Gravel Pile에 의한 연약지반 개량 시험시공 사례연구
A Case Study on the Application of Gravel Pile in Soft Ground

천병식[1], Byung-Sik Chun, 고용일[2], Yong-Il Koh, 여유현[3], Yoo-Hyeon Yeoh
김백영[4], Baek-Yung Kim, 최현석[5], Hyun-Seok Choi

1) 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University
2) 초당대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Enginering, Chodang University
3) 한국해양대학교 토목공학과 겸임교수, Concurrent Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Korea Maritime
4) (주) 석정건설 대표이사, President of Seokjung Construction Co.
5) 한양대학교 대학원 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

SYNOPSIS : Sand drain as a vertical drainage is widely used in soft ground improvement. Recently, sand, the principal source of sand drain, is running out.

The in-situ tests were carried out to utilize gravel as a substitute for sand.

In-situ tests area was divided into two areas by material used. One is Sand Drain(SD) and Sand Compaction Pile(SCP) area, the other is Gravel Drain(GD) and Gravel Compaction Pile(GCP) area. Both areas were monitored to obtain the information on settlement, pore water pressure and bearing capacity by measuring instruments for stage loading caused by embankment. The results of measurements were analyzed. The clogging effect was checked at various depth in gravel column after the test.

According to the test results, the settlement was found to be smaller in gravel drain than in sand drain. The increase in bearing capacity by gravel pile explains the result. The clogging effect was not found in gravel column. It is assumed that gravel is relatively acceptable as a drainage material. Gravel is considered to be a better material than sand for bearing capacity, and it is found that bearing capacity is larger when gravel is used as a gravel compaction pile than as a gravel drain.

Keywords : sand drain, sand compaction pile, gravel drain, gravel compaction pile, clogging effect.

1. 서 론

삼면이 바다로 둘러싸이고 국토면적이 좁은 우리나라는 해안 및 내륙의 연약지반의 활용을 통해 효율적인 국토이용이 절실한 실정이다. 그러나 해안의 초연약지반은 유동성이 큰 포화 점성토층이 깊은 심도로 분포하고 있고, 대부분이 압밀진행성 점토로서 성토 등의 상재하중 작용시 압밀침하, 전단변형 등이 발생하므로 안정성 확보를 위한 연약지반처리는 필수적이라고 할 수 있다.

현재 국내에서는 모래, 자갈, 쇄석등의 조립토를 재료로 하는 조립토말뚝(granular pile)공법 중 sand drain공법이나 sand compaction pile공법은 점토나 실트와 같은 세립토의 연약지반에서 가장 많이 쓰이는 연약지반처리공법으로 활용되고 있으나, 연약한 세립토지반에서 stone drain이나 gravel drain공법, 그리고 gravel compaction pile공법이 연약지반처리공법으로 채택되어 실제 공사에 적을 위한 연구가 진

행중에 있다.

그러나 선진외국의 경우, 특히 연약지반대책공법에 대해서는 여러면에서 앞서고 있는 일본의 경우는 사질지반에서 액상화방지를 위한 공법으로 뿐만 아니라, 점토 또는 유기질의 연약지반처리공법으로서 stone drain이나 gravel drain공법이 활용되고 있고 특히, 주변지반의 교란을 최소화하면서 ϕ700~800 ㎜의 잘 다져진 자갈 또는 쇄석기둥을 형성하는 gravel compaction pile공법이 다양하게 개발되어 실용화되어 있다.

점토 또는 유기질의 연약지반 처리공법으로서의 gravel compaction pile공법은 상대적으로 강성이 크고 압축성이 작은 자갈이나 쇄석으로 말뚝구조체를 형성하여 처리대상 연약지반의 지지력 증가와 장기침하량의 감소 그리고 배수 등 3가지의 복합적 원리에 의하여 일종의 연약지반을 보강한다는 복합지반 개량효과이다.

