

액상화에 의한 피해 주택의 조사와 대책

林 健二 (Hayashi Kenji)*¹

福田勇治 (Hukuda Yuji)*²

中野尊之 (Nakano Nakayuki)*³

柴田 徹 (Shibata Toru)*⁴

1. 머리말

효고현 남부지진에서는 대규모 액상화 현상이 발생하여, 많은 피해를 불러왔다. 본 보고에서는 액상화에 의해 피해를 받은 주택의 지진 재해 후의 기초지반 조사 방법에 대해서 제안함과 동시에 조사 결과로부터 판정된 피해정도에 따른 복구 대책에 대해 제시하였다.

2. 피해조사 방법

효고현 남부지진에서는 많은 지반재해가 발생하여 각종 구조물이 피해를 받았다. 특히, 한신지역의 임해부 및 매립지에서는 대규모 액상화 현상이 발생하여 해안선 부근의 항만 구조물과 기초구조물에 현저한 피해가 확인되었다. 또, 전면기초와 연속기초

등의 얇은 직접기초를 갖는 주택(소규모 저층구조물)도 예외 없이 경사, 부등침하 등의 피해를 받았다.

액상화에 의한 주택의 피해는 크게 구분해서 지상부의 구조물 피해와 기초지반의 피해로 분류할 수 있다. 이 중, 지상부의 구조물 피해는 경사, 크랙 등의 손상 상황을 조사함으로써 쉽게 피해 정도를 판단할 수 있다. 그러나, 기초지반의 피해상황에 대해서는 육안으로 볼 수 없으므로 피해 정도를 정확하게 파악하는 실용적인 지반조사방법이 요구되고 있다.

액상화에 의한 기초지반의 피해로는, 국소적인 이완과 공동의 발생에 의한 기초지반의 지지력 저하를 들 수 있다. 특히, 얇은 기초로 지지된 주택에서는 지표면 아래 수m 정도까지의 지반의 전단 저항에 대해 생각할 필요가 있다. 이들 얇은 부분의 지반은 거의가 지하수위 보다 위에 있어 액상화가 발생하는 토층은 아니지만 지하수위보다 깊은 액상화 층으로부터의 분사·분수의 통로가 되므로 지진 발생 후에 현저하게 흔들릴 가능성이 있다. 효고현 남부지진 발생 당시에도 심한 액상화가 발생한 지역에서는 지하수위 보다 상부 지반의 N값이 액상화 발생 후에

*¹ 포레스트 엔지니어링 대표 (forest-e@kcn.ne.jp)

*² 中央復建 컨설턴트

*³ 中央復建 컨설턴트

*⁴ 福山大学工学部 교수

현저하게 작아진다는 몇 가지 조사결과가 보고 되고 있다. 이 때문에 기초 지반의 지지력이 지진 재해 후에 저하되는 것이 우려된다. 또, 지진 재해 후의 복구 시에는 기초 지반의 지지력 특성을 상세하게 파악할 필요가 있는데, 조사 대상 건수가 많고 구조물이 경량이어서 요구되는 기초 지반의 지지력 특성이 각 구조물 마다 미묘하게 다르다는 문제점을 갖는다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위해서 간단하고 저비용의 조사방법이 필요해진다.

본 보고에서는 액상화에 의해 피해를 받은 주택의 지진 재해 후의 기초 지반 조사 방법으로서 간이 동적 콘 관입시험과 탄성파(레이파) 탐사를 병용한 조사방법을 제안한다. 본 조사방법은 신속하고 저비용의 조사방법이며, 지표면의 상황이나 토층에 대한 적용성이 넓다. 특히, 간이 동적 콘 관입 시험은 콘이 소형이므로 자갈지반에 대해서도 관입이 용이하며, 연속적으로 몇cm 단위로 토층의 이완을 파악할 수 있다. 또, 포장과 장애물 등에 따라 간이 동적 콘 관입 시험의 실험이 불가능한 지점에 있어서는 탄성파 탐사를 병용하는 것으로 대처한다. 아래에 주택(소규모 저층 구조물)을 대상으로 한 경우의 기초 지반 조사방법에 대해서 서술한다.

