

호남고속철도 계획노선에서의 피에조콘 관입시험(CPTu)에 의한 연약지반 특성 평가

Estimation of Soft Ground Characteristics using the Piezo-Cone Penetration Tests(CPTu) on Honam High-Speed Railway Planning Line

이일화* 권오정** 권진수*** 민경남****

Lee, Il-Wha Kwon, Ohjung Kwen, Jin-Su Min, Kyoung-Nam

ABSTRACT

Piezocone penetration testing(CPTu) results such as cone resistance(q_c), sleeve friction(f_s), and pore pressure(u), have been carried out at 5 sites in Honam high-speed railway areas of Korea, in order to continuously estimate the characteristics of soil layers and the undrained shear strength(S_u) in a soft ground. For the applications of the conventional CPTu results to undrained shear strength, the cone factors(N_{kt}) were deduced based on Field vane tests, and Monte-Carlo Simulation(MCS). Moreover the correlations of the undrained shear strength of CPTu by soil depths were compared and revised with the results of triaxial compression(UU test), field vane and Dilatometer tests(DMT). The depths of soft foundation at 5 sites in Honam high-speed railway areas were calculated based on the results of the various field tests in addition CPTu. The applicability of CPTu for a soft foundation criterion referred to the criteria of high-speed railway and related agencies in Korea was evaluated.

1. 서 론

대변형률 조건의 원위치시험인 피에조콘 관입 시험(Piezo-Cone Penetration Test, CPTu)은 다양하고 복잡한 지반 특성을 연속적으로 파악하는데 매우 유용한 시험으로서, 흙의 공학적 분류와 지반의 강도 특성 및 압축, 변형 특성을 평가하기 위한 목적으로 널리 사용되고 있다(Simonini & Cola, 2000). 특히 CPTu는 점토층 내에 분포하는 연속적인 토층의 판별 및 발달정도를 파악하고, 콘관입저항력(q_c), 주변마찰력(f_s) 및 간극수압(u) 등의 측정결과를 이용하여 지층의 분류, 시추공 사이의 지층변화의 파악, 지지력 및 침하량 등 각종 공학적 문제에 사용되는 토질정수의 추정을 목적으로 사용하고 있으며 특히 비배수 전단강도(S_u)와 콘관입저항력(q_c)의 연관성은 CPTu가 개발된 이후 많은 연구가 진행되고 있다. 그렇지만 이론적인 해석방법으로는 원추관입저항력을 이용하여 비배수 전단강도를 직접적으로 도출하기 어렵기 때문에 일반적으로 콘계수(N_{kt})를 이용한 경험적 해석방법을 통한 비배수 전단강도의 산정이 이루어진다.

CPTu는 위에서 살펴본 바와 같이 실제 연약지반을 판정하는데 매우 유용한 설계정수를 제공하는데 반해, 실제 우리나라의 고속철도 설계기준(한국철도시설공단, 2005)에는 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT)의 N값 규정만을 두고 있다. 일반적으로 SPT의 경우 방법이 간단하여 적용성이 좋으나, 각종 제한조건으로 인해 적용성에 한계가 있기 때문에 다양하고 복잡한 지반특성을 연속적으로 파악할 수 있는 CPTu의 결과 또한 연약지반의 판정기준으로 제시할 필요가 있다.

