

액상화 발생 지반에 대한 보강공법 별 보강 효과 및 적용성 분석

Evaluation of Reinforcement Efficiency and Applicability Using a Reinforcement Method for Liquefiable Ground

유 민 택¹ Yoo, Mintaek 한 진 태² Han, Jin-Tae
박 영 준³ Park, Youngjun 김 석 중⁴ Kim, Seok-Jung

Abstract

This study reviewed the liquefaction reinforcement and ground reinforcement methods widely used domestically and abroad through construction method characteristics and analyzed the economic feasibility and reinforcement efficiency of each reinforcement method. The analysis results were used to evaluate the applicability of the appropriate reinforcement method for the liquefaction reinforcement of new and existing structures. As a result of evaluating the applicability of the reinforcement method based on the economic feasibility and reinforcement effect of each reinforcement method, the compaction method, which secures the construct ability by applying large equipment, is advantageous when reinforcing a new structure, and the low-fluidity mortar injection method (C.G.S method) and the high-pressure injection method (J.S.P method) are considered appropriate in the existing structure.

요 지

본 연구에서는 국내외에서 널리 사용되고 있는 액상화 보강 및 지반 보강 공법들에 대해 공법 특성별로 검토하고, 각 보강방안의 경제성 및 보강효과를 분석하였다. 또한 분석 결과를 바탕으로 신설구조물 및 기존구조물의 액상화 보강시 적절한 보강 방안 적용성 평가를 수행하였다. 보강방안 별 경제성, 보강효과를 바탕으로 보강 방안의 적용성을 평가한 결과, 신설 구조물의 보강시에는 대형장비를 적용하여 시공성이 확보되는 다짐계열 공법이 유리하며, 기존 구조물에서는 저유동성 몰탈 주입공법(C.G.S공법) 및 고압분사공법(J.S.P공법)의 적용이 적절할 것으로 판단된다.

Keywords : Applicability, Economic feasibility, Efficiency, Liquefaction, Reinforcement

1. 서 론

액상화 현상이란 반복적 혹은 일시적인 동적 하중에

의해 포화된 지반내의 과잉간극수압이 증가하여 지반이 유효응력을 잃고 액체처럼 거동하는 현상을 뜻한다. 1960년대 니가타 지진에서 액상화가 보고된 이후로 약

1 정회원, 가천대학교 토목환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon Univ.)

2 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 연구위원 (Member, Research Fellow, Department of Geotechnical Engineering, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

3 정회원, ㈜서현기술단 지반터널본부 부사장 (Member, Executive Vice President, Geotechnics & Tunnel Division, Seohyun Engineering)

4 정회원, 한국건설기술연구원 경영기획실 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Planning and Coordination Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Tel: +82-31-910-0277, seokjungkim@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 11월 30일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

60년간 액상화에 관한 다양한 연구가 진행되었으며 이와 관련하여 액상화의 안전율을 평가하는 기법 등이 정립되었다(Seed and Idriss, 1971; Ishihara and Li, 1972; Arulmoki et al., 1985; Iwasaki et al., 1984). 국내에서도 2018년 포항지진에서 액상화가 발생하는 등 국내 지반 및 지진 발생 환경에서도 액상화 발생 및 이로 인한 피해에 대한 대비가 필요한 실정이다. 이에 최근 내진설계와 관련된 최상위 기준인 KDS 17 10 00 내진설계 일반이 제정되며 액상화 평가와 관련된 기준이 정립된 바 있다.

그러나 국내 액상화 관련 평가 기준은 지반의 액상화 발생 가능성에 대해서만 수립되어 있으며, 액상화 발생에 따른 시설물의 영향에 대해서는 명확한 기준이 수립되어 있지 않은 실정이다. 이에 액상화시 구조물의 거동 및 피해평가와 관련된 다수의 연구가 수행되었다. Han et al.(2011)은 액상화시 말뚝기초에 작용하는 동적 토압에 관한 연구를 수행하였으며, Kwon et al.(2018)은 액상화시 말뚝기초의 동적거동의 수치해석 기법을 제시하였다. 또한 Chae et al.(2021)은 재액상화시 제방 시설물의 피해를 평가하는 연구를 수행하였다. 그러나 이러한 연구들도 액상화시 구조물의 피해영향 분석 및 피해 예측에 초점을 맞추고 있고, 적절한 보강공법 선정 등에 대한 연구는 부족한 실정이다. 기존 시설물(기초 및 지반) 내진성능 평가 요령(KALIS, 2020) 및 기존 시설물(기초 및 지반) 내진성능 향상요령(KALIS, 2023) 등에서 액상화 발생시 시설물에 발생하는 피해 평가 및 보강 방안을 기술하고 있지만 정성적인 기술에 국한되어 있는 실정이며 적절한 보강 방안을 제시하지 못하고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 국내외에서 널리 사용되고 있는 액상화 보강 및 지반 보강 공법들에 대해 공법 특성별로 검토하고, 각 보강 방안의 경제성 및 보강효과를 분석하였다. 또한, 지반 조건 및 현장 여건을 반영한 보강 방안별 적용성 분석을 통해 적절한 액상화 보강공법 선정의 기초자료를 수립하였다.

2. 액상화 지반의 보강공법

액상화 보강공법의 절차는 Fig. 1에 나타낸 바와 같다. 그림에 보인 것처럼 공법을 선정한 후에 지반개량범위를 결정하는 것이 일반적이며, 지반개량범위의 제약 또는 지반개량을 실시하는 장소에서의 시공상 제약에

의해 공법선정을 수정할 필요가 있는 경우가 많다. 본 연구에서는 특정 지반에 적용 가능한 사례조사가 아닌 일반적으로 사용 가능한 보강공법들에 대해 조사하고 각 공법의 경제성 및 보강효율을 분석하였다. 이에 먼저 실제 적용사례가 많으며, 액상화 발생 가능 지반에 적용하기 효율적으로 판단되는 공법들에 대해 정리하였다.

