

연약지반 개량후 교대구간 수평지반반력계수 적용 사례

Application of Horizontal Subgrade Reaction Modulus to Bridge Abutment Design after Soil Improvement

김경태¹⁾, Kyung-Tae Kim, 박시범²⁾, See-Boum Park, 김창현³⁾, Chang-Hyun Kim, 이종범⁴⁾, Jong-Bum Lee, 윤여원⁵⁾, Yea-Won Yoon

- 1) 한국종합기술개발공사 지반부 차장, Deputy General Manager, Korea Engineering Consultants Corp.
- 2) 한국종합기술개발공사 항만부 대리, Assistant Manager, Korea Engineering Consultants Corp.
- 3) 한국종합기술개발공사 지반부 부장, Senior Manager, Korea Engineering Consultants Corp.
- 4) 한국종합기술개발공사 지반부 상무, Managing Director, Korea Engineering Consultants Corp.
- 5) 인하대학교 환경토목공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng, Inha University.

SYNOPSIS : In soft ground, There are many case that Bridge Abutment is constructed after soil improvement in order to reduce the Negative Friction and prevent from Lateral Soil movements of Bridge Abutment. That section of Horizontal Subgrade Reaction Modulus(K_h) derivation has much important mean due to Horizontal Stability of Abutment. It is come from behavior of Pile and Soil within depth of $1/\beta$. After Soil Improvement, however, If Bridge Abutment was construction, It's not impossible to carry out Field Investigation After Ground of Improved at design stage. Therefore, It's not able to derivate Horizontal Subgrade Reaction Modulus(K_h). Therefore, in this case of study compare with Field Construction Test Data in order to derivation of Horizontal Subgrade Reaction Modulus(K_h) and Reliability in terms of ground of Bridge Abutment by Sand Compaction Pile(SCP) during design of The 2nd Bridge Connection Road of Incheon International Airport.

In this paper determine, Soil Property(The rate of strength increase, c_u so on) and Horizontal Subgrade Reaction Modulus(K_h) after soil improvement at design stage.

Key words : Lateral soil movements, Horizontal subgrade reaction modulus(K_h)

1. 서 론

연약지반구간에서는 교대기초의 측방유동방지 및 부마찰력발생 저감을 위하여 지반개량 후 교대기초를 시공하는 경우가 많다. 이러한 경우 교대기초의 안정성에 영향을 미치는 인자로는 강도정수, 변형계수, 수평지반반력계수 등이 있다. 특히 교대의 수평방향 안정검토시 말뚝상단에서 $1/\beta$ (말뚝특성치) 깊이 까지 에서의 말뚝 및 지반에 변형이 있는 것으로 간주하므로, 이 구간의 수평지반반력계수는 수평방향의 안정성에 큰 영향을 미치므로 말뚝 상단부 지반에 대한 수평지반반력계수 산정은 중요한 의미를 내포하고 있다.

수평지반반력계수 산정방법으로는 변형계수, N 치, c_u , 공내재하시험에 의한 방법 등을 들 수 있으며, 이 중에서 공내재하시험에 의한 결과가 가장 신뢰성 있는 것으로 판단되어 설계시 많이 사용하고 있는 실정이다.

그러나 지반개량 후 교대기초가 시공되는 경우에는 설계단계에서 장래 개량된 지반에 대한 현장시험을 할 수 없으므로 수평지반반력계수의 추정이 불가피하다.

따라서 본 연구에서는 인천국제공항 제2연육교건설공사 설계사례를 통하여 연약지반구간을 P.B.D 및 모래다짐말뚝공법(S.C.P) 의하여 개량 후 교대기초를 시공하는 경우에 대한 수평지반반력계수 평가 방안을 다음과 같은 절차로 검토하였다.

