

크기효과를 고려한 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주면마찰력

Side Resistance of Rock Socketed Drilled Shafts in Consideration of the Shaft Size Effects

사 공 명¹ Sagong, Myung

백 규 호² Paik, Kyu-Ho

Abstract

According to Sagong and Paik (2003), the side resistance of rock socketed drilled shafts is affected by rock quality, types, uniaxial compressive strength, and confining stress. Their approach based upon the Hoek-Brown criterion provides reasonable predictions of the side resistance. In this study, we propose an equation to calculate the side resistance considering size effects of the shafts and investigate the influence of drilled shaft diameter on the side resistance. A new method employs the modified Hoek-Brown criterion together with an empirical size effect of rock core. From the previous field tests, 12 pile load test results were collected and compared with prediction calculated from the equation proposed in this study. In a given condition, similar results between measurement and estimate are observed. From the parametric study on the GSI, confining stress, uniaxial compressive of intact rock and pile size, it is shown that uniaxial compressive strength is the most influential parameter on the side resistance. Though pile size shows the least influence on the resistance, the size effect is apparent as rock quality increases.

요 지

사공과 백(2003)에 의하면 암반에 근입된 현장타설말뚝의 단위주면마찰력은 암반의 상태, 종류, 일축압축강도, 구속압 등으로부터 영향을 받는 것으로 알려졌다. 또한 그들이 제안한 Hoek-Brown 공식을 변형한 암반근입부의 단위주면마찰력 산정공식은 적절한 단위주면마찰력 값을 산정하는 것으로 밝혀졌다. 본 연구에서는 기존의 암반에 근입된 현장타설말뚝의 단위주면마찰력 산정에 있어 말뚝의 크기효과를 고려하는 방법을 제안하였으며, 말뚝의 크기효과로 인한 단위주면마찰력의 영향을 조사하였다. 본 논문에서 제안하는 방법은 기존의 Hoek-Brown 공식을 변형한 식에 경험적인 암석의 일축압축강도에 대한 크기효과를 나타내는 식을 대입하여 결정되었다. 또한, 기존 논문에 보고된 말뚝재하실험 결과 중 12개의 실측치와 말뚝의 크기효과를 고려한 식을 통하여 계산된 단위주면마찰력의 예측치를 비교하였다. 비록 충분치 않은 지반조건이 기술되어 있는 상황이지만, 본 연구에서 제안하는 크기효과를 고려한 단위주면마찰력의 산정공식은 실측치와 근사한 결과를 보였다. 또한, 지반의 지질강도정수(GSI), 구속압, 일축압축강도, 말뚝의 직경에 대한 매개변수실험 결과 일축압축강도가 주면마찰력에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 말뚝의 크기는 상대적으로 그에 비해 적은 것으로 나타났으나 말뚝의 크기효과는 암반의 상태가 양호할수록 더욱 큰 것으로 관측되었다.

Keywords : Drilled shaft, GSI, Hoek and Brown criterion, Side resistance, Size effects, Uniaxial compressive strength

1 정회원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원 (Member, Associate Researcher, Track & Civil Engr. Research Dept. Korean Railroad Research Institute, rockcore@krii.re.kr)

2 정회원, 관동대학교 공과대학 토목·환경학부 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engr., Kwandong Univ.)

1. 서론

현장타설말뚝은 시공상의 장점으로 인하여 장대교량 및 고층건물의 기초로 자주 사용되고 있다. 이러한 현장 타설말뚝은 충분한 지지력을 확보하기 위하여 선단부가 암반에 근입된 경우가 많은데, 암반에 근입된 부분이 깊을수록 상부구조물로부터 전이되는 하중의 상당 부분이 주면마찰력으로 지지된다. 특히 근입부의 깊이가 현장 타설말뚝 직경의 약 2배 이상인 경우 대부분의 하중이 주면마찰력으로 지지되는 양상을 보인다(Radhakrishnan and Leung, 1988).

암반에 근입된 현장타설말뚝의 경우 하중의 전이는 상당히 복잡한 과정을 겪는데 상부 구조물로부터 전달되는 하중이 증가할수록 재하방향의 변위 또한 증가할 것이다. 이때 탄성이론의 적합조건을 따른다면 재하방향의 변위는 인근 암반으로 전달되는 하중을 발생시킨다. 또한 말뚝의 암반근입부 변형의 발생에 있어서도 암반근입부 상부에서부터 변형이 시작되며 이로 인하여 암반과 콘크리트의 경계면에서 발생하는 전단도 변위와 마찬가지로 암반근입부 상부에서부터 시작된다. 결국 이러한 현상은 상이한 재료의 직접전단과 유사한 상황이지만, 이 경우에는 Seidel과 Harberfield (2002)가 제시한 것과 같이 전단의 직각방향으로 작용하는 암반의 수직강성도는 일정한 값을 보일 것이다. 따라서, 현장타설말뚝을 시공하기 위하여 천공을 한 상태에서 암반벽면에 생성되는 불규칙한 돌기들로 인하여 전단시에 발생하는 들뜸현상은 전단방향의 직각 방향으로 작용하는 수평응력을 증가시키는 결과를 보인다. 그러므로 암반에 근입된 현장타설말뚝은 침하가 점진적으로 진행됨에 따라 그에 상응하는 크기로 수평응력이 증가하는 양상을 보인다. 또한 이때 전단으로 인한 재료의 손상 및 파괴는 콘크리트 혹은 암반내에서 발생하며, 이는 결국 두 재료의 상대적인 강도에 따라 결정된다.

이처럼 복잡한 거동을 보이는 현장타설말뚝의 주면마찰력을 무결암의 일축압축강도와 선형 혹은 비선형의 상관관계로 나타내는 기존의 방식은 다양한 암반의 상태를 고려해서 지지력을 예측하는데 한계가 있을 것으로 판단된다. 이에 대한 대안으로 Hoek-Brown 파괴규준을 이용하여 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주면마찰력을 산정하는 사공과 백(2003)의 방식은 다양한 암반조건에 대하여 적용이 가능하다. 이외, 암반에 근입

된 현장타설말뚝의 단위주면마찰력에 영향을 미치는 요인으로 말뚝의 크기를 들 수 있으나, 말뚝의 크기에 따른 주면마찰력의 변화에 대한 고려는 최근 들어 일부 수행되고 있는 상황이다(조천환 등, 2004). 따라서, 본 논문에서는 사공과 백(2003)이 제안한 주면마찰력 산정기법에 대한 일부 수정을 통하여 크기효과를 고려한 단위주면마찰력의 산정기법을 제시하고, 제안된 방법을 통한 예측치와 측정치를 비교하여 정확도를 검증하고자 한다.