본 연구에서는 호남고속철도 예정노선 구간의 5개 부지에 대해 CPTu를 실시하여 Monte-Carlo

* 한국철도기술연구원 궤도노반연구팀 선임연구원, 정회원

E-mail : iwlee@krri.re.kr

TEL : (031)460-5326 FAX : (031)460-5319

** 한국철도기술연구원 궤도노반연구팀 박사후연구원, 정회원

*** 한국철도시설공단 KR기술연구소 부장, 정회원

**** 대원토질(주) 토목사업본부 차장, 정회원

Simulation(MCS)을 적용한 콘계수를 이용해 비배수 전단강도(S_u)를 산출하고 실내삼축압축시험(UU test), 현장베인시험 및 DMT 시험에서 구한 전단강도와와의 비교를 통해 현장 비배수 전단강도를 보정하였다. 또한 예정노선의 연약지반 위치, 깊이 등을 파악하여, 매우 개략적인 현재의 고속철도 연약지반 판정기준(SPT N값 기준)에 대해 실제 CPTu의 결과인 콘관입저항력(q_c), 비배수 전단강도(S_u) 등에 대한 연약지반의 기준제시를 통해 보다 구체적인 판정기준을 제안하였다.

2. 호남고속철도 예정노선의 지반 특성

호남고속철도 예정노선 중 표 1에 표시한 것과 같이 총 5개 지점에서 지반특성을 조사하였다. 시추조사 및 SPT 결과 조사지반 상부에는 퇴적층(실트질 점토, 실트질 모래, 점토질 실트, 모래질 자갈 등)이 존재하며, 하부로 풍화토, 풍화암 등이 존재한다. 대상지반에서 각 지점마다 약간의 차이는 있지만 실트질 점토는 4.2~13.9m의 두께로 존재하며 SPT에 의한 N값은 0/30~4/30 정도로 매우연약(very soft)~연약(soft)한 정도의 연경도를 나타낸다. 실트질 모래는 1.0~8.4m의 두께로 존재하며 N값은 각 지역마다 큰 차이를 보인다. 본 연구에서의 자세한 시추조사결과, N값의 범위 및 지층 주상도를 표 2 및 그림 1에 나타내었다.

표 1. 본 연구에서의 조사 위치

구 간	위 치
제1구간	충청남도 논산시 강경읍 일원
제2구간	전라북도 익산시 삼기면 일원
제3구간	전라북도 김제시 공덕면 일원
제4구간	전라남도 나주시 공산면 일원
제5구간	전라남도 무안군 몽탄면 일원

표 2. 각 구간별 시추조사결과 및 N값의 범위(괄호는 평균)

지층분포 및 N값의 범위		실트질점토	실트질모래	풍화토	풍화암
지층 분포 (두께, m)	제1구간	4.2~13.3(10.5)	1.0~8.0(3.3)	0.9~4.7(2.6)	2.6~3.4(3.1)
	제2구간	6.7~8.0(7.4)	1.0~4.8(2.9)	0.6~7.2(4.2)	3.0~3.2(3.1)
	제3구간	4.4~13.6(7.4)	2.6~8.4(5.3)	0.9~6.1(2.7)	3.2~3.5(3.4)
	제4구간	8.3~10.7(9.6)	1.4~2.7(1.8)	0.6~13.1(8.1)	1.5~3.2(2.7)
	제5구간	6.2~13.9(10.4)	2.7~6.4(4.7)	0.5~12.8(6.7)	3.0~3.3(3.2)
N값 범위	제1구간	0~8(1)	4~30(12)	23~50/12	50/10~50/3
	제2구간	0~8(1)	1~28(9)	20~50/13	50/10~50/7
	제3구간	0~7(2)	2~25(10)	45~50/13	50/10~50/5
	제4구간	0~15(3)	19~35(27)	9~50/12	50/10~50/4
	제5구간	0~8(1)	6~50/20	22~50/14	10/10~50/8

