

텍사스 콘 관입시험을 이용한 IGM에 근입된 현장타설말뚝의 설계

Design of IGM Socketed Drilled Shafts Using Texas Cone Penetrometer Tests

남 문 석¹ Nam, Moon S.

Abstract

Modern methods for designing IGM(Intermediate Geomaterial) socketed drilled shafts require knowledge of the compressive strength and modulus of the IGM. However, the weathered IGMs at many sites prohibit the recovery of samples of sufficient length and integrity to test cores in either unconfined or triaxial compression tests. Since rational design procedures usually require values of compressive strength, surrogate methods must be employed to estimate the compressive strength of the IGM. A surrogate method considered in this study was Texas cone penetrometer tests which were performed at several sites in North Central Texas. Correlations of Texas cone penetrometer tests and compressive strengths of cores from these formations are provided in the paper. In order to develop the relationships between Texas cone penetrations and side and base resistance of IGM socketed drilled shafts, three field load tests were conducted in the same sites. Based on the field study and literature reviews, a design method for IGM socketed drilled shafts using Texas cone penetration test was proposed.

요 지

IGM(Intermediate Geomaterial)에 근입된 현장타설말뚝의 설계를 수행하기 위해서는 대상 지반의 강도특성을 알아야 하고, 이를 위해 IGM에 대한 일축이나 삼축 등의 압축강도시험을 수행한다. 그러나, 설계 대상의 IGM지반이 풍화가 된 경우에는 압축강도시험을 통한 강도특성 파악이 힘들다. 이러한 경우에는 압축강도시험을 대체하여 IGM지반의 강도특성을 파악할 수 있는 방법들이 필요로 한다. 본 연구에서는 현재 텍사스주 도로국(Texas Department of Transportation)에서 말뚝기초의 설계인자로서 사용 중인 텍사스 콘 관입시험(Texas Cone Penetrometer Test)을 이용하여 IGM지반의 역학특성을 파악하였다. 그리고 미국의 텍사스주 지역에 분포하는 IGM지반인 셰일(Clay Shale)과 석회암(Limestone)을 대상으로 시험현장을 선택하였고 말뚝재하시험과 텍사스 콘 관입시험을 수행하였다. 본 연구결과를 바탕으로 텍사스 콘 관입시험과 IGM 근입 현장타설말뚝의 주면마찰력과 선단지지력과의 상관관계를 제시하였다.

Keywords : Base resistance, IGM socketed drilled shafts, Side resistance, Texas cone penetration test

1. 서 론

암이나 IGM(Intermediate GeoMaterial)에 근입된 현장타설말뚝의 합리적인 설계를 위해서는 대상 지반의

강도 특성을 파악하는 것이 중요하다. 예를 들면, Rowe와 Armitage(1987), Kulhawy와 Phoon(1993), Hassan과 O'Neill(1997), 그리고 O'Neill과 Reese(1999) 등의 연구자들은 암반 근입 말뚝에서의 최대 단위 주면 마찰력

¹ 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원 (Member, Senior Researcher, Department of Geotechnical Engrg., Highway & Transportation Technology Institute, Korea Highway Corporation, msnam@freeway.co.kr)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

(f_{max})과 최대 단위 선단지지력(q_{max}) 산정을 위해 암이나 IGM의 일축압축강도(q_u)와의 상관관계를 이용하였다. 그러나, 대상 지반이 풍화가 되어서 양질의 IGM 시편의 회수가 힘들 경우가 있다. 이러한 경우에 압축강도 시험을 대체하여 IGM지반의 강도 특성을 파악할 수 있는 방법들이 필요로 한다.

본 연구에서는 IGM에 대한 압축강도시험의 대체 시험으로서, 현재 텍사스주 도로국[Texas Department of Transportation(TxDOT)]에서 말뚝기초의 설계인자로서 사용 중인 텍사스 콘 관입시험[Texas Cone Penetrometer Test (TCPT)]을 제시하였고, 이를 위하여 미국의 텍사스주 지역에서 현장시험 및 실내 시험을 수행하였다. 이러한 TCPT의 결과치와 압축강도와의 상관관계를 비교 및 분석하였고, TCPT를 이용한 IGM 근입 현장타설말뚝에서의 주면마찰력과 선단지지력과의 상관관계를 현장 재하시험과 수치해석을 통하여 도출하였다. 도출된 상관관계를 텍사스주 도로국의 TCPT를 이용한 IGM 근입 현장타설말뚝의 설계법과 비교 분석하였다.

2. 시험 현장

세일(Clay Shale)과 석회암(Limestone) 등의 IGM지반이 주로 분포하는 미국 텍사스주 지역에서 본 연구는 수행되었으며, 이를 위하여 다섯 곳의 시험 현장이 선택되었다. 네 곳[Denton Tap(DT), Belt Line Road(BL), Hampton Road(HT)과 Lone Star Park(LS)]은 기반암이 세일이고 나머지 한 곳 [Rowlett Creek(RC)]은 기반암이 석회암이었다.

미국 텍사스 주에 분포하는 세일과 석회암은 후기 백악기의 퇴적층으로써, 석회암은 다량의 탄산칼슘(calcium carbonat)을 포함하고 있으며 세일은 다량의 점토질을 함유하고 있다(Sellards 외, 1932). 그리고 세일의 경우는 층상구조를 보이며, 이 층 안에서의 탄산성분들이 고결(cementation) 작용을 일으키기도 한다.

3. 지반조사 및 강도특성

각각의 시험 현장에서는 약 7~8m 간격의 정삼각형 형태로 세 공을 천공하여 이 중 두개의 공에서는 압축강도 시험을 위해 코어를 채취하였고 나머지 한 공은 텍사스 콘 관입시험을 실시하였다. 현장에서 채취된 코어에 대하여 압축강도시험을 LS현장을 제외하고 모든

현장에 대하여 수행하였다. LS 현장의 경우는 Hassan (1994)의 시험 결과를 사용하였다.

IGM 시편의 채취를 위해 내경 52.3mm의 NWD4의 이중관을 이용하여 시편을 채취하였고 RQD(rock quality designation)를 측정된 후에 시편의 보호를 위해 알루미늄 호일과 테이프를 이용하여 싼 후에 비닐백으로 밀봉하였다. 채취된 시편에 대하여 0.6m 간격으로 각각 압축강도 시험을 수행하였다. 각각의 시험들의 세부사항은 다음과 같다.

3.1 삼축압축시험

모든 삼축압축시험에 사용된 시료들은 ASTM D 4543-85에 준하여 직경 50mm와 길이 102mm로 준비되었으며, DT, HT와 BL 현장 에서 채취된 세일 시료에 대하여 수행되었다. 삼축압축시험의 조건은 비압밀·비배수 상태 이었고, 절차는 ASTM D 2664-95a에 준하여 수행되었다. 세일의 경우는 하중의 재하 속도가 배수 속도보다 상대적으로 크고 투수계수 또한 아주 낮아서 비배수 조건을 사용하였다. 구속압은 시료의 실제 깊이에서 작용하는 상재압을 그대로 적용하여 0.6m간격으로 시험을 수행하였다.

3.2 일축압축시험

삼축압축시험 장치의 재하 용량 부족으로 인하여 일축압축시험은 석회암인 RC현장 시료에 한하여 수행되었다. 시료의 준비는 삼축시험과 동일한 크기와 절차 (ASTM D 4543-85)로 준비되었으며, ASTM D 2938-95에 따라 0.6m간격으로 시험을 수행하였다.

3.3 텍사스 콘 관입시험(TCPT)

현재 텍사스주 도로국에서 IGM 근입 현장타설말뚝의 설계인자로서 사용 중인 텍사스 콘 관입시험(TCPT)를 각각의 현장에 적용하였다. 그림 1에서는 TCPT의 개요도와 시험 순서를 도시하고 있다. TCPT의 결과는 텍사스 콘 관입지수[Texas Cone Penetration Resistance (TCPR)]로 산출되는데, 그림 1과 같이 직경 76mm와 60도 각도의 강재 콘이 N-로드에 끝에 부착되어 공의 바닥면에 거치된 후에, N-로드 상단에 설치된 0.76kN의 해머를 이용하여 610mm의 낙하고로 100번을 타격할 때 콘의 관입깊이로 나타낸다(TxDOT, 1995). 이때, TCPT

의 항타에너지는 표준관입시험(SPT)과 유사하다. 이러한 텍사스 콘의 강성 때문에, 미국 텍사스 주와 오클라호마 주 일대에서 IGM의 지반조사 시에는 SPT보다 TCPT가 범용되고 있다.

