

모래다짐말뚝의 품질평가 방법과 프로그램의 개발

Development of a quality evaluation method and computer program of Sand Compaction Pile

전홍수¹⁾, Heung-Soo Jeon, 임종철²⁾, Jong-Chul Im, 강연익³⁾, Yeoun-Ike Kang,
권정근⁴⁾, Jeong-Geun Kwon, 주인곤⁵⁾, In-Gon Joo

- 1) 부산대학교 사회환경시스템공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Civil Engineering, Pusan University
- 2) 부산대학교 사회환경시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan University
- 3) 삼성건설 토목사업본부 과장, Manager, Samsung Engineering & Cooperation
- 4) 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정, Ph.D. candidate, Dept. of Civil Engineering, Pusan University
- 5) 부산정보대학 건축디자인학과 교수, Professor, Dept. of Architecture Design, Busan Info-tech College

SYNOPSIS : Recently soil improvement methods are using in many ways such as costal and soft ground of inland. Among them, sand compaction pile be widely used because of quiet few advantages. There are two ways for quality evaluation method of sand compaction pile. Especially standard penetration test is used the most general method. However, Current method have problems in that it is not consider the condition of construction site. Therefore this study is propose new quality evaluation method. Relation of $N-\Phi$ is always not fixed but changing by condition of construction site. By through the Laboratory test we can know relationship between relative density and internal friction. Also this study propose revision for effective stress. From these study, we can acquire more accurate and reasonable result than current method.

Keywords : quality evaluation, standard penetration test, relative density, internal friction angle

1. 서론

국토 면적이 좁은 우리나라는 해안 및 내륙의 연약지반 활용을 통한 효율적인 국토 이용이 절실한 실정이다. 이 때문에 현재 연약지반 상의 구조물 건설이 많이 요구되고 있으며 더불어 연약지반 상의 구조물의 기초공사 시 안정 혹은 침하에 문제가 되는 지반을 개량하는 여러 공법들이 제시 되어 있다. 구조물의 건설 시 문제점을 발생시키는 연약지반의 개량을 위하여 양질의 재료로 치환하여 비 압축화 하고 전단변형 억제하며 진동성을 개선하는 치환공법, 압밀을 통한 강도증가의 효과를 가지는 압밀공법, 그리고 전단강도 증대 및 액상화방지의 효과를 내는 진동·다짐공법 등이 연약지반을 개량하는 공법으로 현재 사용되고 있고 있다.

그 중 해상의 대형 구조물의 공사 시에 느슨한 모래나 점토로 된 연약지반에 모래를 압입하여 연약층 내에 모래말뚝을 조성하는 모래다짐말뚝공법(Sand Compaction Pile Method, 이하 SCP 공법)이 연약지반의 개량공법으로 널리 사용되고 있다. 이러한 SCP 공법을 적용하면 원 지반에 모래말뚝으로 이루어진 복합지반을 형성하고 함으로서 지반의 전단강도 및 지지력 증대, 측방변위 억제, 압밀침하 저감효과를 등을 가져와 연약지반 상의 구조물 건설 시 안정성 및 침하에 대한 문제점의 개선을 기대 할 수 있다.

이와 같이 현재 국내에서 연약지반의 개량공법으로서 많이 시공되고 있는 SCP 공법의 품질평가방법에는 국내 지방서에 명시되어 적용되고 있는 표준관입시험(Standard Penetration Test)과 물리탐사 방법

이 있다. SCP에 대한 품질평가 시 물리탐사는 국내에서 그 경험이 적으며, 정량적인 평가를 하기에는 모호한 면이 있어 그 적용성이 상당히 결여되어 현재 그 사용이 희박한 실정이다. 이에 대부분의 SCP 시공 현장에서는 표준관입시험을 통한 품질평가를 실시하고 있으며, 또한 실제 시방기준도 표준관입시험의 N치로 제시되어 있다. 하지만 현재의 표준관입시험을 통한 품질평가 방법은 모래말뚝을 압입 시 사용되어지는 현장 모래의 특성이 고려되어 지지 않고 대표적인 몇 가지의 입도에 기초하여 심도에 따라 확인한 N치의 평균이 설계 내부마찰각을 확보하는지에 대한 여부만을 확인하고 있는 실정이며, 실제 현장의 품질평가로서의 보편적 판단기준이 되기에는 모호한 점들을 가지고 있다.