실제로 공법 선정 시에는 그 공법에 필요한 목표개량 범위 및 시공상 제약 등을 기존 시공사례 등에 근거하여 어느 정도 파악해 두고 이러한 점에서 볼 때 명백하게 옳지 않은 공법은 공법선정의 초기단계에서 검토대상에서 제외하면 공법선정이 효율적으로 이루어질 수 있다. 공법의 비용은 매우 효과적인 경우가 많다. 예를 들면, 기존구조물 근접 지반에는 배수공법처럼 저소음 저진동인 방법을 사용하고 그 주변 지반에 대해서는 다짐공법처럼 흙의 변형특성인 점성을 기대할 수 있는 공법을 사용하는 방법 등이다. 이러한 비용공법은 이미 매립지의 기존구조물 액상화 보강에 자주 적용되고 있다.

일반적으로 어떠한 비용방법이 최적인가에 대해서 검토하기 위한 절차는 아직 확립되어 있지 않으며 각각의 현장조건을 고려한 창의적인 설계가 필요하다.

2.1 진동치환 및 다짐 공법(스톤 컬럼 공법)

진동치환 및 다짐 계열 공법은 대규모 단지 및 부지가 충분한 성토제방에 효율적인 방법이다. 대형장비 이동에 제약이 없는 넓은 부지에서만 적용이 가능하며 소음, 진동 등이 발생하여 민가와 보강 현장이 근접한 경우에 환경적인 영향이 큰 공법이다. 그러나 다양한 심도의 느슨한 토사지반 개량이 가능하며 모래, 실트, 점토 등 N치 10 이하 다양한 지반에서 모두 적용가능한 장점이 있다. 또한 깊은 심도의 개량이 가능하며 개량효율도 높은 공법이다.

2.2 진동 다짐 공법

진동다짐 공법은 대규모 단지 및 부지가 충분한 성토제방, 구조물 기초의 지반 액상화 방지를 위해 적용하는 공법으로 주로 비교적 깊은 심도의 개량에 적용된다. 모래 등 일부 사질토 지반에서만 적용이 가능하며, 세립분이 많은 토사층에 부적합한 단점이 있다. 또한, 대형장비를 이용하기 때문에 공간적 제약 및 진동, 소음으로 인한 환경적인 영향이 큰 공법이다.