본 연구에서는 점토 또는 유기질의 연약지반처리공법으로서의 gravel pile을 국내에서 실용화하고자 계측관리 및 지지력 시험을 통한 시험시공을 실시하여 그 결과를 고찰 정리하였다.

2. Gravel Compaction Pile의 지지력 특성

Gravel pile은 sand drain과 같은 vertical drain으로 적용될 수 있으며 또한 복합지반 개량개념으로서 gravel compaction pile은 연약한 세립토지반을 통과하여 지지층에 지지되게 시공되는 경우가 일반적이지만, 때로는 선단이 지지층에 지지되지 않는 floating pile의 형태로 시공되기도 한다.

이와 같이 시공된 gravel compaction pile의 연직하중에 대한 파괴는 대부분 팽창파괴(bulging failure) 형태로 나타나고, 연약내지 매우 연약한 점성지반에 대한 이들 group pile의 지지력은 group내의 single pile의 지지력에 pile의 개수를 곱하여 산정할 수 있기 때문에 (Barksdale ; Bachus, 1983), single pile의 지지력을 산정하는 것은 매우 중요한 과제이다.

single gravel pile의 극한 지지력 산정에 대한 식들은 많은 연구자들에 의해 제안되어 정리되었다 (Aboshi ; Suematsu, 1985). 그리고, gravel pile 재료의 내부마찰각, 주변지반의 전단강도 및 극한 지지력과의 관계가 그림 1.과 같이 정리되기도 하였다(Bergado ; Lam, 1987).

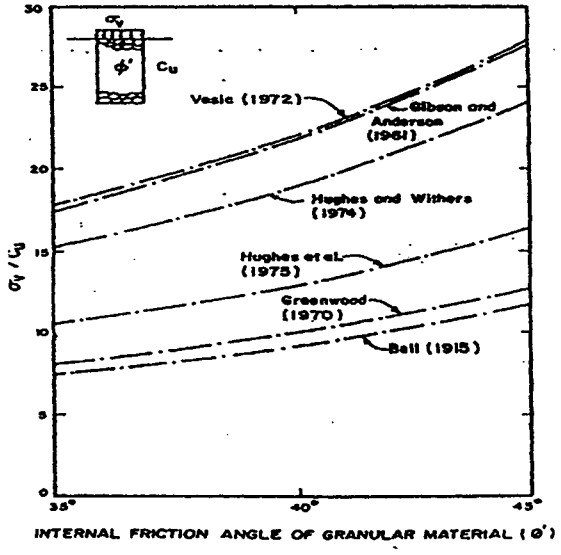


그림 1. 조립질 재료의 내부마찰각과 주변 지반의 전단강도, 그리고 single 조립토 말뚝의 극한지지력간의 관계

3. 현장상황 및 시험시공

현장시험시공에서는 sand drain(SD) 및 sand compaction pile(SCP) 지반과 gravel drain(GD) 및

gravel compaction pile(GCP)지반으로 구분하여 단계별 성토하중에 대한 계측관리를 실시하여 각 공법의 침하특성, 간극수압특성 및 지지력 특성을 비교검토하고자 하였다.

3.1 현장상황

(1) 부지위치 (충청남도, 00 - 00간 고속도로건설공사, 제 0공구)

- Gravel Drain, Gravel Compaction Pile : RAMP F STA. 0+130 ~ 0+180 (50m 구간)
- Sand Drain, Sand Compaction Pile : 본선 STA. 8+700 ~ 8+740 (40m 구간)

(2) 지층특성

상부에 5.4m~12.5m두께의 연약한 점토질 실트(MC)내지 실트질 점토(CL)의 충적층이 존재하고, 그 하부로 충적모래층, 자갈층, 풍화토, 풍화암, 연암층이 순차적으로 구성되어 있으며, 지하수위는 지표면 부근 내지는 GL-2.4m 이내에 존재하고 있다. 연약한 충적토의 베인전단시험 결과 는 0.24~0.29kg/㎠ 이고, 소성지수(Ip)는 8~33%, 액성한계는 32~64%이며, 자연함수비는 27~55%, SPT의 N치가 1~4정도이다.