따라서 현재 SCP 품질평가방법으로서 거의 유일한 수단이 되어 있는 표준관입시험 N치에 의한 품질평가 시에 현장에 특성에 맞는 객관적인 근거와 정확성을 지닌 새로운 품질평가방법을 제안하고 더불어 실제 현장에서 현장의 특성을 반영하여 사용되어 질 수 있는 프로그램을 개발하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. SCP 품질평가방법의 개요

SCP와 같은 지반개량공법을 적용할 경우, 설계에서 확보하도록 되어 있는 우수한 품질을 확보하기 위해서는, 시공과정에서 관리하는 시공관리와 시공관리 하에 완성된 제품에 대해 수행하는 품질관리로 구분하여 공사 전 과정에서 관리를 철저히 수행하여야 한다.

SCP 개량지반의 품질평가방법은 사질지반에서의 평가방법과 점성토지반에서의 평가방법으로 구분해서 생각해 볼 수 있다. 지반개량에 있어서 일반적으로 수행되고 있는 시공관리와 품질관리(검사) 항목을 표 1에 나타내었다. 품질검사항목의 대부분은, 개량지반의 요소의 품질확인시험을 실시하는 것으로 되어 있다. 사질지반에서는, 말뚝 사이의 표준관입시험이 개량효과의 판정법이 되는 경우가 많고, 그 외에는 특수한 경우로서, PS 검층 등을 이용하여 그 효과를 확인하는 경우나, 모래샘플러에 의한 불교란시료의 채취, 진동삼축시험 등이 행해지는 경우도 있다. 또 수평저항의 증가를 확인하기 위해서는, 횡방향 지반반력계수의 판정 등도 행해지고 있다.

한편 점성토지반에 대한 개량효과와 그 판정법에 관해서는, 모래말뚝 자신에 대한 것, 모래말뚝 사이의 점성토에 대한 것, 개량지반 전체에 대한 것으로 구분할 수 있다.

표 1. 주된 지반개량공법과 시공관리 · 품질관리

개량 원리	공법명	시공관리	품질관리
다 집	샌드콤팩션파일 공법	케이싱 빈도, 모래투입회수, 모래면 높이	중간지반N치, 모래말뚝심 N치
	정적다집공법	케이싱 빈도, 모래투입회수	중간지반N치, 모래말뚝심 N치
	바이브로플로테이션 공법	롯드심도, 모래투입량, 진동기전류	중간지반N치, 모래말뚝심 N치
	중추낙하다집공법	낙하고, 타격회수	N치, 공내재하시험, 평판재하시험
고 결	천층개량공법	고화재(슬러리) 첨가량, 혼합시간	시공시 채취공시체 강도, 콘관입시험, 평판재하시험
	심층혼합처리공법	고화재(슬러리) 첨가량(유량), 교반익심도, 관입 · 인상 속도, 교반익회전수, 교반익회전부하(전류, 유압)	시공시 채취공시체 강도, 코어채취율, 코어강도
	고압분사교반공법	고화재 슬러리 유량 · 압력, 모니터유량 · 압력 · 스텝, 약액의 겔타임	코어채취율, 코어의 육안관찰 코어강도
	약액주입공법	약액유량 · 압력 · 스텝, 약액의 겔타임	N치, 투수계수, 전기저항, 채취시료의 일축 · 삼축압축시험, 콘관입시험

① 모래말뚝 자신에 관한 판정법

모래말뚝 자신에 관한 것으로서는 표준관입시험이 가장 일반적이다.

② 모래말뚝 사이 점성토에 관한 판정법

모래말뚝 사이 점성토에 관해서는 thin wall sampler에 의한 불교란 시료를 채취하여, 실내시험을 각 시기(타설 직후, 일정기간방치 후, 재하중, 재하후 등)에 행하여 그 변화를 확인하는 것이 된다. 그 결과와 통계시의 제정수의 비교에 의한 안정성의 확인이 이들의 토질조사결과의 판정법이 된다.

③ 개량지반 전체에 대한 판정법

개량지반 전체에 대한 것으로서는, 침하판, 층별 침하계에 의한 연직변위의 판정, 경사계, 변위말뚝 등에 의한 수평변위의 측정, 간극수압계에 의한 드레인 효과, 배수성능의 확인, 토압계에 의한 응력분담비의 측정 등 동태관측을 행하고, 설계추정치와 실제의 비교를 행하는 것에 의해 그 개량효과를 확인하는 경우도 많이 행해져 왔다.