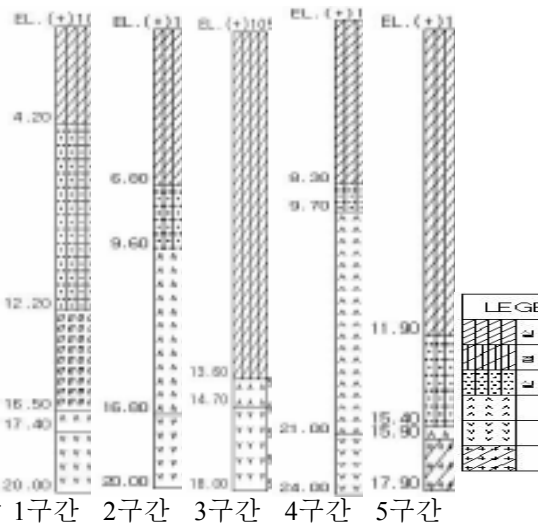


그림 1. 대상 부지의 지층 주상도

3. 대상 부지의 피에조콘 관입시험

본 연구에서는 호남고속철도 예정노선 중 5개 부지에 대한 피에조콘 관입시험(CPTu)을 실시하여 각 깊이에 따른 콘관입저항력(q_c), 주면마찰력(f_s), 간극수압(u)을 측정하였다(그림 2). 표준콘을 사용하였으며, ASTM D-3441방법에 따라 관입속도 2cm/sec로 관입하였다. 시험 결과, 그림 2에 제시한 시추 주상도와 비교할 경우(그림 1), $q_c \geq 20 \text{kgf/cm}^2$ 으로 급격하게 증가할 때의 깊이에서 실트질 점토층이 사질토층으로 변화함을 확인할 수 있다. 예정구간 5개소에서의 주면마찰력은 $0.0 \leq f_s \leq 0.67 \text{kgf/cm}^2$, 간극수압은 $0.0 \leq u \leq 5.34 \text{kgf/cm}^2$ 의 범위를 갖는 것으로 나타났다. 또한 CPTu의 콘 저항값으로부터 대상 부지의 지층분포를 추정할 수 있는데, Robertson(1990)의 흙 분류방법을 이용하여 CPTu 적용지층을 분석한 결과 예정구간 5개소의 지반은 유기질토-이탄(Organic soils-peats) 혹은 예민비가 큰 세립질 흙(Sensitive fine grained)부터 높은 강도의 모래 또는 점토질 모래(Very stiff sand to clayey sand)의 상태로 분포한다.