(3) 재료특성

각 재료의 입경가적곡선은 그림 2.에 나타내었다. 그림 2.에 나타낸 바와 같이 수직배수재별 최대입경 크기는 gravel 재료의 경우는 25mm, sand 재료의 경우는 9.5mm로 하였다.

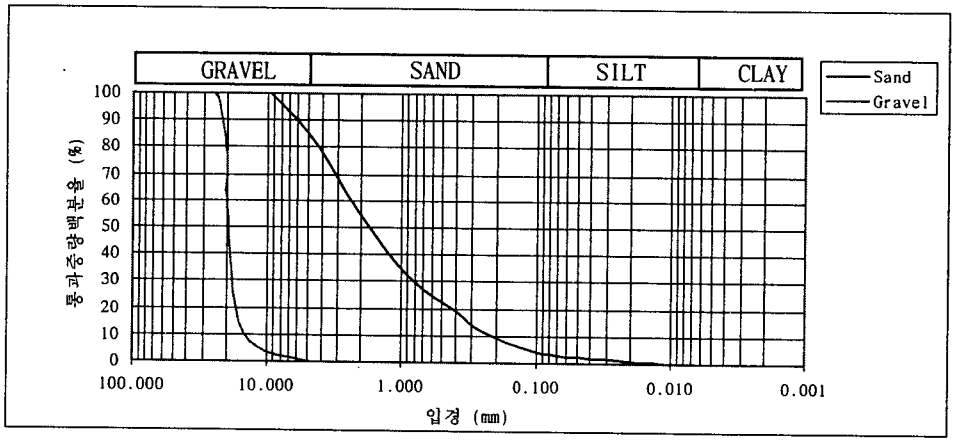


그림 2. 수직배수재(sand 재료 & gravel 재료) 입경가적곡선

(1) 부지위치 (충청남도, 00 - 00간 고속도로건설공사, 제 0공구)

- gravel drain, gravel compaction pile : RAMP F STA. 0+130 ~ 0+180 (50m 구간)
- sand drain, sand compaction pile : 본선 STA. 0+180 ~ 0+230 (50m 구간)

(2) 지층특성

상부에 5.4m~12.5m두께의 연약한 점토질 실트(MC)내지 실트질 점토(CL)의 충적층이 존재하고, 그 하부로 충적모래층, 자갈층, 풍화토, 풍화암, 연암층이 순차적으로 구성되어 있으며, 지하수위는 지표면 부근 내지는 GL-2.4m 이내에 존재하고 있다. 연약한 충적토의 베인전단시험 결과 는 0.24~0.29kg/㎠ 이고, 소성지수(Ip)는 8~33%, 액성한계는 32~64%이며, 자연함수비는 27~55%, SPT의 N치가 1~4정도이다.