또한, 고치환율에 있어서의 수평저항의 증가에 대한 확인으로는 국부적인 횡 방향 지반반력계수의 조사만이 아니고, 시험말뚝에 의한 수평 재하시험 등도 행해지고, 개량지반 전체에서의 효과를 확인하는 것도 행해지고 있다. 시간적인 안정성에 관해서는 사용재료가 모래나 사리이기 때문에 부식, 풍화의 영향에 의한 열화는 없고, 오히려 점성토 지반에 관해서는 배수로 인해 점성토의 강도증가, 모래말뚝의 구속성이 상승되어 가는 경로를 따른다고 볼 수 있으며, 오히려 재하 직후의 단기간이 가장 주의를 요하는 기간이고, 이후 서서히 안정성이 증가하는 경향을 보인다.

사실 지반에 관해서도 특히 액상화 대책을 실시한 경우, 지층에 의해 강도가 저하한다고 하는 경우는 없고, 안전하게 탱크를 지지하고 있다는 보고도 있다.

일본에서는 SCP 품질평가방법으로서 여러 가지 방법들을 적용하고, 많은 사례를 제시하고 있다. 그러나 현재 국내 지방서에 명시되어 적용되고 있는 SCP의 품질평가방법은 표준관입시험(SPT)과 물리탐사이다. 표준관입시험에 의해서는 시공 전·후의 N치를 비교하여 개량에 의한 다짐도를 확인하는 것이 주목적이다. 그리고 물리탐사는 특히 해상 SCP의 경우는 국내에서는 경험이 그리 많지 않은데다, 정량적인 평가를 하기에는 모호한 면이 있어 그 적용성이 상당히 결여된다. 예로써, 탄성과 토모그래피의 경우 하부지반의 형상 및 밀도, 변형계수 등에 대한 자료를 얻을 수가 있지만, 이 자료로써 품질을 평가할 수 있는 분석방법이 명확하지 않기 때문에 판정법으로 사용하기가 곤란한 실정이다. 따라서, 현재 SCP 품질평가방법으로서는 표준관입시험에 의한 N치를 적절하게 활용하여 더욱 합리적인 품질평가방법을 제안하는 것이 불가피하다고 할 수 있다.

3. 현행 SCP 품질평가방법과 문제점

3.1 SCP 현행 품질평가기준

현행 SCP 품질관리의 기준은 Dunham의 식 $\phi = \sqrt{12N} + C$ 에서 입도의 대표적인 몇 가지 종류 중 유사한 c값을 표 2에서와 같이 선택하여, 표준관입시험을 통한 심도에 따른 N치의 평균값이 설계내부마찰각을 만족하는지에 대한 여부를 그림 1에서와 같이 확인 하고 있다.

표 2. 모래지반의 종류에 따른 C값

모래지반의 종류	C
입도가 균일하고 둥근 입자	15
입도분포가 좋고 둥근 입자	20
입도가 균일하고 모난 입자	20
입도분포가 좋고 모난 입자	25

