

새만금 지역의 액상화 평가 및 향후 구조물 기초 설계시 액상화 영향의 고려방안 (II)

Liquifaction Evaluation of Saemangeum Area and the Considerations of Liquifaction Effect to the Foundations of Structures in Near Future (II)

김 유 성¹ Kim, You-Seong
고 형 우^{2*} Ko, Hyung-Woo

ABSTRACT

In the preceding study, the possibility of liquefaction according to the liquefaction evaluation methods was predicted in Saemangeum reclamation area for tide embankment, Jeollabuk-do, Korea. The risk of liquefaction was also expected when foundations and underground structures were built at a depth within 10 m below ground surface, and meticulous care was required in the design of them in the future. This study considered the effect of the embedded depth for foundation design regarding liquefaction based on the various earthquake data from literatures. On the basis of the results of this study, an alternative consideration in foundation design for liquefaction was proposed for the Saemangeum area.

요 지

선행연구에서 국내의 대표적인 매립지인 새만금 방조제 지역을 대상으로 액상화 평가방법에 따른 액상화 발생 가능성을 예측되었다. 또한 검토대상 지역의 깊이 10m 이내에 기초 또는 지중구조물이 구축될 경우 액상화에 따른 피해가 예상되었고, 향후 기초 또는 구조물 설치 위치에 따른 세밀한 검토가 필요한 것으로 판단되었다. 이 연구에서는 실제 여러 지역에서의 다양한 지진피해사례를 토대로 액상화가 근입깊이에 따른 기초에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 이 검토를 통해 새만금 지역에서 향후 구조물 기초 설계시 액상화 영향의 고려방안을 제시하였다.

Keywords : Liquefaction, Dredged soil, Maximum acceleration, Seismic response analysis

1. 서 론

선행 연구에서는 국내의 대표적인 매립지인 새만금 방조제 지역을 대상으로 액상화 평가방법에 따른 액상화 발생 가능성을 예측하였다. 또한 액상화 평가방법에 따라 장·단주기 실제 지진기록을 이용해 지진응답해석과 반복삼축압축시험에 의한 액상화 평가를 수행하였다. 평가 결과 대상지역의 준설매립토의 입도분포 곡선은 액상화 가능성이 매우 높은 범위에 해당하고 있고, 검토대상 지역의

깊이 10m 이내에 기초 또는 지중구조물이 구축될 경우 액상화에 따른 피해가 예상되고 있어, 향후 기초 또는 구조물 설치 위치에 따른 세밀한 검토가 필요한 것으로 판단되었다. 이 연구에서는 기초 또는 지중구조물에 대한 지진피해 내용이 상세히 기록되어 있는 일본과 중국의 피해사례를 수집하여 기초가 설치된 지역에서 기초의 형태 및 근입깊이에 따른 지진시 액상화 피해내용을 분석하였다. 이 분석을 통해 향후 액상화 발생에 대한 피해를 최소화 할 수 있도록, 연구대상 지역에서의 기초의 근입깊이 및 지중구

1 정회원, 전북대학교 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Chonbuk National University)

2* 정회원, 전북대학교 토목공학과 박사수로 (Member, Doctor candidate, Dept. of Civil Engrg., Chonbuk National University, E-mail: bismark77@jbnu.ac.kr)

조물의 설치위치에 따른 설계시 고려방안을 모색하고자 하였다. 우리나라에서는 지진에 대한 기초구조물의 피해, 특히 액상화에 대한 피해기록도 없어 외국의 피해사례에 따른 고려방안의 모색이 유효할 것인가에 대한 의문이 제기될 수도 있으나, 선행연구에서의 지진규모는 우리나라의 설계기준에 따른 지진규모를 설정하였고 설정된 지진 규모에 따른 액상화가능성을 검토한 것이므로 액상화가 발생한다면 유사한 피해를 예상할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 기초의 근입깊이에 따른 액상화의 영향