2. 원지반 조건과 크기효과를 고려한 단위주면마찰력 산정식

2.1 Hoek-Brown 공식

암석의 경우 흙과는 달리 구성 입자들간의 높은 결합력으로 인해 인장력이 발휘되며 입자들 사이에 존재하는 미시적인 공극이나 크랙 혹은 거시적인 관점에서의 절리나 파쇄대가 존재함으로써 암석이나 암반에 대한 극한상태의 추정이 매우 어렵다. 따라서 흙에 일반적으로 적용되는 Mohr-Coulomb 이론을 암석에 적용하는 데는 그 한계가 있을 수 있다.

일반적으로 암석의 극한상태(파괴하중)를 추정하는데 있어서 Mohr-Coulomb 이론보다 Hoek-Brown 공식의 적용성이 더 높은 것으로 알려져 있다. 1980년 초기 Hoek-Brown 공식이 제안된 후 몇 차례의 수정과 보완을 거쳐서 최근에 발표된 일반적인 Hoek-Brown 공식의 형태는 다음과 같다(Hoek과 Brown, 1997).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

여기서

σ_1 과 σ_3 = 절리를 내포한 풍화된 원지반 암반의 파괴시 최대 및 최소 주응력

σ_{ci} = 원지반의 무결암에 대한 일축압축강도

m_b = 원지반 상태를 고려한 Hoek과 Brown 정수

$$\left(= m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28}\right) \right)$$

m_i = 암석의 종류에 따른 상수

GSI(Geological Strength Index) = 원지반의 풍화도 및 절리 간격 등을 고려한 특성값

s, a = 원지반의 상태에 의존하는 상수

m_i 와 GSI의 선택과 관련해서는 Hoek과 Brown(1997) 및 사공과 백(2003)의 논문을 참조할 수 있다. s 와 a 값은 GSI 값에 따라 결정되며, GSI값이 25일 때(암반의 풍화가 상당히 진행된 경우)를 기준으로 s 와 a 의 값은 다음 식에 의해 결정된다.

$$\text{GSI} > 25 \text{ 인 경우} \quad s = \exp\left(\frac{\text{GSI} - 100}{9}\right), \quad a = 0.5$$

$$\text{GSI} < 25 \text{ 인 경우} \quad s = 0, \quad a = 0.65 - \frac{\text{GSI}}{200}$$

2.2 크기효과를 고려한 단위주면마찰력 산정식

암반에 근입된 현장타설말뚝의 경우 콘크리트로 형성되는 현장타설말뚝부와 선굴착된 원지반간의 상대강성에 따라 말뚝과 원지반간의 전단파괴 메커니즘이 달라진다. 원지반의 강도가 현장타설말뚝의 강도에 비해 클 경우에는 콘크리트로 구성된 말뚝에서 파괴가 발생할 것이며, 말뚝의 강도가 원지반의 강도에 비해 크다면 원지반의 암반 내에서 파괴가 발생할 것이다. 이때 비교의 대상이 되는 콘크리트 말뚝과 원지반 암반의 일축압축강도가 서로 다르게 정의되어야 한다. 즉 말뚝의 경우에는 콘크리트의 일축압축강도를 바로 적용할 수 있으나 암반의 경우에는 원지반의 특성을 고려한 일축압축강도를 적용해야 한다. 결국 이것은 식 (1)에서 σ_3 의 값을 "0"으로 두고 계산하였을 때 얻어지는 σ_1 값을 원지반의 일축압축강도로 사용하여야 한다는 것을 의미한다. 따라서 식 (1)을 이용해서 원지반의 일축압축강도를 계산하면 GSI값에 따라서 달라지겠지만 원지반의 일축압축강도는 무결암의 일축압축강도의 57%에서 0.2%까지 저하될 수 있다. 이 수치는 GSI가 80인 경우와 10인 경우에 대한 "s"와 "a"를 이용하여 원지반의 일축압축강도를 계산한 것이다. 콘크리트의 일축압축강도를 약 50MPa 정도로 가정할 때 원지반 암석의 일축압축강도가 콘크리트의 일축압축강도보다 작은 경우는 원지반 암석의 일축압축강도가 100MPa 이하인 연암에 해당하는 경우일 것이다. 따라서 본 연구에서 제안하는 단위주면마찰력의 산정식은 연암 이하의 강도를 지닌 암반에 대하여 적용하는 것이 적당할 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 제안하는 단위주면마찰력의 산정식은 원지반 굴착공벽의 거칠기를 고려하지 않으며 적용의 대상은 단일 암반층에 근입된 경우로 한정한다.

식 (1)을 최대 전단강도의 향으로 변환하면 다음과 같은 형태로 바꿀 수 있다.

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sigma_{ci} (m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s)^a \quad (2)$$

일반적으로 심도가 얇은 암반의 수평토압계수는 1 이상이므로 최소주응력의 방향은 수직 방향이 될 것이다. 따라서 식 (2)에서 σ_3 는 암반근입부의 중앙부 깊이에서의 상재하중으로 나타낼 수 있다. 결국, 최종적인 말뚝의 단위주면마찰력 f_{su} 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$f_{su} = \frac{1}{2} \sigma_{ci} (m_b \frac{\gamma_t z}{\sigma_{ci}} + s)^a \quad (3)$$

여기서 f_{su} = 말뚝의 최대 단위주면마찰력

γ_t = 암반근입부의 상부에 위치하는 상재토의 단위중량(MN/m³)

z = 지표면에서 말뚝의 암반근입부 중앙까지의 깊이

식 (3)은 현장타설말뚝의 주면마찰력이 지반의 무결암의 일축압축강도와 암반의 종류, 그리고 구조적 상태 및 풍화도 등에 의해 결정될 수 있음을 나타내고 있다.