TxDOT의 지반공학 매뉴얼(TxDOT, 2000)에 나타나 있는 TCPT와 SPT의 점성토와 사질토에서의 상관관계는 다음과 같다.

$$N_{TCPT} = 1.5N_{SPT} \text{ (점성토)} \quad (1)$$

$$N_{TCPT} = 2.0N_{SPT} \text{ (사질토)} \quad (2)$$

여기서, IGM에서 TCPT와 SPT와의 상관관계는 SPT의 IGM에 대한 적용성 부족으로 인하여 TxDOT의 지반공학 매뉴얼에는 제시되어 있지 않다.

4. 텍사스 콘 관입지수와 압축강도와의 상관 관계

깊이에 따른 q_u 와 TCPR을 그림 2에 도시하였고, 각 현장에서의 평균 일축압축강도(q_u) 값은 HT와 LS현장에서 약 1.5MPa, DT와 BL현장에선 2.0MPa, 그리고 RC 현장에서는 11.0MPa 이다. 여기서, O'Neill과 Reese (1999)이 제시한 IGM 강도 기준($0.5 \leq q_u \leq 5.0\text{MPa}$)에 따라 세일은 IGM으로 분류되었고, 석회암은 IGM보다 큰 강도를 지녔으나 본 연구에서는 IGM으로 간주하였다.

각 현장에서의 평균 텍사스 콘 관입지수(TCPR)은 HT 현장에선 178.6mm/100타수, LS현장에선 282.8mm/100타수, DT현장에선 133.4mm/100타수, BL현장에선 63.8mm/100타수, 그리고 RC현장에선 45.4mm/100타수이다.

그림 2에서 보여 주듯이, 세일의 경우에서 상부 쪽이

하부 쪽보다 상대적으로 높은 강도 값을 보여주고 있는데, 이는 이 지역들의 지질 이력에서 건조작용에 기인하여 형성된 탄산성분들이 고결 작용을 일으켜 높은 강도를 보여준다. 그러나 LS현장의 경우는 이미 상부 쪽의 세일층이 이미 제거가 되어 다른 양상을 보여주고 있다 (Hassan, 1994). 이런 현상을 규명하기 위하여 X선 회절분석[X-Ray Diffraction (XRD)]을 상부 쪽과 하부 쪽 세일에 대하여 수행하였으며, 그 결과를 DT현장에 대하여 그림 3에 도시하였다. 그림 3에서와 같이 상부 쪽의 세일이 하부 쪽의 세일보다 다량의 탄산칼슘(calcium carbonate)을 함유하고 있으며, 이러한 탄산칼슘이 세일에서의 고결작용을 유발하여 높은 강도를 지니게 된다. 본 연구에서 고결성 세일의 일반적인 q_u 값은 약 3.0 MPa를 상회하였다.

일련의 현장 시험과 실내 시험을 통하여 얻어진 q_u 와 TCPR 값들을 이용하여 상관관계를 그림 4와 같이 IGM의 종류에 따라 도시하였다. 여기서, 보다 양질의 상관관계를 만들기 위하여 기존의 현장 외에 텍사스 도로국에서 제공된 현장들(SH45, GTE와 Dallas)의 자료를 이용하여 그림 4에 추가 도시하였다. 그림 4에 도시되어 있는 상관관계를 IGM에 따라 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$q_u(\text{MPa}) = 11.45[\text{TCPR}(\text{mm})]^{-0.07}, \text{ 석회암} \quad (3)$$

$$q_u(\text{MPa}) = 6.33[\text{TCPR}(\text{mm})]^{-0.1}, \text{ 고결성 세일} \quad (4)$$

$$q_u(\text{MPa}) = 7.50[\text{TCPR}(\text{mm})]^{-0.4}, \text{ 비고결성 세일} \quad (5)$$

여기서, q_u 의 단위는 MPa이고 TCPR의 단위는 100번의 타격수에 대한 콘의 관입 깊이(mm) 이다.

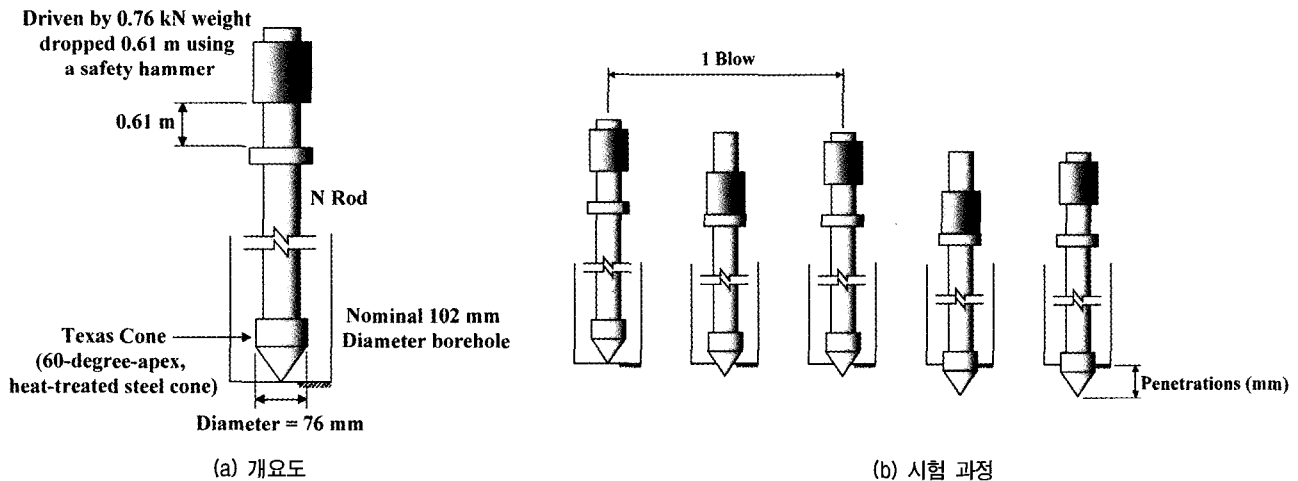
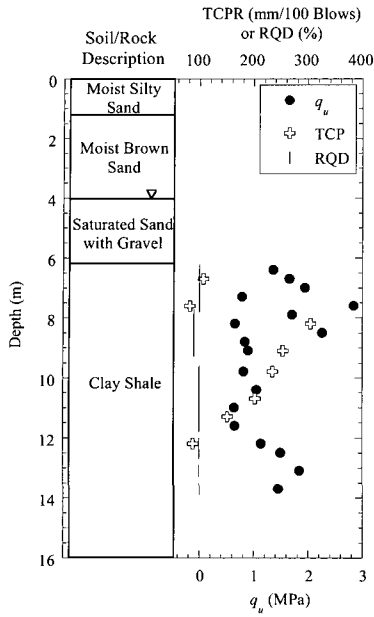
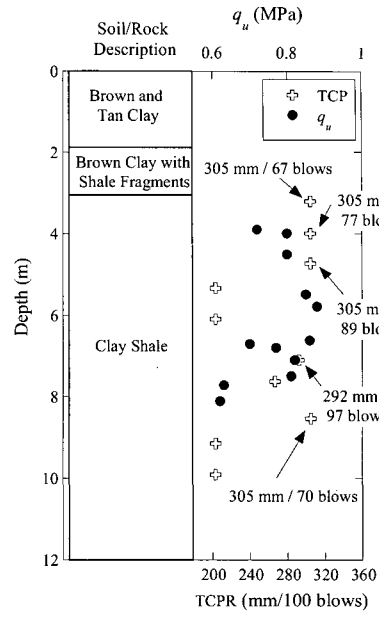


