

개량식 동적 콘 관입시험기의 개발 및 적용성 평가

Development of Advanced Dynamic Cone Penetration Test Apparatus and Its Application Performance Evaluation

김옥기¹, Zhuang Li², 이광우^{3*}

Uk-Gie Kim¹, Li Zhuang², Kwang-Wu Lee^{3*}

¹Nonmember, Post Doctoral Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil engineering and building Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

²Nonmember, Research Specialist, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil engineering and building Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

³Member, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Civil engineering and building Technology, 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

ABSTRACT

For quick and accurate ground investigation in wide construction site being not easy to access, advanced dynamic cone penetration test equipment was developed based on widely used equipment abroad. Advantages of existing equipment of portability and simple testing method were reflected in the new developed equipment. Meanwhile, by extending connection of lower rod, penetration depth is raised to 6m from 1 m of the existing equipment. Moreover, by assembly of hammer (2+3+3kg) and cone (3 types) etc., it is possible to perform test under the same conditions with those by German and Japan dynamic cone penetration test equipment (Tsukuba, PWRI and SH types). Auxiliary equipment was applied to make sure of perpendicularity as penetration depth increases. Applicability of the new developed equipment was evaluated through tests on various fields and its reliability was verified.

요 지

1m 6m , (2+3+3kg), (3type) /
(Tsukuba, PWRI, SH type) 가 , 가
가 /

Keywords : Site investigation, In situ test, Dynamic cone penetration test, SPT N value, Cone Resistance

1. 서 론

최근 건설동향은 고속철도나 플랜트 건설과 같이 장대/

광역부지에 대한 사회기반시설의 대형화와 해외건설 진출이 눈이 띄게 진행되고 있으나, 양질의 부지확보에 어려움이 있어 산지나 해안에 근접하고 있는 경향이다. 이러한 대규모 건설 부지의 지반조사나 해외 건설에서는 다양하고 복합적인 지반이 분포함에 따라 보다 신속하고 신뢰성 있는 지반조사 자료가 무엇보다 중요시 되고 있다. 또한,

Received 3 Nov. 2014, Revised 19 Dec. 2014, Accepted 23 Dec. 2014

*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0232; Fax: +82-31-910-0211

E-mail address: kwangwu@kict.re.kr (K. W. Lee)

이상 기후에 의한 국부적인 집중호우에 따른 산사태나 토석류 등의 재해방지, 원인 조사를 위한 지반조사에서도 광역산지에 대한 다방면의 지반조사 자료가 요구되고 있으나, 지반조사 장비의 접근성과 비용 등의 문제로 그 조사에 한계가 있는 실정이다.

본 연구에서는 이러한 광역부지에 대한 지반조사를 신속·정확하게 수행하기 위한 목적으로 포장 하부구조(노상, 보조기층)의 지지력 평가를 위해 해외에서 널리 사용되고 있는 동적 콘 관입시험기를 개선한 개량형 동적 콘 관입시험기를 개발하였다. 기존의 동적 콘 관입시험기는 휴대성이 용이하고 비교적 시험방법이 간단한 장점을 가지고 있어 포장 하부구조의 강성, 강도특성 및 사운딩으로 널리 활용되어 왔으나, 측정 가능한 지반 관입심도가 1m로 제한적이어서 표층이상의 지반에 대한 조사는 불가능한 실정이다. 따라서, 본 연구를 통해 이와 같은 단점을 보완하고자 하부 로트를 심도 6m까지 관입시킬 수 있도록 연장시키고 수직도 유지할 수 있는 장치를 개발하였으며, 다른 유사 동적 콘 관입시험기와 동일한 제원으로 조립이 가능하도록 개량형 동적 콘 관입시험기를 제작하고 국내/외 현장시험을 통하여 그 적용성을 평가하였다.

2. 문헌연구

동적 콘 관입시험기는 나라마다 그 결과에 영향을 미치는 해머의 중량, 낙하고, 콘의 제원 등의 규격을 통일시키

지 않고 독자적인 콘을 제작하여 시험하고 있는 실정이다. 국내에서는 주로 도로 하부구조의 강성측정에만 적용되어 시험결과가 많지 않은 관계로 이와 관련된 지반정수 추정을 위한 자료축적이 미흡한 실정이다(Oh et al., 2009).

본 연구에서는 개량형 동적 콘 관입시험기의 효율적인 개발을 위해 우선 국외에서 사용되고 있는 대표적인 동적 콘 관입시험기를 분류하고 활용사례를 조사하였다. 국외의 동적 콘 관입시험기는 제원의 미소한 차이는 있지만, 유럽, 미국에서 널리 사용되고 있는 독일식 동적 콘 관입시험기와 일본식 간이 동적 콘 관입시험기로 분류하였다. 본 절에서는 이와 같이 분류한 각 시험기의 구성과 활용사례를 정리한다.

2.1 동적 콘 관입시험기(독일식)

국내에서 일반적으로 사용되는 독일식 동적 콘 관입시험기는 성토 도로에 대한 포장 하부구조의 강성을 측정하기 위한 현장시험기로 Scala(1956)에 의해 최초로 개발되었으며, 휴대성이 좋고 현장 적용이 용이하여 미국, 유럽, 일본 등에서 그 활용도가 매우 높다. 독일식 동적 콘 관입시험기는 Fig. 1의 시험기 구성과 Table 1의 제원에 나타난 바와 같이 크게 상부부분, 하부부분과 눈금자로 구성된다. 해머는 철로 구조되어있고 나머지 부분은 부식을 방지하기 위해 스테인레스로 제작되어 있다.

상부부분은 장비를 수직으로 유지시켜주는 핸들과 그 하

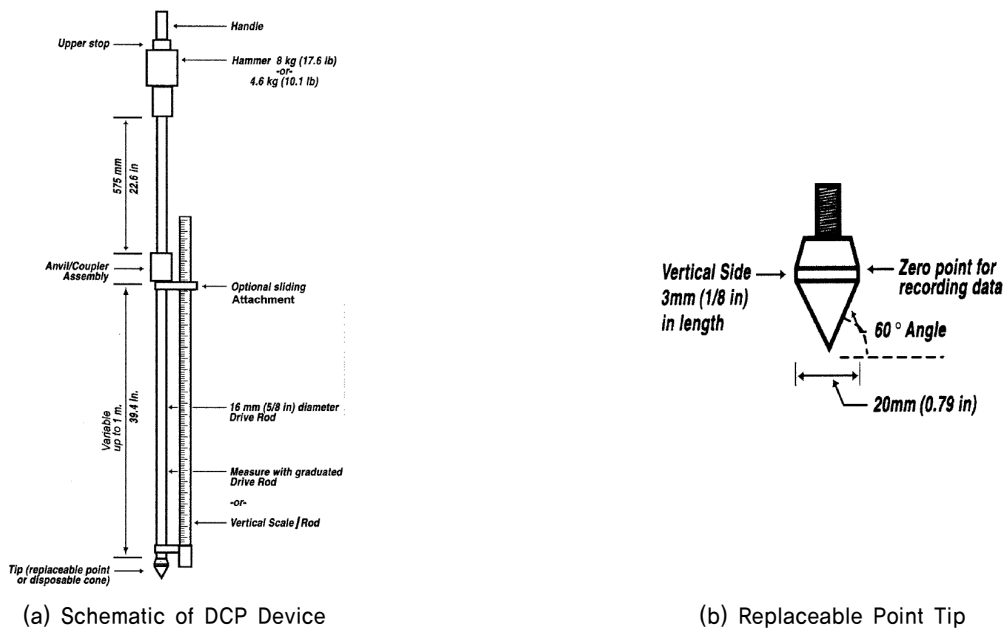


Fig. 1. German dynamic cone penetration test equipment (ASTM D6951/D6951M-09, 2001)