2.1 비액상화층(표층)과 액상화층 깊이의 영향

지반의 표면 가까이에는 점토·실트·자갈 등을 포함하는 단단한 표층(비액상화층)이 존재하는 것이 일반적이어서 그 하부의 모래층에서 액상화가 발생하더라도 그 악영향이 지표면에 미치지 않을 수가 있다. 분사·분수 현상이나 지반균열, 부등침하 등의 지반변형이 나타나는 것은, 그 표층이 얇거나 하부의 액상화층이 두꺼워서 표층을 관통하는 충분한 영향력이 있을 경우이다. 따라서, 액상화에 의해 지반변형이 발생하여 지상의 저층 구조물이나 매설 관에의 피해 여부는 표층부근의 비액상화층의 두께 H_1 과 그 하부의 액상화층의 두께 H_2 의 조합에 의해 결정된다고 생각할 수 있다. 그 관계를 이론적으로 고찰하기는 매우 어렵다. 따라서, 원위치에서의 액상화 피해현상의 관찰과 데이터 분석에 의해 경험적으로 유도되고 있다. 石原研而(1995)는 비액상화층의 두께 H_1 과 과거의 지진 등에서 액상화되었다고 생각되는 모래층의 두께 H_2 를 결정하여 경험적 법칙을 모색하였다. 일정 지역의 지표면에서 과거 지진시 분사·분수 현상이나 지반균열 등이 있었을 경우 ●표시로, 지반변형이 나타나지 않았을 경우에는 ○표시로 나타낸 사례를 다수 수집·도시하여 ●과○의 경계선을 그어 나타낸 것이 그림 1이다. 이 그림에서 비액상화층(표층)의 두께가 3m 이상이면, 그 아래의 모래층에서 액상화가 발생하여도 그 영향이 지표면에 나타나지 않으므로, 지표면에 기초를 두는 건물 등에는 피해가 발생하지 않게 된다. 이상의 검토는 지표면에서의 변형 또는 지표면 부근에서의 구조물 기초에 대한 액상화 영향의 여부에 관한 것이었으나, 이하에서는 지중에 근입된 기초에 액상화의 영향이 어떠한 조건하에서 발생하는가에 대하여 과거 경험적 측면에서 검토한다.

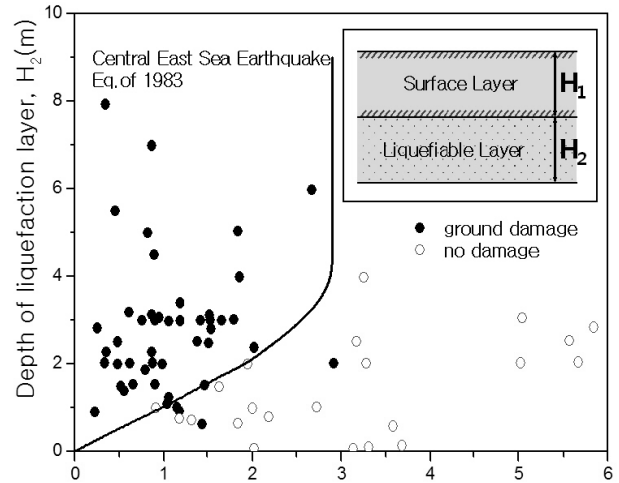


그림 1. 액상화가 지표면에 미치는 표층두께의 영향(石原研而, 1995)