Hoek과 Brown(1980)은 여러 가지 암종에 대한 실험을 통해서 암반의 일축압축강도 σ_{ci} 와 암석코어의 크기간에 다음과 같은 경험 공식을 제안하였다.

$$\sigma_{ciD} = \sigma_{ci50} \left(\frac{50}{D}\right)^{0.18} \quad (4)$$

여기서 σ_{ciD} 는 지름이 D(mm)인 암석코어의 일축압축강도를 나타내며 σ_{ci50} 은 50mm 지름의 시험체에 대한 일축압축강도를 의미한다. 그림 1은 암석의 일축압축강도

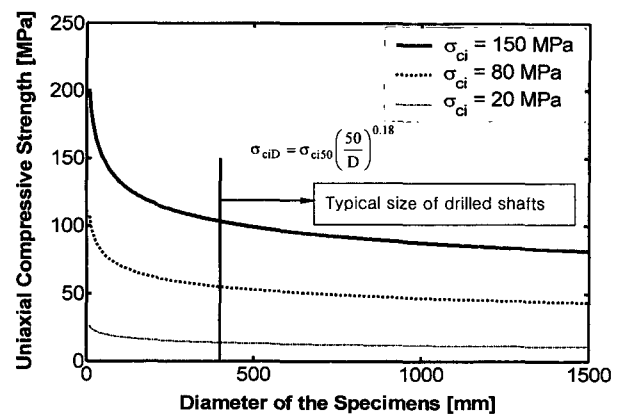


그림 1. 암반의 일축압축강도에 따른 크기효과

별 크기효과를 나타내고 있는데 암석코어의 직경이 클수록 강도는 감소하며, 일축압축강도가 클수록 크기효과가 뚜렷함을 나타내고 있다.

결국 일반적으로 일축압축강도가 클수록 암반의 상태가 양호한 경우가 많으므로 암반의 상태가 양호할수록 크기효과도 뚜렷할 것으로 판단된다. 이상의 식 (4)를 식 (3)에 대입하면 크기효과를 고려한 현장타설말뚝의 단위주면마찰력 산정식은 식 (5)와 같이 얻어진다.

$$f_{su} = \frac{1}{2} \sigma_{ci50} \left(\frac{50}{D} \right)^{0.18} \left(m_b \frac{\gamma_t Z}{\sigma_{ci50} \left(\frac{50}{D} \right)^{0.18} + s} \right)^a \quad (5)$$

결국, 식 (5)는 무결암의 일축압축강도에 대한 크기효과를 간접적으로 적용한 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주면마찰력 산정식이다. 본 식은 현장타설말뚝에 하중이 가해질 때 현장타설말뚝과 원지반간의 경계면에서 발생하는 전단거동시의 크기 의존적인 특성을 간접적으로 고려한 것으로 이는 직접전단에서도 크기효과가 발생한다는 Bandis 등(1981)의 연구 결과와도 어느 정도 일치함을 알 수 있다.

3. 제안식의 검증

암반에 근입된 현장타설말뚝의 주면마찰력은 원지반의 암반과 콘크리트 말뚝의 상대강도 및 원지반의 특성

그리고 크기효과와 상관성이 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 절에서는 기존 문헌에서 제시하고 있는 재하실험 결과를 이용하여 본 연구에서 제안하고 있는 식 (5)의 정확도를 검증하고자 한다. 적용된 말뚝의 제원 및 현장의 특성에 대한 값들은 표 1에 정리되었다.

표 1은 문헌을 통해 기존에 보고된 12개의 재하실험 결과를 보이고 있다. 표의 첫번째 열은 암반의 종류를 나타내고 두번째 열은 말뚝의 직경으로 0.4에서 1.5m의 범위에 있으며, 세번째 및 네번째 열은 현장타설말뚝의 심도 및 암반근입부의 길이를 나타내고 있다. 다섯번째 열은 무결암의 일축압축강도를 나타내고 있으며 그 뒤로 오는 열은 지반정수인 m_i 와 GSI를 나타낸다. m_i 의 경우에는 기존 문헌에서 기술된 암반의 종류에 근거하여 선정하였으며 GSI는 각 논문에 기재된 원지반의 상태를 기준으로 평가하였다. 이와 관련하여 재하실험결과가 보고된 대부분의 논문에서는 원지반에 대하여 자세히 언급하지 않고 “풍화된”, “상당히 풍화된”, “다소 덜 풍화된” 정도로만 기술하였기 때문에 GSI값의 선정에 있어 다소의 불확실성이 존재할 수도 있다. 선정된 GSI값을 이용해서 s, a 및 m_b 를 산정하였으며, 이미 무결암의 일축압축강도와 말뚝의 직경을 이용해서 식 (4)로부터 크기효과를 고려한 일축압축강도를 구하였다. 또한 암반 근입부의 중앙에 작용하는 수직응력은 말뚝의 심도와 근입부의 길이, 20kN/m^3 으로 가정한 지반의 단위중량을 이용하여 계산되었다. 이상의 조건으로부터 계산된 단위주면마찰력(아홉번째 열)은 현장재하실험

표 1. 각종 재하실험 결과와 단위주면마찰력의 추정을 위한 입력 자료

암반 타입	말뚝직경 (mm)	말뚝길이 (m)	근입부 길이 (m)	σ_{ci} (MPa)	m_i	GSI	단위주면마찰력, f_{su} (MPa)			(b)/(a) (%)	참고 문헌	
							측정치 (a)	예측				
								예측치 (b)	예측치 (GSI-5)			예측치 (GSI+5)
파쇄 및 전단된 안산암	450	12.2	0.56	10.5	19	50	1.12	1.18	1.07	1.30	105	14
간헐적인 수직절리의 이암	670	6.0	1.0	1.1	4	55	0.15	0.13	0.12	0.15	88	16
간헐적인 수직절리의 이암	762	11.1	5.6	1.1	4	45	0.34	0.29	0.27	0.32	86	16
높은 RQD(88%)의 사암	1070	16.6	1.4	9.3	19	65	2.15	1.54	1.39	1.71	72	4
높은 RQD(88%)의 사암	1070	15.5	1.5	8.4	19	65	2.15	1.40	1.27	1.55	65	4
상당히 풍화되며 단편화된 미사암	810	12.4	11.5	6.0	9	40	0.38	0.48	0.44	0.53	126	11
풍화되며 단편화된 미사암	705	7.3	1.5	9.0	9	40	0.66	0.43	0.39	0.47	65	11
미사암	1350	14	6.8	7.0	9	40	0.40	0.47	0.42	0.51	116	11
단단한 혈암	1500	11.5	3	9.0	4	55	0.66	0.48	0.42	0.54	72	11
단단하며 풍화되지 않은 사암	1200	41.8	1.5	26.0	19	65	5.93	4.18	3.79	4.64	70	9
높은 RQD에 괴상, 쇄설성 석회암	457	5.6	1.4	60.7	10	55	2.30	2.21	1.83	2.71	96	5
높은 RQD에 괴상, 쇄설성 석회암	457	5.3	1.6	60.7	10	55	2.30	2.22	1.84	2.72	96	5