첫째, 원 지반에 대하여 각종 수평지반반력계수 산정방법별 검토결과를 토대로 신뢰성 있는 산정방법으로 LLT에 의한 방법과 CPTu의 비배수강도를 이용한 Davisson방법을 선정하여 상관관계 분석을 수행하였다.

둘째, 향후 개량된 지반에 대한 강도정수는 강도증가율을 고려하여 산정하였으며, 이를 토대로 원지반과 개량된 지반이 혼재하는 복합지반에서의 강도정수를 산정하였다

셋째, 개량된 지반의 수평지반반력계수는 앞서 산정한 강도정수를 토대로 Davisson방법으로 산정하였다.

넷째, 산정된 수평지반반력계수는 LLT와 Davisson방법의 상관관계분석으로 도출된 상관식으로 보정하였다.

마지막으로, 이러한 일련과정을 통하여 산정된 수평지반반력계수의 신뢰성 검토를 위해 본 검토현장과 유사한 하중규모이고 인접한 구간인 인천국제공항관련 시험시공자료 중 개량전·후 변형계수를 비교, 검토하였다.

이상과 같이 연약지반개량 후 교대가 시공되는 경우에 설계단계에서 정확한 지반특성 파악이 곤란하므로 원 지반상태에 대한 시험결과로 개량 후 지반특성을 추정해야 되며 따라서 지역, 지반특성, 상부구조물별 수평지반반력계수 등의 자료 축적이 필요할 것이다. 또한 조사단계에서 개량 후 지반특성을 파악하는데 필요한 제반정수(강도증가율, c_u 등)를 파악하여 보다 신뢰성 있는 값을 도출할 수 있는 조사항목 및 수량의 검토가 필요할 것이다.

2. 사례현장 및 지반특성

2.1 현장위치 및 지층개요

본 사례지역은 영종도내 인천국제공항 인근지역으로 행정구역상으로 인천광역시 중구 운서동~운남동을 연결한다. 향후 1)제2연육교와 기존도로망을 상호연결하는 접속구간으로 연약지반구간에 단교량 6개소가 계획되었다.

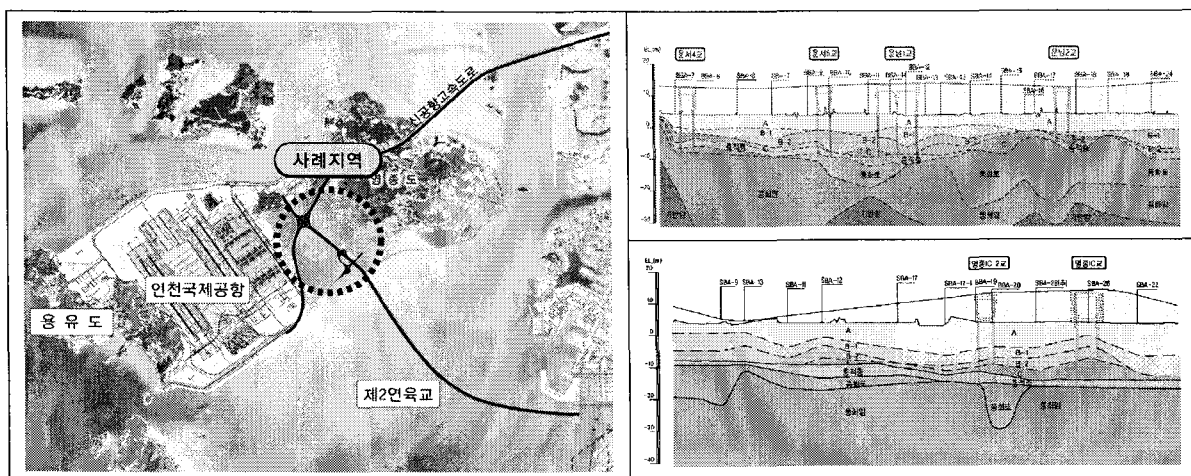


그림 1. 사례 현장 개요도

연약지반구간의 층서는 매립층, 퇴적층, 충적층, 풍화토, 풍화암의 층서를 보이며, 퇴적층 두께는 5~17m 정도로 해안으로 갈수록 깊이 분포하는 특성을 보인다. 또한 퇴적환경에 따라 수직적으로 4개의 층으로 세분화된다.