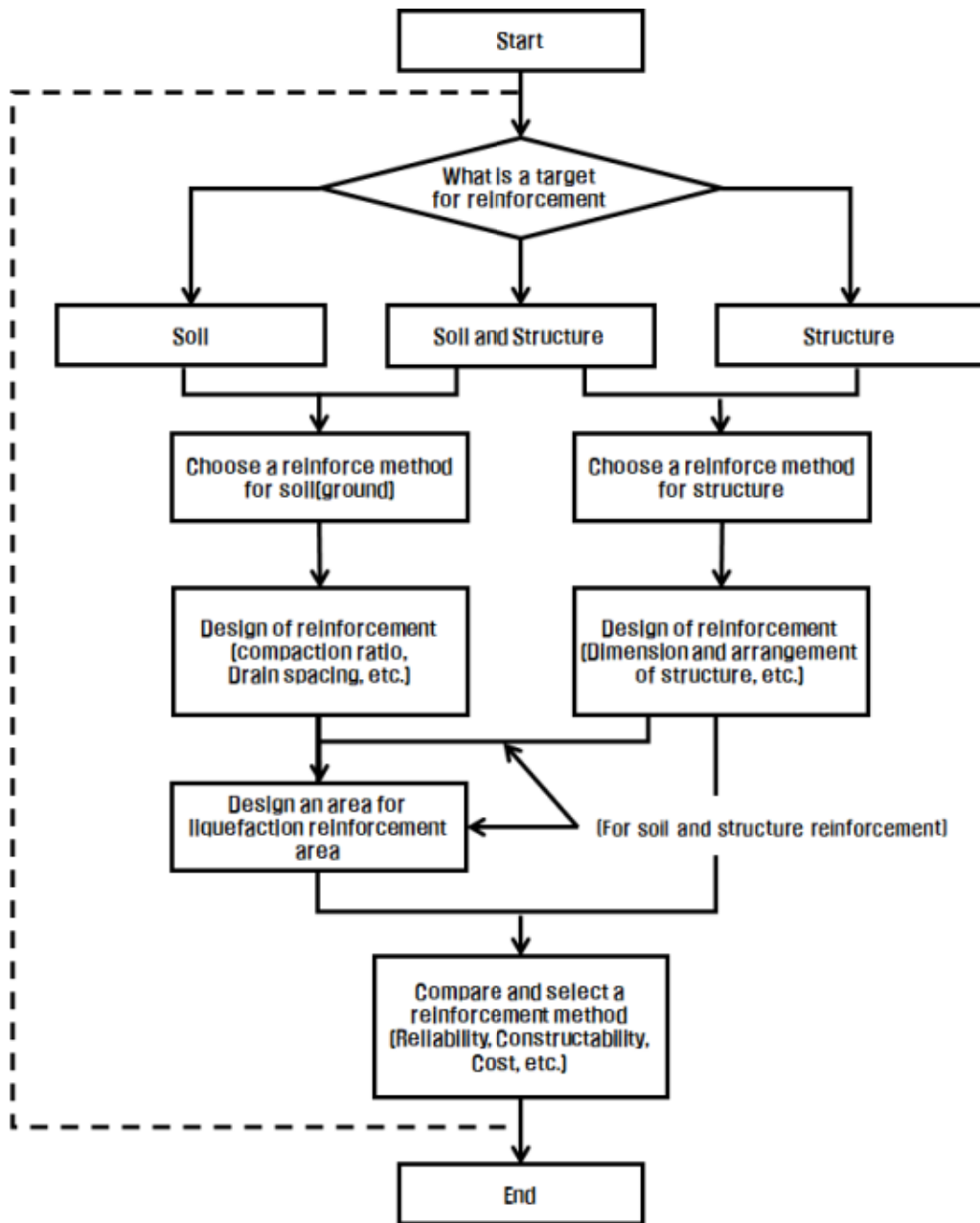


Fig. 1. The procedure of liquefaction reinforcement

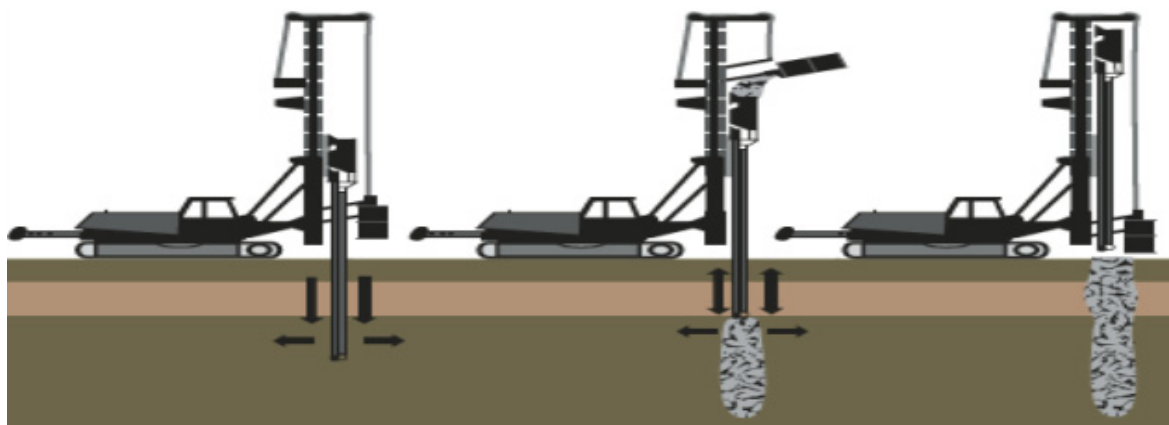


Fig. 2. Stone column method for liquefaction reinforcement (New Zealand Geotechnical Society, 2021)

2.3 SCP 및 GCP 공법

SCP(Sand compaction pile) 및 GCP(Gravel Ccompaction pile)은 부지가 충분한 성토 제방 및 구조물 기초의 액상화 방지를 위해 적용하는 공법으로 개량 심도가 중간심도 이상일 경우에 주로 적용된다. 모래, 실트, 점토 등 다양한 지반에 모두 적용이 가능하며 국내 연약지반 개량을 위해 많은 시공사례가 있다. 대형장비를 이용하기 때문에 공간적 제약이 발생하며, 진동공법보다는 적지만 진동, 소음으로 인한 환경적인 영향이 존재하고, 고치환율일 경우에 주변 지반 용기 발생 위험이 있다.

2.4 지하수위 저감공법

지하수위 저감공법은 우물정 내 양수펌프를 설치하여 지하수위를 저하시켜 지반의 유효응력을 증가시키는 공법이다. 보통 압밀로 인한 연약지반 점성토의 개량 및 느슨한 사질토의 액상화 저감공법으로 주로 이용되며, 모래, 실트, 점토 등 다양한 지반에 적용이 가능하다. 신설구조물 및 기존 구조물의 보강에 모두 적용이 가능한 장점이 있으나, 지반 유효응력 증가에 따른 주변 지반 침하 발생 위험이 있다. 진동, 소음 등의 환경적 영향은 타 공법에 비해 적은 편이나 배출된 지하수가 다량의 용해성 철분을 함유하고 있을 경우 추가적인 처리 대책

이 요구된다. 또한 지속적인 유지보수 비용이 발생하여 경제성이 좋지 않다.

2.5 저유동성 몰탈 압입주입(C.G.S) 공법

저유동성 몰탈 압입주입 공법은 콘크리트 몰탈을 고결체의 형태로 압력을 가하여 주입하는 공법으로 하부 지반의 밀도를 증진시키는 지반개량 공법이다. 주로 좁은 공간에 위치한 구조물 기초의 지지력 개선, 하부 지반의 액상화 방지에 적용할수 있으며, 개량심도 및 설치간격에 제한이 없는 장점이 있다. 또한 소형장비를 이용하므로 소규모 공사 및 협소한 장소에서도 시공이 가능하고 진동, 소음의 영향이 적은 장점이 있다. 그러나 지반용기 및 변형 발생 가능성이 있어 정밀한 시공이 요구되며 타 공법에 비해 공사비용이 높아 경제성이 낮은 편이다.

2.6 고압분사(J.S.P) 공법

분사경화제를 이용하여 지반을 굴착하고 토립자와 분사경화제를 고압 교반시켜 강제치환된 지반 개량체를 형성시키는 지반개량 공법이다. 좁은 공간에서의 시공이 가능하며 개량심도 및 설치간격의 제한이 없는 장점이 있다. 또한 세립토에서의 개량도 가능하며 진동, 소