조사의 흐름을 그림 1에 나타내었다. 1건의 구조물에 대한 조사 지점은 구조물 우각부의 4점 이상으로 한다. 또, 조사 심도는 토층 구성과 대상 구조물의 종류에 따라 다른데, 경량 저층 구조물의 경우 대체로 GL-5m 정도가 타당하다고 여겨진다. 조사 방법은 원칙으로는 간이 동적 콘 관입 시험에 의한 것으로 하는데 포장 등으로 관입이 불가능한 지점은 탄성파(레이파) 탐사를 적용한다.

조사항목의 일람표를 표 1에 제시한다. 조사에서는 간이 동적 콘 관입 시험에 의한 심도마다 N_d 값 혹은

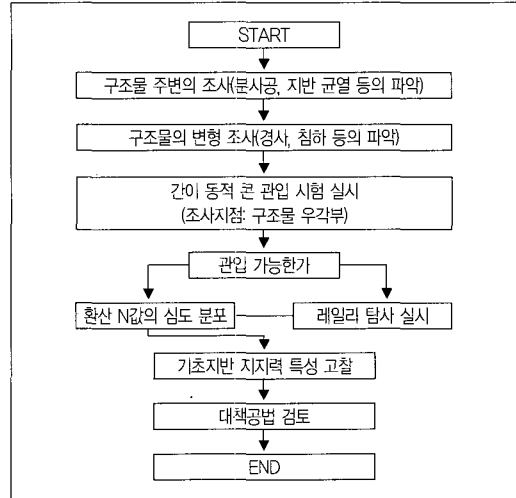


그림 1. 조사의 흐름

표 1. 조사항목

조사대상	조 사 항 목
구조물 주변의 지표조사	· 지반 균열 · 지반고(침하, 융기) · 분사퇴적 영역, 분사공 · 분사시료 샘플링
구조물	· 구조물의 침하, 경사 · 구조물의 손상(크랙 등) · 구조물의 기존시료(기초 설계도 등)
기초지반	· 기초지반의 다짐상태 (간이 관입 시험 결과 혹은 탄성파 탐사결과로부터 N_d 값 환산) · 국소적인 공동 존재 · 지하수위

은 탄성파 조사에 의한 심도 마다의 레이리파 속도 V_R 과 더불어, 액상화에 의한 분사퇴적영역, 분사공, 지반균열, 지반고와 가옥의 경사각도 등의 데이터를 수집, 정리한다. 이들 데이터는 소정의 형식으로 정리하여 각 구조물의 기록카드로서 정리하면 유용하다.

간이 동적 콘 관입 시험과 탄성파 탐사에서 얻어진 N_d 값과 V_R 은 지반의 지지력 특성을 고찰하는 지

액상화에 의한 피해 주택의 조사와 대책

표로는 사용하기 어려우므로 양자를 N값으로 환산하면 실용적이다. N_d 값과 V_R 과 N값과의 상관관계는 몇 가지 제안되고 있는데, 조사결과를 유효 이용하고 지지력 특성의 예측 정도를 향상시키기 위하여 조사 구역의 지반에 있어서 국부적인 상관관계를 찾아낼 수 있도록 조사 계획을 입안하는 것도 중요하다.

3. 조사방법의 적용성

(1) 간이 동적 콘 관입 시험

여기서는 필자들이 실시한 간이 동적 콘 관입 시험 및 표준 관입 시험결과에 근거하여 N_d 값과 N값의 관계에 대해서 고찰한다. 소개할 시험결과는 간

사이 지역에 있어 지반특성이 다른 점성토, 사질토, 역질토의 3종류 지반을 대상으로 동일 지점에서 간이 동적 콘 관입 시험 및 표준 관입을 실시하여 얻은 것이다. 표 2에 각 지반의 지반 특성을 제시한다.