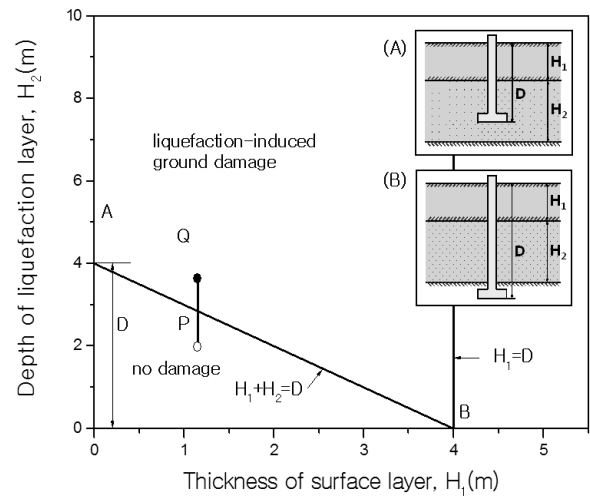


그림 2. 액상화층 내부 또는 그 하부에 기초 저면이 위치한 경우

2.2 기초저면이 액상화층 내부 또는 액상화층 하부에 있는 경우

그림 2(A)에 나타낸바와 같이 근입깊이 D인 기초가 액상화층의 내부에 위치하고 있는 경우를 검토한다. (A)와 같은 근입상태이면 기초는 액상화에 의한 영향을 받게 될 것이므로, 보-링 주상도에 근거하여 결정된 H_1 과 H_2 는 그림 2에서 액상화 영향 영역인 Q점의 위치에 ●로 도시된다. 또한, 근입깊이 D가 깊어서, 액상화층 하부의 비액상화층에서 기초가 지지되어 있는 경우에(그림 2(B)) 기초는 액상화에 의한 영향을 받지 않게 될 것이다. 이 경우는 보-링 주상도로부터 결정된 H_1 과 H_2 는 그림 2에서 비액상화 영향영역인 P점과 같은 위치에 ○로 도시될 것이다. 이상의 2가지 경우를 구분짓는 경계선은 $H_1 + H_2 = D$ 인 직선이 된다. 따라서, 대상 지역의 토질주상도 등에 의해

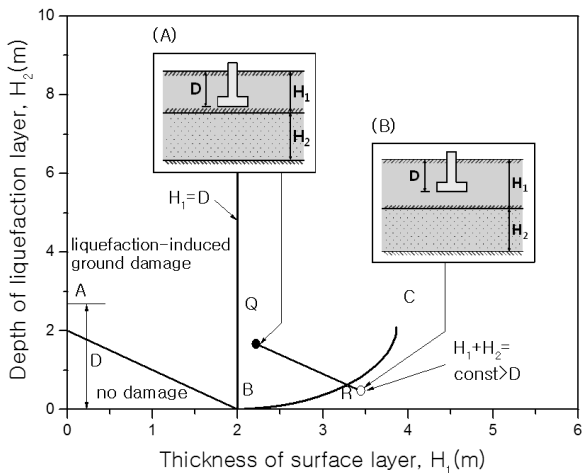


그림 3. 기초저면이 표층의 비액상화 층내에 근입된 경우

언어진 H_1 과 H_2 의 값이 이 직선보다 상측에 표시되면 기초에 피해가 발생하게 되고, 하측에 표시되면 피해가 발생할 가능성이 적다고 판단할 수 있다.

2.3 기초저면이 표층의 비액상화 층내에 근입된 경우

위에서는 기초저면이 지표면 근처의 비액상화층보다 하부에 설치된 경우 즉, $H_1 \leq D$ 의 경우를 대상으로 하였다. 이하에서는, 기초가 표층의 비액상화 층내에 설치되는 경우를 검토한다. 그림 3(A)에 나타난 바와 같이 기초저면이 하부의 액상화층에 근접하면 지지력이 부족하게 되어 기초가 파손될 가능성이 있다. 이 상태에 대응하는 H_1 과 H_2 는 그림 3의 점 Q(●)와 같은 위치에 도시된다. 저면보다 충분히 깊은 하부 위치에 액상화층이 있는 경우에는 그림 3(B)에 나타난 바와 같이, 액상화의 악영향이 없고 기초는 안정할 것이다. 따라서, 이 경우의 H_1 과 H_2 는 그림 3에서 R과 같은 위치에 도시된다. 이상의 검토에서, 기초 피해가 있을것인가의 여부를 구별하는 H_1 과 H_2 의 조합은 그림 3에 나타난 BC와 같은 곡선으로 나타낼 수 있을 것이다. 이 곡선의 형태는 간단한 이론에 근거하여 구하는 것은 곤란하므로 다음과 같이 유추한다. 예를 들어 그림 3(A)에서 기초의 저면이 지표면에 해당한다고 생각한다. 그러면, $H_1 - D$ 와 H_2 의 값을 조합하여, 지표면에 존재하는 기초의 피해유무를 판정하는 그림 1의 방법을 적용할 수 있게 된다. 따라서, 그림 1에 나타난 경계곡선을 그림 3에서는 횡축방향으로 D 만큼 이동하여 이용하면 될 것이다. 이와 같은 방법으로 구한 경계선을 나타낸 것이 그림 3의 곡선 BC이다.