으로부터 측정된 단위주면마찰력(여덟번째 열)과 비교되었다. 예측된 단위주면마찰력의 뒤쪽에 위치한 열(열번째 및 열 한번째 열)은 GSI값을 ± 5 만큼 변화시킴에 따라 계산된 단위주면마찰력을 나타내고 있으며, 마지막 두 열은 단위주면마찰력의 측정치에 대한 계산치의 비와 참고문헌을 나타내고 있다.

그림 2는 단위주면마찰력의 예측치를 측정치와 비교한 것으로, 전반적으로 제안식을 통하여 계산한 예측치가 실험치에 비해 다소 작은 값을 제공하고 있음을 알 수 있다. 이는 표 1에서도 나타낸 바와 같이 실험치에 대한 예측치의 비가 최저 65%에서 최고 126%의 범위에 있으며, 평균적으로 예측치가 실험치보다 다소 작음을 알 수 있다. 이러한 경향을 보이는 것에 대해서는 여러 가지 원인을 들 수 있겠지만, 무엇보다 각 변수들의 적절성 특히 지반의 특성을 나타내는 GSI값의 적절성을 들 수 있다. 표 1에 보이는 바와 같이 각 논문에서 언급된 암반상태에 근거해서 평가된 GSI값보다 5만큼 큰 GSI값을 이용해서 단위주면마찰력을 산정하면 예측치의 평균값이 거의 측정치의 100%에 도달하여 보다 더 적절한 결과를 도출한다. 그림에도 불구하고 본 연구에서 사용한 GSI값은 앞에 기술한 바와 같이 기존 논문에서 밝히고 있는 암반상태에 대한 평가를 통해서 주관적으로 선정한 것이므로 그 값의 선정에 있어 근본적인 한계가 존재한다고 할 수 있을 것이다. 비록, 각 변수에 대한 입력값의 선정에 있어 제한성이 존재하더라도 식 (4)와 (5)가 측정치에 어느 정도 근접한 결과를 제공한다고 볼 수 있으며, 이에 대한 이유로 다음의 두 가지를 들 수 있다.

본 연구에서 적용하고 있는 Hoek-Brown 모델의 수정식은 최대전단응력의 산정을 목표로 하고 있다. 식 (4)와

(5)에서 볼 수 있듯이 최대 및 최소주응력의 차에 대한 항을 최대전단응력의 항으로 표현하였다. 그러나 실제 암반의 근입부에서 작용하는 전단응력의 상태는 반드시 최대전단응력의 상태라고 할 수는 없을 것이다. 즉 구조물로부터 전달되어 오는 상부 하중이 벽면의 마찰력으로 전이되는 과정에서 이 마찰력으로 인해 암반과 말뚝의 경계부에 인접한 암반에 작용하는 주응력은 회전하게 되므로 이때 발생하는 전단응력을 최대전단응력이라 규정하기는 힘들 것이다. 따라서 식 (4)와 (5)는 단위주면마찰력 산정 시 마찰력으로 인한 주응력의 회전을 고려하지 않기 때문에 과도한 값을 산정한다고 볼 수 있다. 또한, 비록 서로 다른 특성을 가진 물체이지만 콘크리트와 암반이 서로 전단될 때 전단방향에 수직한 방향으로의 들뜸(dilation)현상이 발생하여 실제 암반의 벽체에 작용하는 구속응력은 더 커지게 되고, 그로 인해 결과적으로 전단저항은 더 크게 나타날 것이다. 그러나 식 (4)와 (5)에는 이러한 들뜸현상으로 인한 구속응력의 증가와 그로 인한 전단저항의 증가를 고려할 수 있는 항이 없는 상황이다. 따라서 식 (4)와 (5)는 들뜸현상을 고려할 수 없으므로 실제 단위주면마찰력보다 작은 값을 예측한다. 결국, 응력의 회전을 고려하지 않아서 과도한 값을 예측하는 부분과 들뜸현상을 고려하지 않아서 과소한 예측을 하는 부분이 어느 정도 서로 상쇄되어 표 1에서와 같이 수용할 만한 결과를 제시하는 것으로 판단된다.

그림 3은 무결암의 일축압축강도에 따른 단위주면마찰력의 변화를 나타내고 있다. 그림 3에서 보이는 각종 기호는 현장재하시험의 결과를 나타내며 점선으로 나타낸 상관선은 식 (5)를 통한 각 재하시험결과의 예측치에 대한 상관관계를 나타내는 선이다. 또한 각 기호에 인접해서 그려진 에러(error)막대는 논문에 근거해서 선정된 GSI값에 ± 5 를 했을 때의 값을 이용해서 계산된 단위주면마찰력의 범위를 나타낸다. 따라서, 그림 2에서는 식 (5)의 적절성을 평가하였다면, 그림 3에서는 식 (5)를 기존의 제안식과 비교하고자 한다. 표 2에 나타낸 기존에 제안된 현장타설말뚝의 단위주면마찰력에 대한 산정식은 크게 두 가지 형태로 나타낼 수 있다. 첫번째는 무결암의 일축압축강도와 단위주면마찰력을 선형적인 관계를 제안한 것이며, 두번째는 단위주면마찰력을 일축압축강도의 멱승의 형태로 제안한 것이다. 전자의 경우에는 Gupton과 Logan(McVay와 Townsend, 1992), Reese와 O'Neill(1987)의 제안식이 포함되며, 후자의 경우에는 Horvath와 Kenney(1980)와 Rowe와 Armitage