2.2 연약지반특성

2.2.1 물리적특성

함수비는 25~60%(평균40%), 액성한계는 28~49%(평균34%), 간극비는 0.83~1.45(평균1.15)로 대부분 비활성내지 보통 점토로 통일분류에 의하여 CL, ML로 분류되고, 극소수의 CH가 존재하는 것으로 나타났다.(그림 2~그림 4)

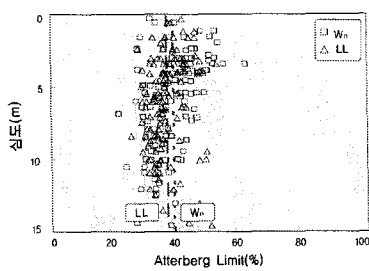


그림 2. 에터버그 한계

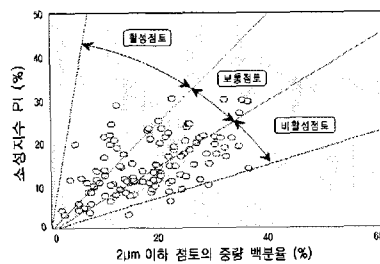


그림 3. 활성도

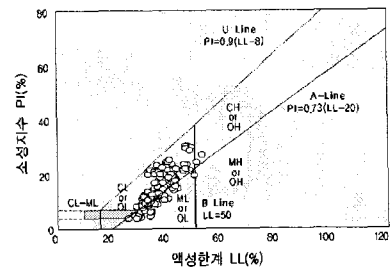


그림 4. 소성차트

2.2.2 역학적 특성

교대기초의 수평방향 안정성에 영향을 미치는 $1/\beta$ 심도(약6.0m, A층)에서 비배수강도는 0.1~0.15 kgf/cm^2 (평균0.13), 강도증가율은 0.23~0.28(평균0.238), 압축지수는 0.276~0.375(평균0.327)의 분포 특성을 보인다.

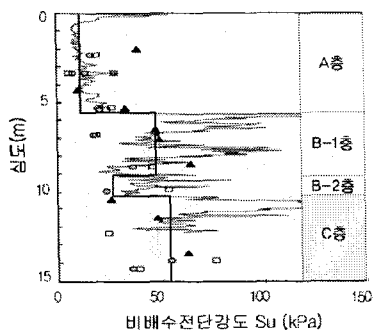


그림5. 비배수강도

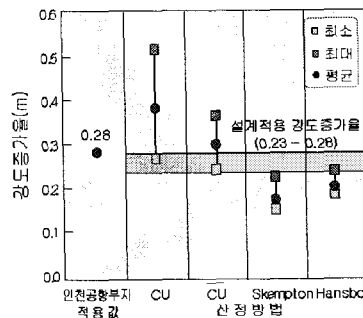


그림6. 강도증가율

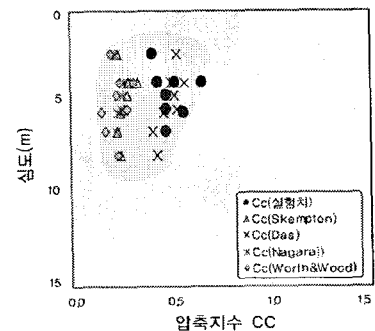


그림7. 압축지수

3. 교대시공현황 및 고려사항

본 검토에서 적용된 대상현장은 연약층의 평균심도가 10m정도로, 침하율이 12%정도로 나타나는 구

간으로 일반성토구간은 PBD공법과 과재성토로 지반을 개량하였고, 교량교대구간은 모래다짐말뚝(SCP) 공법과 과재성토공법으로 지반을 사전개량한 후 교대를 시공하는 것으로 시공개요는 그림 8.과 같다.