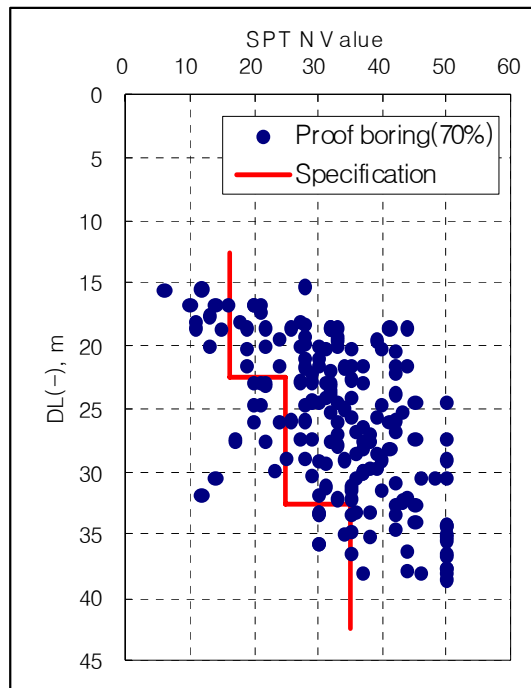


그림 1. 현행 품질평가기준의 예

3.2 현행 품질평가의 문제점

현행 품질평가에서는 사용 모래에 대한 내부마찰각 ϕ_s 의 크기를 설계에서 사용하는 35° (또는 30°)를 확보할 수 있는지 확인만 하고, Dunham의 식 중 모래의 평균적인 $N-\phi$ 관계를 사용하고 있다. Dunham 외에 Terzaghi, Peck(1948), Meyerhof, 大崎 등에 의해서도 N 치에 따른 모래의 내부마찰각의 관계를 밝혀두고 있는데, 이들의 연구에서 알 수 있는 것은 단지 모래의 종류에 따라 $N-\phi$ 의 관계가 다양하다는 결론이 중요한 것이다. 따라서, 투입 모래의 제대로 된 특성을 활용하여 관리할 상대밀도와 N 치를 확보하고자 하는 합리적인 방법이라고는 볼 수 없다.

특히, Dunham(1954)은 $\phi = \sqrt{12N + C}$ 의 형태로 N 과 ϕ 의 관계를 제안하고 C 는 모래지반의 종류(입도분포, 형상)에 따라 그 값을 네 가지로 분류하였다. 이들의 연구는 N 과 ϕ 의 관계가 모래의 종류에 따라 다른 값을 나타낸다는 것을 대표적으로 지적하고 있을 뿐이므로 이들 결과를 그대로 SCP 현장의 품질평가방법에 적용하는 것은 바람직하지 않다고 판단된다.

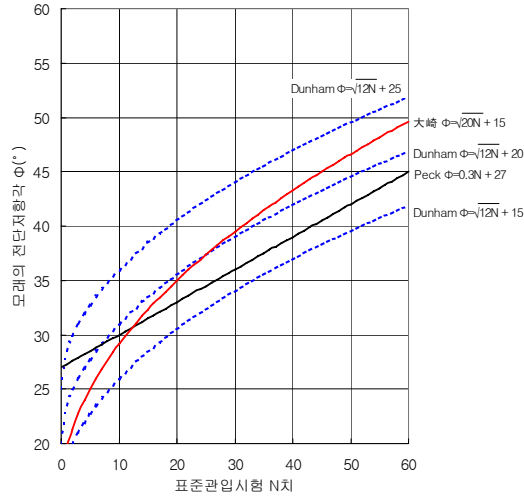


그림 2. 모래의 내부마찰각과 N치의 관계

따라서, 현장에 사용될 SCP용 모래가 결정이 되면 그 재료에 대한 직접전단시험을 실시하여 내부마찰각의 값을 결정하고, 정해진 설계내부마찰각에 해당하는 상대밀도를 안전율을 감안하여 결정하여 상대밀도에 따른 N치의 관계로써 실제 시공된 현장의 품질을 평가하여야 할 것이다.

4. SCP 품질평가방법의 제안

4.1 관리기준치 설정

그림 3과 같이 투입되는 모래의 실내시험을 통하여 상대밀도와 내부마찰각의 관계도를 그림 3과 같이 작성한 후 설계내부마찰각에 대한 상대밀도를 결정하여 관리기준이 되어 질 상대밀도 기준으로 삼는다. 그리고 심도에 따른 N치를 Meyerhof(1956)근사식인 식 (1)로 보정하여 정확한 심도에 따른 관리기준을 설정한다.

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N}{\sigma_v' + 0.7}} \quad (1)$$

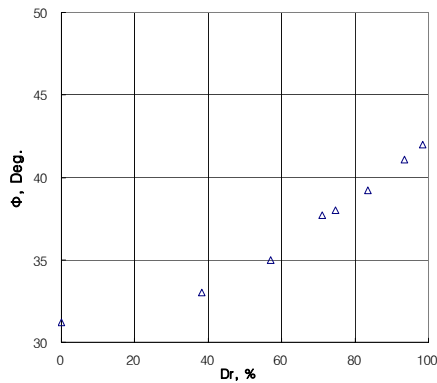


그림 3. 실내시험을 통한 상대밀도에 따른 내부마찰각 ϕ 의 예

심도에 따라 보정한 N치는 관리기준을 삼을 상대밀도에 따라서 그림 4와 같이 관리기준으로 설정하여 투입되는 모래의 특성을 고려한 품질관리를 가능하게 한다.