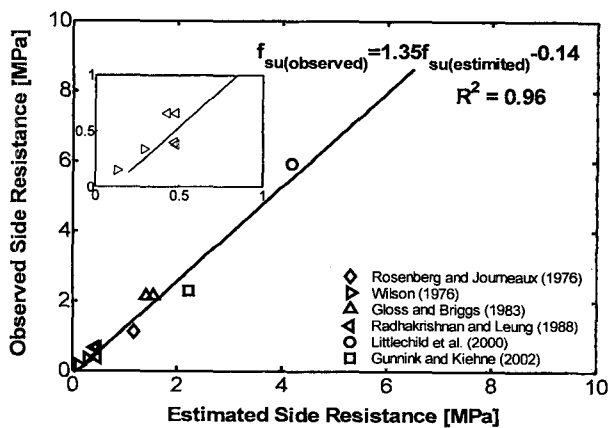


그림 2. 단위주면마찰력의 예측 및 측정값간의 비교

(1987)의 제안식이 포함된다. 특히 후자의 경우에는 Horvath와 Kenney(1980)가 제안한 $f_{su}=0.2(\sigma_{ci})^{0.5}$ 이나 Rowe와 Armitage(1987)가 말뚝의 거칠기가 일정한 경우에 대하여 제안한 $f_{su}=0.45(\sigma_{ci})^{0.5}$ 과 같이 여러 식들이 단위주면마찰력을 일축압축강도의 제곱근의 형태로 표현하였다. 결국, 그림 3에 보이는 바와 같이 표 1의 경우에 대하여 식 (5)로부터 계산된 단위주면마찰력을 암반의 일축압축강도의 함수로 표현한다면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다

$$f_{su}=0.35(\sigma_{ci})^{0.5} \quad (6)$$

본 연구에서 사용한 데이터를 바탕으로 도출한 식 (6)의 형태는 표 1에서 Rosenberg와 Journeaux(1976)의 실험데이터로부터 구한 식의 형태와 상당히 유사함을 알 수 있다. 이것은 식 (5)의 적용성을 어느 정도 검증하는 결과라 할 수 있다.

표 2. 기존에 제안된 단위주면마찰력 산정공식(단위 MPa, Mcvay와 Townsend, 1992)

단위주면마찰력 산정식	참고문헌
$\tau = 0.3(\sigma_{ci})^{0.52}$	Rosenberg와 Journeaux, 1976
$\tau = 0.2(\sigma_{ci})^{0.5}$	Horvath와 Kenney, 1980
$\tau = 0.795(\sigma_{ci})^{0.367}$	Williams 등 (Mcvay와 Townsend, 1992)
$\tau = 0.3(\sigma_{ci})$	Reynolds와 Kaderabek (Mcvay와 Townsend, 1992)
$\tau = 0.2(\sigma_{ci})$	Gupton과 Logan (Mcvay와 Townsend, 1992)
$\tau = 0.15(\sigma_{ci})$	Reese와 O'Neill, 1987
$\tau = 0.45(\sigma_{ci})^{0.5}$	Rowe와 Armitage, 1987 (clean sockets)
$\tau = 0.6(\sigma_{ci})^{0.5}$	Rowe와 Armitage, 1987 (rough sockets)
$\tau = 0.19(\sigma_{ci})^{0.5}$	Carter와 Kulhawy, 1988

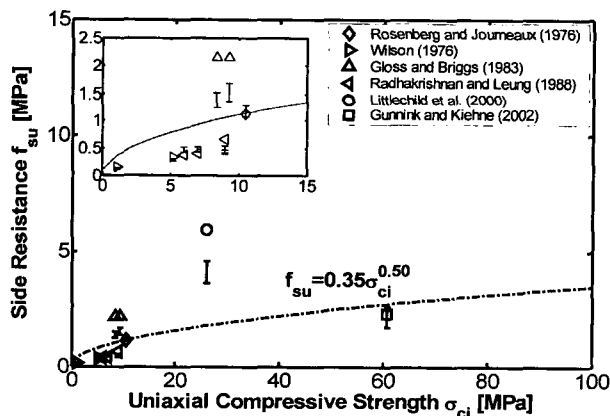


그림 3. 무결암의 일축압축강도와 단위주면마찰력간의 상관관계

그림 4에서는 세 종류의 데이터가 포함되어 있다. 첫째로는 본 연구에서 제안된 방법을 통한 주면마찰력의 예측치가 있으며, 둘째로는 기존의 단위주면마찰력 산정식으로부터 얻어진 결과가 도시되어 있으며, 마지막으로 표 1에서 사용한 현장재하시험의 결과가 포함되어 있다. 그림 4를 살펴보면 식 (6)은 기존의 일축압축강도와 선형적인 상관관계를 나타내는 단위주면마찰력 산정식의 결과와 다소 차이를 보이고 있으며 Rosenberg와 Journeaux(1978)에서 도출된 공식이 가장 근사한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 결국, 이러한 결과에 근거할 때 단위주면마찰력 산정 시 암반의 일축압축강도만을 고려하는 기존의 산정식보다 암반의 특성 및 말뚝의 크기효과를 고려할 수 있는 본 연구에서 제안된 식 (5)가 보다 넓은 적용성을 가진다고 할 수 있다.

그림 5는 말뚝의 직경에 따른 정규화된 단위주면마찰력의 변화를 보인 것으로, Y축에 표시된 단위주면마찰력은 무결암의 일축압축강도의 0.5승에 해당하는 값으로 정규화되었다. 그림에서 보이는 바와 같이 Littlechild 등(2000)과 Gloss와 Briggs(1983)의 재하시험결과는 말