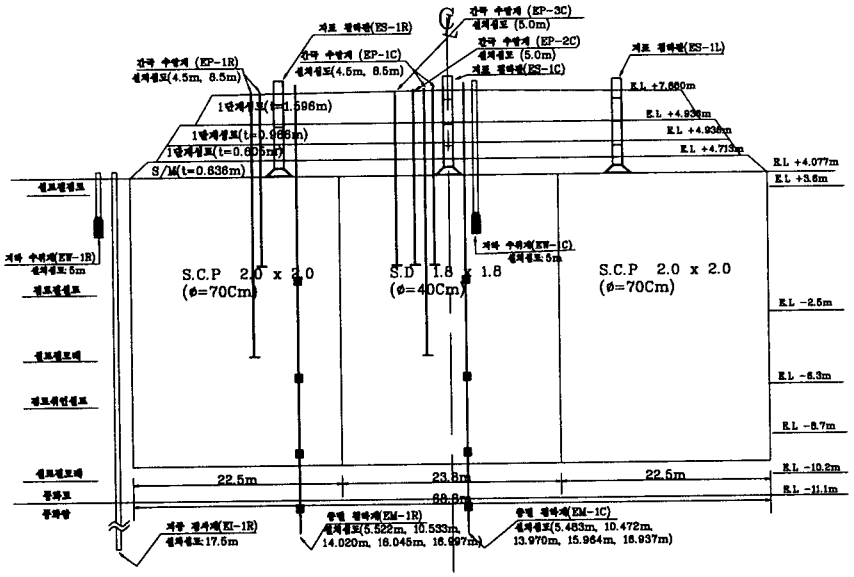
3.2 시험시공 규모

(1) sand drain 및 sand compaction pile : 50m × 75m, 설치심도 : 11.5m

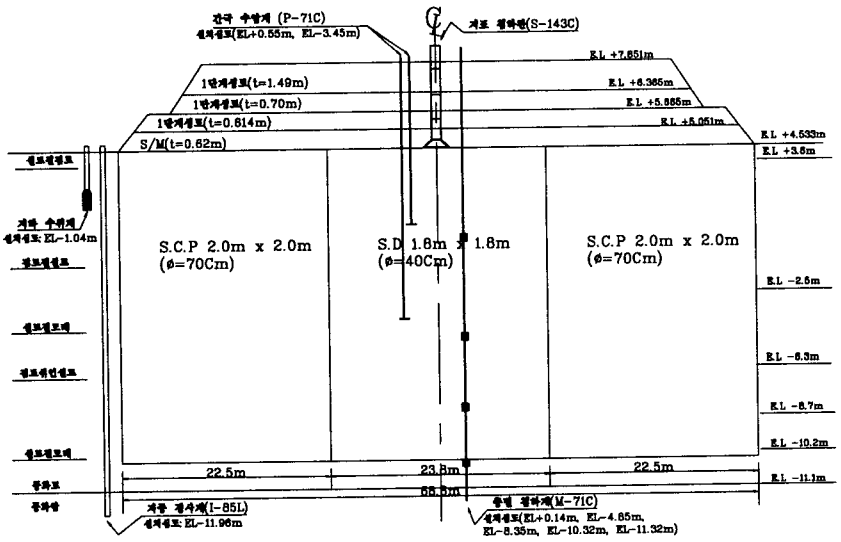
(2) gravel drain 및 gravel compaction pile : 50m × 75m, 설치심도 : 11.5m

3.3 계측기 설치 현황

본 시험시공 구간에 설치된 계측기 설치단면을 배수재별로 나타내면 다음과 같다.



(a) GD, GCP 설치지역



(b) SD, SCP 설치지역

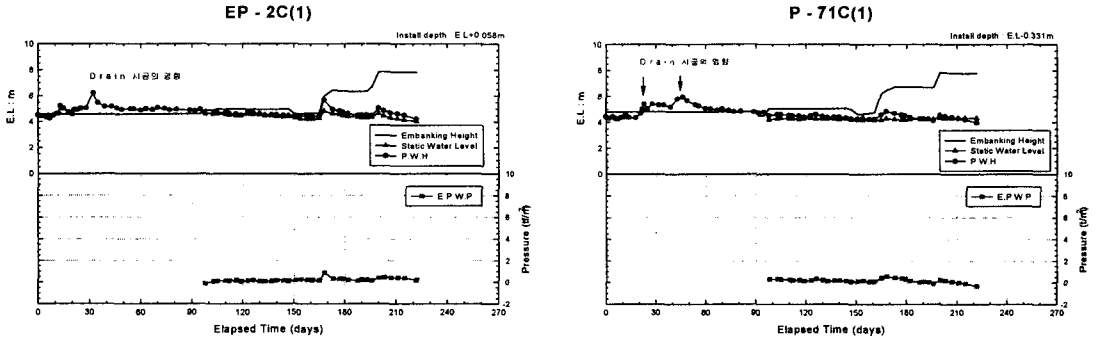
그림 3. 계측기 설치단면도

4. 분석 및 고찰

4.1 간극수압특성

간극수압 측정자료에 의해 파악된 과잉간극수압은 GD, GCP구간과 SD, SCP 구간의 상하부지반 모두에서 1단계 성토작업(누계 성토고 H=2.3~3.8m)시 최대 과잉간극수압은 0.6t/m^{2}정도 이내로, 성토진행중 과잉간극수압이 빠르게 소산되었음을 보여주며, 1단계 성토후 방치중인 현재 매우 미소한 과잉간극수압 특성을 나타내고 있는 것으로 나타났다.