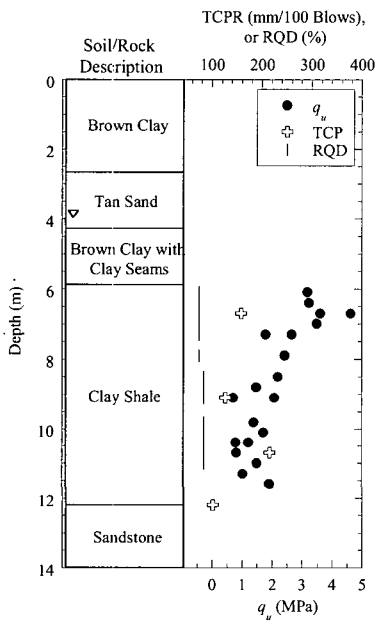
그림 1. 텍사스 콘 관입 시험



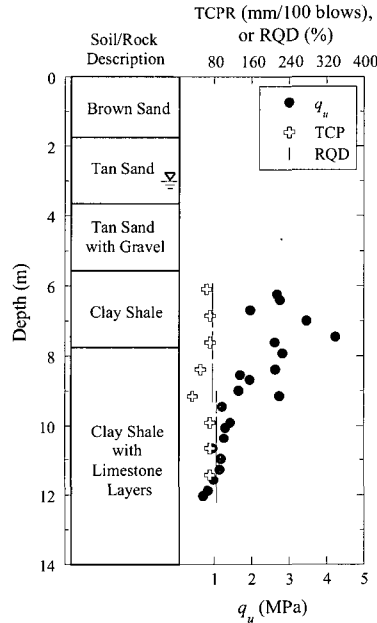
(a) HT 현장



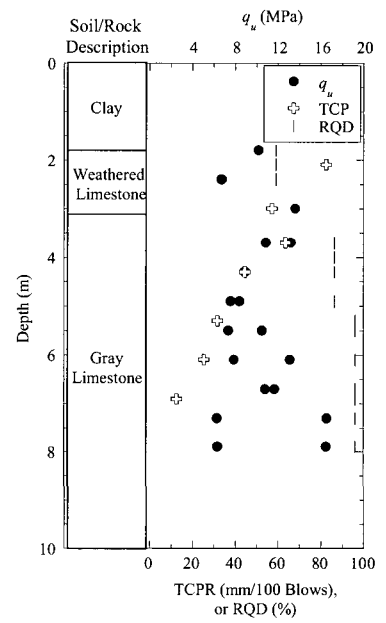
(b) LS 현장



(c) DT 현장



(d) BL 현장



(e) RC 현장

그림 2. 지반조사 결과

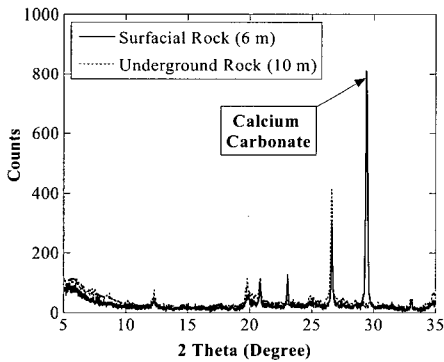


그림 3. XRD 분석결과

5. 시험 말뚝과 현장재하시험

텍사스 콘 관입지수(TCPR)에 대한 IGM에 근접된 현장타설말뚝의 f_{max} 와 q_{max} 와의 상관관계를 도출하기 위하여, 앞서 언급한 다섯 곳의 현장 중 세 곳의 현장(HT, DT와 RC)에 대하여 IGM에 근접된 시험말뚝을 시공하여 말뚝재하시험을 수행하였다. 시험 현장은 상대적으로 약한 강도를 대표하는 HT현장(세일), 중간 강도를 대표하는 DT현장(세일), 그리고 강한 강도를 대표하는

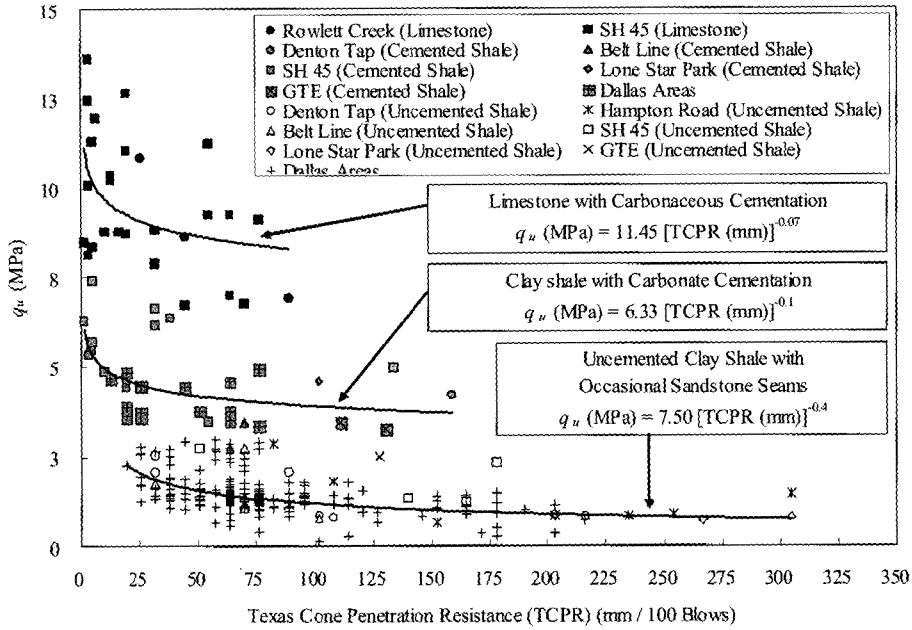


그림 4. 텍사스 콘 관입 지수(TCPR)와 압축강도(q_u)와의 상관관계

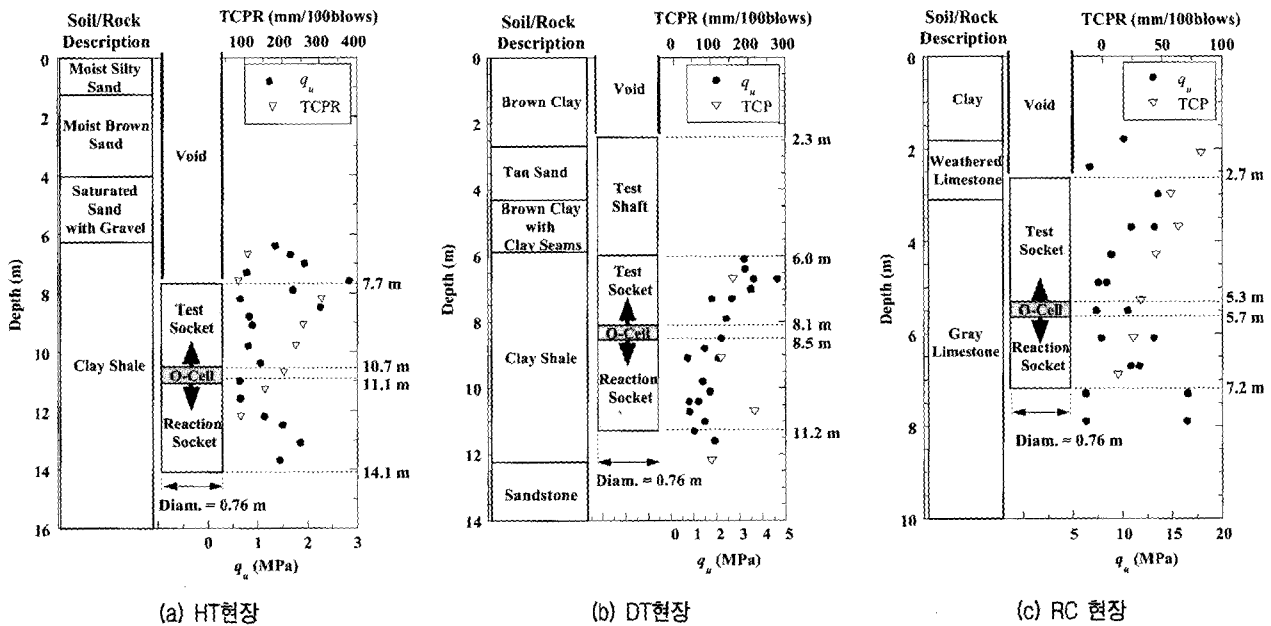


그림 5. 시험말뚝 개요도

RC현장(석회암)으로 구성되었다.