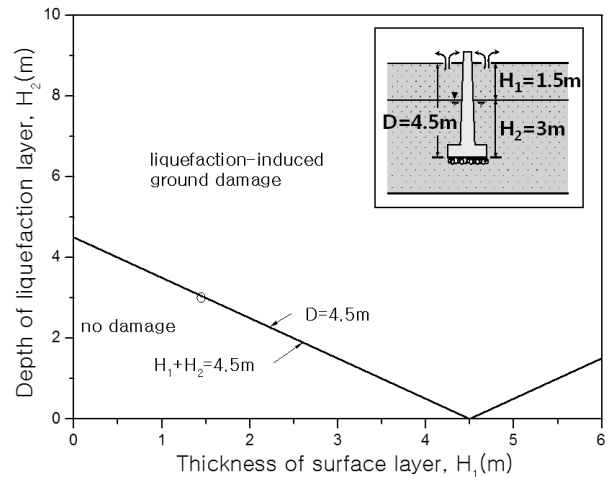


그림 4. 송전철탐의 기초(井合進 등, 1988)

이상 검토한 2가지의 경우, 즉 근입깊이가 액상화층 내부에 있는 경우와 표층내에 있는 경우를 종합하여, 기초피해 영향 여부의는 경계선을 구분짓는 H_1 과 H_2 의 관계를 나타내면 그림 3의 곡선 ABC가 얻어진다.

3. 사례검토에 의한 기초피해 예측방법 검증

위에서 검토한 피해여부 구분 경계선은 이론적 근거가 아닌 추론적 방법에 근거하고 있어, 사례 검토를 통해 그 타당성을 검증할 필요가 있다.

3.1 송전 철탐의 기초(일본 치바 지진, 1987)

이 지진에서 일본 치바시를 중심으로 한 해안선 매립지에서 액상화에 의한 피해가 발생하였다. 그림 4는 송전선의 철탐 및 기초의 거동에 관한 것을 보여주고 있다. $D = 4.5m$ 의 깊이까지 굴착, 기초를 시공한 후 되메움 처리되었다. 지진 후, 철탐 기둥의 주변에는 분사의 흔적이 보였으나, 철탐자체의 피해가 없고 경사도 없었다. $H_2 = 3m$ 부분의 되메움 모래층이 액상화하였다고 생각되고 있으나, 기초저면의 지지력이 충분히 확보되어 있었기 때문에 철탐의 손상이 발생치 않은 것으로 생각되고 있다. 지하수면 위의 모래층을 비액상화층으로 보면, $H_1 = 1.5m$ 가 되므로, 이 조건을 도시하면 그림상의 O표시점이다. 따라서, 이 사례에 경우 $H_1 + H_2 = 4.5m$ 직선을, 액상화에 의해 기초에 파손이 발생할지 여부를 결정하는 경계선으로 사용하여도 좋을 것으로 판단된다.

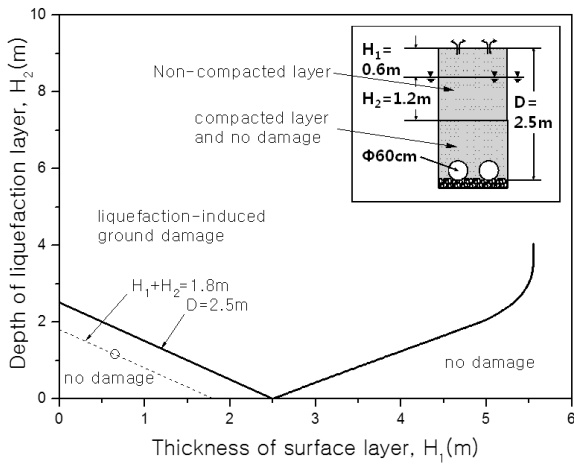


그림 5. 매설관의 거동(井合進 등, 1988)

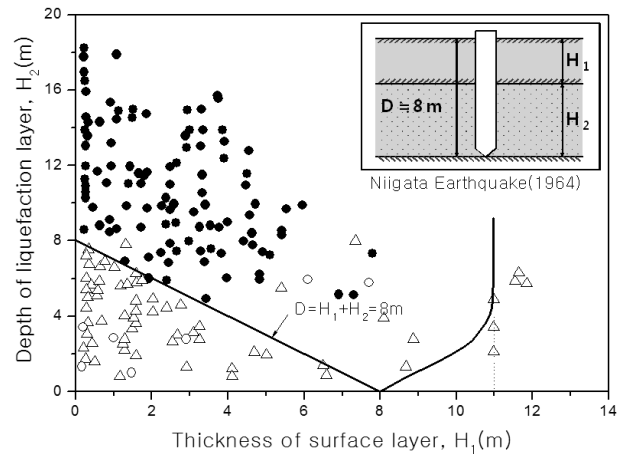


그림 6. 말뚝의 거동(Ohsaki, 1966)