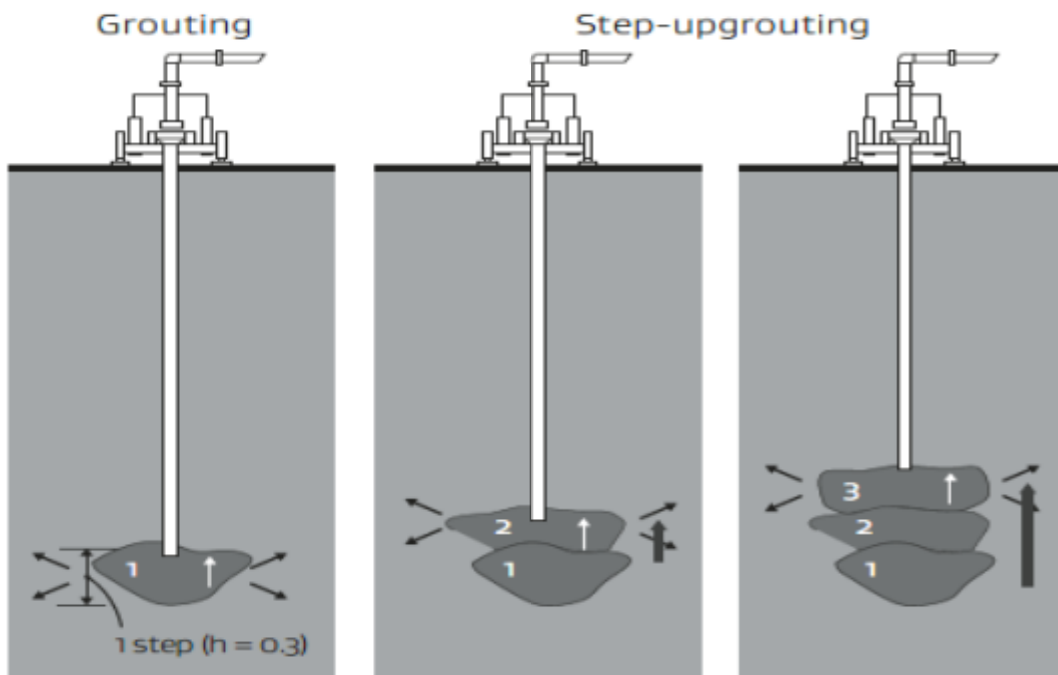


Fig. 3. C.G.S method for liquefaction reinforcement (New Zealand Geotechnical Society, 2021)

음의 영향이 적다. 단, 지반의 용기 및 주변 지하 구조물의 변형발생에 주의해야 하며 슬라임 발생이 많고 처리를 위한 별도의 공사비가 요구된다. 또한 고압분사 그라우트 액으로 인한 지하수 오염 가능성이 존재한다.

2.7 쉬트파일(Sheet pile) 또는 지중연속벽 공법

접속성이 있는 쉬트파일(Sheet pile) 또는 지중연속벽을 설치하여 측면부 구속형 또는 내부 격자형 등의 형태로 지반을 보강하여 액상화 발생시 구조물의 침하나 전단변형 등을 억제시키는 공법이다. 설치 심도 및 간격에 제한이 없으며 구조물을 구속하는 형태의 보강 공법으로 기존 구조물에 적용이 용이하다. 그러나 과잉간극수

압 소산을 방해하는 부정적인 효과가 발생할 여지가 있으며 진동, 소음으로 인한 환경적인 영향이 큰 공법이다.

3. 액상화 보강공법의 경제성 및 보강효과 평가

3.1 공법별 경제성 비교

앞서 2장에서 기술한 액상화 보강공법 별 보강 효과 및 경제성 평가를 위해 Fig. 5와 같이 느슨한 퇴적모래 지반에 철도 성토 노반을 건설하는 조건으로 액상화 보강공법 검토를 수행하였다. 철도 성토노반은 표준 단면을 적용하여 폭 26m, 높이 5m로 하였으며, 하부노반의 지반 조건은 N치 5 이하, 세립분 함유량 20% 이하의

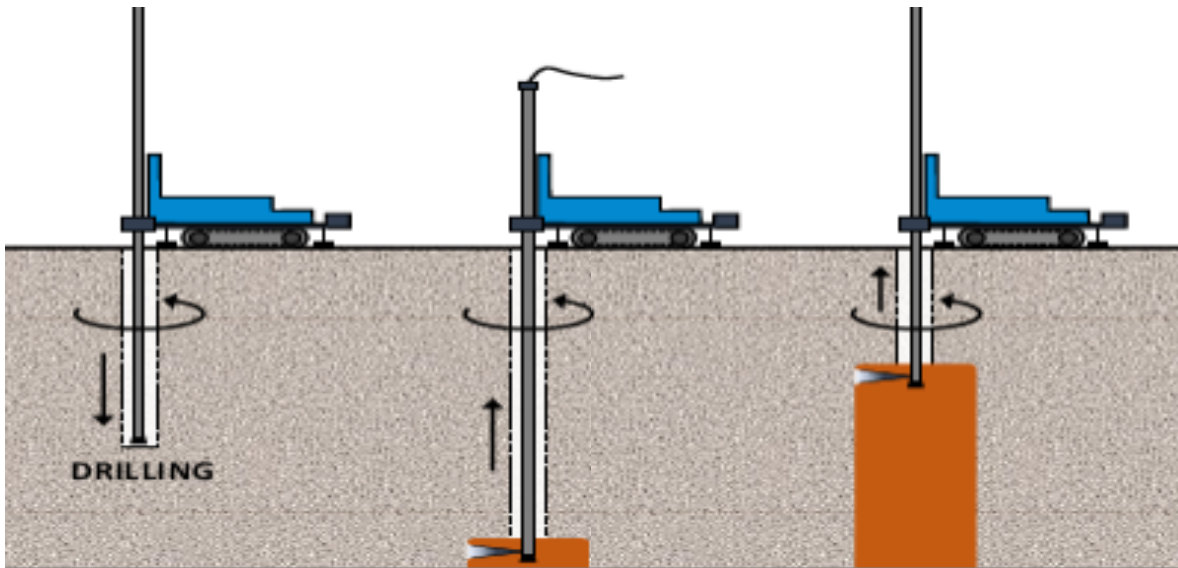


Fig. 4. J.S.P method for liquefaction reinforcement (Modoni et al, 2019)