Table 1. Specifications of German dynamic cone penetration test equipment

Items	Unit	Specification
Hammer, M	kg	8.0
Dropping height, H	cm	57.5
Self weight (exclude hammer), T	kg	5
sectional area of cone, A	cm ²	6.28

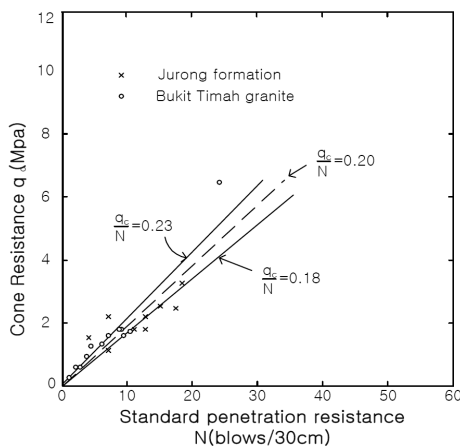
부에 상부 모루, 그리고 상부 모루에서 하부모루 까지 자유 낙하하는 8kg(17.6 lbs.)의 해머, 해머의 자유낙하 운동을 유도하는 지름 16mm, 길이 575mm의 상부 로트 이렇게 다섯 부분으로 이루어져 있다. 하부부분은 하부모루의 충격에너지를 콘까지 전달하는 지름 16mm, 길이 1,000mm의 하부로트와 그 밑에 지반으로 관입되는 콘으로 구성되어 있다. 콘은 제원은 Fig. 1(b)와 같이 지름 20mm의 원추 각 60°로 구성된다. 눈금자는 하부로트 1,000mm와 동일하거나 조금 긴 막대 형태로 되어 있으며, 하부로트 옆에 조립하여 사용하여 1mm 단위로 눈금이 그려져 있다.

시험방법은 핸들을 잡고 수직 상태를 유지한 후 8kg의 해머를 상부모루까지 올리고 자유 낙하시켜 하부모루로 전달되는 자유낙하 에너지가 충격하중으로 바뀌어 하부로트에 전달시킨다. 이와 같은 과정을 반복하여 콘이 지반에 관입되는 1회 타격에 대한 관입량을 눈금자로 측정하고 다짐 강도를 결정하는 시험 방법으로(ASTM D6951/D6951M-09, 2001)는 충격횟수 당 관입량(PR: mm/blow)을 측정하거나 측정된 전체 관입량을 충격 횟수로 나누어 평균값으로 포장의 다짐기준측정(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011)에 적용한다.

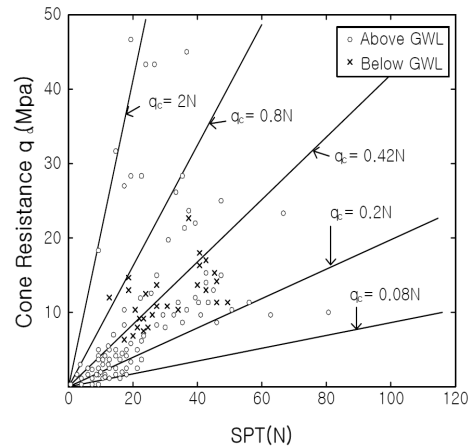
시험 제한 조건으로는 연속된 낙하 횟수 5회 이상 관입량 PR값이 2mm/blow인 경우나 시험 중 수직도가 유지되

지 않아 관입지점에서 핸들까지의 수평 변위량이 75mm 이상이 되면 시험을 종료하고 기존의 원 관입지점 300mm 이내에서 시험을 다시 수행한다. 또한, 콘에 마모가 발생할 경우 교체하여 사용하고 세립토 및 조립토 등으로 구성된 균질한 지반에서 신뢰성 있는 데이터를 얻을 수 있다. 강도가 높은 지반이나 고결화 된 지반, 직경 50mm 이상의 입상 재료를 많이 포함하고 있는 지반 등에서는 그 신뢰성에 대해 검토가 필요하다.

이와 같은 독일식 동적 콘 관입시험기의 대표적인 결과는 Meyerhof(1956)가 처음 제안한 SPT N값과 콘 저항값의 상관관계로써 $q_t/N=0.4$ (혹은, $q_t=4N$)이 가장 일반적이다. 여기서, 상관계수 0.4는 세립 모래, 실트질 모래에 대한 값으로 다양한 토질 종류에 따른 상관계수를 평가하기 위한 연구가 많은 연구자들에 의해 시도되었다. Meigh and Nixon(1961)은 균질한 세립 모래, 중립질의 모래와 실트가 포함된 지반에 대해서 시험을 수행한 결과 Meyerhof의 제안식과 크게 상이하지 않은 $q_t/N=0.4 \sim 0.45$ 의 값을 확인하였다. 또한, Chang(1988), Ajayi and Balogun(1988) 등은 다양한 지역 및 토질 조건을 대상으로 SPT N값과 콘 관입값의 상관관계를 평가하기 위해 싱가포르, 아프리카, 나이지리아, 브라질 등에서 수행한 조사 결과를 분석하였다. 분석 결과, Fig. 2(a)와 같이 싱가포르에서 수행한 시험



(a) Singapore foundation (Chang, 1988)



(b) Africa foundation (Ajayi and Balogun, 1988)

Fig. 2. Relationships between SPT N value and cone resistances

결과는 N 값과 콘 저항값이 좋은 상관관계를 보이는 반면에, 아프리카에서 수행한 시험 결과는 분산정도가 상당히 큰 것으로 나타났다(Fig. 2(b)). 이에 Ajayi and Balogun(1988)은 추가적인 검증을 위해 나이지리아 점토를 대상으로 삼축압축시험(UU)을 수행하여 콘저항값과의 관계를 검토하였으나 분산 정도가 커서 그 관계를 입증하지 못하였다. 이와 같이 분산정도가 큰 이유 중 하나는 나라와 지역에 따라 토질특성이 서로 상이하기 때문이다. 따라서, 실제 설계 및 안정해석에 사용할 수 있는 상관관계의 도출을 위해서는 많은 실험자료에 대한 분석을 통해 토립자의 크기, 입도 분포 등의 영향을 반영할 필요가 있다(Lunne et al., 1997, Schmertmann, 1970).

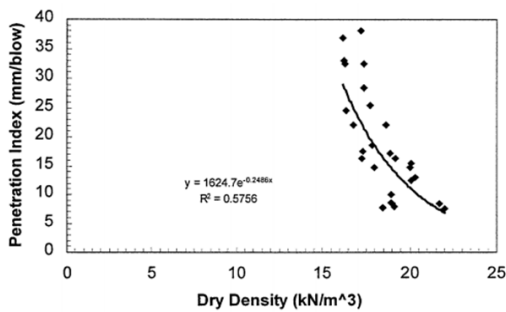
Luo et al., (1998)은 도로포장 하부 지반을 대상으로 동적 콘 관입시험을 수행하여 조사 보고서를 작성하였다. 이 보고서에는 Fig. 3과 같이 건조 단위중량과 함수비에 따른 저항계수와의 상관관계를 산정하였으며, 최종적으로 SPT N 치와의 비교를 위한 Penetration index와의 상관관계를 도출하고자 하였으나 관입심도가 1m에 국한되어 있어서

신뢰성 있는 시험결과를 얻기에는 무리가 있었다.