3.2 매설관(일본 치바 지진, 1987)

일본 치바시 남쪽의 동경만 해안지역에 있는 파이프라인의 매설 지역에서 액상화가 발생, 그 직상의 지표면에서 다수의 분사가 발견되었다. 이 상황의 일례가 그림 5에 나타나 있다. 이 매설관의 경우, 우선 $D = 2.5\text{m}$ 깊이의 굴착을 행하고, 그 저부에 쇄석을 포설, 그 위에 60cm 직경의 매설관을 2열로 배치하고 있다. 그 주변 또는 상부의 모래는 잘 다짐되었으나, 지표면 가까이의 퇴메움층은 다짐이 시행되지 못하였다. 때문에, 지하수면 이하 $H_2 = 1.2\text{m}$ 부분의 느슨한 모래가 액상화되어, 지표면에 분출한 것으로 생각되고 있다. 이 사례에서는 기초의 설치 깊이가 $D = 2.5\text{m}$ 이므로, 그림 상에 우선 $H_1 + H_2 = 2.5\text{m}$ 의 직선을 긋는다. 그리고 그 우측에 그림 1에서 차용한 곡선을 접목시켜 전체의 경계선을 만들 수 있다. 상기의 상황에서, $H_1 = 0.6\text{m}$, $H_2 = 1.2\text{m}$ 가 얻어지므로, 이를 그림 상에 도시하면 그림 5의 ○위치에 놓인다. 이 사례에서는 매설관 자체의 손상이 없었기 때문에, 데이터는 ○로 표시하였다. 이 예로부터도 상술한 방법에 따라 작성한 경계선의 설정에 무리가 없는 것으로 판단된다.

3.3 말뚝의 거동(일본 니카타 지진, 1964)

일본 니카타시에서 지진 후 약 340개의 철근콘크리트 건물(2~3층)에서 피해상황 조사(Ohsaki, 1966)가 이루어졌다. 이들 건물 중에서 경사가 1%정도 이하의 것이 존재하는 지역을 경피해구역 B, 1%이상의 건물경사가 발생한 지역을 피해구역 C, 피해가 거의 없는 지역을 무피해구역

A로 구분하여 시가지를 3부분으로 분할한 지도를 작성하였다. 한편, 약 100개 지역에서의 보-링 주상도의 내용을 분석한 결과, 각 깊이마다의 액상화 발생여부를 결정짓는 N값의 존재가 있음을 발견하였다. 이 한계 N값에 근거하여 보-링 지역 각각에 대해, 액상화층의 깊이와, 표층의 비액상화 층의 깊이를 결정하여 그림 상에 표시하면 그림 6과 같다. 이 그림에서 보-링 지역이 상기의 무피해구역 A에 있는 경우는 ○표시, 경피해구역 B에 있는 경우에는 △표시, 피해구역 C에 있을 때는 ●표시에 의해 구분하였다. 한편 조사대상으로 한 철근콘크리트기초 말뚝의 타입 상황이나 띠기초의 설치상황에 의하면 3/4은 8m 또는 그 이하의 깊이에 위치하고 있었다. 이러한 상황을 고려, $D = H_1 + H_2 = 8\text{m}$ 의 직선을 그으면 그림 6에 나타낸 바와 같이 피해구역 C에 속한 보-링 데이터는 이 직선의 위쪽에 표시되고, 그 이외의 구역 A와 B의 데이터는 직선의 아래쪽에 표시되고 있음을 알 수 있다. 니카타시의 모래지반에서는, 8m 깊이에서의 한계 N치는 12였다. 따라서 8m 깊이에서의 N치가 12이하의 지점에서는, 그 위치에 타입된 말뚝이 액상화에 의해 선단지지력의 저하로 인해 크게 침하하여, 상부구조물에 큰 경사를 가져왔다고 생각되고 있다.