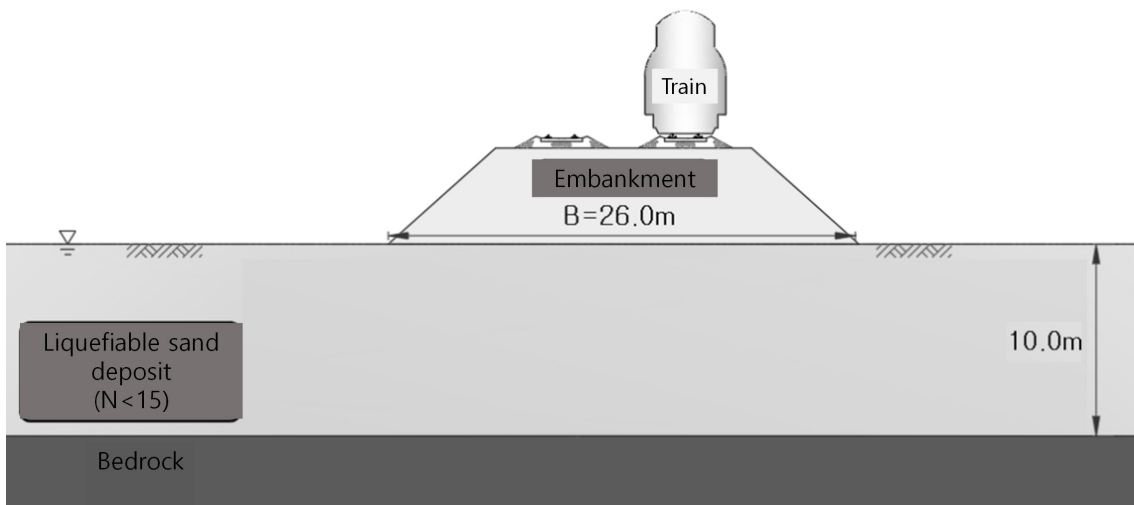


Fig. 5. Embankment site for liquefaction reinforcement

느슨한 퇴적모래 지반 10m인 실제 호남고속철도 2단계 ○○공구 철도 건설 현장 지반 조건을 활용하여 가정하였다. 해당 지반은 액상화에 취약한 지반으로 판단되며, 철도 성토노반 건설을 위해 액상화 보강 및 지반 개량이 요구되는 조건이다.

공법별 경제성은 실제 시공사례의 분석 결과를 바탕으로 산출하였다. 공법별 개량에 필요한 장비의 경우 실제 공사비 내의 장비 임차료 등을 바탕으로 산출하였고, 재료 비용 및 재료의 운송비용은 해당 필요 재료의 평균 비용을 이용하여 계산하였다. 개량심도는 모든 보강공법에서 동일하게 10m를 기준으로 하였다. 단, 본 논문에서 기술한 경제성 분석결과는 다양한 액상화 지반조건, 구조물의 성능별 피해평가기준 및 지진 규모 등 모든 조건을 고려한 검토수행이 불가하여 임의로 검토조건을 단순하게 가정한 결과이며 공법 별 정성적인 비교를 목적으로 하고 있다. 경제성 분석 결과는 Table 1에 기술하였다. 분석결과 지하수위 저감공법, 저유동성 몰탈주입공법(C.G.S)공법, 슈트파일 공법이 상대적으로 높은 공사비가 필요한 것을 확인할 수 있었다. 특히 지하수위 저감공법은 지속적으로 유지보수 비용이 발생하는 단점이 있었다. 상대적으로 진동 및 소음이 크게 발생하는 진동치환 공법, 진동다짐공법, SCP 공법이 저렴하였으며, 고압분사공법(J.S.P) 공법도 주입 공법임에도 불구하고 높은 경제성을 나타내었다.

3.2 액상화 보강공법의 보강 효과 평가

지반개량 효과는 개량 전후의 액상화 안전율 변화를 통해 검토하였다. 개량 전후 액상화 안전율의 경우 내진설계 일반(KDS 17 10 00)의 액상화 본 평가 방법에 따라 수행하였다. 3.1에서 제시된 대상 현장의 시추주상도를 확보하고, 이를 바탕으로 액상화에 대한 진동 저항

능력 비를 진동 전단 응력 비로 나누는 방식으로 깊이별 안전율을 산출하였으며 개량 지반의 경우 개량 심도를 10m로 동일하게 가정하고 평가를 수행하였다. 액상화 안전율 검토를 위한 설계 입력 지진파는 장주기 지진파인 Hachinohe, 단주기 지진파인 Ofunato, 설계 응답 스펙트럼에 따른 인공지진파, 포항 및 경주 지진파를 적용하였다. 액상화 보강 전의 해당 지반의 깊이별 액상화 안전율은 Fig. 6과 같으며, 지진파 별 평균 안전율은 Table 2와 같다.

진동치환 및 다짐공법인 스톤 컬럼 공법의 경우 개량 전후의 복합지반 N치를 산출하는 방식으로 보강 효과를 검토하였으며, 쇄석 컬럼의 치환율은 지름 1m로 가정하여 약 19%로 산출하였다(Lee et al., 2001). 진동다짐 공법의 경우 세립분 20% 내외인 경우를 가정하여 개량된 N치를 산출하였으며 시공간격은 1.5m × 1.5m로 가정하였다(구조물기초 설계기준 해설, 2018). SCP 및 GCP 공법은 직경 700mm 모래다짐 말뚝을 1.7m × 1.7m