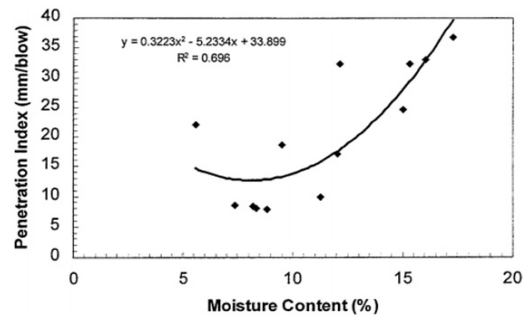
2.2 간이 동적 콘 관입시험기(일본식)

일본에서 일반적으로 사용되고 있는 간이 동적 콘 관입 시험기(portable dynamic cone penetration test, JGS 1433)는 Okunishi(奥西) et al.,(1978)에 의해 최초로 개발되었으며 Tsukuba type으로 불리 운다. 이와 유사한 형식으로 연약지반을 대상으로 개발한 동적 원추 관입시험기(KDK S 0901-1968, PWRI type) 및 비탈면 표층의 지반강성을 측정할 수 있는 SH형 관입시험기가 사용되고 있다. 이들 일본식 시험기에 대한 개요도 및 제원은 Fig. 4 및 Table 2에 각각 나타낸다.

일본식 간이 동적 콘 관입시험기는 전술한 독일식 동적 콘 관입시험기와 시험원리는 동일하나 해머무게를 5kg (SH type은 심도별로 3kg과 5kg 해머 사용)로 감소시킴으로써 연약지반 및 표층에 대한 지반 특성을 자세히 조사할 수 있도록 개조하였다. 또한, 하부로드를 체결 연장하여

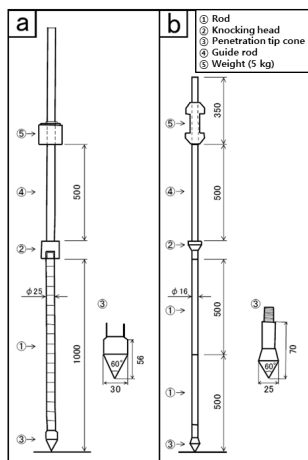


(a) Dry density VS penetration index



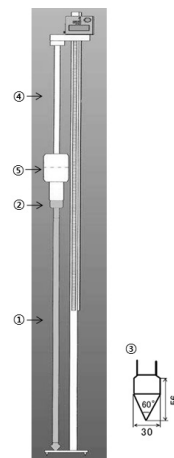
(b) Moisture content VS penetration index

Fig. 3. Penetration index varying with dry density and moisture content



(a) PWRI type

(b) Tsukuba type



(c) SH type

Fig. 4. Different types of dynamic cone penetration test equipments in Japan

Table 2. Different types of dynamic cone penetration test equipments in Japan and their specifications

Type	Hammer weight	Cone specifications	Testing method and condition
Tsukuba type	5kg	L=70mm, 25mm ϕ , 60°	Required number of blows by penetration of 10cm ended at < 20mm penetration by 10 blows
PWRI type	5kg	L=56mm, 30mm ϕ , 60°	Required number of blows by penetration of 10cm ended at < 20mm penetration by 10 blows
SH Type	3+2kg	L=56mm, 30mm ϕ , 60°	Required number of blows by penetration of 10cm and penetration per blow ended at < 20mm penetration by 10 blows

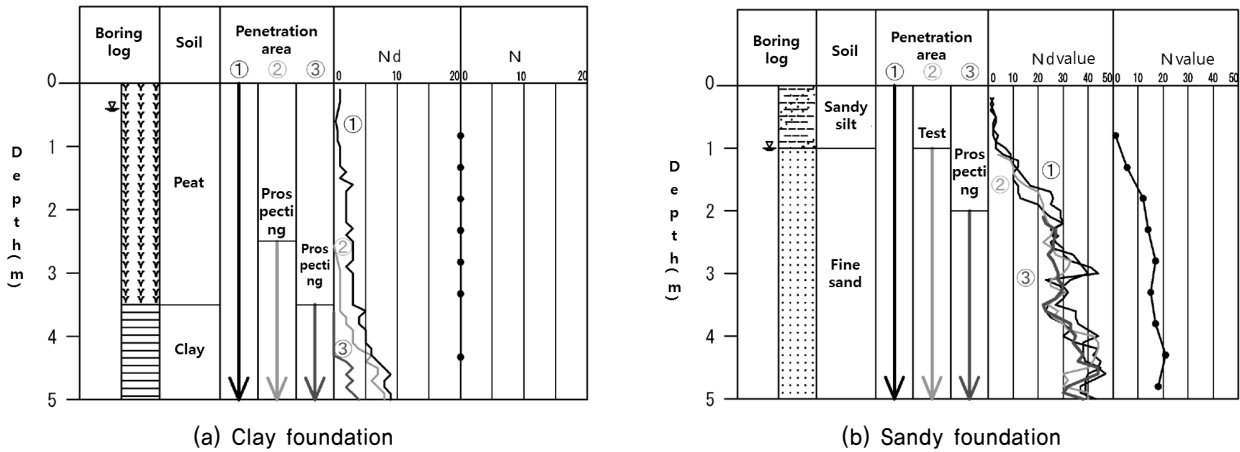


Fig. 5. Comparison of N_d values and SPT N values

심도 5m까지 측정 가능하도록 개량하고 결과 값으로 콘이 지중으로 10cm관입하는데 필요한 타격횟수를 기록하도록 고안되었다. 이와 같이 개발된 일본식 간이 동적 콘 관입시험기를 활용한 주요 최근 연구결과 및 활용사례를 요약하면 다음과 같다.

Kobayashi(小林, 2012)는 Tsukuba type 간이 동적 콘 관입시험기의 결과인 N_d 값과 SPT N 값의 결과를 비교하여 Fig. 5와 같은 결론을 발표하였으며 주요 내용은 다음과 같다.

- 점성토지반에서 심도 1.5m이상의 N_d 값은 점토의 주변 마찰력에 의한 영향을 받으며, 주변 마찰의 영향이 상대적으로 작은 심도 1.5m까지는 SPT N 값과 q_c 값과의 좋은 상관관계가 도출되어 설계 정수를 개략적으로 산출하는 것이 가능하다.
- 사질토 지반에서는 주변 마찰의 영향이 크지 않으므로 심도 4m 이상에서도 SPT N 값과 N_d 값의 관계는 비교적 양호한 결과를 얻을 수 있다.
- 오거보링으로 지반을 굴착하여 시험시작 심도를 바꾼 상태에서 콘 및 하부로드에 대한 주변마찰의 영향을 조사한 결과, 점성토 지반에서는 0.5~1.0m에서 주변 마찰의 영향을 받아 심도가 증가할 수록 저항값이 증가하는 경향을 나타내고 사질토 지반에서는 주변 마

찰의 영향이 작아 심도 5m 정도까지 적용 가능하다.