현장 지반조사와 실내시험 등을 토대로 하여 오스터버그 셀(Osterberg Cells (O-Cell))을 이용하여 시험말뚝을 평가하였으며, 그 시험내용은 다음과 같다: (1)직경이 0.76m인 시험말뚝과 반력말뚝을 IGM에 근입시키고, (2)O-Cell의 용량은 세일의 경우 8.9MN이고 석회암의 경우는 16.0MN을 적용하고, (3)반력말뚝의 총 반력은 시험말뚝 지지력에 대하여 최소한 1.5의 안전율을 적용하고, 그리고 (4)O-Cell의 용량은 설계된 시험말뚝의

지지력에 대하여 최소한 2.0의 안전율을 적용한다. 이에 따라 설계된 시험말뚝과 반력말뚝은 그림 5에 도시되어 있다. HT현장의 경우, 시험말뚝의 길이는 3.0m(7.7m~10.7m)이고, 반력말뚝의 길이는 또한 3.0m(11.1m~14.1m)이다. DT 현장의 경우, 시험말뚝의 길이는 2.1m(6.0m~8.1m)이고, 반력말뚝의 길이는 2.7m(8.5m~11.2m)이다. 여기서 세일층 위의 토사층에도 말뚝을 시공하여 IGM 근입말뚝의 토사부 주변마찰력에 분석하였다. 그리고 축하중전이해석을 위하여 Geokon사의 진동현식

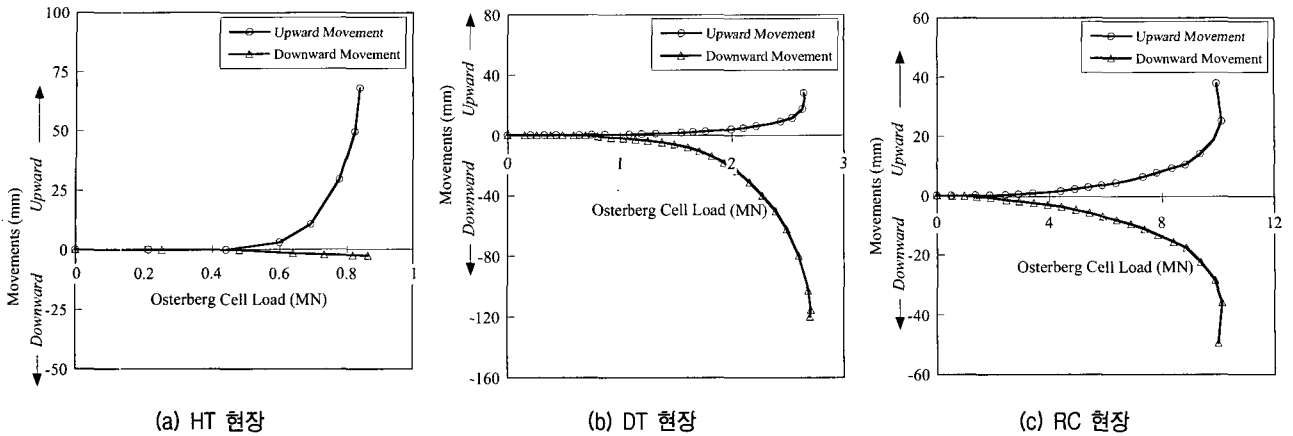


그림 6. 하중 - 변위 곡선

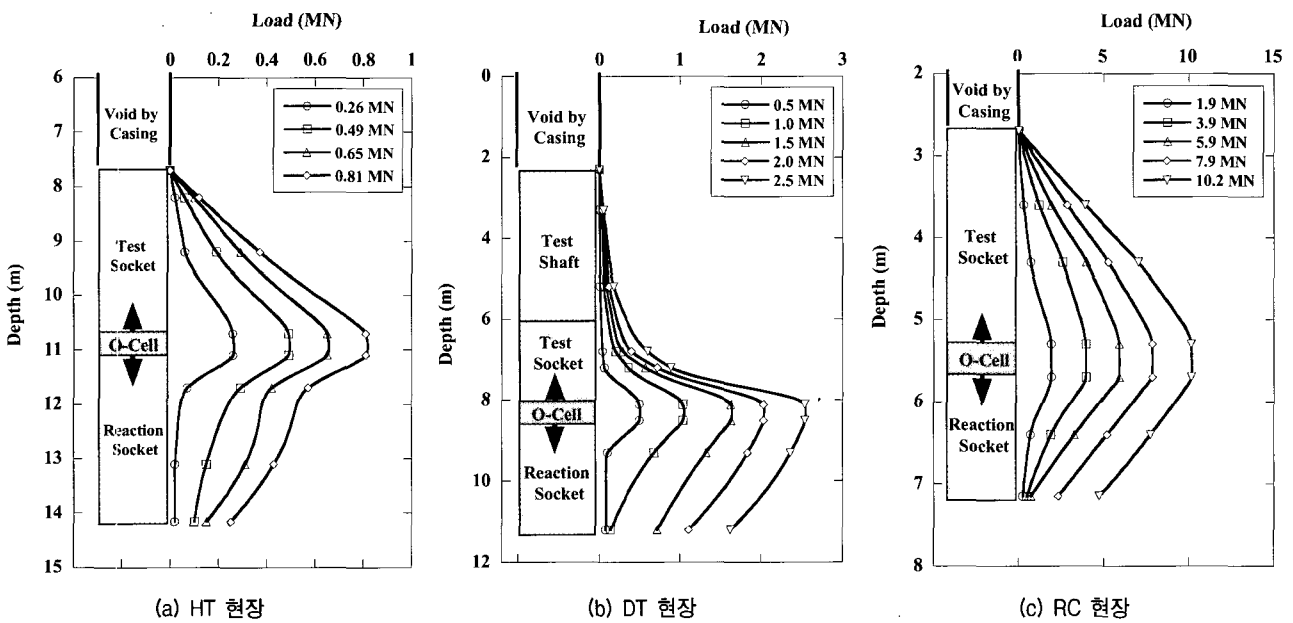


그림 7. 하중전이 곡선

스트레인 게이지(모델명 4911)를 시험말뚝과 발력말뚝에 각각 설치하여 축하중을 측정하였다.

시험말뚝의 시공 후 약 50이 경과한 후, O-Cell을 이용한 TxDOT 급속재하시험을 텍사스주 도로교 표준시방서 (TxDOT, 1993)과 ASTM D 1143에 준하여 수행하였다. O-Cell을 이용한 말뚝재하시험 결과로 그림 6에서 하중 변위 곡선을 도시하였다. 각 시험말뚝의 극한하중은 그림 6과 같이 명확하게 도시되었고, 그 값은 HT의 경우 0.8MN, DT의 경우 2.5MN, 그리고 RC의 경우 10.2MN 이다. 이와 상응되는 시험말뚝의 변위는 HT의 경우 42mm, DT의 경우 10mm, 그리고 RC의 경우 25.0mm 이다.

시험말뚝과 반력말뚝의 f_{max} 와 q_{max} 을 산정하기 위하여 하중전이 해석을 수행하였으며, 그림 7에서는 하중전

이 곡선을 도시하고 있다. 그림 7에 보여 주듯이 대부분의 하중은 O-Cell 주변에서 전이되었다.

그림 7에 근거하여, 단위 주면마찰력 전이곡선($f-w$ curves)과 단위 선단지지력곡선($q-w$ curves)을 O'Neill 과 Reese(1999) 방법에 근거하여 그림 8과 그림 9에 각각 도시하였다. 시험말뚝의 f_{max} 값은 HT의 경우 0.11 MPa, DT의 경우 0.43MPa, 그리고 RC의 경우는 1.55MPa 이다. 그리고 반력말뚝의 f_{max} 값은 HT의 경우 0.10MPa, DT의 경우 0.19MPa, 그리고 RC의 경우는 1.37MPa이었고, q_{max} 값은 HT의 경우 2.1MPa, DT의 경우 3.6MPa, 그리고 RC의 경우는 10.5MPa이다. 여기서, HT현장의 반력말뚝은 그림 6(a)에서 보여 주듯이 극한상태까지 도달치 못하였고, 이 반력말뚝의 f_{max} 와 q_{max} 를 산정하