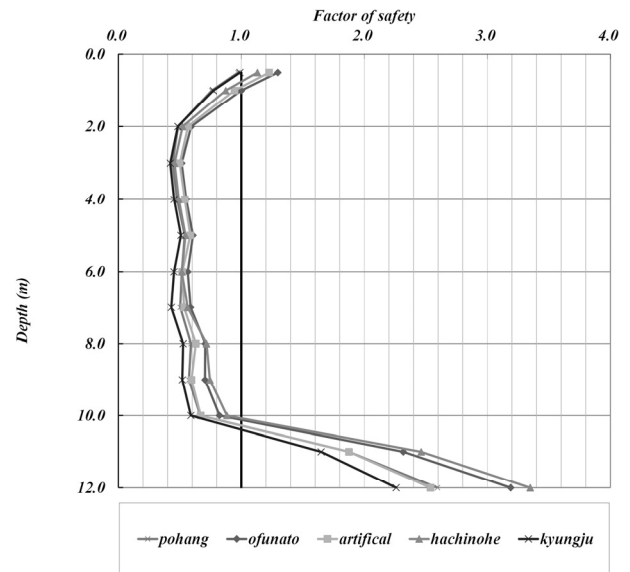


Fig. 6. Factor of safety of liquefaction before reinforcement

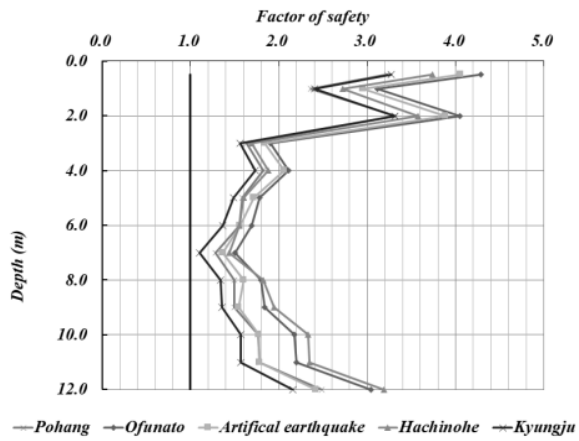
Table 1. Economic analysis for each reinforcement method

	Stone column method	Vibro compaction	SCP method	Ground water reduction	C.G.S method	J.S.P method	Sheet pile method
Approximate construction cost per volume	15,000	14,000 ~ 15,000	10,000	27,000 + Maintenance	32,000	14,000	26,000

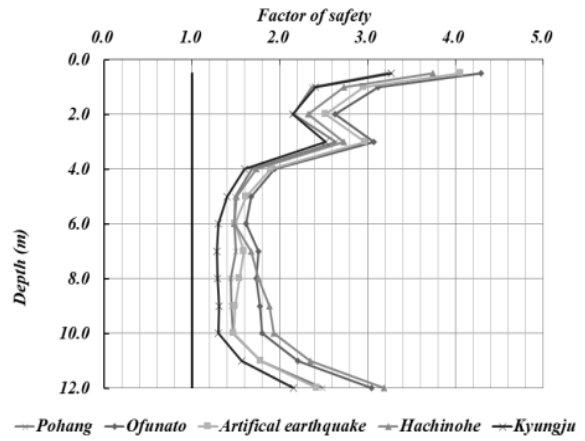
(Unit : won/m³)

Table 2. Liquefaction safety before reinforcement

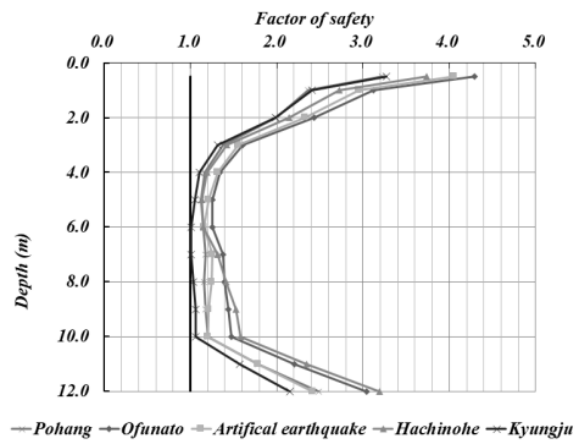
	Hachinohe	Ofunato	Artificial	Pohang	Kyungju	Average
Liquefaction safety	0.68	0.72	0.66	0.59	0.56	0.64