- 실험결과를 바탕으로 주변 마찰의 영향을 제거한 N_d 값과 SPT N 값의 관계는 점성토 지반에서 $N = (1 \sim 1/2) \times N_d$, 사질토 지반에서 $N = (1/2 \sim 1/3) \times N_d$ 의 관계를 나타내고, 동일한 조건에서 공내 수평재하시험(In Situ Pressuremeter Test)을 수행하여 주변 마찰의 영향을 받지 않을 경우의 N_d 값과 변형계수 $E_B = (300 \sim 500) N_d$ (kN/m^2)의 관계를 나타내는 경험식을 제안하였다.

또한, Yachie(谷内江, 2013)는 Tsukuba type 간이 동적 콘 관입시험기의 점성토 지반에 대한 주변마찰 영향과 주변 마찰을 감소시킬 수 있는 시험방법을 고안하기 위해 오거보링, 단일관, 이중관식 등 3종류의 시험기를 이용하여 층적 점성토와 홍적 점성토에서 시험을 수행하였다. 시험결과, Fig. 6과 같이 홍적 점성토의 주변 마찰영향은 선단 심도 0.3m부근부터 주변 마찰의 영향을 받기 시작하며, 이중관을 이용하여 시험을 수행하는 경우, 단일관 형식과 비교하여 N_d 값은 확연히 감소함을 확인하였고 보링과 같이 주변마찰 영향을 제거한 시험결과와 유사한 결과를 얻어 주변 마찰의 영향을 제거할 수 있었다. 이중관식 관입 시험의 작업 시간은 단일관 형식과 비교하여 약 1.5배정도 작업시간이 증가하여 작업성에는 크게 구애받지 않고 마

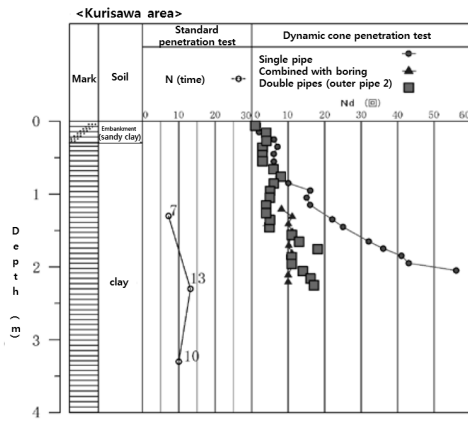


Fig. 6. Comparison of Nd values in two different test methods (diluvial clay)

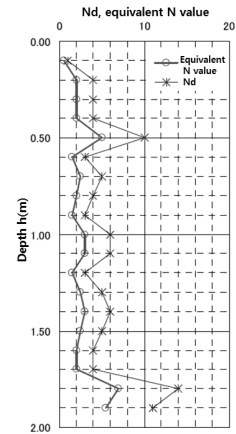


Fig. 7. Penetration test results(A area)

촬영향을 배제할 수 있는 방법이라 추천하고 있다.

간이 동적 콘 관입시험기의 활용 사례로는 Kimura(木村, 2012)가 일본 대지진의 피해를 입은 하천 제방을 대상으로 피해 전/후의 제방강도를 비교 조사하기 위한 목적으로 보링조사를 병행한 SPT를 수행했다. Fig. 7에는 SPT시험의 대표적인 결과인 N 값과 동일한 개소에서 측정된 N_d 값의 상관관계를 검토한 결과를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 $SPT\ N \approx 0.43N_d$ 의 결과를 도출하고 장대역에 걸친 하천제방에 대하여 간이 동적 콘 관입시험을 수행하여 환산 N 값으로 역산함으로써 제방의 연약화를 판정, 검토하였다.

3. 개량형 동적 콘 관입시험기 개발 및 적용

3.1 개량형 동적 콘 관입시험기 개발

본 연구에서는 2장에 설명한 문헌연구 결과를 토대로

기존의 동적 콘 관입시험기의 장점인 휴대성, 간편성 등을 최대한 반영하고 하부로드의 관입 깊이를 6m까지 연장시킨 개량형 동적 콘 관입시험기를 개발하였다. 개량형 동적 콘 관입시험기는 콘과 해머를 적절히 조합하여 독일식 동적 콘 관입시험기 혹은 일본식 간이 동적 콘 관입시험기 (Tsukuba, PWRI, SH Type)와 동일한 제원으로 조립할 수 있다. 또한 기존 시험기에서 심도가 깊어짐에 따라 수직도 확보가 어려워 신뢰성 있는 데이터 취득이 어려운 점을 개선하기 위해 수직도 유지 장치를 고안하였으며, 접근성이 어려운 현장에서도 활용성을 높이기 위해 수직도 유지 장치는 손쉽게 탈·부착이 가능하도록 하였다. 이러한 개량형 동적 콘 관입시험기의 개요도는 Fig. 8에 나타내며 구성 장치별 제원 및 사양은 Table 3에 나타낸다.

개량형 동적 콘 관입시험기의 주요 특징은 다음과 같다.