다음 그림 4는 각 설치지점의 지하수위 및 간극수압, 과잉간극수압 변화 경향을 나타낸 것이다.

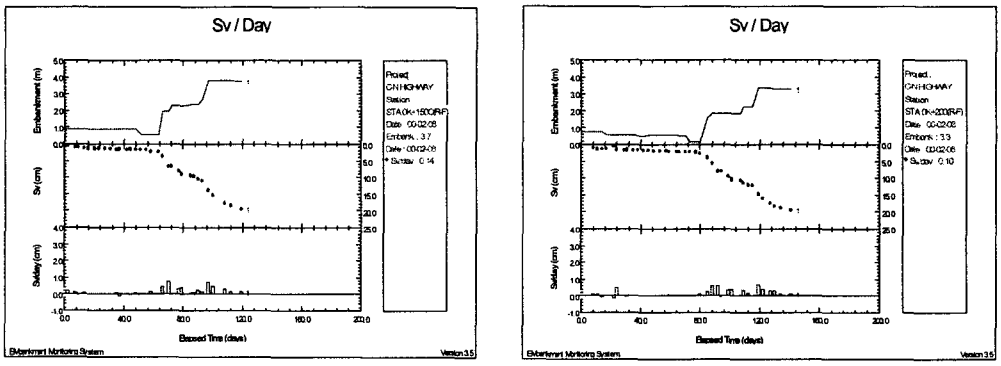


(a) GDD, GCP 구간 (b) SD, SCP 구간

그림 4. 각 공법별 배수 및 간극수압특성(지하수위계, 간극수압계)

4.2 침하특성

각 공법 적용지역별로 설치운영한 지표면 침하판 측정결과, 수직배수재설치 및 1단계 성토후 방치중에 측정한 발생 침하량은 도로중앙쪽에서 두공법 모두 20cm 내외로 나타났으며, 성토작업후 현째까지 1일 침하량 증가속도는 0.1cm/day 내외로 일반적인 안정관리 기준치인 Sh/Sv=0.5~0.6에 훨씬 못미치는 결과를 나타내고 있어 두 공법 모두 양호한 특성을 보이는 것으로 나타났다.



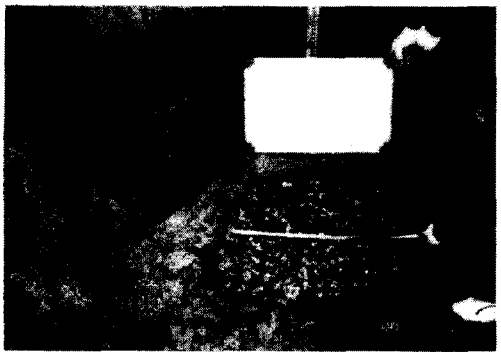
(a) GD, GCP 구간 (b) SD, SCP 구간

그림 5. 각 공법별 침하특성(지표면 침하판)

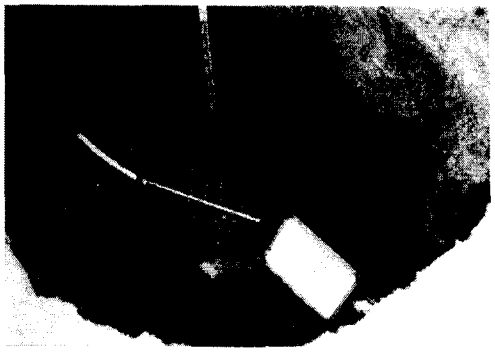
4.3. 배수특성

현장 시험시공 계측결과로부터 간극수압특성과 침하특성을 분석해볼 때 Sand Drain과 유사하게 나타나 배수효율 또한 Sand Drain 공법과 비슷한 것으로 판단되었으며 Drain 설치후 약 5개월이 경과한 시점에서 지표면으로부터 GL-5.0m까지 굴착하여 막힘현상의 발생유무를 조사한 결과, clogging effect에