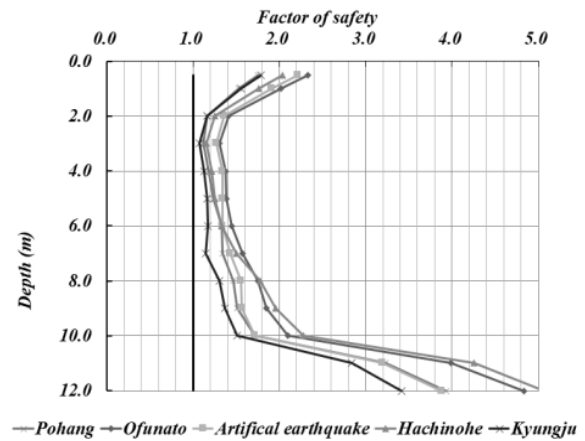
(a) Stone column



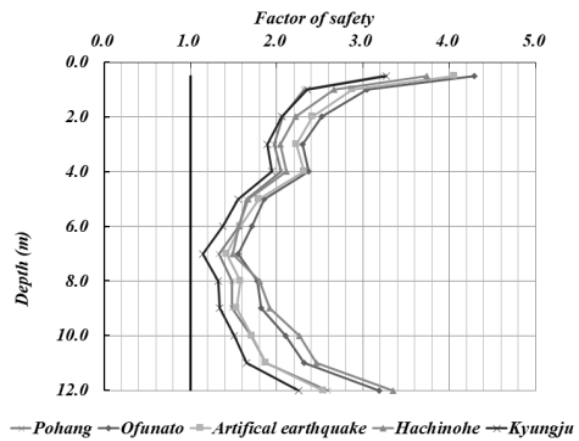
(b) Vibro compaction method



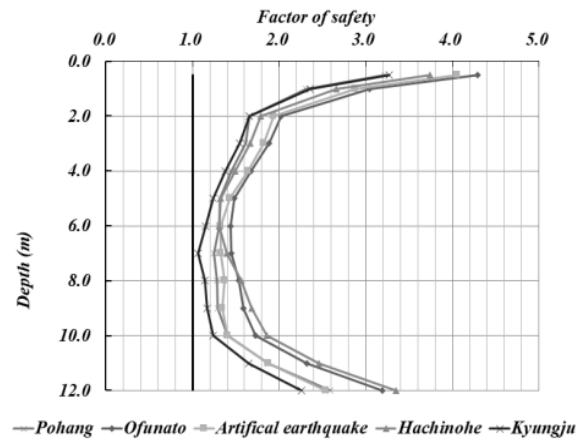
(c) SCP Method



(d) Dewatering method



(e) C.G.S method



(f) J.S,P method

Fig. 7. Factor of safety of liquefaction after reinforcement

Table 3. Liquefaction safety after reinforcement

	Hachinohe	Ofunato	Artificial	Pohang	Kyungju	Average
Stone column	2.21	2.39	2.22	1.96	1.86	2.13
Vibro compaction method	2.13	2.31	2.15	1.90	1.80	2.06
SCP method	1.76	1.91	1.77	1.55	1.48	1.70
Dewatering method	1.59	1.69	1.55	1.39	1.31	1.51
C.G.S method	2.14	2.31	2.14	1.90	1.80	2.05
J,S,P method	0.48	1.97	2.13	1.98	1.75	1.66

시공하는 것을 가정하였으며 시공후 복합지반의 N치를 산출하는 방식으로 보강효과를 검토하였다(Kim et al., 2008).

지하수위 저감공법의 경우 지하수위를 지표면 이하 10m까지 저감시키는 것을 가정하였으며 지하수위 감소에 의한 평균 N치 증가 및 유효응력 증가를 적용하여 보강효과를 검토하였다.

저유성 몰탈 압입주입 공법(C.G.S 공법)의 경우 직경 800mm의 저유성 몰탈을 2.5m × 2.5m간격으로 주입하는 것을 가정하였으며 치환율은 약 8%인 경우로 평가하였다(Shin et al., 2010). 시공 후 복합지반의 N치는 치환율에 따라 산정하였다. 마지막으로 고압분사 공법(J.S.P 공법)의 경우 직경 800mm의 고결체를 2m × 2m 간격으로 시공하는 것을 가정하였으며 고결체의 일축 압축강도를 활용하여 치환된 면적의 N치를 산정하고 치환율에 따라 복합지반의 N치를 산출하였다(구조물 기초 설계기준 해설, 2018).

액상화 보강공법을 적용한 후 액상화 안전율은 모든 경우 1 이상으로 나타났다. 깊이별 평균 안전율의 경우 스톤컬럼 공법, 진동다짐 공법, 저유동성 몰탈주입공법(C.G.S) 공법이 2 이상으로 크게 상승하는 것을 확인할 수 있었으며, SCP 공법, 지하수위 저감공법, 고압분사 공법(J.S.P 공법)은 1.5 이상으로 안전율의 상승 폭이 작게 확인되었다. 이를 바탕으로 액상화에 대한 위험도가 크게 나타나는 지반의 경우 보강효과가 높은 공법을 선정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 액상화 보강공법의 적용성 평가

앞서 설명한 액상화 보강공법 별 특징에 따라 시공성, 환경성, 경제성을 분석한 결과는 Table 4와 같다. 신설 구조물의 경우 상당부분 작업공간이 충분하고 환경진

동소음에 민감하지 않은 공사구간에서 적용되는 경우가 많으므로 환경 민원 보다는 시공성에서 우세한 대형 장비를 적용하는 다짐공법계열(스톤컬럼 공법, SCP 공법)이 적용성이 양호한 것으로 나타났다. 이에 보강효과가 높게 필요한 경우에는 스톤컬럼 공법이나 진동다짐 공법을 적용하는 것이 유리하며, 경제성이 더 중요한 현장에서는 SCP 공법을 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 고결공법이나 지하수위 저하 공법의 경우에도 신설구조물의 규모가 크지 않을 때 현장여건에 따라 적용이 가능할 것으로 보인다. 특히, 지하수위 저하 공법의 경우 공용후 유지보수비가 추가적으로 발생할 수 있으므로 현장여건과 구조물의 중요도 등을 고려하여 적용함이 바람직할 것으로 판단된다.

기존 구조물의 보강에 적용할 경우 타 시설물에 인접되어 작업공간이 협소한 경우가 많고, 기존 시설 등을 고려하여 시공성 및 환경 진동소음문제 등에 대처가 양호한 중소형 장비를 이용하는 저유동성 몰탈주입공법(C.G.S공법), 고압분사공법(J.S.P공법) 등이 적용시 공사 중 환경진동소음 등의 문제 등을 개선할 수 있고, 좁은 공간에서 시공성에서 양호할 것으로 판단된다. 한편 공사비 측면으로는 고압분사공법(J.S.P 공법)이 비배출 압입주입 C.G.S 공법이나 전단변형구속(쉬트파일공법) 및 지중연속벽 등에 비해 공사비가 상대적으로 저렴할 판단된다. 단, 지하수의 오염이 문제가 되거나 높은 보강효과가 필요한 현장일 경우에는 저유동성 몰탈 주입공법(C.G.S 공법)이나 지하수위 공법의 적용이 더 바람직할 수 있으며, 이는 현장여건 및 구조물의 중요도 등을 고려하여 적용함이 바람직할 것으로 판단된다.

5. 결론

이에 본 연구에서는 국내외에서 널리 사용되고 있는

Table 4. Applicability of reinforcement method

		Stone column method	Vibro compaction	SCP method	Ground water reduction	C.G.S method	J.S.P method	Sheet pile method
New construction	Constructability	○	○	○	○	○	○	○
	Environment	△	△	△	○	○	△	△
	Economic	△	△	○	×	×	△	×
Existing structure	Constructability	×	×	×	○	○	○	○
	Environment	△	△	△	○	○	△	△
	Economic	×	×	×	×	×	△	×

* ○ Suitable △ Moderate × Unsuitable

감사의 글

액상화 보강 및 지반 보강 공법들에 대해 공법 특성별로 검토하고, 각 보강 방안의 경제성 및 보강효과를 분석하였다. 또한, 지반 조건 및 현장 여건을 반영한 보강 방안별 적용성 분석을 통해 적절한 액상화 보강공법 선정의 기초자료를 수립하였다.