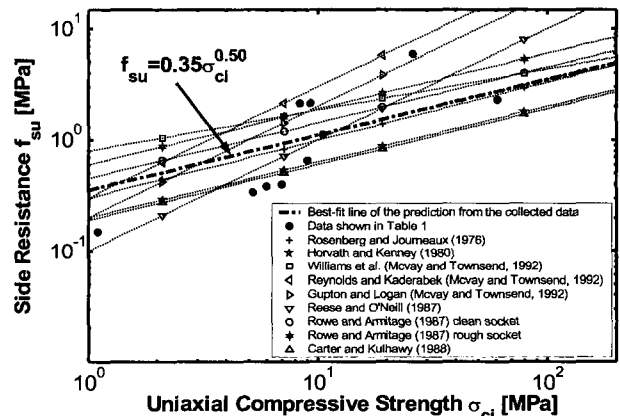


그림 4. 기존 제안식과 본 연구결과와의 비교

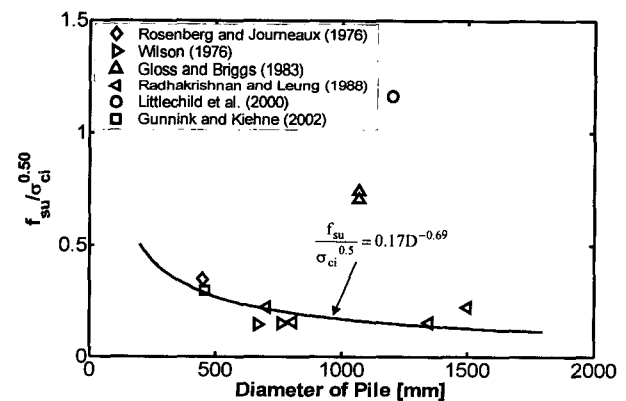


그림 5. 파일의 직경에 따른 정규화된 단위주면마찰력의 변화

뚝의 설치심도가 각각 16m와 42m로 다른 시험말뚝에 비해 매우 깊은 경우에 대한 것으로 시험결과들과 다소 동떨어져서 위치하고 있음을 알 수 있다. 이는 결국 암반근입부의 심도가 깊어짐에 따라 상재하중이 증가하고 최종적으로는 말뚝의 주면마찰력이 무시할 수 없을 정도로 커지기 때문으로 판단된다(사공과 백, 2003). 따라서, 이 두 경우에 대해서는 다른 경우에 포함되어 말뚝의 크기 효과를 비교하기에는 다소 무리가 따를 것으로 판단되므로 고려대상에서 제외하였다. 따라서, 그 외의 다른 시험결과들에 대하여 말뚝의 직경과 정규화된 단위주면마찰력간에 상관관계를 구한 결과 식 (7)이 얻어졌다.

$$\frac{f_{su}}{\sigma_{ci}^{0.5}} = 0.17D^{-0.69} \quad (7)$$

이 식의 산정을 위하여 사용한 재하시험결과들은 일축압축강도와 암반의 상태가 심하게 차이가 나지 않는 경우에 대한 것이므로 말뚝의 직경이 단위주면마찰력에 미치는 영향을 분석하는데 이들 시험결과들이 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 식 (7)에서 알 수 있듯이 암반에 근입된 현장타설말뚝의 단위주면마찰력은 말뚝의 직경과 반비례하는 관계를 보였으며, 이 결과 또한 기존의 단위주면마찰력 산정식들로부터는 도출할 수 없는 것이다.

4. 단위주면마찰력의 산정과 관련된 주요 변수의 평가

본 절에서는 단위주면마찰력의 산정에 영향을 미치는 중요한 인자들에 대한 평가를 매개분석을 통하여 제시하고자 한다. 단위주면마찰력의 산정에 있어 주요 변수로는 암반의 특성, 암반근입부의 심도, 무결암의 일축압축강도, 그리고 말뚝의 크기를 들 수 있다. 이상의 변수들은 식 (5)에 포함되어 있는 것으로서 각 변수별 상대적인 중요성을 평가하고자 한다.

암반의 특성과 관련된 여러 변수중 먼저 지질강도지수(GSI)가 단위주면마찰력에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 그림 6은 세가지 암반타입 “좋은”, “보통”, “나쁨”에 대한 GSI 값과 그에 상응하는 일축압축강도값을 이용하여 단위주면마찰력을 산정한 결과이며, 이때 사용된 입력값들은 표 3에 정리되어 있다. 표 3의 값은 Hoek(1998)이 제안하는 값을 적용하였다. 그 결과 일반적으로 GSI값이 증가함에 따라 말뚝의 단위주면마찰력이 지속적으로 증가하므로 이 경우에는 말뚝 본체의 콘

크리트가 파괴되는 상태에서의 단위주면마찰력을 상한값으로 설정하는 것이 필요하다. 이를 위해 말뚝 본체의 콘크리트가 파괴될 때의 단위주면마찰력을 다음과 같은 방법으로 산정하였다.

$$f_{su} \leq \sigma_c D/4L \quad (8)$$

여기서 D 는 말뚝의 직경이며 L 은 암반근입부의 깊이로서 말뚝직경의 두 배로 가정하였다. 또한 콘크리트의 일축압축강도 σ_c 는 Gunnink과 Kiehne(2002)의 실험 결과치와 근사한 50MPa로 가정하였다. 이상의 값을 식 (8)에 대입하면 콘크리트 말뚝이 파괴될 때 최대주면마찰력은 6.25MPa로 산정된다. 이상의 특성이 그림 6에 도시되었으며, 그림에서 점선부는 암반보다 말뚝 본체의 콘크리트가 먼저 파괴되는 영역을 의미하는 것이다. 이 그림으로부터 단위주면마찰력에 대한 GSI값의 영향을 살펴보면, GSI 값이 클수록 단위주면마찰력은 증가하였으며 암반의 상태가 좋을수록 GSI의 영향이 두드러지는 것을 알 수 있다. 또한 그림으로부터 단위주면마찰력을 일축압축강도에 대한 일정한 계수 혹은 멱수형태로 나타낸 식을 이용해서 다양한 조건에서의 단위주면마찰력을 도출하는 데는 한계가 있음을 알 수 있다.