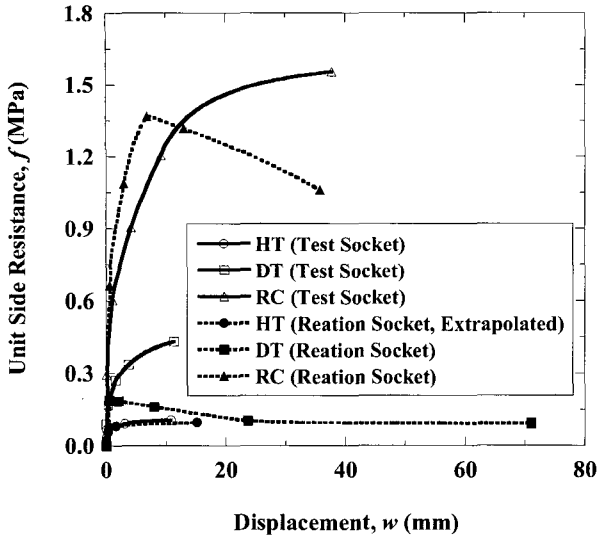


그림 8. $f-w$ 곡선

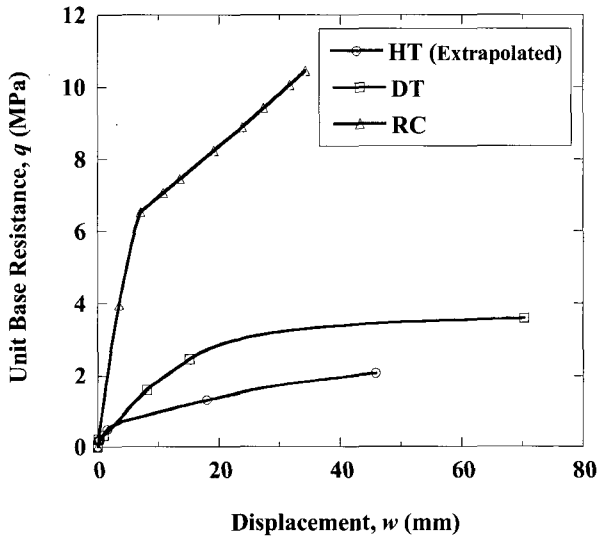
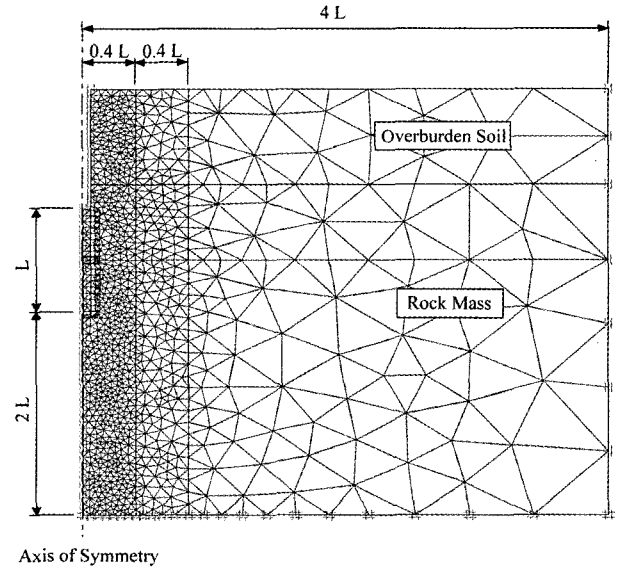
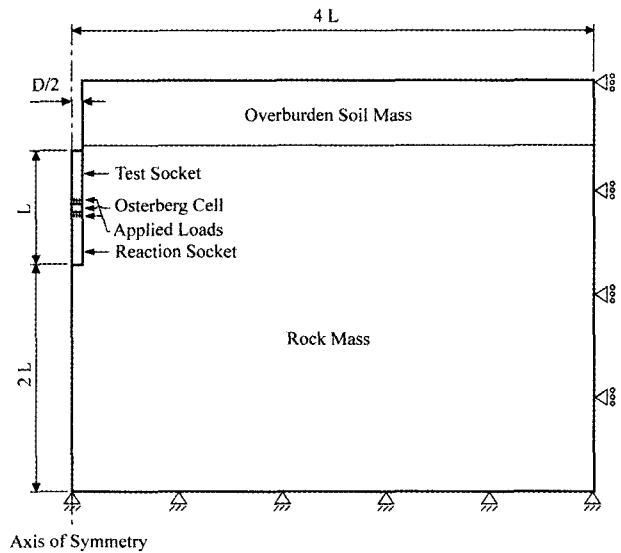


그림 9. $q-w$ 곡선



(a) 유한요소망



(b) 경계조건

그림 10. PLAXIS의 유한요소망과 경계조건

기 위하여 유한요소 프로그램인 PLAXIS를 사용하여 반력말뚝을 극한 상태까지 유추하였다. 그림 8과 그림 9에서 보여주는 HT현장 반력말뚝의 $f-w$ 와 $q-w$ 곡선은 PLAXIS에 의한 추정 곡선이다.

PLAXIS에 의한 유한요소해석에선 6절점 삼각형 축대칭 요소를 사용하여 시험말뚝과 지반을 묘사하였다 (PLAXIS, 1998). 시험말뚝과 IGM의 인터페이스 근처의 높은 응력구배(high stress gradient) 지역에서는 세밀한 요소망이 시험말뚝의 축 방향으로부터 말뚝 총 길이 (L)의 0.8배까지 사용되었고(Hassan, 1994), 이는 그림 10(a)와 같이 도시되었다. 또한, 반경 방향 변위는 시험말뚝의 축 방향으로부터 $4L$ 로 제한되었고 축 방향 변위는 반력말뚝의 선단으로부터 $2L$ 로 제한되었다(그림 10).

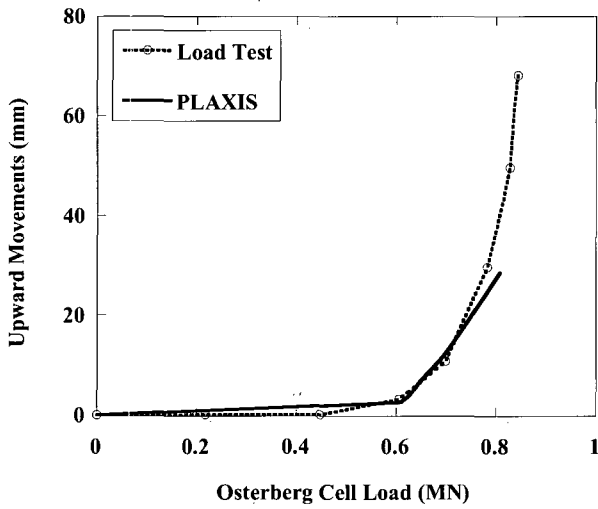
이렇게 제한된 범위를 초과하여 발생하는 반경 및 축 방향의 미소 변위는 결과값에 아무런 영향을 미치지 않았다. 시험말뚝의 콘크리트 구조체는 등방 및 균질하고, 현장타설말뚝 구조체의 일반적인 푸아송 비(Poisson's ratio) 값인 0.15를 지닌 선형탄성모델로 가정하였다(Hassan, 1994). 지반과 지반-시험말뚝 인터페이스의 경우는 탄소성모델인 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 그리고 Plaxis 해석에 사용된 입력변수는 표 1에서 각각의 시험현장별로 나타내었다.

PLAXIS에 의한 HT현장 반력말뚝에 대한 해석결과는 그림 11과 같다. 그림 11에서 추정된 반력말뚝에 작

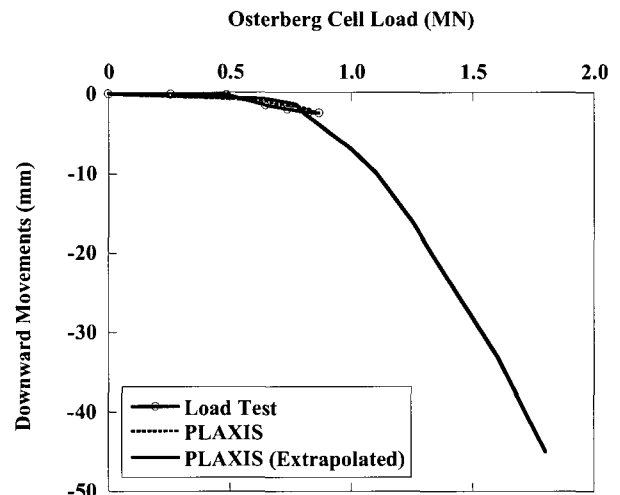
표 1. Plaxis 해석에 사용된 입력변수

Test Site	Identification	Model	Depth (m)	γ_{wet} (kN/m ³)	ν	E (MPa)	c (kPa)	ϕ (°)	
HT	TS*, RS**	Linear Elastic	7.7 - 14.1	20.4	0.15	26140	-	-	
	Sand	Mohr-Coulomb	0.0 - 7.7	17.0	0.35	4	0	30	
	1 st Clay Shale	Mohr-Coulomb	7.7 - 10.9	20.8	0.3	550	850	0	
	2 nd Clay Shale	Mohr-Coulomb	10.9 - 27.1	20.8	0.3	600	900	0	
	Interface	TS*	Mohr-Coulomb	7.7 - 10.7	20.8	0.3	550	95	0
		RS**	Mohr-Coulomb	10.7 - 14.1	20.8	0.3	550	95	0
		Base of RS**	Mohr-Coulomb	14.1	20.8	0.3	600	100	0

여기서, TS*와 RS**는 각각 Test Socket과 Reaction Socket를 의미한다.