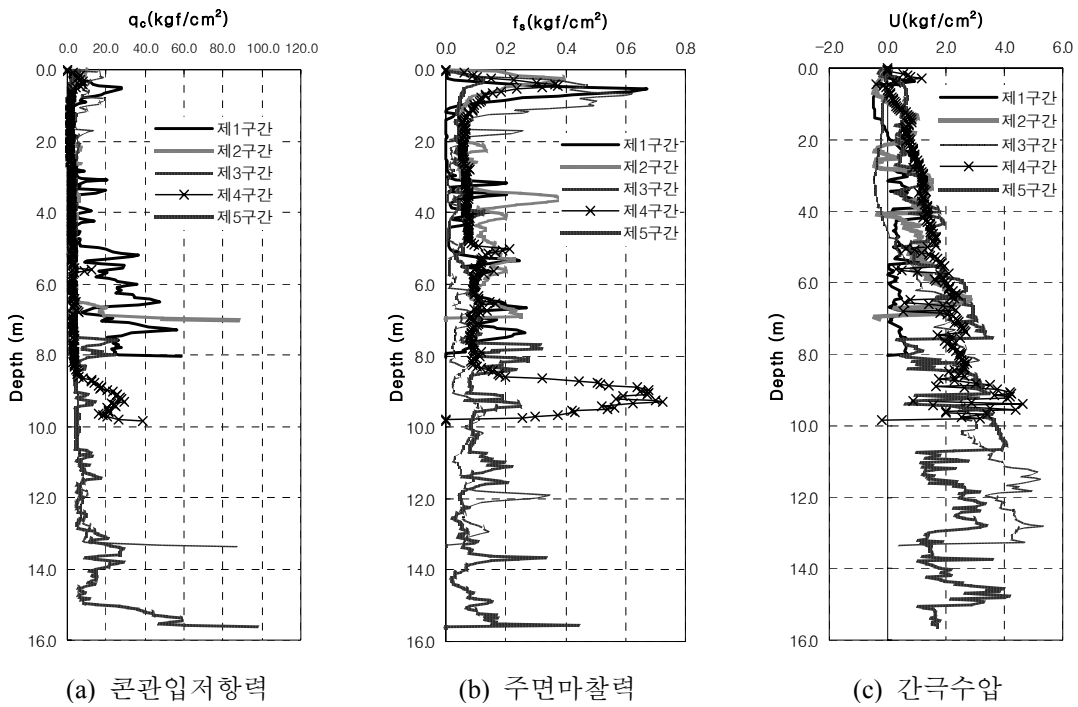


그림 2. 호남고속철도 예정노선의 CPTu 결과

4. 대상 부지의 비배수 전단강도

4.1 콘계수(N_{kt}) 산정

CPTu 결과로는 대상 부지 점성토의 비배수 전단강도를 직접적으로 산정할 수 없기 때문에, 본 연구에서는 현장 베인시험 등을 통해 구한 전단강도를 기준으로 콘계수(N_{kt})를 추정하여 전단강도를 추정하는 간접적인 방법을 사용하였다. 콘계수를 이용한 비배수 전단강도 산정식은 식 (1)에 제시하였다.

$$S_u = (q_t - \sigma_v) / N_{kt} \quad (1)$$

여기서, σ_v 는 전응력(kgf/cm²), q_t 는 보정된 콘저항력($q_t = q_c + u(1-a)$, a:순면적비, kgf/cm²)를 나타낸다.

콘계수는 지반의 특성 및 콘 관입속도, 크기효과(scale effect) 등에 따라 값의 차이가 나타나며, 대부분 8~30 사이에 존재한다(Rad & Lunne, 1998). 본 연구에서는 현장 베인시험에서 산정된 콘계수로부터 난수(random) 자료 2000개를 생성하여 Monte-Carlo Simulation(MCS)을 적용하여 전단강도 산정에 필요한 콘계수(N_{kt})를 결정하였다(그림 3). 이 MCS에 의한 콘계수(N_{kt})는 11.0으로 산정되었다.