그림 7은 표 3에 나타난 세가지 암반의 상태에 대한 말뚝의 설치심도(또는 구속압)이 단위주면마찰력에 미

표 3. 매개변수분석을 위한 입력데이터

변수	암반의 물성		
	좋은	보통	나쁨
무결암 강도(σ_{ci})	150	80	20
Hoek-Brown 상수(m_i)	25	12	8
지질강도인수(GSI)	75	50	30

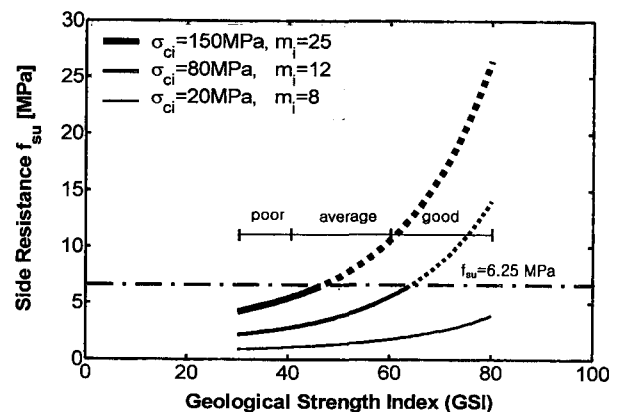


그림 6. 지질강도지수(GSI)에 따른 단위주면마찰력의 변화(점선부는 콘크리트의 파괴를 의미함)

치는 영향을 나타낸 것이다. 구속압은 암반 근입부의 중앙부에 작용하는 값으로, 계산에 고려된 말뚝 심도의 범위는 1에서 30m로 하였고 이때 사용된 상재토의 단위중량은 20kN/m³이다. 본 논문에서는 상재하중을 최소주응력의 향으로 변환하였는데 비록 암반상태의 변화

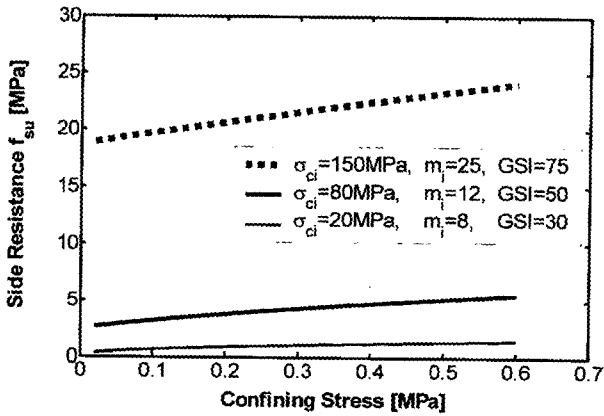


그림 7. 구속압에 따른 주면마찰력의 변화(점선부는 콘크리트의 파괴를 의미함)

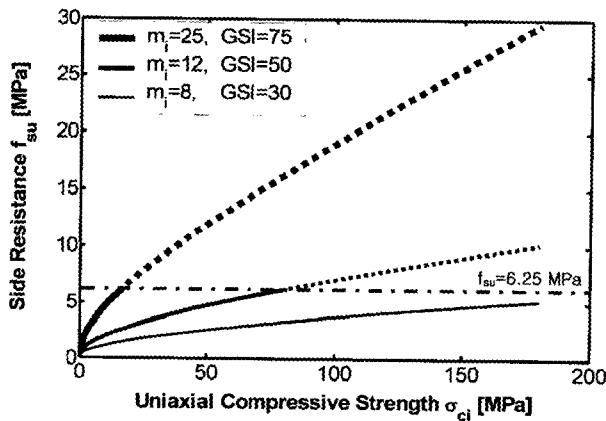


그림 8. 일축압축강도에 따른 주면마찰력의 변화(점선부는 콘크리트의 파괴를 의미함)

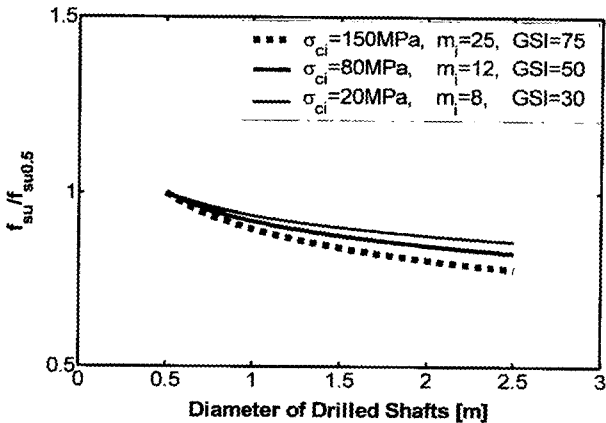


그림 9. 말뚝의 크기에 따른 정규화된 단위주면마찰력의 변화(점선부는 콘크리트의 파괴를 의미함)

가 구속압에 비해 단위주면마찰력에 더 큰 영향을 미치지만 구속압의 영향 또한 무시할 수준은 아님을 알 수 있었다.

그림 8은 세 가지 암반의 상태에 대하여 무결암의 일축압축강도에 따른 단위주면마찰력의 변화를 나타낸 것으로, 암반의 상태가 우수할수록(GSI가 클수록) 일축압축강도가 단위주면마찰력에 미치는 영향이 더욱 커짐을 알 수 있다. 따라서, 이러한 이유로 인하여 기존에 제안된 일축압축강도만을 바탕으로 한 단위주면마찰력 산정식들이 어느 정도 실측치에 근사한 결과를 도출할 수 있었던 것으로 판단된다.

그림 9는 단위주면마찰력에 대한 말뚝직경의 영향을 나타내고 있다. 여기서 X축의 말뚝 직경은 0.5m부터 2.5m의 범위이며, Y축은 임의의 직경을 갖는 말뚝의 단위주면마찰력을 직경이 0.5m인 말뚝의 단위주면마찰력으로 정규화 한 값을 사용하였다. 그림에서와 같이 말뚝의 직경이 커짐에 따라 단위주면마찰력이 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 암반의 상태가 양호할수록(GSI가 클수록) 정규화된 단위주면마찰력의 감소가 뚜렷한 것을 알 수 있는데 이는 결국 암반의 상태가 좋을수록 말뚝의 크기효과가 분명함을 나타낸다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 Hoek-Brown 공식을 이용하여 말뚝의 크기효과를 고려한 현장타설말뚝의 주면마찰력을 산정하는 방법을 제안하였다. 본 제안은 말뚝의 주면마찰력 산정 시 암반의 특성 및 말뚝 크기의 영향을 고려함으로써 기존의 무결암의 일축압축강도만을 이용해서 단위주면마찰력을 추정하는 방법과 사공과 백(2003)이 제안한 Hoek-Brown 공식만을 이용한 산정방법보다 상대적으로 그 적용성이 넓다고 할 수 있다. 또한 본 연구에서 제안하는 방법에 대한 정확도를 검증하기 위하여, 제안된 식을 통해서 얻어진 결과들은 여러 문헌에 보고된 재하시험결과 및 기존의 공식들로부터 얻어진 결과치와 비교되었다. 이러한 시도를 통하여 다음과 같은 결론이 도출되었다.