- 간단한 장비로 구성되어 이동성과 접근성이 좋으며, 최소 인원(2명)으로 시험수행이 가능하다. 또한, 시험

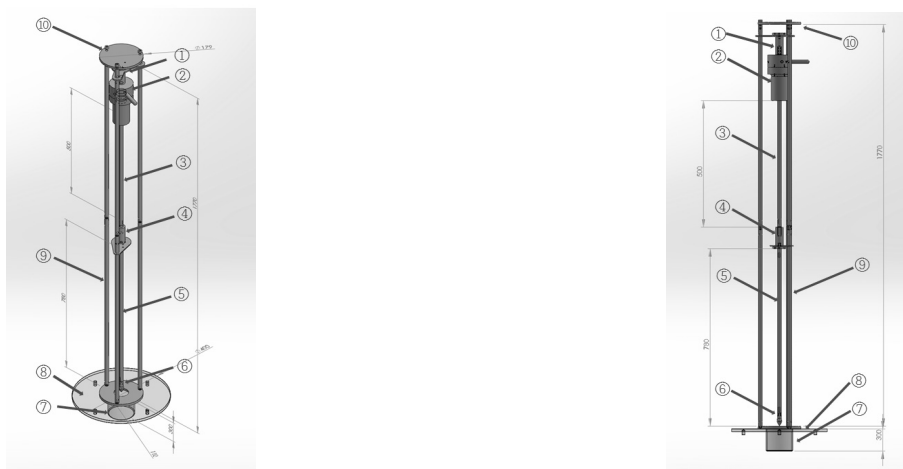


Fig. 8. Advanced dynamic cone penetration test equipment

Table 3. Specifications of advanced dynamic cone penetration test equipment

Item	Constitution	Note
①	Handle	1set - assembled and connected with guide rod - required high stiffness for drawing of penetration rod
②	Hammer	3+2+3kg, combined type of hammer (3kg: SH type, 5kg: PDCPT, 8kg: DCPT) - assembled by 3 hammers of 3kg, 2kg, 3kg - the weight considers handle
③	Upper guide rod	16φ×800mm (fixed dropping height) - upper part connected with handle, lower part connected with anvil - fixed dropping height
④	Knocking head and anvil	1set - upper part connected with guide rod, lower part connected with penetration rod - penetration can be measured by each blow
⑤	Penetration rod	16φ×750mm (penetration depth 750×8=6,000mm), - upper part connected with anvil, lower part connected with cone - after penetration, lower part connected with top of penetration rod - Scale by interval of 5cm
⑥	Cone	(DCPT) 20mmφ, 60°, L=44.5mm (Tsukuba type)25mmφ, 60°, L=70mm (PWRI and SH type)30mmφ, 60°, L=56mm - upper part connected with penetration rod - 3 types - consumables
⑦	borehole wall stabilization pipe	H=300mm, inner dia.=110mm - upper part connect with lateral plate - to stabilize borehole wall by penetration into ground
⑧	Lateral plate	outer dia.=400mm, inner dia.=110mm - connected with 3 vertical pedestal and borehole wall stabilization pipe - 4 installed shear keys at the lower part
⑨	Vertical pedestal	16φ×900mm: 6 EA - Connected with upper support fixed bed, lateral plate - Assembled by 3 sets with each set of 2 EA
⑩	Fixed bed	1set - Connected with 3 vertical pedestals

분석 방법이 간단하여 일반 현장 실무자들도 쉽게 사용이 가능하고, 기존 연구자들이 제안한 관계식을 통해 각 층의 물성을 간접적으로 추정할 수 있다.

- 사용목적에 따라 3, 2, 3kg의 낙하 해머와 콘을 조합하여 독일식 동적 콘 관입시험기(8kg), 일본식 간이 동적 콘 관입시험기 Tsukuba type, PWRI type(5kg), SH type(3kg)의 제원에 맞게 시험을 수행할 수 있다. 따라서, SPT *N*값이 1이하인 연약한 지반에 대한 강성을 검토할 수 있으며, 느슨한 표층의 공벽을 유지시킬 수 있도록 수평판에 공벽 유지관과 4개의 전단키를 설치하여 표층 교란 없이 정확한 측정값을 얻을 수 있다.
- 독일식 동적 콘 관입시험기는 관입심도가 1m로 얇은 표층에서만 측정 가능하여 SPT *N*값 등의 결과 비교에 한계가 있으나, 750mm의 로드를 6개까지 연장시켜 6m 심도까지 측정 가능하다.
- 기존(독일/일본식) 동적 콘 관입시험기의 측정 데이터에서 가장 큰 오차를 발생시킬 수 있는 수직도를 유지시키기 위해 수평판과 3개의 연직 지지대를 조립 설치함으로써 수직도를 제어할 수 있다.

- 접근성이 용이하지 않은 현장에서 여건에 따라 수직도 조절장치(수평판, 공벽 유지관, 연직 지지대 등)를 제거하고 시험을 수행할 수 있으며, 측정방법(1회 타격 관입량, 10cm관입에 필요한 타격횟수)에 따라 로드 표면에 표시된 눈금(5cm)이나 스틸 자를 이용하여 간편하게 관입심도를 측정할 수 있다.

3.2 동적 콘 관입시험기(독일식) 시험결과

구조물의 기초가 되는 지반특성을 파악하기 위해서 반드시 선행되어야 하는 작업 중 하나가 대상지반의 공학적 특성과 지층구성을 파악하는 것이다. 따라서, 국내에서 사용되고 있는 독일식 동적 콘 관입시험기로 실제로 표층의 강성 및 콘 저항에 따른 토질상태 파악하기 위해 ○○부지에서 시험을 수행하였으며, 동일 부지에 SPT시험을 수행하여 *N*값과의 관계를 조사하였다. 시험에 사용한 독일식 동적 콘 관입시험기는 지표에서 최대 1mm 깊이까지 관입이 가능하므로 시추조사에서 확인된 표토층과 풍화토층 상부까지의 콘 저항값을 산정하였다. 일반적인 콘 저항값 산정식은 다음 식 (1)과 같다.

Table 4. Cone resistance for different soils

Soil type		Cone resistance (kgf/cm ²)
Clay	Mud	1 ~ 10
	Silt	6 ~ 15
	Very soft clay	1 ~ 15
	Medium clay	15 ~ 30
	Stiff clay	30 ~ 50
	Very stiff clay	30 ~ 70
Sandy soil	Loose sand	2 ~ 40
	Dense sand	50 ~ 300
	Dense clayey sand	40 ~ 70
	Loose sand with gravel	5 ~ 40
	Dense sand with gravel	70 ~ 350

Table 5. Test results by German dynamic cone penetration

BH-1		BH-2		BH-3		BH-4		BH-5	
Depth (cm)	Soil type	Depth (cm)	Soil type	Depth (cm)	Soil type	Depth (cm)	Soil type	Depth (cm)	Soil type
1,0-81,5	Very soft clay	1,0-53,5	Very soft clay	1,0-60,0	Very soft clay	1,0-47,0	Very soft clay	1,0-75,0	Very soft clay
		53,5-59,5	Medium clay			47,0-73,0	Medium clay		
81,5-88,0	Medium clay	59,5-85,5	Very soft clay	71,0-82,0	Stiff clay	73,0-78,0	Very stiff clay	75,0-93,0	Stiff clay
		85,5-90,0	Medium clay			78,0-93,0	Stiff clay		
88,0-93,0	Stiff clay	90,0-93,0	Stiff clay	82,0-93,0	Very stiff clay				

$$Cone\ resistance, \text{ kgf/cm}^2 (R_d) = \frac{M^2 \times H}{e(T+M) \times \frac{1}{A}} \quad (1)$$

여기서, e : 관입깊이/타격횟수(cm/blow)

M : 해머중량(kg)

T : 해머낙하높이(cm)

A : 콘 단면적(cm²)

콘 저항값은 극한저항력과 허용지지력 등을 구하는 데 이용할 수 있으며(Oh et al, 2009; Oh, 2010; Kim et al., 2006), CBR값을 계산하여 탄성계수를 구할 수 있다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2012). 또한 Table 4에 나타낸 바와 같이 콘 저항치를 이용하면 개략적인 토질의 상태도 추정할 수 있다(Kweon, 2009).

시험 결과와 Table 4에 근거하여 개략적인 토질상태를 분류하면 Table 5와 같다. Table 5에서 시추지점의 경우 지표로부터 47~85.5cm 깊이까지는 매우 연약한 층으로 판정되었다. 동적 콘 관입시험을 지표로부터 대략 10~

15cm 정도 내려간 지점에서 실시한 점을 고려하면, 시추 조사에서 확인된 표토의 심도(0.9~1.4m)와 유사하다.

지반조사에서 가장 널리 활용되고 있는 SPT N 값은 Table 6에 나타낸 바와 같이 지반의 공학적 특성 평가와 지층분류에 효과적이다. 이에 동적 콘 관입시험의 활용성을 검토하기 위해, 현장시험을 실시하였다. 본 현장시험은 개도국에 대한 공적원조사업이 수행되고 있는 라오스 OO 현장에서 실시하였다. 동적 콘 관입시험으로부터 산정한 콘 저항값을 산정하여 SPT N 값과의 상관관계를 비교하였으며 그 결과를 Table 7, Fig. 9에 정리하였다. N 값이 측정된 지반은 모래섞인 실트질 점토로서, N 값은 13~40의 범위를 가진다.