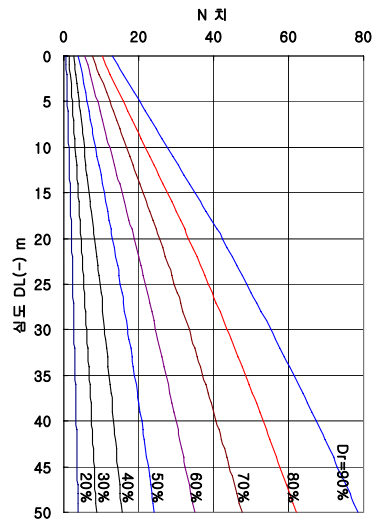
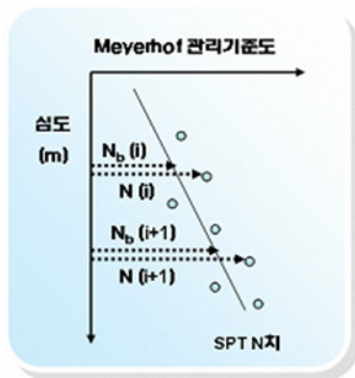


그림 4. Meyerhof 근사식에 의한 관리기준도(예)

4.2 관리기준 만족 여부의 확인



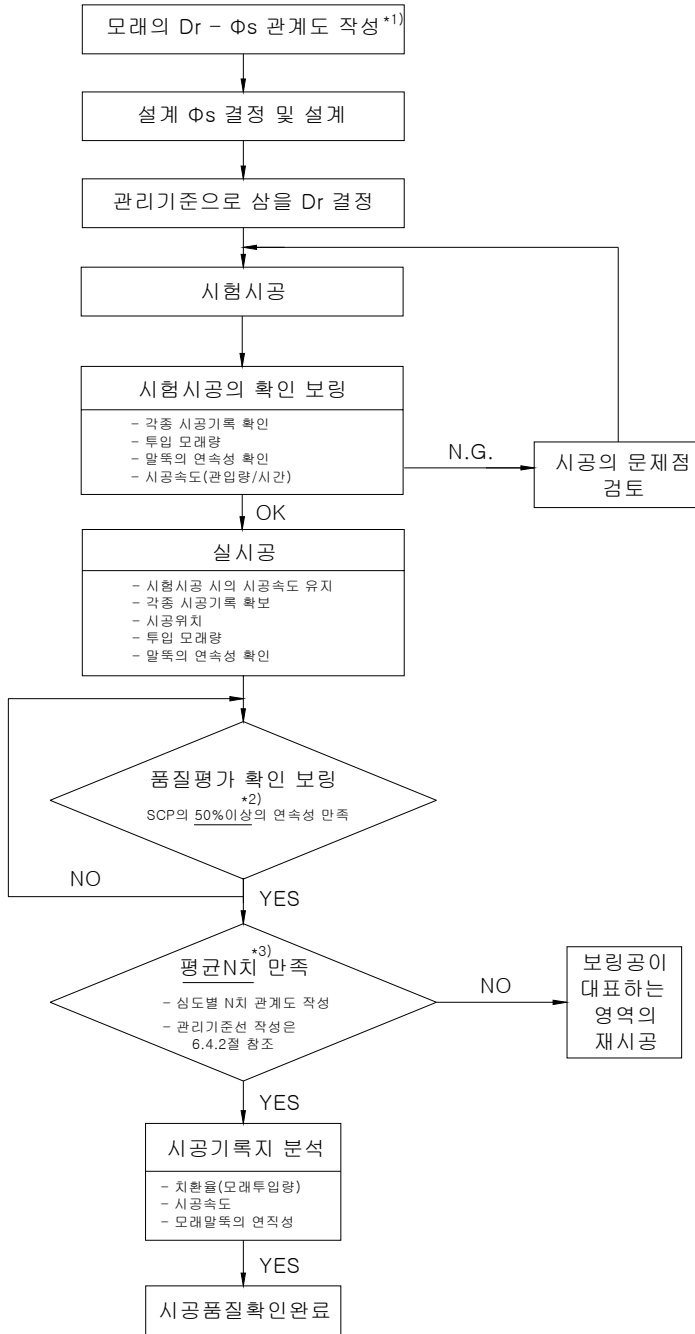
n개의 측정 N치에 대해

$$\sum_{i=1}^n \frac{N(i)}{N_b(i)} \geq 1 \quad (2)$$

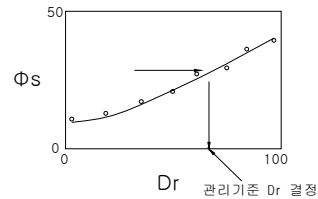
일 경우 평균 N치를 만족하는 것으로 판단

그림 5. 품질평가 기준

SPT에 의한 품질평가는 실제 시험으로 얻은 n개의 N치가 그림 5와 같이 평균 N치의 만족여부에 대한 판단으로 평가한다. 이는 모래말뚝의 일부분의 안정성 평가가 아닌 압입된 모래말뚝의 전체적인 안정성 평가로 합리적인 방법이라 할 수 있겠다. 앞의 관리기준치의 제안과 관리기준의 만족여부를 포함하고 기존의 SPT를 통한 품질확인 내용을 종합하여 현장에서 품질평가 시 합리적이고 정확한 품질평가를 가능하게 하는 Flow Chart를 그림 6과 같이 나타낼 수 있다.



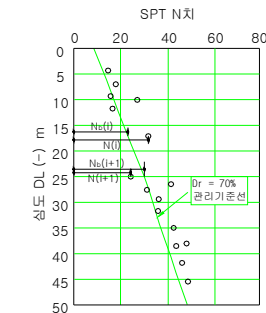