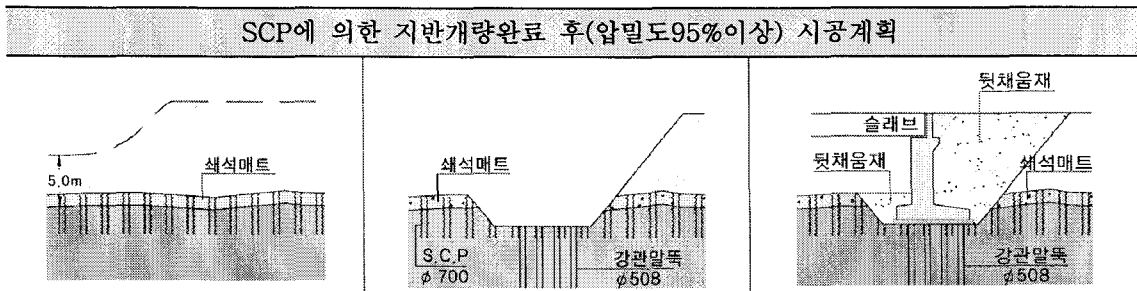


그림 8. 교량 교대부 시공개요

지반개량시 적용된 설계조건으로는 최종 쌓기고 약11m에 대하여 4단계 나누어 단계쌓기를 계획하였으며 최종 단계시 압밀도는 95%이상 확보하였고 허용잔류침하량은 토공부와 구조물접속부의 부등침하를 감소시키고자 5.0cm이하로 강화된 설계기준을 적용하였다.

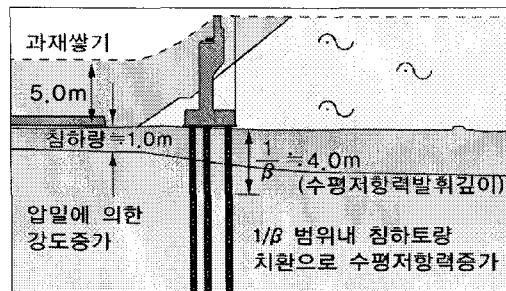


그림 9. 개량된 지반의 교대시초 시공시 고려사항

따라서 원 지반은 과재쌓기에 의한 압밀과 복합지반형성에 의하여 그림 9.와 같이 전단강도 및 수평저항력이 증가되어 지반개량 후 증가된 지반제정수의 추정이 필요하다. 특히 연약지반 교대부는 수평방향 안정이 중요하므로 수평저항력발휘깊이(1/β이내)에 대한 적절한 수평지반반력계수의 평가가 필요하다.

4. 수평지반반력계수 산정방법

수평지반반력계수를 산정하는 방법에는 현장시험, 유도식에 의한 방법 등 여러 가지 방법이 있고 이중 재하시험에 의한 방법이 신뢰성이 높으나 현실적으로 모든 위치에서 실시할 수 없으므로 N치를 이용하는 Hukuoka, 도로교표준시방서에서 제시한 방법이 많이 이용되고 있는 실정이다.

표1. 수평지반반력계수 산정방법

구 분		적 용 식
시 험 결 과 이 용	·수평재하시험	·수평재하시험에서 구한 하중-변위 곡선으로부터 K_h 산정
	·공내재하시험	· $k_h = \frac{\pi}{2} K_m \left[\frac{2R_o (R_m - R_o)^2}{D v^2} \right]^{1/4}$
	·비배수강도시험 (Dvisson방법)	· $K_h = 67 C_u / D, K_h = 8N/B$