Table 7 및 Fig. 9에서 알 수 있는 바와 같이, N 값이 증가함에 따라 콘 저항값도 증가하고 본 연구에서 관계는 $q/N=0.103$ 으로 평가되었다. 이는 Koo and Yi(2003)가 잔류토층 상부의 층적 연약층을 대상으로 수행한 연구에서 제시한 $q/N=0.1\sim 0.2$ 의 결과와 유사한 경향을 나타낸다.

Table 6. Various practical applications of SPT N values

Various practical applications		
Synthetic judgement on ground		<ul style="list-style-type: none"> • soft layer or not • geology of ground and strength distribution • possibility of penetration of pile or sheet pile • permeable layer or not • depth of bearing layer
Engineering characteristics evaluated by N value	Sandy soil	<ul style="list-style-type: none"> • relative density • bearing capacity coefficient • void ratio • internal friction • liquefaction or not • elastic settlement, allowable bearing capacity
	Clay	<ul style="list-style-type: none"> • consistency • undrained cohesion • bearing capacity at failure • uniaxial compression strength • allowable bearing capacity of foundation
	Pile	<ul style="list-style-type: none"> • vertical bearing capacity of pile and lateral displacement • foundation modulus, deformation modulus, S wave speed

Table 7. Measured N values and cone resistance in ○○ construction site

		BH-1	BH-2	BH-3	BH-4	BH-5
SPT	measured depth, (m)	1,3	1,4	0,9	0,9	1,4
	N , (blows/30cm)	45	28	50	35	13
DCPT	measured depth, (m)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	cone resistance, R_d (MPa)	3,59	2,82	5,28	4,61	2,05

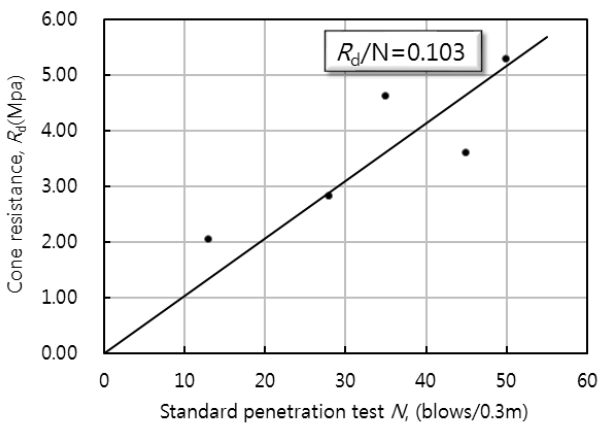


Fig. 9. Relationship between N values and cone resistance in ○○ construction site

3.3 개량형 동적 콘 관입시험기 적용성 평가

개발한 개량형 동적 콘 관입시험기의 현장 적용성을 평가하기 위해 국내 현장 2개소에서 시험을 수행하였다. Fig. 10는 현장시험을 실시한 현장중 “국도 23호선 익산함열 다중교차로 개선공사” 현장의 종단면도를 나타낸다. 종단면도에서 나타낸 8개의 시추조사 개소 중에서 다양한 지반 분포 상황과 현장 여건을 고려하여 BH-1, BH-2, BH-5개소를 시험 대상으로 선정하고 개량형 동적 콘 관입 시험(Tsukuba type)을 수행하였다.

시험을 수행한 BH-1에는 개량형 동적 콘 관입시험기의 적용 대상이 되는 심도 6m내에 표층에서 3.7m까지 점토

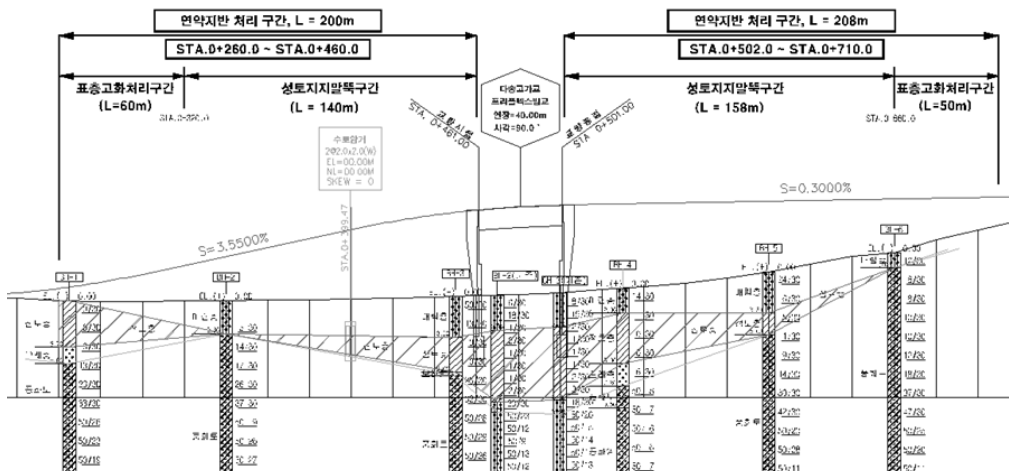


Fig. 10. Longitudinal section of betterment of No.23 national highway

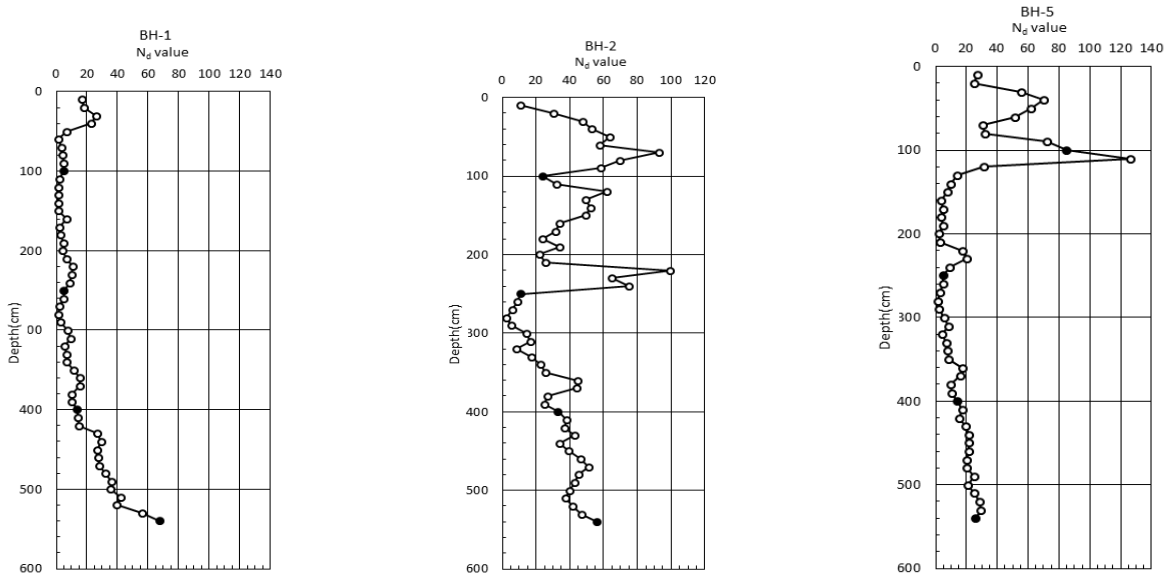


Fig. 11. Advanced dynamic cone penetration test results (Tsukuba type, No.23 national highway)



Fig. 12. Boring investigation and advanced cone penetration test (in Paju)

층이 있고 아래에 모래층에 존재하여 SPT N_{60} 값이 0에서 점차 증가하는 경향을 나타낸다. BH-2는 2.6m까지 매립층이 있고 이후에 단단한 풍화토 층이 있어 N_{60} 값이 증가한다. BH-5는 표층에 매립층이 있어 높은 N_{60} 값을 나타내며, 아래에 점토층이 존재하여 N_{60} 값이 감소하는 경향을 가진 지층구조를 가진다. 이와 같이 각기 다른 특징을 가진 지층을 대상으로 시추 조사 실시하고 동일한 위치에서 개량형 동적 콘 관입시험기를 수행하였으며 실험 결과를 Fig. 11에 나타낸다.