*1) 사용 모래의 Dr - Φs 관계도 예



※ 설계시 사용모래가 결정되지 않았을 경우에는 설계시에는 Φs를 가정하고, 시험시공 전에 반드시 사용모래의 Dr - Φs관계를 구하여 기준으로 상을 Dr를 결정하여야 한다.

*2) 모래의 투입량과 모래단면의 연속성(모래의 집합체로 존재)만 확보되면 전단강도에는 별 변화가 없다(그림 6.1.8) 따라서, 깊이방향으로 50% 이상의 SCP가 확인되면 연속성을 인정하기로 하는 방법을 취하였다. 50%에 대해서는 추후 보다 많은 현장자료와 경험을 토대로 수정할 수 있을 것이나 우선 지표로 제시하고자 한다.

*3) 평균 N치 만족여부 결정방법



n개의 측정 N치에 대해

$$\sum_{i=1}^n \frac{N_i(0)}{N_i(0)} \geq 1$$
 일 경우 평균N치 만족.

그림 6. SCP 품질평가방법의 흐름도

4.3 제안 품질관리 방법의 적용

본 연구에서 제안한 품질평가 방법을 토대로 프로그램을 개발하였고, 이를 적용하기 위하여 SCP가 시공된 OO현장의 시공기록 자료와 품질검증을 위한 현장의 표준관입시험 데이터를 사용하였다. 데이터를 이용하여 개발 된 프로그램에 적용시켜 본 결과는 그림 7과 같다.