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 20230105-001, 인공지능을 활용한 대심도 지하 대공간의 스마트 복합 솔루션 개발 - 미래 지하 대공간 안전을 위한 스마트 복합 솔루션 개발).

- (1) 액상화 보강공법 별 경제성 분석결과 지하수위 저감공법, 저유동성 몰탈주입공법(C.G.S공법), 슈트파일 공법이 상대적으로 높은 공사비가 필요한 것을 확인할 수 있었다. 특히 지하수위 저감공법은 지속적으로 유지보수 비용이 발생하는 단점이 있었다. 상대적으로 진동 및 소음이 크게 발생하는 진동치환 공법, 진동다짐공법, SCP 공법이 저렴하였으며, 고압분사공법(J.S.P 공법)공법도 주입 공법임에도 불구하고 높은 경제성을 나타내었다.
- (2) 신설구조물의 경우 상당부분 작업공간이 충분하고 환경진동소음에 민감하지 않은 공사구간에서 적용되는 경우가 많으므로 환경 민원 보다는 시공성에서 우세한 대형장비를 적용하는 다짐공법계열(스톤컬럼 공법, SCP 공법)이 적용성이 양호한 것으로 나타났다. 이에 보강효과가 높게 필요한 경우에는 스톤컬럼 공법이나 진동다짐 공법을 적용하는 것이 유리하며, 경제성이 더 중요한 현장에서는 SCP 공법을 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.
- (3) 기존 구조물의 보강에 적용할 경우 타 시설물에 인접되어 작업공간이 협소한 경우가 많고, 기존 시설 등을 고려하여 시공성 및 환경 진동소음문제 등에 대처가 양호한 중소형 장비를 이용하는 저유동성 몰탈주입공법(C.G.S공법), 고압분사공법(J.S.P공법) 등이 적용시 공사중 환경진동소음 등의 문제 등을 개선할 수 있고, 좁은 공간에서 시공성에서 양호할 것으로 판단된다.
- (4) 단, 본 논문에서 기술한 경제성 분석결과는 다양한 액상화 지반조건, 구조물의 성능별 피해평가기준 및 지진 규모 등 모든 조건을 고려한 검토수행이 불가하여 임의로 검토조건을 단순하게 가정한 결과이며 공법 별 정성적인 비교를 목적으로 하고 있다. 이에 실제 보강공법 선정시에는 현장여건 및 구조물의 중요도 등을 고려하여 적용함이 바람직할 것으로 판단된다.

참고문헌 (References)

1. Arulmoli, K., Arulanandan, K., and Seed, H. B. (1985), New Method for Evaluating Liquefaction Potential, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.111, No.1, pp.95-114.
2. Chae, M., Yoo, M., Lee, I. W., and Lee, M. (2021), A Study on Reliquefaction Behavior of Railway Embankment Using 1g Shaking Table Test, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.37, No.11, pp.71-81.
3. Han, J. T., Choi, J. I., Kim, S. H., Yoo, M. T., and Kim, M. M. (2011), Analysis of Dynamic Earth Pressure on Piles in Liquefiable Soils by 1g Shaking Table Tests, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.9, pp.87-98.
4. Ishihara, K. and Li, S. I. (1972), Liquefaction of Saturated Sand in Triaxial Torsion Shear Test, *Soils and Foundations*, Vol.12, No.2, pp.19-39.
5. Iwasaki, T., Arakawa, T., and Tokida, K. I. (1984), Simplified Procedures for Assessing Soil Liquefaction during Earthquakes, *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.3, No.1, pp.49-58.
6. KALIS (2020), Guideline for Evaluating seismic performance of existing facilities (foundation and ground).
7. KALIS (2023), Guideline for improving seismic performance of existing facilities (foundation and ground).
8. KGS (2018), Commentary on Standard Guideline for the Design of Foundation Structures, Korean Geotechnical Society.
9. Kim, J. K., Son, H. H., Yoon, W. S., Chae, Y. S., and Choi, I. G. (2008), Evaluation of Liquefaction Remediation of Reclaimed Land by Sand Compaction Pile, In Proceedings of the Korean Geotechnical Society Conference (pp.1678-1688), Korean Geotechnical Society.
10. Korean Design Standard 17 00 00, Korea Construction Standard Center, pp.13-14.
11. Kwon, S. Y., Yoo, M. T., and Kim, S. J. (2018), Numerical Simulation of Dynamic Soil-pile-structure Interaction in Liquefiable Sand, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.7, pp.29-38.
12. Lee, S., Chae, J. S., and Park, S. K. (2001), Reduction Effect of liquefaction by Vibro-Replacement Stone Columns, In Proceedings of the KSR Conference (pp.443-450), The Korean Society for Railway.
13. Modoni, G., Croce, P., Proia, R., and Spacagna, R. L. (2019), Guidelines and Codes for Liquefaction Mitigation by Ground Improvement, In Towards a Resilient Built Environment-Risk and Asset Management (Vol.1, No.1, pp.810-817).

14. New Zealand Geotechnical Society Inc. (2021), Module 5: Ground Improvement of Soils Prone to Liquefaction.
15. Seed, H. B. (1982), Ground Motions and Soil Liquefaction during Earthquakes, Earthquake Engineering Research Insititue, pp.134.
16. Shin, E. C., Chung, D. K., Seo, K. C., and Lee, M. S. (2010), Case Study for Improvement of Marine Clay and Dredgedfill Ground by

CGS Method, In Proceedings of the Korean Geotechnical Society Conference (pp.480-488), Korean Geotechnical Society.

Received : March 21st, 2023

Revised : April 3rd, 2023

Accepted : April 3rd, 2023