3.4 공장건축물의 피해(중국 당산지진, 1976)

중국의 당산 지진시에는 약 20km 떨어진 천진시에서도 큰 피해가 발생하였으나, 교외의 충적층 지역에 있는 기계 부품공장의 건물기초와 지반상황을 나타낸 것이 그림 7이다. 이 예에서는 연속기초는 상부의 혼합토층내에 설치되

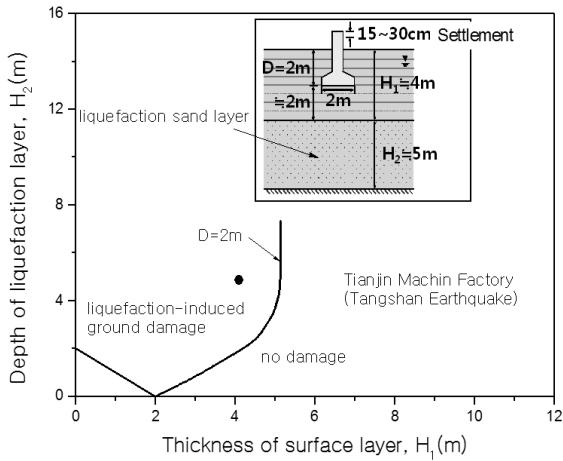


그림 7. 중국 천진시의 공장 건축물(Huixian et al., 2002)

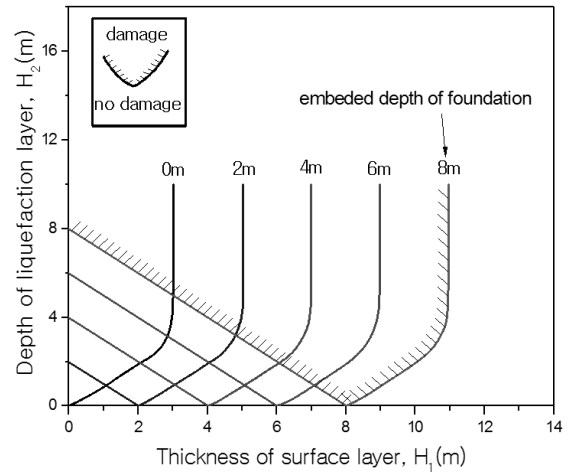


그림 9. 근입깊이에 따른 기초의 피해유무에 미치는 액상화층의 영향

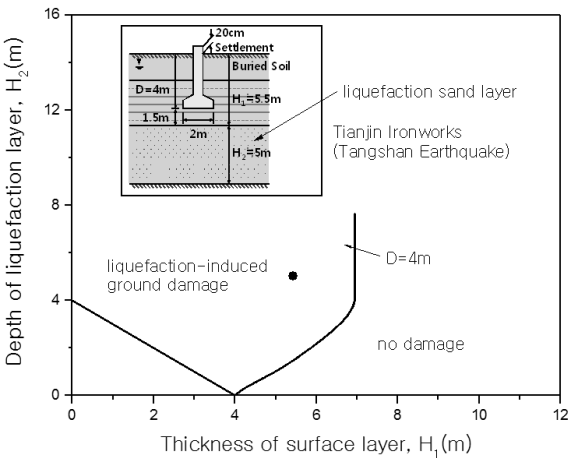


그림 8. 중국 천진시의 제철소 건물(Huixian et al., 2002)