의한 배수효율 저하는 없는 것으로 나타났다.(사진 1. 참조)



(a) GL-1.0m 지점



(b) GL-5.0m 지점

사진 1. 지중의 구근상태 확인 및 배수(막힘현상 여부)성능 확인

4.4. 지지력 특성

깊이 5.4m~12.5m로 시공된 single gravel pile과 single sand pile의 위치에서 PE mat까지를 제거한 후, ϕ400~ϕ700㎜의 pile 및 각 pile들 사이의 원지반에서 ϕ400㎜의 재하판을 사용하여 재하시험을 실시하였다. 재하시험 결과는 표 1.과 같다.

표 1. 시험결과요약

시험위치	시험번호	재하최대하중 (t/㎡)	항복하중에 의한 분석법						극한하중 (t/㎡)	극한하중에 의한 허용지내력(t/㎡)
			P - S			LOG P - LOG S				
			항복하중 (t/㎡)	허용지지력 (t/㎡)	침하량 (㎜)	항복하중 (t/㎡)	허용지지력(t/㎡)	침하량 (㎜)		
Gravel Drain(원지반)	PBT-1	19.75	13.4	6.70	24.0	13.0	6.5	24.0	16.2	5.4
Gravel Drain Pile	PBT-2	31.60	22.0	11.0	22.5	22.0	11.0	22.0	29.0	9.7
Gravel Compaction(원지반)	PBT-3	19.75	14.8	7.40	21.0	15.0	7.5	22.0	17.3	5.8
Gravel Compaction Pile	PBT-4	55.30	42.5	21.3	30.0	43.0	21.5	31.0	48.5	16.2
Sand Drain(원지반)	PBT-5	19.75	9.80	4.9	13.0	10.0	5.0	14.0	15.3	5.1
Sand Drain Pile	PBT-6	31.60	17.0	8.50	17.0	17.4	8.7	18.0	24.5	8.2
Sand Compaction(원지반)	PBT-7	19.75	14.5	7.3	33.0	14.0	7.0	30.0	16.2	5.4
Sand Compaction Pile	PBT-8	55.30	40.0	20.0	36.0	40.0	20.0	39.0	43.0	14.3

SD 및 SCP가 설치된 주변지반 및 기둥 상부의 지지력은 GD 및 GCP가 설치된 주변지반 및 기둥상부의 지지력보다 모두 작은 것으로 평가되어 상부성토하중에 대한 지지력 측면에서는 본 신기술인 Gravel을 이용한 GD, GCP 공법이 우수한 것으로 평가되었다.

수직배수재별로 실시한 지지력시험결과를 이용하여 Pile 지지력 및 원지반 지지력관계에 따른 복합지반지지력 및 원지반의 강도증가율은 표 2.과 같다.

표 2. 복합지반의 단면적

구 분	총면적 (m^2)	Pile 단면적 (m^2)	원지반단면적 (m^2)	비 고
Drain 지역	4.0	0.1256	3.8744	2m×2m
Compaction Pile 지역	4.0	0.3847	3.6153	2m×2m

표 2.에 나타낸바와 같이 극한하중에 의한 허용지지력으로부터 Sand 및 Gravel Drain에서 원지반에 대한 Pile의 강도증가율은 38.3%와 79.6%로 Gravel Drain에서 약 2배정도의 지지력 증대가 발생한 것으로 나타났으며 또한 복합지반 효과를 고려한 지반지지력은 5.19t/㎡, 5.53t/㎡으로 Gravel Drain 설치시의 지지력증대가 다소 크게 평가되고 있다.

