kitakyushu, Japan, pp. 60-64.
- Shakir-Khalil, H. (1993a). "Pushout strength of concrete-filled steel hollow sections." *The Structural Engineers*, Vol. 71, No. 13, pp. 230-233.
- Shakir-Khalil, H. (1993b). "Resistance of concrete-filled steel tubes to pushout forces." *The Structural Engineers*, Vol. 71, No. 13, pp. 234-243.