(a) 하중 - 상향변위곡선



(b) 하중 - 하향변위곡선

그림 11. HT현장 시험말뚝의 PLAXIS 해석 결과

용하는 하향의 극한 지지력은 1.8MN이었고, 이에 상응하는 하향 변위 값은 45mm이다. 이러한 PLAXIS의 해석결과에 근거하여 HT현장의 반력말뚝에 대한 하중전이 해석을 극한하중단계까지 수행하였고, 이에 근거하여 HT 반력말뚝에 대한 f_{max} 와 q_{max} 를 그림 8과 그림 9와 같이 추정하였다.

6. 텍사스 콘 관입시험을 이용한 IGM에 근입된 현장타설말뚝의 설계

6.1 현행 텍사스 도로국 (TxDOT)의 IGM에 근입된 현장타설말뚝 설계법

현행 텍사스 주 도로국의 IGM에 근입된 말뚝의 설계법은 텍사스 주 도로국 지반공학 메뉴얼(TxDOT, 2000)에 서술되어 있고 그림 12와 같다. 항타 말뚝의 경우 일반적으로 300mm/100 타수 이하의 단단한 지반이나 IGM 지반에는 항타가 가능하지 않기에 그림 12는 주로 현장

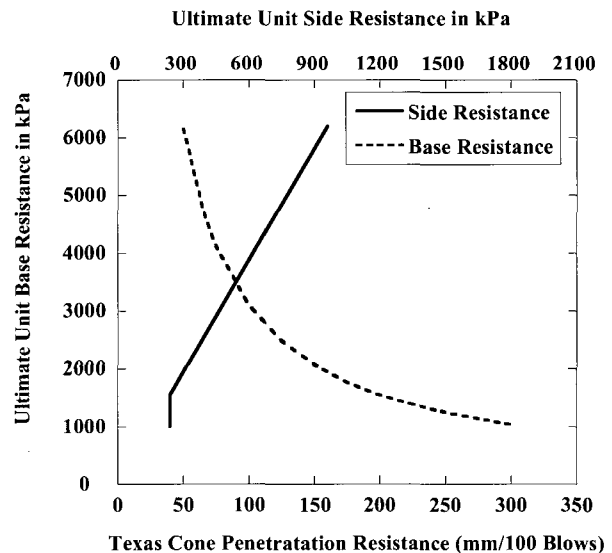


그림 12. 현행 TxDOT의 IGM근입말뚝의 설계차트

타설말뚝에 적용된다. 설계자는 TCPR를 이용하여 단순히 f_{max} 와 q_{max} 를 산정할 수 있다. 이러한 f_{max} 와 q_{max} 값에 각각 주면 면적과 선단 면적으로 곱한 후 지지력 들을

합산하면 극한 지지력이 산정된다. 또한, 현행 TxDOT 지반공학 매뉴얼에서는 말뚝이 IGM이나 단단한 지반(75mm/100 타수) 지지되어 있는 경우, IGM이나 단단한 지반 위에 존재하는 상부 지반의 주면 마찰력을 무시한다. 이는 IGM에서의 선단 지지력을 유발시키기 위한 변위가 너무 작고, 이러한 작은 선단 변위는 상부 지반의 주면 마찰력을 유발을 허용할 만큼 충분치 못하기 때문이다.

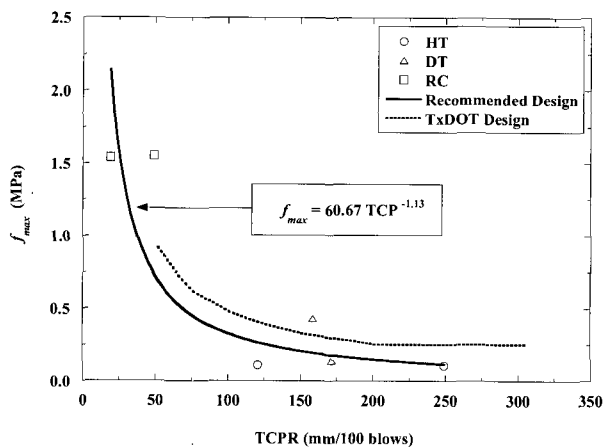
현행 텍사스 주 도로국의 IGM 근입된 말뚝의 설계 차트는 설계자들이 손쉽게 사용을 할 수가 있으나, 설계차트에 대한 명확한 참고문헌 및 자료가 없어 텍사스 주 도로국에서는 현행 설계 차트의 신뢰성에 대하여 문제를 제기하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 실제 현장에서 IGM에 근입된 현장타설말뚝에 대한 재하시험을 수행하여 현행 설계차트에 대한 검증하였다.

6.2 텍사스 콘 관입시험을 이용한 IGM에 근입된 현장 타설말뚝 설계

텍사스 콘 관입시험(TCPT)을 이용한 IGM에 근입된 현장타설말뚝 설계의 검증을 위하여 선택된 다섯 곳의 시험 현장 중 세 곳(HT, DT와 RC)의 현장에 대하여 O-Cell을 이용한 현장말뚝재하시험을 실시하였다. 실험 크기의 O-Cell 재하 시험 결과를 TCPR에 대한 f_{max} 와 q_{max} 와의 관계를 각각 그림 13에 도시하였다. 재하시험 결과에 근거한 TCPR에 대한 f_{max} 과 q_{max} 와의 관계를 수식적으로 나타내면 다음과 같다.

$$f_{max} = 60.67 \text{ TCPR}^{-1.13}, (R=0.81 \text{ and } N=6) \quad (6)$$

$$q_{max} = 60.29 \text{ TCPR}^{-0.61}, (R=0.97 \text{ and } N=3) \quad (7)$$



(a) f_{max} - TCPR 관계곡선

여기서, f_{max} 와 q_{max} 의 단위는 MPa이고, TCPR의 단위는 mm/100 타수이다. 그리고 R은 상관계수이고 N은 데이터 숫자이다.

그림 13(a)에서 현행 텍사스 주 도로국 설계차트에서의 f_{max} 는 재하시험 결과보다 과대 평가하는 경향을 보인다. 그리고 그림 13(b)에 도시된 q_{max} 의 경우, 현행 설계차트가 재하시험 결과보다 과소평가하는 경향을 보인다.

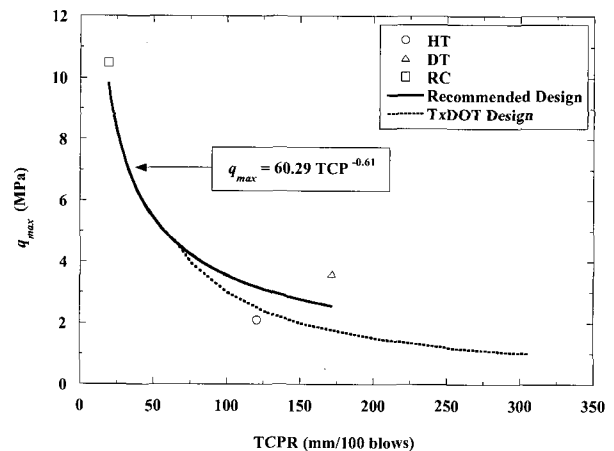
그림 13에 보인 TCPR에 대한 f_{max} 과 q_{max} 의 상관관계는 단지 세 곳의 현장에 제한되어 있으므로 문헌고찰[Aurora와 Reese(1976), Seikh 외(1985), O'Neill 외(1992), 그리고 Hassan(1994)]을 통해 텍사스 주에서 수행된 양질의 현장말뚝재하시험 결과를 추가로 선정하였다. 추가된 현장(Montopolis, Dallas, Irvin)에 대한 재하시험 결과는 표 2에 정리하였고, 그림 14에 추가로 도시하였다. 기존의 현장재하시험 결과와 문헌고찰에 근거한 TCPR에 대한 f_{max} 과 q_{max} 와의 관계를 수식적으로 나타내면 다음과 같다.

$$f_{max} = 40.10 \text{ TCPR}^{-1.07}, (R=0.83 \text{ and } N=11) \quad (8)$$

$$q_{max} = 60.29 \text{ TCPR}^{-0.79}, (R=0.97 \text{ and } N=7) \quad (9)$$

여기서, f_{max} 와 q_{max} 의 단위는 MPa이고, TCPR의 단위는 mm/100 타수이다. 그리고 R은 상관계수이고 N은 데이터 숫자이다.