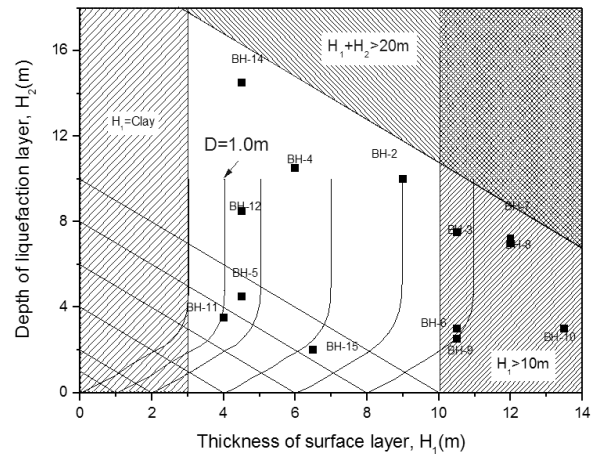


그림 10. 새만금 지역의 액상화 가능성 평가 결과

있고, 기초 저면은 액상화층보다 2m상부에 위치하고 있다. 그러나, 이 상부 혼합토층의 두께가 부족하였기 때문에 액상화의 영향으로, 기초는 15~30cm 침하가 발생하였다. 이 경우의 근입깊이는 $D = 2m$ 이므로, 전술한 방법에 따라 경계선을 그으면 그림 7과 같다. $H_1 \approx 4m$ 와 $H_2 \approx 5m$ 를 그림 상에 나타내면 이 경계선 상부에 표시되어, 피해의 발생사실과 합치하고 있음을 알 수 있다. 천진시에서의 제철공장 건물의 사례에서도 같은 방법으로 정리하면 그림 8과 같다.

3.5 사례분석 종합

이상과 같은 사례 분석결과, 위에서 검토된 경계선의 설정방법이 타당한 것으로 판단된다. 이 사례검토에 근거하여, 근입기초에 대해 액상화 악영향의 존재여부를 정하는 경계선을 상기 방법에 따라 근입깊이 $D=0, 2, 4, 6, 8m$ 의

경우에 대해 도시한 것이 그림 9이다. 예를들어 그림에서 8m의 의미는, 8m의 깊이에 근입된 기초가 액상화에 의한 피해여부를 결정짓는 조건이 된다. 즉 이선의 위와 왼쪽에 H_1 과 H_2 의 위치가 결정되면 피해가 발생하고, 오른쪽과 아래에 위치하면 피해가 발생하지 않는다고 판단할 수 있을 것이다.

3.6 새만금지역에서의 액상화에 대한 기초의 근입깊이 검토

이상과 같은 고찰 결과를 이용하여 본 연구대상지역에 적용을 하기위하여, 선행연구에서 얻어진 안전율 1이하인 지역을 액상화층 H_2 , 그 상부 지층(안전율 1 이상)을 비액상화층 H_1 으로 구분하여 그림 10에 도시하였다. 우선, 그림으로부터 근입깊이가 1m 미만이거나, 20m 이상일 경우에는 액상화가 발생하더라도 이 지역에서 지반 중에 설치

된 기초 또는 매설 구조물에는 액상화의 피해가 없을 것으로 판단된다. BH-5, BH-11, BH-12, BH-14 지역은 기초의 근입깊이가 2m 이내일 때 표면의 비액상화층의 두께가 5m 이하가 되면 액상화의 피해가 예상된다. 또한 BH-2, BH-4, BH-5 지역에서는 기초 근입깊이가 6m 이내일 때, 표면의 비액상화층의 두께가 9m 이하가 되면 액상화의 피해가 예상된다. 이와같은 내용은 향후 기초의 근입깊이 또는 매설구조물의 설치위치 등의 결정에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

1. 액상화에 의한 실제 피해기록을 바탕으로 근입깊이, 액상화층과 비액상화층의 두께에 따른 기초의 액상화피해 유무 영향선을 제시하였다.
2. 액상화피해 유무 영향선으로부터, 대상지역에서 기초 또는 지중매설구조물의 근입깊이가 1m 이하, 또는 20m 이상이면 어떠한 경우에도 액상화의 피해는 없을 것으로

판단된다.

3. 각지역의 지층상태가 상이하므로, 액상화피해 유무 영향선을 이용하여 근입기초 깊이와 매설구조물 등의 설치위치를 결정할 수 있다.

참고문헌

1. 石原研而 (1995), *根入れ基礎に及ぼす地震時における深部液状化の影響*, 土と基礎, 日本土質工學會.
2. 井合進、捕上武、武藤義敬、菊地正樹 (1988), “1987年千葉県東方沖地震による千葉湾周辺地域の液状化等について”, *港研資料*, No.616.
3. Ohsaki, Y. (1966), “Niigata Earthquake 1964 Building Damage and Soil Condition”, *Soil and Foundation*, Vol.6, No.2, pp.14-37.
4. Huixian, L., Housner, G. W., Lili, X. and Duxin, H. (2002), *The Great Tangshan Earthquake of 1976*, Caltech EERL : EERL.2002.001, California Institute of Technology.

(논문접수일 2011. 6. 20, 심사완료일 2011. 9. 10)