구분	적용식
경험식	· 구조물기초설계기준 · $K_h = (1.6E_m)/B \Rightarrow$ 점성토, $K_h = (3.3E_m)/B \Rightarrow$ 사질토
	· 도로교 설계기준 · $K_h = K_{ho} (B_H/30)^{-3/4}$, $K_{ho} = (1/30)\alpha E_0$ · $K_h = 0.34 \times (\alpha \cdot E_0)^{1.1} \times d^{-0.31} \times (EI)^{-0.1}$
	· Hukuoka 공식 · $K_h = 0.691 N^{0.406} (kg/cm^3)$
	· Vesic · $K_h = 0.016 \times (1 \sim 1.3) \times E_s (kg/cm^3)$

※ 공내재하시험결과 이용시, 수평력이 작용하는 깊이(1/β)에 해당하는 값사용

표2. 변형계수 산정방법에 따른 α의 결정

변형계수 $E_0 (kgf/cm^2)$	α	
	정상시	지진시
지름 30cm의 강제원판에 의한 평판재하시험을 반복시킨 곡선에서 구한 변형계수의 1/2	1	2
보링 공내에서 측정된 변형계수	4	8
공시체의 1축 또는 3축압축시험에서 구한 변형계수	4	8
표준관입시험의 N값에서 $E_0 = 28N$ 으로 추정된 변형계수	1	2

표3. 토질조건에 따른 변형계수 기준

흙의 종류	변형계수 $E_0 (kgf/cm^2)$		
	NAVFAC DM-7	도로교 표준시방서	한국지반공학회
실트, 모래질 실트	4N	28N	12N
가는내지 중간모래	7N		
굵은 모래, 자갈이 함유된 모래	10N		
모래질 자갈, 자갈	12N		

5. 원지반의 수평지반반력계수 산정

그림 10.은 원지반에 대하여 각각의 방법별 심도에 따른 수평지반반력계수의 분포특성을 보여주고 있다. 비배수전단강도를 이용한 Davisson방법이 1.37~7.37kg/cm³으로 분석폭이 크게 나타났고, 후쿠오카 및 구조물기초설계기준에 의한 방법은 0.166~1.65kg/cm³ 범위로 분포하며, 현장재하시험인 LLT의한 방법은 0.520~1.397kg/cm³정도의 분포특성을 보이고 있다.

전반적으로 Davisson, LLT, 후쿠오카, 구조물기초설계기준 순으로 수평지반반력계수가 작게 산정되는 경향을 보이고 있다.

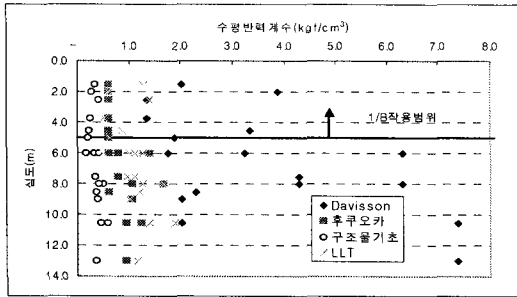


그림10. 수평지반반력계수의 산정방법 비교

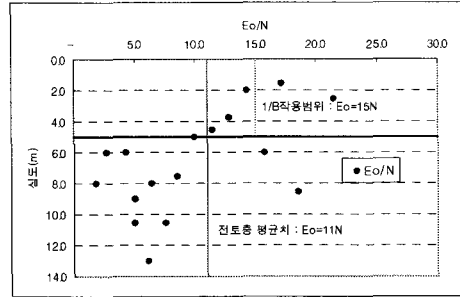


그림11. $E_0 - N$ 의 상관성

변형계수와 N치의 상관관계는 흙의 종류에 따라 4~12N, 이인모 등(1996)은 $E_0=2\sim 6N$, 개선된 강관 말뚝의 설계와 시공(1997)에서는 $E_0=8\sim 17N$ 로 제안하였으며, 도로교 설계기준제안치인 $E_0=28N$ 은 과도한 값이라고 보고되고 있는 실정이다. 따라서 본 검토에서 $E_0 - N$ 의 상관관계를 분석한 결과 전토층에 대하여는 $E_0=11N$, $1/\beta$ 범위 내에서는 $E_0=15N$ 의 상관관계를 나타냈다