문헌고찰을 통하여 추가의 재하시험 결과를 기존의 시험 결과와 함께 도시하였지만, 현행 텍사스 주 도로국 설계차트에서의 f_{max} 는 재하시험 결과보다 과대 평가하는 경향을 보인다. 그러나, q_{max} 의 경우에는 TCPR기준



(b) q_{max} - TCPR 관계곡선

그림 13. 현장 재하시험 결과에 근거한 TCPR에 대한 f_{max} 과 q_{max} 의 상관관계

으로 80mm/100타수보다 작은 범위에서는 현행 설계차트가 재하시험 결과보다 과대평가하는 경향을 보이고, 80mm/100타수보다 큰 범위에서는 현행 설계차트가 재하시험 결과보다 과소평가하는 경향을 보인다.

6.3 TCPR과 q_u 와의 상관관계를 이용한 IGM에 근입된 현장타설말뚝의 설계

TCPT는 미국 텍사스 주 이외의 지역에서는 흔히 사용치 않으므로, 그림 13과 그림 14에서 제안된 TCPT를 이용한 IGM 근입 현장타설말뚝의 설계차트는 지역적

제약성이 있다. 이러한 TCPT를 TCPR과 q_u 와의 상관관계인 식 (3), (4)와 (5)를 이용하여 다른 지역에서도 적용시켜 보았다. 이를 위해, 문헌고찰을 통하여 텍사스 주 이외의 지역에서 수행된 재하시험 결과들 q_u 에 대한 f_{max} 와 q_{max} 와의 관계로 표 2와 같이 정리하였고, 정리된 각각의 q_u 값을 식 (3), (4)와 (5)를 이용하여 TCPR을 추정하였다(표 2 참조). 이렇게 추정된 TCPR(미국 텍사스 주 이외의 지역)과 실측된 (미국 텍사스 주)에 대한 f_{max} 와 q_{max} 와의 관계를 함께 그림 15와 같이 IGM의 종류에 따라 도시하였으며, 이러한 상관관계는 다음과 같다.

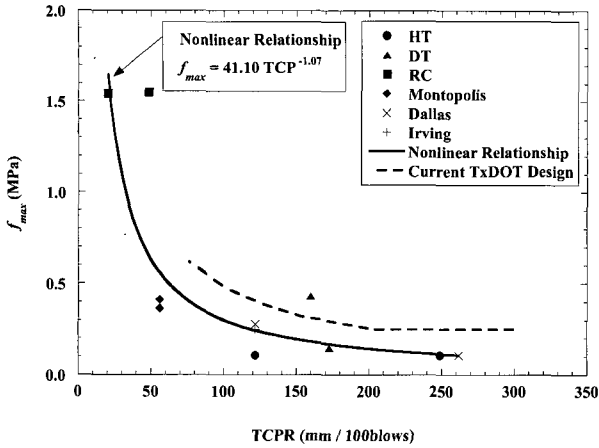
표 2. IGM근입 말뚝에 대한 현장재하시험 결과

IGM종류	현장 위치	q_u (MPa)	f_{max} (MPa)	q_{max} (MPa)	T CPR (mm/100 타수)	참고문헌
비고결성세일	HT, TX	1.2	0.1		249.2	본 연구 (시험말뚝)
	HT, TX	1.3	0.1	2.1	120.7	본 연구 (반력말뚝)
	DT, TX	1.5	0.1	3.6	171.5	본 연구 (반력말뚝)
	Montopolis, TX	1.5	0.4	5.7	55.4	Aurora와 Reese (1976)
	Montopolis, TX	1.5	0.4	5.1	55.4	Aurora 와 Reese (1976)
	Dallas, TX	0.6	0.3	2.4	121.9	Aurora 와 Reese (1976)
	Dallas, TX	0.7	0.1		261.6	Hassan (1994)
	Dallas, TX	0.8		1.1	281.9	Seikh외 (1985)
	Irving, TX	2.8	0.3		120.9	O'Neill외 (1992)
	Lexington, MO	2.3	0.8	6.9	19.2*	Osterberg (2001)
고결성세일	DT, TX	3.1	0.4		158.8	본 연구 (시험말뚝)
	Honolulu, HI	3.6	0.6		169.4**	Hassan 외 (1997)
	Ontario, Canada	5.4	1.1		4.2**	Horvath 외 (1983)
	Ontario, Canada	5.6	2.0		3.1**	Horvath 외 (1983)
석회암	RC, TX	10.2	1.5		49.2	본 연구 (시험말뚝)
	RC, TX	10.9	1.5	10.5	19.1	본 연구 (반력말뚝)
	Clearwater, FL	9.8	1.5		21.5***	McVay외 (1992)
	Clearwater, FL	8.0	1.6		71.2***	McVay외 (1992)
	Miami, FL	3.7	0.8		190.0***	McVay외 (1992)
	Miami, FL	2.6	0.8		220.4***	McVay외 (1992)
	Tampa, FL	2.3	0.4		228.7***	McVay외 (1992)
	Gainesville, FL	2.6	0.6		220.4***	McVay외 (1992)
	Fort Lauderdale, FL	1.1	0.4		261.8***	McVay외 (1992)
	Florida Keys, FL	7.1	1.2		96.1***	McVay외 (1992)
	Jacksonville, FL	6.7	1.2		107.1***	McVay외 (1992)
	Jacksonville, FL	4.4	0.7		170.7***	McVay외 (1992)
	Jacksonville, FL	1.7	0.5		245.2***	McVay외 (1992)
	Jacksonville, FL	3.6	0.7		192.8***	McVay외 (1992)
Tampa, FL	4.5	0.8		167.9***	McVay외 (1992)	
Miami, FL	5.1	0.7		151.3***	McVay외 (1992)	
Apalachicola, FL	2.8	0.4	5.6	214.9***	McVay외 (1993)	

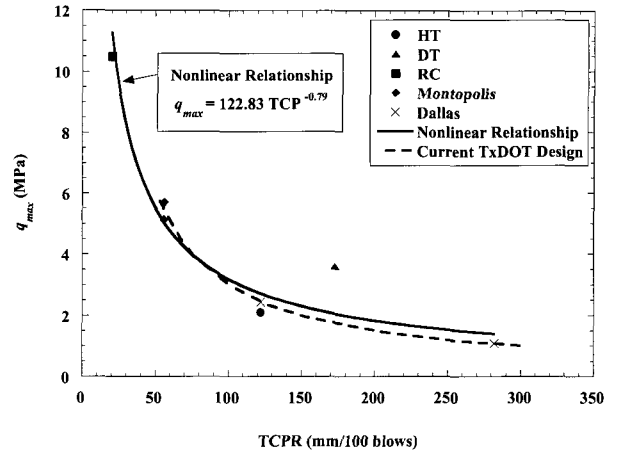
* 식 (3)에 의하여 추정된 값

** 식 (4)에 의하여 추정된 값

*** 식 (5)에 의하여 추정된 값

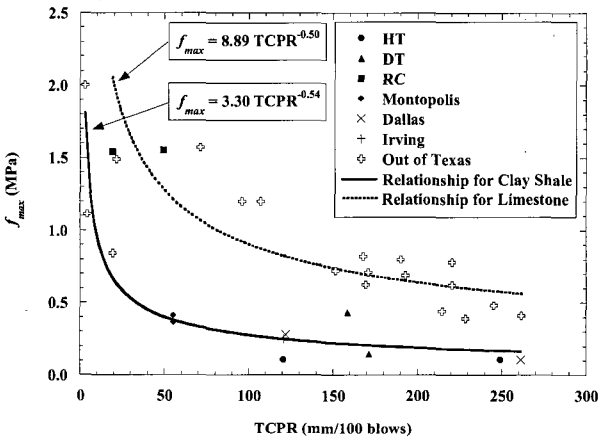


(a) f_{max} - TCPR 관계곡선

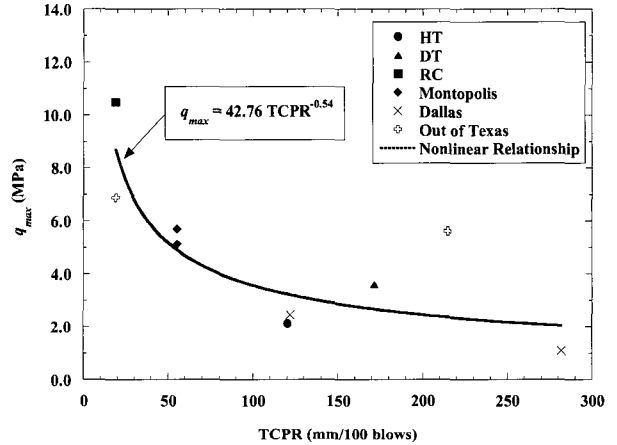


(b) q_{max} - TCPR 상관관계

그림 14. 미국 텍사스주 지역에서의 TCPR에 대한 f_{max} 과 q_{max} 의 상관관계



(a) f_{max} - TCPR 상관관계



(b) q_{max} - TCPR의 상관관계

그림 15. 실측된 TCPR과 추정된 TCPR에 대한 f_{max} 과 q_{max} 의 상관관계

$$f_{max} = 3.30 \text{ TCPR}^{-0.54}, \quad (10)$$

(세일, $R = 0.83$ and $N = 13$)

$$f_{max} = 8.89 \text{ TCPR}^{-0.50}, \quad (11)$$

(석회암, $R = 0.82$ and $N = 17$)

$$q_{max} = 8.89 \text{ TCPR}^{-0.54}, \quad (12)$$

(세일과 석회암, $R = 0.83$ and $N = 9$)

여기서, f_{max} 와 q_{max} 의 단위는 MPa이고, TCPR의 단위는 mm/100 타수이다. 그리고 R은 상관계수이고 N은 데이터 숫자이다. 그리고 q_{max} 의 경우 석회암에 대한 자료 부족으로 석회암과 세일에 대하여 구분 없이 상관관계를 도출하였다.