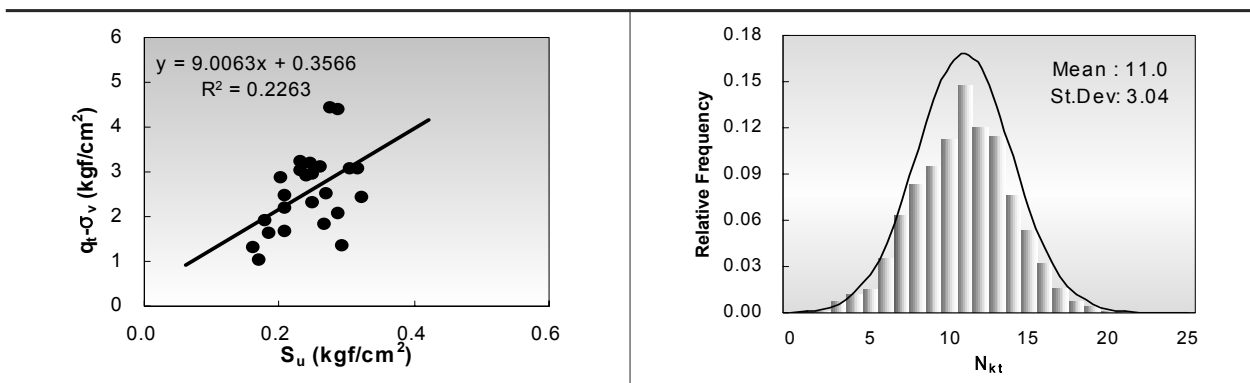


그림 3. Monte-Carlo Simulation에 의한 콘계수(N_{kt}) 산정

4.2 대상 부지의 비배수 전단강도 산정

식 (1)에 의해 호남고속철도 예정노선 5개 부지의 비배수 전단강도(S_u)를 산정하여 그림 4에 도시하였다. 산정 결과, 표 2 및 그림 1에서의 시추조사결과와 비교할 경우 $S_u \geq 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ 으로 급격하게 증가할 때의 깊이에서 실트질 점토층이 사질토층으로 변화함을 확인할 수 있다. 호남고속철도 예정구간 5개소에서 CPTu 관입 깊이까지의 비배수 전단강도는 $0.0 \leq S_u \leq 7.78 \text{ kgf/cm}^2$ 의 범위를 갖는 것으로 나타났다.

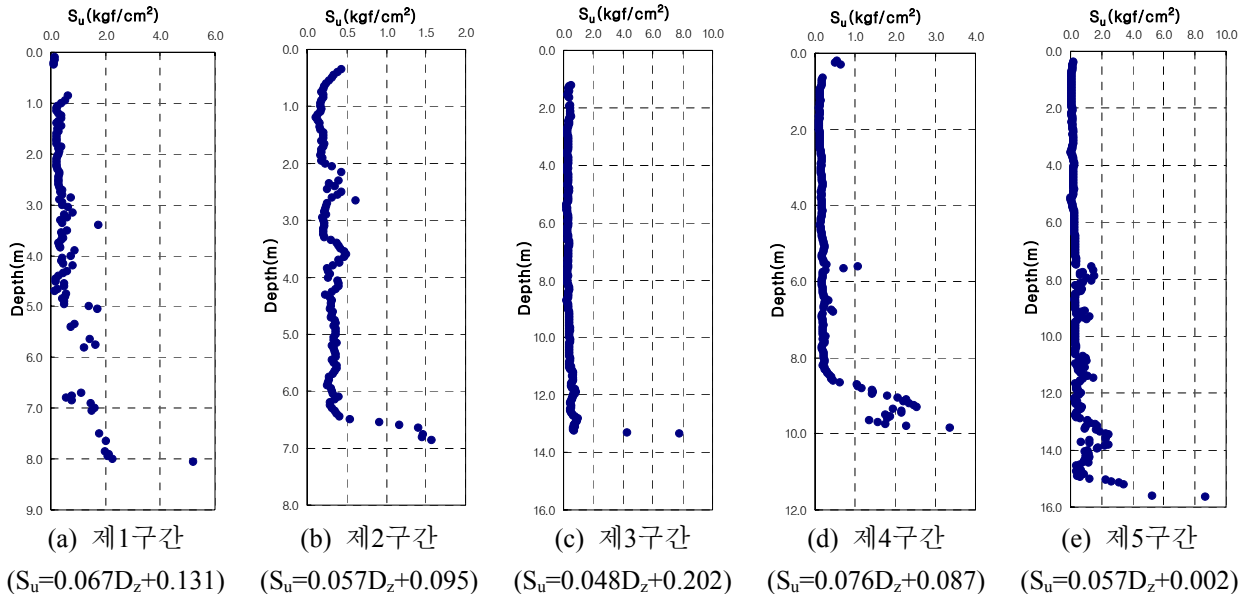


그림 4. 호남고속철도 예정구간에서 CPTu를 이용해 산정한 각 대상 부지의 비배수 전단강도(S_u)

4.3 실내시험 및 다른 현장시험에서 산정한 비배수 전단강도와의 비교

본 연구에서는 CPTu 이외에 실내삼축압축시험(UU test), 현장배인시험, Dilatometer 시험(DMT) 등을 통해 각 대상 부지의 깊이별 비배수 전단강도를 산정하여 각 시험에 대한 깊이별 비배수 전단강도 산정식을 도출하였으며, 산정 결과를 정리하면 표 3과 같다.