Compaction Pile의 경우 원지반과 비교한 Pile의 강도증가율은 Sand 적용시 128.3%, Gravel 적용시 138.2%로 Gravel 재료적용시 10%증대한 것으로 나타났으며 복합지반 효과를 고려한 지지력 평가시 평가지지력은 Sand의 경우 6.26t/㎡, Gravel의 경우 6.80t/㎡이고 강도증가율은 15.7%와 17.24%로 나타나 Gravel 재료 적용시 양호한 지지력 증대 특성을 보여주고 있다.

상기의 시험결과는 Sand Mat가 설치된 위치에서 Sand/Gravel Pile 설치후 성토하중 재하전에 실시한 시험결과로 하중을 재하시 강도개량 특성 변화를 고려할 경우에는 개량특성은 크게 개선되어 질 것으로 판단된다.

표 3. 복합지반효과에 의한 지지력 증대효과 비교

구 분	Pile 지지력 (t/m^2)	원지반 지지력 (t/ml)	복합지반 지지력 (t/m2)	복합지반 / 원지반 강도증가율	Pile / 원지반 강도증가율	비 고
SD 지역	8.2	5.1	$\frac{8.2\times0.1256+5.1\times3.8744}{4}$ = 5.19	2%	38.3%	
SCP 지역	14.3	5.4	$\frac{14.3\times0.3847+5.4\times3.6153}{4}$ = 6.26	15.7%	128.3%	
GD 지역	9.7	5.4	$\frac{9.7\times0.1256+5.4\times3.8744}{4}$ = 5.53	2.4%	79.6%	
GCP 지역	16.2	5.8	$\frac{16.2\times0.3847+5.8\times3.6153}{4}$ = 6.80	17.24%	138.2%	

5. 결 론

현장시험 시공을 통하여 Gravel Pile의 공학적 특성과 복합지반 개량효과에 대한 연구결과를 요약정리하면 다음과 같다.

1) 현장에서 Sand Pile 적용지역과 Gravel Pile 지역으로 구분하여 설치운영한 지표면 침하판 계측결과, 발생침하량은 서로 유사하게 나타났으며, 침하량 기준치는 기준치 이내로 나타나 Gravel Pile의 침하특성은 양호한 것으로 나타났다.
2) Gravel drain 설치지반에서 압밀진행시 배수경로를 통한 막힘현상은 발생하지 않아 gravel drain을 통한 배수효과는 sand drain과 유사한 것으로 평가된다.
3) 현장 시험시공결과를 종합하여 보면 전체적으로 gravel drain에 의한 배수 및 간극수압특성은 상호 유사한 것으로 검토되어 gravel pile 강성에 의한 복합지반 거동에 의한 효과를 고려할 때 sand drain 공법과 비교하여 보다 효과적인 공법인 것으로 나타났다.
4) 현장재하시험 결과로부터 Gravel pile 설치시 지지력의 증대 경향은 gravel 재료 강성에 의한 복합지반효과를 의한 것으로, gravel pile 적용시 압밀효과, 지지력 특성을 통한 sand 재료의 대체 실용화가 가능한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이승련(1998), "진동다짐쇄석말뚝의 적용성에 관한 연구", 한양대학교 산업대학원 석사학위논문, pp.1~75.
2. Aboshi, H. and Suematsu, N. (1985), "Sand Compaction Pile Method : State of the Art Paper", Proc. 3rd Geotech. Seminar on Soil Improvement Methods, NTU, Singapore.
3. Barksdale, R. D. and Bachus, R. C.(1983), "Design and Construction of Stone Columns", Vol. 1, Report No. FHWA/RD-83/026, National Technical Information Service, Springfield, Verginia, pp.195.
4. D.T.Bergado et al, (1987), "Full scale load test on granular piles and sand drains in the soft Bangkok Clay", Proc. Intl. Conf. on In-situ Soil and Rock Reinforcement ,paris, pp.111-118.