본 연구결과를 바탕으로, 풍화대가 발달하여 양질의 시편 회수율이 낮아 q_u 값을 산정하기가 어렵고, SPT용 스프릿 샘플러(split spoon sampler)의 강성부족으로 SPT의 IGM에 대한 적용이 어려운 지역에서는 대체방법으로 TCPT를 적용시킬 수가 있고, TCPT에 산정된 TCPR을 사용하여 식 (10), (11)과 (12)와 같이 IGM에 근입된 현장타설말뚝을 설계를 고려할 수도 있을 것이다. 특히 풍화대가 발달되어 있는 우리나라에서도 TCPT를 이용하여 IGM의 강도특성을 산정하여 IGM에 근입된 현장타설말뚝의 설계법을 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

7. 결론

본 연구에서는 풍화대가 발달한 IGM에 대한 압축강

도시험의 대체 시험으로서, 현재 텍사스주 도로국에서 말뚝기초의 설계인자로서 사용 중인 텍사스 콘 관입시험을 제시하였다. 세일과 석회암의 IGM 지반을 지닌 시험현장에 텍사스 콘 관입시험과 말뚝재하시험을 수행하여 IGM에 근입된 현장타설말뚝의 주면 및 선단지지력과 상관계수를 도출하였다. 그리고 도출된 상관계수를 이용하여 현행 텍사스주 도로국의 TCPT를 이용한 IGM에 근입된 현장타설말뚝의 설계법을 비교 분석하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 풍화된 IGM에서의 현장타설말뚝의 설계 시, IGM의 강도 특성 파악을 위한 압축강도시험의 대체 방법으로 텍사스 콘 관입시험을 제시하였으며, 텍사스 콘 관입 지수와 일축 압축 강도에 대한 상관관계를 IGM의 종류에 따라 제시하였다.
- (2) 시험현장에 대하여 텍사스 콘 관입시험과 말뚝재하시험을 수행하여 텍사스 콘 관입지수에 대한 최대 주면마찰력과 최대 선단지지력과 관계를 제시하였다.
- (3) 제시된 텍사스 콘 관입지수에 대한 최대 주면마찰력과 최대 선단지지력과 상관관계를 이용하여 현행 텍사스주 도로국의 IGM에 근입된 현장타설말뚝의 설계를 검증하였는데, 최대 주면마찰력에 대한 설계는 과다 설계의 경향을 보였다. 최대 선단지지력의 경우, 텍사스 콘 관입지수 기준으로 80mm/100타수보다 작은 범위에서는 현행 설계차트가 재하시험 결과보다 과대평가하는 경향을 보이고, 80mm/100타수보다 큰 범위에서는 현행 설계차트가 재하시험 결과보다 과소평가하는 경향을 보인다.
- (4) 시험현장과 텍사스주의 전반의 지반조사자료를 이용하여 텍사스 콘 관입지수와 일축압축 강도에 대한 상관관계를 제시하였으며, 이를 적용하여 미국 텍사스 지역 외 다양한 지역에서 텍사스 콘 관입지수에 대한 최대 주면마찰력과 최대 선단지지력과 관계를 제안하였다. 이와 같은 방법으로 풍화대가 발달하여 IGM지반의 강도특성 파악이 힘든 지역에서는 텍사스 콘 관입 시험을 이용한 현장타설말뚝 설계법의 적용성이 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

저자는 은사이신 고 Michael W. O'Neill 교수님(1940 - 2003)의 본 연구에 대한 무한한 기여와 열정에 대하여 감사 드리며, 고인과 함께 과업을 수행하였던 것을 무한한 영광으로 생각합니다. 고인의 명복을 빕니다.

본 연구는 미국 텍사스 주 도로국의 연구비 지원으로 의해 이루어진 것이며, 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. American Society of Testing and Materials (2000), "Annual Book of ASTM Standards", Vol. 4.02, ASTM, West Conshohocken, Philadelphia.
2. Aurora, R. P., and Reese, L. C. (1976), "Behavior of Axially Loaded Drilled Shafts in Clay-Shales", Research Report 176-4, Center for Highway Research, The University of Texas at Austin, Austin, Texas.
3. Hassan, K. M., and O'Neill, M. W. (1997). "Side Load Transfer Mechanisms in Drilled Shafts in Soft Argillaceous Rock", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.123, No.2, ASCE, pp.145-152.
4. Hassan, K. M. (1994), "Analysis and Design of Drilled Shafts Socketed into Soft Rock", *Ph. D. Thesis*, Department of Civil & Environmental Engineering, University of Houston, Houston, Texas.
5. Kulhawy, F. H., and Phoon, K-K (1993), "Drilled Shaft Side Resistance in Clay Soil to Rock", Design and Performance of Deep Foundations, GSP No. 38, Ed. by P. P. Nelson, T. D. Smith and E. C. Clukey, ASCE, October, pp.172-183.
6. McVay, M. C., Townsend, F. C., and Williams, R. C. (1992), "Design of Socketed Drilled Shaft in Limestone", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.118, No.10, ASCE, pp.1626-1637.
7. McVay, M., Ellis, Kim, M., Villegas, J., Kim, S-H, and Lee, S. M. (2003), "Static and Dynamic Field Testing of Drilled Shafts: Suggested Guidelines on Their Use and for FDOT Structures", *Report No. WPI No. BC354-08, FDOT*, Department of Civil and Coastal Engineering, University of Florida.
8. Nam, M. S. (2004), "Improved Design for Drilled Shafts in Rock", *Ph. D. Dissertation*, Department of Civil & Environmental Engineering, University of Houston, Houston, Texas.
9. O'Neill, M. W., Reese, L. C., Barnes, R., Wang, S. T., Morvant, M., and Ochoa, M. (1992), "Effects of Stratigraphic and Construction Details on the Load Transfer Behavior of Drilled Shafts", *Transportation Research Record*, No.1336, pp.50-56.
10. O'Neill, M. W., and Reese, L. C. (1999), "Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods", FHWA Publication No. FHWA IF 99 025. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Implementation, McLean, VA.
11. PLAXIS-Finite Element Code for Soil and Rock Analyses Program, Version 7.2 (1998), Plaxis BV. AN Delft, The Netherlands.
12. Rowe, P. K., and Armitage, H. H. (1987), "A Design Method for Drilled Piers in Weak Rock", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.24, pp.126-142.

13. Seikh, S., O'Neill, M. W., and Kapasi, K. J. (1985), "Behavior of 45° Underream Footing in Eagle Ford Shale", *Research Report No. 85-12*, University of Houston, December, 129 pp, Houston, Texas.
14. Sellards, E. H., Adkins, W. S., and Plummer, F. B. (1932), "The Geology of Texas—Volume I, Stratigraphy", The University of Texas Bulletin No. 3232, Bureau of Economic Geology, Austin, Texas.
15. Texas Department of Transportation (1993), "Standard Specifications for Construction of Highways, Streets and Bridges", Texas Department of Transportation, Austin, Texas.
16. Texas Department of Transportation (1995), *Manual of Testing Procedures*, 100-E Series.
17. Texas Department of Transportation (2000), "Geotechnical Manual (On Line Version)", Texas Department of Transportation, Bridge Division, Austin, Texas.

(접수일자 2006. 4. 5, 심사완료일 2006. 9. 9)