표 3. 각 시험별 비배수 전단강도(S_u) 산정식

각 구간 번호	비배수 전단강도 산정식 (단위 : kgf/cm^2)			
	CPTu	UU test(실내삼축)	현장배인시험	DMT
제1구간	$S_u = 0.067D_z + 0.131$	$S_u = 0.021D_z + 0.101$	$S_u = 0.014D_z + 0.163$	$S_u = 0.016D_z + 0.132$
제2구간	$S_u = 0.057D_z + 0.095$	$S_u = 0.024D_z + 0.041$	$S_u = 0.008D_z + 0.326$	$S_u = 0.018D_z + 0.100$
제3구간	$S_u = 0.048D_z + 0.202$	$S_u = 0.011D_z + 0.220$	$S_u = 0.007D_z + 0.205$	$S_u = 0.015D_z + 0.108$
제4구간	$S_u = 0.076D_z + 0.087$	$S_u = 0.102D_z + 0.359$	$S_u = 0.024D_z + 0.124$	$S_u = 0.146D_z + 0.087$
제5구간	$S_u = 0.057D_z + 0.002$	$S_u = 0.010D_z + 0.119$	$S_u = 0.013D_z + 0.141$	$S_u = 0.015D_z + 0.083$

산정 결과에서 대부분의 경우 CPTu의 비배수 전단강도가 다른 시험법에 비해 크게 나타나는데(각 구간 5m 깊이에서의 S_u 를 비교해보면 CPTu의 경우 제4구간을 제외하고는 다른 경우에 비해 최대 2.4배까지 증가), 이는 실내삼축압축시험의 경우 시료채취 및 제작 중에 발생하는 시료의 교란 및 상재하중 제거에 의한 응력이완, 불완전한 배수조건, 지반의 이방성(Anisotropy) 등으로 인해 실제의 비배수 전단강도보다 작은 값을 갖는 것으로 알려져 있으며, 현장배인시험의 경우도 흙의 이방성과 시험 중의 변형속도에 영향을 받아 실제 전단강도와는 차이를 보이기 때문(이기승, 2004)으로 판단된다.

CPTu에 의한 비배수 전단강도 역시 콘계수(N_{kt})를 결정하여 산정하였기 때문에, 실제와 가장 유사한 전단강도를 도출하기 위해 그림 5와 같이 비배수 전단강도를 보정하였다. 호남고속철도 예정노선 중 5개 구간의 보정된 비배수 전단강도 결과를 정리하면 표 4와 같다.

표 4. 보정된 호남고속철도 예정노선의 비배수 전단강도 산정식

각 구간 번호	보정된 비배수 전단강도 산정식(kgf/cm ²)
제1구간	$S_u=0.055D_z+0.141$
제2구간	$S_u=0.052D_z+0.094$
제3구간	$S_u=0.045D_z+0.175$
제4구간	$S_u=0.114D_z+0.127$
제5구간	$S_u=0.053D_z+0.002$

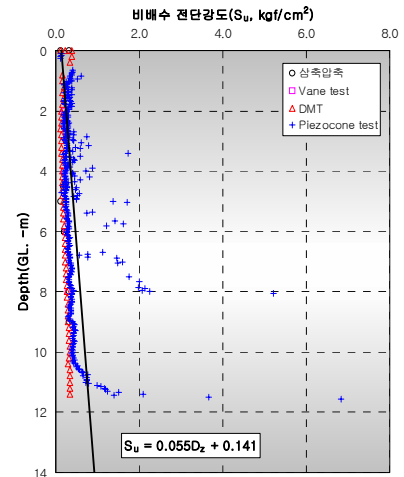


그림 5. S_u 의 보정작업(제1구간)

5. CPTu를 이용한 연약지반 판정기준

5.1 현행 연약지반 판정기준

(1) 한국고속철도 (한국철도시설공단, 2005)

연약지반 판정 시에는 절대적인 판정보다는 실무적 견지에서 판정이 요구되며, 일반적으로 표준관입시험(SPT)의 N값이 점성토의 경우 4~6, 사질토의 경우 10을 기준으로 판정되지만, 국내 고속철도의 경우 연약지반에서의 시공실적이 적고 KTX의 고속운행을 감안할 때 점성토, 사질토 모두 $N \geq 10$ 을 만족해야 한다.