개량형 동적 콘 관입시험(Tsukuba type)결과, SPT의 N_{60} 값과 유사하게 NH-1의 경우 점토층에서 낮은 타격횟수를 나타내며 모래층이 존재하는 4.0m 부근에서 타격횟수가 증가함을 알 수 있다. BH-2에서는 매립층도 층과 풍화토 층이 있어 심도가 증가할수록 타격횟수 또한 증가하나 매

립층에서 매립쇄석 등의 영향으로 몇 개소에서 높은 타격횟수를 나타낸다. BH-5의 결과에서는 표층의 매립층으로 높은 타격횟수를 나타내며 점토층에 존재하는 3m 부근에서 그 값이 낮아져 SPT 결과와 유사한 경향을 나타낸다.

개발된 시험기의 두 번째 현장으로 파주시 탄현면의 “강널말뚝 항타 시험구간”에서 시험을 수행하였다(Fig. 12). 현장시험은 적용방법을 달리하며 1개소의 시추조사 지점에 일본식 간이 동적 콘 관입시험기 Tsukuba, PWRI, SH type을 적용하여 타격심도와 타격횟수의 관계를 정리하였다.

시추결과 시험부지는 개량형 동적 콘 관입시험기의 최대 심도인 6m까지 균일한 매립층이 존재하며, 심도 4m까지 연약한 점토 섞인 실트질 모래층이 있어 N_{60} 값 3~4의 일정한 값을 나타낸 후, 심도가 증가함에 따라 N_{60} 값이 증가하는 경향을 나타낸다.

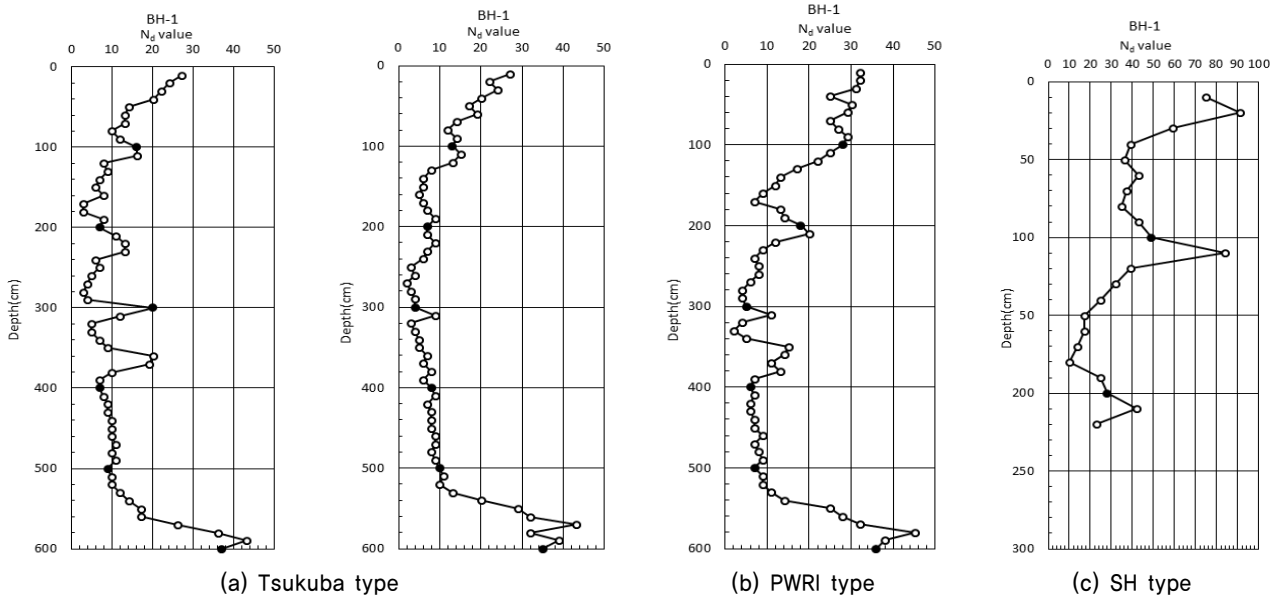


Fig. 13. Advanced dynamic cone penetration test results (in Paju)

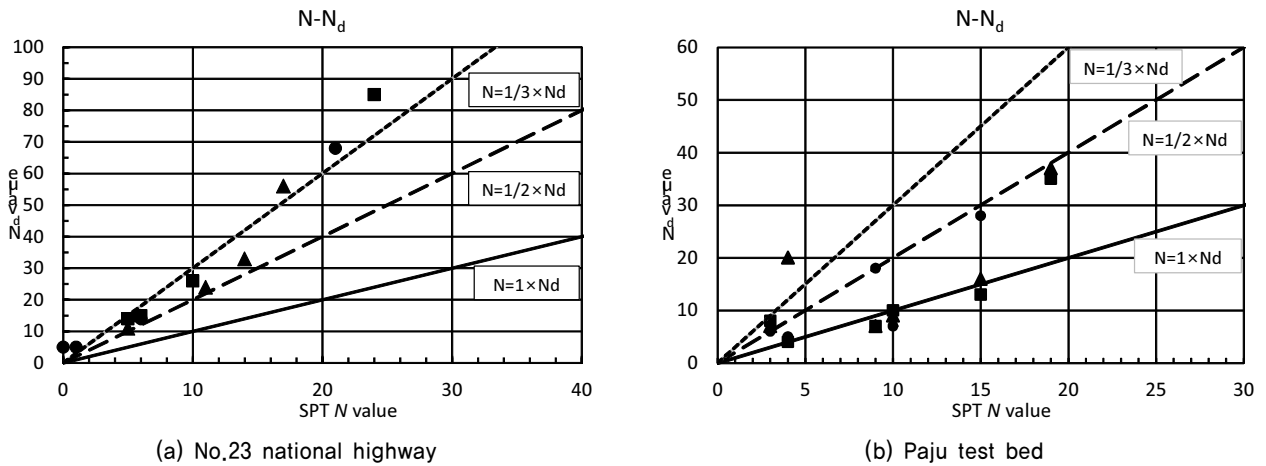


Fig. 14. Relationships between N_d and N values

Fig. 13(a)에 일본 Tsukuba type의 시험 결과에서 동일한 시험기를 2회 시험한 결과, 초기에 높은 낙하 횟수를 나타낸 후 1m이상의 심도에서 낙하횟수는 감소하며 다시 4m부근에서 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 Fig. 17(b), (c)의 다른 일본식 PWRI type과 SH type의 시험결과에서도 비슷한 경향을 나타낸다. 이와 같은 국내 2개소의 시험부지의 결과를 Kobayashi(2012)가 제안한 주면 마찰의 영향을 제거한 N_d 값과 N 값의 관계로 정리하여 Fig. 14에 나타낸다. 그림(a)에서 국도 23호선에서 수행한 시험 결과는 시추조사를 통한 토질분류에서 사질토로 분류되고 SPT N 값과 N_d 의 관계에서 $N \approx (1/2 \sim 1/3) \times N_d$ 의 영역에 분포하거나 더 낮은 값을 나타낸다. 이는 시험 개소에 자갈 등에 의한 굵은 골재가 산재하여 일정 관입량에 대한 타격