이상과 같이 시험방법 종류에 따른 결과값의 분산폭이 크고 대상지층이 연약한 점성토이므로 N치에 의한 제반정수 산정은 큰 불확실성을 내포하므로 Hukuoka식 및 $E_0 - N$ 의 상관관계에 의한 방법은 배제하였고, 신뢰성이 큰 것으로 판단되는 공내재하시험(LLT)에 의한 현장재하방법과 비배수강도를 이용한 Davisson방법($K_h = 67C_u/D$)에 의한 결과를 이용하였다. 비배수전단강도 산정방법으로는 심도별 연속적인 비배수강도측정이 가능한 피조콘시험(CPTu)에 의해 산정된 비배수강도를 이용하였다.

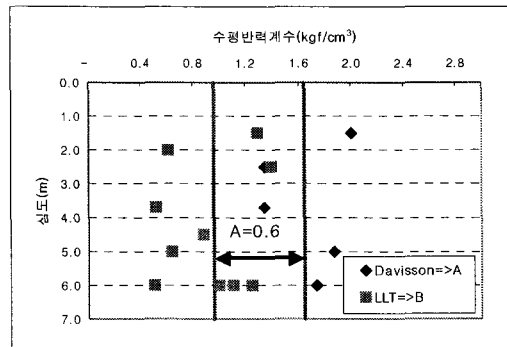


그림12. LLT와 Davisson방법의 상관성

그림 12.는 LLT에 의한 방법과 비배수강도를 이용한 Davisson방법의 상관관계를 분석한 그래프이다. 분석결과 CPTu의 k_h 가 LLT의 k_h 보다 17%크게 나타나 $k_h(LLT)=0.6k_h(CPTu)$ 의 상관식을 유추하여 추후 지반개량후의 수평지반반력계수 추정시 보정토록 하였다.

6. 모래다짐말뚝(SCP)에 의하여 개량된 지반의 수평지반반력계수 산정

모래다짐말뚝에 의한 복합지반 및 단계성토에 의한 압밀완료 후 개량된 지반에 대하여 강도는 다음 표 4.와 같은 방법으로 산정하였고 산정결과 그 값의 분포범위는 다음과 같이 나타났다.

표4. SCP에 의한 지반 개량후 강도정수 산정방법

구 분		원지반 강도정수	SCP 복합지반 강도정수	단계성토완료 후 강도정수
강도정수	점착력	Co: 원위치시험 및 실내시험	$C'=(1-a_s) C_o$	$C=C'+c/p \cdot \Delta\sigma_v \cdot U \cdot I \cdot \mu_c$
	마찰각	$\phi=0$: 점성토	$\phi'=\tan^{-1}(\mu_s \cdot a_s \cdot \tan\phi_p)$	$\phi'=\tan^{-1}(\mu_s \cdot a_s \cdot \tan\phi_p)$
비 고		Co: 원지반비배수강도 ϕ : 원지반 내부마찰각	C': 복합지반 비배수강도 ϕ' : 복합지반 내부마찰각 a_s : 치환율(As/A) μ_s : 응력집중계수 ϕ_p : 모래의 내부마찰각	C: 개량 후 복합지반 비배수강도 c/p: 강도증가율 $\Delta\sigma_v$: 성토하중 U: 압밀도, I: 영항계수 μ_c : 응력저감계수

표5. 복합지반 강도정수 산정결과

구 분	단위중량 (tonf/m ³)	강도증가율	원지반		개량완료후		비고
			점착력 (tonf/m ²)	마찰각(°)	점착력 (tonf/m ²)	마찰각(°)	
분포범위	1.70 ~1.75	0.23 ~0.24	1.0 ~1.4	-	4.2 ~4.9	9.6	1/β 범위

그림13.은 개량 후 복합지반에 대한 수평지반반력계수를 산정한 결과를 원지반에 대한 공내재하시험(LLT)의 결과치와 비교분석한 그래프이다.