(2) 한국도로공사 (건설교통부, 2001)

도로에서의 연약지반 판정기준을 살펴보면, 점성토의 경우 연약층의 두께가 10m 미만일 때는 $N \leq 4$, 콘관입저항력(q_c) $\leq 8 \text{ kgf/cm}^2$, 일축압축강도(q_u) $\leq 0.6 \text{ kgf/cm}^2$, 연약층의 두께가 10m 이상일 때는 $N \leq 6$, $q_c \leq 12 \text{ kgf/cm}^2$, $q_u \leq 0.6 \text{ kgf/cm}^2$, 사질토의 경우 $N \leq 10$ 인 조건일 때 대상 지반을 연약지반으로 판정한다. 고속철도의 판정기준과 비교할 때, 지반의 특성을 충분히 검토하기 위해 각종 제한조건으로 인해 적용성에 한계가 있는 N값 규정뿐 아니라 CPTu의 콘관입저항력 및 일축압축강도를 판정기준으로 함께 제시하였다.

(3) 일본고속철도 (철도구조물 등 설계표준: 생력화궤도용토구조, 1999)

일본고속철도는 대부분의 구간에서 콘크리트궤도를 채택하여 사용하고 있다. 콘크리트 궤도의 경우 일반 자갈궤도에 비해 시공기간이 짧고, 내구성이 큰 장점이 있는 반면, 레일체결장치에서 허용되는 크기보다 큰 침하량이 발생할 경우 궤도의 유지, 보수가 어렵다는 단점이 있다. 따라서 보다 적극적인 침하억제를 위해 연약지반의 판정기준을 점성토의 경우 $N \geq 4$, 사질토의 경우 $N \geq 20$ 으로 규정하고 있다.

5.2 본 연구에서의 CPTu 결과와의 연약지반 판정기준 비교

연약지반의 정의는 토질의 성상 및 시공 상황 등에 따라 다르기 때문에 체제나 구조물의 종류, 형식, 규모, 지반특성을 충분히 검토한 뒤에, 연약지반으로 취급할 것인지를 판단할 필요가 있다. 호남고속철도 예정노선의 경우 콘크리트 궤도를 채택하여 사용할 예정이기 때문에, 일본고속철도의 경우와 같이 보다 엄격한 기준(점성토 $N \geq 4$, 사질토 $N \geq 20$)을 제시할 필요가 있다. 그렇지만, 표준관입시험(SPT)의 N값의 경우 각종 제한조건으로 인해 적용성에 한계가 있기 때문에, 다양하고 복잡한 지반특성을 연속적으로 파악할 수 있는 CPTu의 결과와 동시에 제시하는 것이 효과적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 그림 1의 지층 주상도를 바탕으로 SPT의 연약지반 판정기준에 의한 대상부지의 연약지반을 조사하였으며, 이를 기준으로 하여 CPTu의 콘관입저항력(q_c) 변화량 및 보정된 비배수 전단강도(S_u)의 산정범위를 확인해 보았다(제4구간의 경우 시료의 교란으로 인한 실내삼축시험의 결과이상으로 판단되기 때문에 CPTu의 S_u 를 사용하였다).