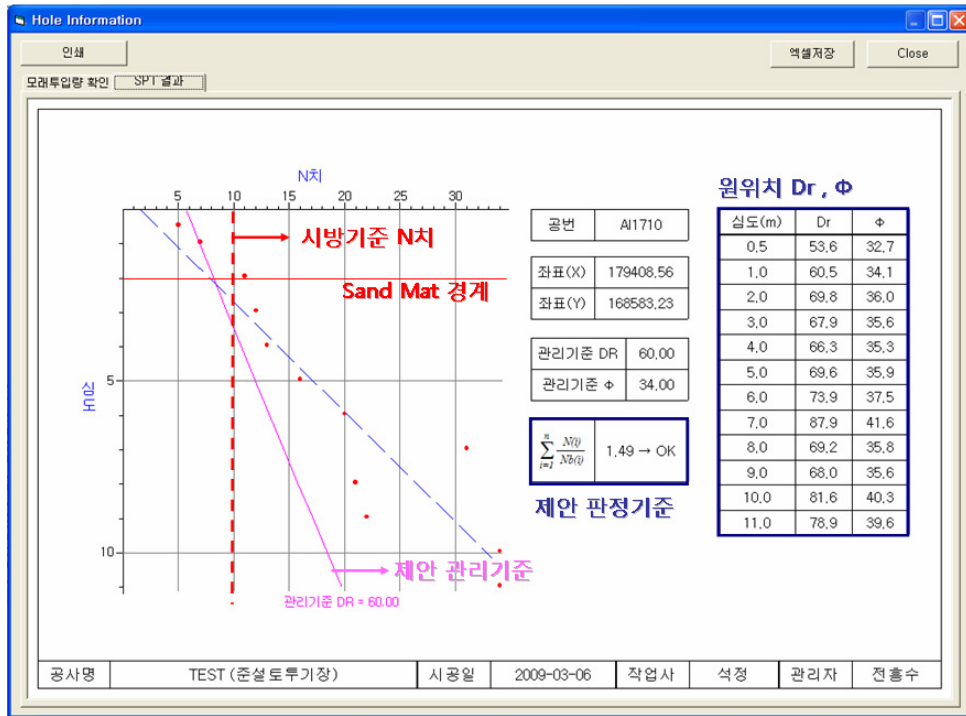


그림 7. 개발 된 프로그램 해석 결과의 예

그림 7에서와 같이 적용현장의 표준관입시험 시방기준 N치는 10으로 규정되어 있다. 하지만 본 연구에서 제안 한 실제 현장에 사용되어지는 모래의 특성을 고려하고, 심도에 따른 유효응력에 의한 보정한 관리기준이 기존의 품질관리 기준보다 더욱 정확한 품질관리 기준을 제시할 수 있으며, 또한 식 (3) 과 같이 N치에 영향을 미치는 인자들의 보정(Skempton, 1986)을 통하여 품질평가 판단 시에도 SPT에 의한 전체적인 경향을 포괄적으로 수용할 수 있는 제안 판정기준이 현행 품질평가 방법의 범주 내에 있으면서도, 심도에 따라 더욱 세밀한 품질평가를 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 실제 실내시험을 통한 상대밀도와 내부마찰각의 관계를 통하여 실제 SPT를 실시한 심도에 대한 원위치 상대밀도와 내부마찰각을 확인 할 수 있는 장점 또한 개발 된 프로그램에서 확인 할 수 있다.

$$N' = N \times \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 \quad (3)$$

- 여기서, N' : 보정한 N값
 N : 각 장 비별 표준관입시험 결과
 η_1 : 로드길이 보정계수
 η_2 : 샘플러 종류에 대한 보정계수
 η_3 : 공경에 대한 보정계수

5. 결론

본 연구에서는 SCP의 품질평가 기준으로 사용되어지고 있는 표준관입시험을 통한 현행 평가방법의 문제점을 고찰하고 그 문제점을 바탕으로 SCP 개량에 사용되어지는 모래의 특성을 반영한 정확하고 합리적인 품질평가 방법을 제안하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 현행 품질평가의 기준은 Dunham식을 이용한 설계내부마찰각에 대한 SPT의 시험의 결과가 만족하는지에 대한 여부를 확인하는 것인데, 이는 모래말뚝 형성에 사용되는 모래의 특성을 반영하지 못한 기

준이라 판단된다.

2) 모래의 특성을 고려한 품질평가를 하기 위하여 실내시험을 통하여 상대밀도와 내부마찰각의 관계를 도출하여 품질관리의 기준으로 사용하는 것이 현장 상황에 맞는 품질평가 방법이라 판단된다.

3) 심도에 따른 N치의 보정을 하지 않고 평가하는 현재의 방법 대신 $D_r = 21\sqrt{\frac{N}{\sigma_v' + 0.7}}$ 의 Meyerhof 식을 이용하고, 심도에 따른 N치 보정을 하여 관리기준을 제시하는 것이 올바른 방법이라 판단된다.

4) 품질평가의 판단은 표준관입시험을 통한 N치와 설계내부마찰각에 대한 관리기준 선에 근거한 N치의 합의 관계가 다음과 같은 식으로 품질관리의 판정법을 제안한다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{N(i)}{N_b(i)} \geq 1 \quad (2)$$

참고문헌

1. Dunham, J. W, Pile Foundation for Buildings(1954), Proc. ASCE, Soil Mech. and Found, Vol 82, pp.1~22
2. Meyerhof, G. G(1956), Penetration Test and Bearing Capacity of Cohesionless Soils, Proc. of the ASCE, Journal of the Soil Mech. and Found, Vol. 82, pp.1~19
3. Skempton, A.W(1986), Standard penetration test procedures and the effects in sands overburden pressure, Relative density, particle size, ageing and overconsolidation, Geotechnique, Vol 36, No3, pp.425~447
4. Terzaghi, K. and Peck, R. B(1948), Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley and Sons, New York