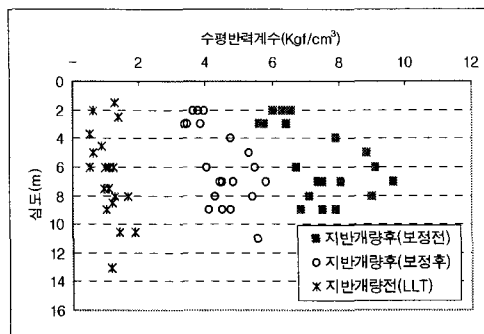


그림 13. 지반개량 후 수평지반반력계수

비배수강도를 이용하여 산정하는 Davisson방법($K_h = 67C_u/D$)으로 구조물별 5.63~9.65kg/cm³ (평균 7.11)의 분포범위를 보이며, 원지반에서 분석된 LLT/CPTu 상관관계 [$k_h(LLT)=0.6k_h(CPT)$]에 의해 보정한 최종 적용 수평지반반력계수는 3.38~5.79kg/cm³ (평균 4.27)분포특성을 보이고 있다.

이상과 같은 결과는 원 지반에 대한 공내재하시험값 0.504~1.883kg/cm³(평균 1.093)보다 보정전은 약6배, 보정후는 4배정도 증가한 것으로 나타났다.

7. 시공사례분석을 통한 개량 전·후 지반특성변화 경향분석

인접 및 유사지역에 대한 시공사례를 분석하기 위하여 연직배수공법별 지반개량 전후 평가가 이루어진 “인천국제공항 부지조성공사 시험시공” 자료를 검토하였다.

표 6.는 설계시 적용된 지반 제정수이며, 구간별 적용공법현황으로 성토고가 사례구간과 유사한 10~12m 정도이고, 압축지수 및 강도증가를 또한 0.28, 0.25로 본 사례구간과 유사한 지반특성을 보인다.

표6. 지반제정수 및 구간별 연직배수공법 적용현황

지반 정수		구간별 적용공법	
함수비(wn,%)	30-33	YARD-I	Sand Compaction Pile
액성한계(LL,%)	37-40	YARD-II	Sand Drain
간극비(대)	0.89-0.93	YARD-III	Paper Drain
압축지수(Cc)	0.28	YARD-VI	Pack Drain
비배수강도(c_u)	4.7-5.0	YARD-V	선행재하공법
성토고	10-12	YARD-VI	선행재하공법
강도증가율	-	-	-

그림 14.는 구간별 개량 전·후 지반에 대하여 공내재하시험(LLT) 결과를 분석하여 개량전 1.86~13.45 kgf/cm³에서 개량후 4.72~16 kgf/cm³로 약 3.5배 정도 증가됨을 확인하였다.

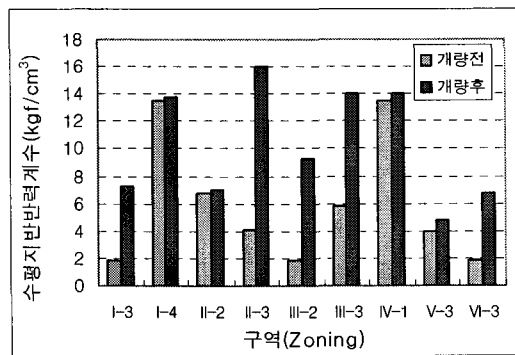


그림14. 지반개량 전·후 수평지반반력계수(인천국제공항 시험시공결과)

따라서 본 사례구간의 경우 3.38~4.27kgf/cm³로 약간 적은 값을 보이나 원지반 대비 증가율은 약4배로 유사하게 나타났다.