해석 결과 그림 2(a)와 그림 1의 지층 주상도를 비교할 경우 $q_c \geq 20 \text{ kgf/cm}^2$ 으로 급격하게 증가할 때의 깊이에서 각 층의 변화가 있음을 확인할 수 있었고, 깊이별 연속적인 확인을 통해 구체적인 연약지반의

분포 범위를 파악할 수 있었으며, 본 q_c 기준을 연약지반 판정에 적용할 경우 SPT의 연약지반 판정기준에 부합하는 것으로 확인되었다. 비배수 전단강도 (S_u)의 경우 각 지반에 대해 N값 및 q_c 값을 기준으로 산정한 연약지반 깊이를 표 4의 보정된 S_u 산정식에 대입한 결과 $0.60\sim 0.80\text{kgf/cm}^2$ 의 범위를 갖는 것으로 확인되었다(표 5 참조). 따라서 본 연구에서의 해석결과 SPT의 N값을 이용한 연약지반 판정기준이외에 CPTu의 콘관입저항력($q_c \geq 20\text{kgf/cm}^2$) 및 비배수 전단강도($S_u \geq 0.8\text{kgf/cm}^2$)의 기준을 연약지반 판정기준으로 제시할 수 있다고 판단된다.

표 5. 연약지반 경계에서의 비배수 전단강도

각 구간 번호	연약지반 깊이(m)	$S_u(\text{kgf/cm}^2)$
제1구간	12.0	0.80
제2구간	9.6	0.60
제3구간	13.6	0.79
제4구간	8.3	0.72
제5구간	15.0	0.80

6. 결론

본 연구에서는 호남고속철도 예정노선 구간의 5개 부지에 대해 CPTu를 실시하여 Monte-Carlo Simulation(MCS)을 적용한 콘계수를 이용해 비배수 전단강도를 산출하고 다른 시험의 결과치와 비교하여 보정하였다. 또한 매우 개략적인 현재의 고속철도 연약지반 판정기준(SPT N값 기준)에 대해 실제 CPTu의 결과인 콘관입저항력(q_c), 비배수 전단강도(S_u) 등에 대한 연약지반의 기준제시를 통해 보다 구체적인 판정기준을 제안하였다. 그 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) CPTu 결과 대상 지반의 지층 주상도와 비교할 때 $q_c \geq 20\text{kgf/cm}^2$ 으로 급격하게 증가할 때의 깊이에서 각 층의 변화가 있음을 확인하였다.
- (2) Monte-Carlo Simulation(MCS)을 적용한 콘계수(N_{kt})는 11.0으로 계산되었으며, CPTu 관입 깊이까지의 비배수 전단강도는 $0.0 \leq S_u \leq 7.78\text{kgf/cm}^2$ 의 범위를 갖는 것으로 나타났다. 또한, 실내삼축압축시험, 현장배인시험 및 DMT 결과를 바탕으로 CPTu로 산정된 비배수 전단강도를 보정하였다.
- (3) 현행 고속철도에서 연약지반 판정기준으로 사용하는 SPT의 N값의 경우 각종 제한조건으로 인해 적용성에 한계가 있기 때문에 CPTu의 결과를 동시에 기준으로 제시하는 것이 효과적이며, 본 연구에서는 콘관입저항력($q_c \geq 20\text{kgf/cm}^2$) 및 보정된 비배수 전단강도($S_u \geq 0.8\text{kgf/cm}^2$)의 기준을 연약지반 판정기준으로 제시하였다.

참고문헌

1. 건설교통부(2001), “도로설계편람(II) 제4편”
2. 이기승(2004), “피에조콘을 이용한 흙의 분류와 비배수 전단강도 산정”, 석사학위논문, 중앙대학교
3. 한국철도기술연구원(2006), “철도토공구간의 원지반 안정성 강화 기술개발 연구용역 보고서”
4. 한국철도시설공단(2005), “철도설계기준(노반편)”
5. P.K. Robertson(1990), “Soil classification using the cone penetration test”, Can. Geotech. J., vol.27, pp.151-158
6. P. Simonini, and S. Cola(2000), “Use of piezocone to predict maximum stiffness of Venetian Soils”, J. of Geotech. and Geoenv. Engrg., ASCE, Vol.126, No.4, pp.378-382