(1) 본 연구에서 제안하는 크기를 고려한 현장타설말뚝의

$$\text{단위주면마찰력 산정식은 } f_{su} = \frac{1}{2} \sigma_{ci50} \left(\frac{50}{D} \right)^{0.18} \left[m_p \frac{\gamma_{1z}}{\sigma_{ci50} \left(\frac{50}{D} \right)^{0.12} + s} \right]$$

참 고 문 헌

- 의 형태이며, 이는 일축압축강도의 크기의존성을 적용하여 간접적으로 현장타설말뚝의 주면마찰력에 대한 크기의존성을 나타내고 있다.
- (2) 제안식의 적용에 있어 콘크리트와 암반의 상대강성 비교 시 콘크리트의 경우에는 양생된 콘크리트의 일축압축강도를 적용하며 암반의 경우에는 원지반의 풍화도 및 절리빈도 등을 고려한 원지반의 일축압축강도를 사용하여야 한다. 또한 본 제안은 일반적으로 강도가 연암 이하의 강도를 가진 암반의 경우에 대해서 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.
 - (3) 제안된 산정식으로부터 얻어진 계산치와 기존에 보고된 재하실험결과가 비교적 근사한 것으로 나타났다으며, 단위주면마찰력과 무결암의 일축압축강도와의 상관관계를 도출한 결과 단위주면마찰력은 $f_{su}=0.35(\sigma_{ci})^{0.5}$ 의 형태로 나타낼 수 있었다. 그리고 이 식은 Rosenberg와 Journeaux(1976)의 실험결과와 상당히 근사한 형태임을 알 수 있다.
 - (4) 본 논문에서 제안된 지지력 산정식은 말뚝에 작용하는 주면마찰력으로 인한 경계면에서의 주응력 회전과 들뜸현상으로 인한 구속압의 증가를 고려하지 못한다. 주응력의 회전에 대한 미 고려는 말뚝에 작용하는 주면마찰력을 과대하게 평가하며, 들뜸현상의 미 고려는 주면마찰력을 과소평가 한다. 그러나 제안된 지지력 산정식에서는 이 두 가지 요인들에 의한 예측치의 오차가 서로 상쇄되므로 제안식은 비교적 적절한 단위주면마찰력을 제공하는 것으로 판단된다.
 - (5) 일축압축강도의 제공근으로 정규화된 단위주면마찰력과 말뚝의 직경 사이에는 $\frac{f_{su}}{\sigma_{ci}^{0.5}} = 0.17D^{-0.69}$ 의 상관성을 보이며 이는 결국 말뚝의 크기효과가 존재함을 증명한다. 따라서 본 연구에서 제안하는 크기효과 및 암반의 특성을 고려한 단위주면마찰력의 산정식은 기존의 제안식들에 비해 폭 넓은 적용성을 가진다 할 수 있다.
 - (6) 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주면마찰력에 가장 크게 영향을 미치는 요소는 일축압축강도이며, 상대적으로 가장 영향력이 적은 요소는 말뚝의 크기로 나타났다. 그러나 지반조건이 양호한 경우에 대해서는 분명한 크기효과가 발생함을 알 수 있다.

1. 사공명, 백규호 (2003), "Hoek-Brown 공식을 이용한 현장타설말뚝의 주면마찰력 산정", 한국지반공학회 논문집, 제19권 제2호, pp.209-220.
2. 조천환, 김홍목, 김용규 (2004), "축소모형말뚝을 이용한 현장타설말뚝의 지지력 평가", 한국지반공학회 논문집, 제20권 제5호, pp.117-126.
3. Bandis, S., Lumsden, A. C., and Barton, N. R. (1981), "Experimental studies of scale effects on the shear behavior of rock joints", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanical Abstracts*, Vol.18, pp.1-21.
4. Carter, J. P., and Kulhawy, F. H. (1988), "Analysis and design of drilled shaft foundations socketed into rock", *EPRI Report EI-5918*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
5. Gloss, G. H., and Briggs, O. H. (1983), "Rock Sockets in soft rock", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.109, No.4, pp.525-535.
6. Gunnink, B., and Kiehne, C. (2002), "Capacity of drilled shafts in Burlington limestone", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.128, No.7, pp.539-545.
7. Hoek, E. (1998), "Rock engineering course note by Evert Hoek", <http://www.rocsience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp>, 최종 방문일 2004. 10. 5.
8. Hoek E. and Brown E. T. (1980), *Underground Excavation in Rock*, The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp.97-98.
9. Hoek E. and Brown E. T. (1997), "Practical estimation of rock mass strength", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol.34, No.8, pp.1165-1186.
10. Horvath, R. G., and Kenney, T. C. (1980), "Shaft resistance of rock-socketed drilled piers", *Proceedings of Symposium on Deep Foundation*, ASCE, New York, pp.182.
11. Littlechild, B. D., Hill, S. J., Plumbridge, G. D., and Lee, C. L. (2000), "Load capacity of foundations on rock", *Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000: New Technology and Design Developments in Deep Foundations*, Denver, pp.141-157.
12. Mcvay, M. C., and Townsend, F. C. (1992), "Design of socketed drilled shafts in limestone", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.118, No.10, pp.1626-1637.
13. Radhakrishnan, R. and Leung, Chun F. (1988), "Load transfer behavior of rock-socketed piles", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.115, No.6, pp.755-768.
14. Reese, L. C., and O'Neill, M. W. (1987), *Drilled shafts: Construction procedures and design methods*, FHWA design manual.
15. Rowe, R. K., and Armitage, H. H. (1987), "A design method for dilled piers in soft rock", *Canadian Geotechnical Journal*, 24(1), pp.126-142.
16. Rosenberg, P., and Journeaux, N. L. (1976), "Friction and end bearing tests on bedrock for high capacity socket design", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.13, No.3, pp.324-333.
17. Seidel, J. P., and Harberfield, C. M. (2002), "A theoretical model for rock joints subjected to constant normal stiffness direct shear", *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 39, pp.539-553.
18. Wilson, L. C. (1976), "Tests of bored and driven piles in cretaceous mudstone at Port Elizabeth, South Africa", *Geotechnique*, 26(1), pp.5-12.

(접수일자 2004. 9. 15, 심사완료일 2004. 11. 22)