횟수가 증가한 값으로 판단된다. 그림 (b)는 파주에서 수행한 두 번째 현장 시험결과로 점성토 $N \approx (1 \sim 1/2) \times N_d$ 의 관계와 유사한 분포를 나타내고 시추조사를 통한 토질 분포인 점성토의 특징이 잘 반영됨을 알 수 있다. 시험결과 중에서 $N \approx 1/2 \times N_d$ 보다 약간 낮은 값을 나타내는 경우는 시험시점의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 즉, 시추조사 당시에는 우천으로 인하여 표층이 매우 연약하게 판정되었으나, 콘 관입시험 수행 시에는 건조한 조건에서 수행하여 심도 1m까지 단단한 지반조건을 나타낸 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 지반조사를 보다 신속 정확하게 수행하

기 위한 목적으로 개량형 동적 콘 관입시험기를 개발하였고, 현장시험을 통하여 그 적용성을 평가하였다. 연구 결과를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 기존의 동적 콘 관입시험기의 장점인 이동성, 접근성 및 간이성을 반영하여 개량형 동적 콘 관입시험기를 제작하였다. 본 시험기는 사용목적 및 현장 조건에 따라 3, 2, 3kg의 해머와 적절한 콘을 조합하여 독일식 동적 콘 관입시험기(8kg) 혹은 일본식 간이 동적 콘 관입시험기 Tsukuba type, PWRI type(5kg), SH type (3kg)과 동일한 조건에서 시험을 수행할 수 있다.
- (2) SPT N값이 1이하인 연약한 지반에 대한 강성을 검토할 수 있으며, 관입심도를 1m에서 6m까지 연장시켜 측정할 수 있다. 또한, 탈/부착 가능한 수직도 조절장치를 개발하여 깊은 심도에 대한 실험값의 신뢰성을 확보하였다.
- (3) 현장시험을 통하여 SPT N값과 콘 저항값에 대한 관계를 기존 제안식에 의해 확인하였으며, 사질토 지반 및 점성토 지반에 대한 실험을 수행하여 Kobayashi(2012)가 제안한 주면 마찰의 영향을 제거한 N_d 값과 N값의 관계와 비교하여 적용성을 검토하였다.

본 연구에서 개발한 개량형 간이 동적 콘 관입시험기의 현장 적용성을 보다 면밀히 평가하기 위해서는 다양한 현장 지반조건을 반영한 추가적인 연구가 필요하다. 특히, 국내외 현장에서 널리 활용되어 빅데이터를 확보하고 있는 SPT N값과의 비교/분석을 수행한다면 개발 시험기의 현장 활용성이 크게 증대될 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant(14RTRP-B071526-02) from Railroad Technology Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government

References

1. Ajayi, L. A. and Balogun, L. A. (1988), "Penetration testing in tropical lateritic and residual soils-Nigerian experience", *Proc. of the International Symposium on Penetration Testing*,

- ISOPT-1, Orlando, 2, pp. 315-28.
2. Chang, M. F. (1988), "In Situ testing of residual soils in Singapore", *Proc. of the 2nd International Conference on Geomechanics in Tropical Soils*, Singapore, 2, pp. 97-108.
3. Kim, B. I., Jeon, S. I. and Lee, M. S. (2006), "Comparison of Field Bearing Capacity Tests to Evaluate the Field Application of Dynamic Cone Penetrometer Test", *Journal of Korean Society of Road Engineers*, Vol. 8, No. 4, pp. 75-85.
4. Koo, J.-K, Yi, C.-T (2003), "Correlations between the CPT and the SPT for the Residual Soil in Korea", *Journal of Korea institute for Structural Maintenance Inspection*, Vol. 7, No. 3, pp. 231-239.
5. Kweon, B. S. (2009), "캄보디아 송변전망 건설 프로젝트에 적용된 Dynamic Cone Penetration Test 사례 및 향후 활용방안", *Korean Geotechnical Society Journal*, Vol. 25, No. 11, pp. 30-35.
6. Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell John J. M. (1997), "Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice", *Blackie Academic and Professional*, London. UK.
7. Luo X., Salgado R. and Altschaeffl A. G. (1998), "Dynamic Cone Penetration Test to Assess the Mechanical Properties of the Subgrade Soil", *Purdue Univ.*, FHWA/IN/JTRP-98/13, final report.
8. Meigh, A. C. and Nixon, I. K. (1961) Comparison of In Situ Tests for Granular Soils, *Proc. 5th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, Vol. 1, pp. 499-507.
9. Meyerhof, G. G. (1956) Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 82, No SM1, January, 866, pp. 1-18.
10. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011), "포장 하부구조 다짐관리 잠정지침".
11. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012), "도로설계기준", pp.7.10-7.17.
12. Oh, H.-J. (2010), "Reliability Analysis and Resistance Characteristics of Dynamic Cone Penetration according to Ground Characteristics", Master Thesis, *Korea National Univ. of Transportation*.
13. Oh, H.-J., Lee, B.-J., Lee, J.-K. and Oh, S.-U. (2009), "Relationship between the DCPT and the SPT", *Korean Geo-Environmental Conference*, pp.132-135.
14. Scala, A. J. (1956), "Simple Methods of Flexible Pavement Design Using Cone Penetrometers", *Proc. 2nd Australian-New Zealand Conf. Soil Mech and Found Engg.*
15. Schmertmann, J. H. (1970), "Static cone to compute static settlement over sand", *ASCE Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol.96, No.SM3, May, pp.1011-1043.
16. American Society for Testing and Materials (2001), "Standard Test Method for Use of the Dynamic Cone Penetrometer in Shallow Pavement Applications", *ASTM D 6951-03*, <http://>

www.astm.org/

17. 奥西一夫, 飯田智之 (1978), “愛知県小原村周辺の山崩れについて(I), 斜面形土層構造と山崩れについて”, *京大防災研年報*, 21B-1, pp.297-311.
18. 木村好延, 谷垣勝久 (2012), “河川堤防における簡易動的コーン貫入試験の実施例”, *全地連「技術フォーラム2012」新潟*, CD-ROM.
19. 小林豊, 谷内江敬太, 石尾政男, 小島一宏, 森本崇 (2012), “簡易動的コーン貫入試験の適用性について(その2)”, *全地連「技術フォーラム2012」新潟*, CD-ROM.
20. 谷内江敬太, 松本和正, 石尾政男, 小林豊, 宮西広基, 森本崇 (2013), “簡易動的コーン貫入試験器の改良について”, *全地連「技術フォーラム2013」長野*, CD-ROM.