8. 결론 및 제언

모래다짐말뚝에 의하여 연약지반을 개량 후 교대부가 시공되는 경우에 대하여 수평지반반력계수를 산정하기 위하여 원지반과 개량 후 지반의 강도 및 변형특성을 비교분석하였으며, 이를 통하여 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 원지반에 대하여 산정방법별 수평지반반력계수를 분석한 결과 Davisson, LLT, 후쿠오카, 구조물기초설계기준 순으로 수평지반반력계수가 작게 산정되는 것으로 나타났다.
- 2) 대상구간이 점성토이므로 N치를 이용한 추정방법은 신뢰성이 저하되어 적용성이 떨어지며 시험결과를 이용하는 공내재하시험에 의한 방법 및 비배수강도를 이용하는 Davisson 방법이 신뢰할 수 있는 것으로 판단되어 개량된 지반의 수평지반반력계수(k_h) 추정에 이용하였다.
- 3) LLT에 의한 방법과 비배수강도를 이용한 Davisson방법의 상관관계를 분석한 결과 CPTu의 k_h 가 LLT의 k_h 보다 17%크게 나타나 $k_h(LLT)=0.6k_h(CPTu)$ 의 상관관계를 유추하였다.
- 4) 모래다짐말뚝에 의하여 개량된 지반의 수평지반반력계수는 개량지반의 비배수강도를 구한 후 Davisson방법에 의하여 산정하였으며, 산정된 값을 $k_h(LLT)=0.6k_h(CPTu)$ 의 상관관계에 의하여 보정하여 최종 적용 수평지반반력계수를 산정하였다.
- 5) 산정결과 수평지반반력계수는 $3.38\sim 5.79\text{kg/cm}^3$ (평균 4.27)분포범위로 원 지반에 대한 공내재하시험값 $0.504\sim 1.883\text{kg/cm}^3$ (평균1.093)보다 4배정도 증가한 것으로 나타났다.
- 6) 사례구간과 상재하중 및 지반특성이 유사하며 인접한 “수도권 신국제공항 부지조성공사 시험시공 관리용역 보고서”를 분석한 결과 개량 후 지반반력계수는 원지반 대비 3.5배정도 증가하여 사례구간의 증가량과 유사한 것으로 나타났다.

이상과 같이 설계단계에서 개량된 지반의 수평지반반력계수 산정시에는 원지반에 대한 상관관계 설정 후 보정이 필요한 것으로 사료되며, 시공시 확인조사 및 공내재하시험을 통하여 설계의 적정성을 확인하여야 할 것이다. 또한 설계단계에서 개량 후 지반에 대한 수평지반반력계수의 부적절한 평가로 연직배수계에 의한 지반개량 후 EPS, PLIE SLAB등의 추가적인 보강이 필요한 경우가 있으므로 조사계획시 장래 개량된 지반의 강도특성에 영향을 미치는 인자, 즉 비배수강도 및 강도증가율 등을 보다 정확한 산정이 될 수 있는 시험 및 조사계획이 필요할 것이다.

참 고 문 헌

1. 인천 제2연육교 연결도로 건설공사 T/K보고서(2005), 한진중공업.
2. 정하익(2003a) "연약지반개량에 따른 지반의 물리역학적 특성변화", 지반공학회지 연약지반기술위원회 2003 학술세미나
3. 한국토지공사(1999), 연약지반의 압밀특성에 관한 연구
4. 수도권 신국제공항 부지조성공사 시험시공 관리용역 종합보고서, 1995.12, 인천국제공항공사
5. Davisson, M.T.(1970), "Lateral Load Capacity of Piles" *Highway Research Recod* No.333, pp.9~27
6. 구조물기초설계기준 2003, 한국지반공학회, pp.320~333
7. 모래다짐말뚝(SCP)에 의한 복합지반의 응력분담 및 거동연구 2003.8. 학술세미나