그림 2는 각 지반에 있어 N_d 값과 N값의 관계를 나타낸 것이다. 각 지반의 N_d 값과 N값은 양호한 상관관계가 있는 것을 알 수 있다. 또한, N_d 값과 N값의 관계식 $N = \alpha \cdot N_d$ 에 있어서 계수 α 의 관계는 토질에 따라 다른 것을 알 수 있다. 그림 3은 계수 α 와 50% 입경 D_{50} 의 관계를 나타낸 것이다. 계수 α 와 $\log D_{50}$ 의 사이가 거의 직선적인 관계인 것을 알 수 있다. 이것은 간이 동적 콘관입시험의 적용성의 확대를 시사하는 것이다.

(2) 탄성과 탐사

본 조사 방법에서는 간이 동적 콘 관입 시험에 의한 지반 평가를 원칙으로 하는데, 자갈 지반과 포장 등으로 관입이 불가능한 지점은 탄성과(레이리파) 탐사를 적용한다. 따라서, 탄성과 탐사에 의해 얻어진 기초 지반의 레이리파 속도 V_R 에 대해서도, N값으로 환산하는 것이 실용적이다. 그림 4는 간사이 지역의 매립층을 대상으로 실시한 탄성과 탐사결과와

표 2. 조사 지역의 지반특성

지반	토질	N값 (평균치)	세립분(%) (평균치)	D_{50} (mm) (평균치)	상대 밀도
A	세립토 (F)	10~26 (18)	57.8~79.4 (69)	0.01~0.04 (0.02)	단단함
B	실트질모래 (SM)	2~21 (9)	37.7~60.4 (47)	0.04~0.39 (0.18)	느슨함
C	점토자갈혼합 (G-C)	3~17 (9)	5.2~18.9 (12)	0.72~23.4 (7.6)	느슨함

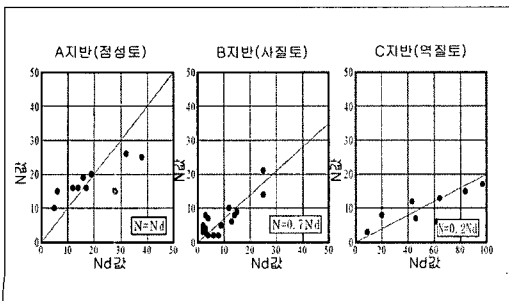


그림 2. N_d 값과 N값의 관계

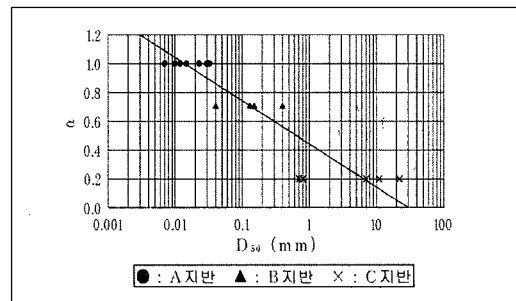


그림 3. 계수 α 와 D_{50} 의 관계

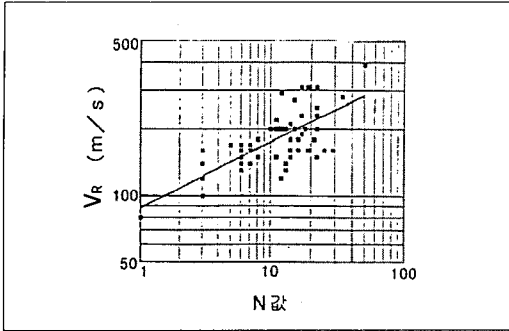


그림 4. V_r 과 N 값의 관계

표준 관입 시험 결과를 비교한 것이며, 동일 지점 동일 심도에서의 양자의 시험 결과를 대비시켜 놓았다. 양쪽에는 어느 정도의 상관 관계가 확인되고 있는데, 이것은 탄성과 탐사가 기초지반 조사에 적용이 가능하다는 것을 나타내고 있다.

4. 조사결과와 해석과 대책공의 방법

여기서는 제안한 조사방법에 의해 얻어진 조사결과와 해석에 대해서 서술한다. 즉, 대상 구조물 주위 4점의 조사에 의해 N_0 값에서 환산된 N 값을 이용하

여 그림 5에 제시된 바와 같은 조사 결과를 얻을 수 있다. 그림 5에서 대상 구조물의 어느 지점의 지지력이 어느 정도 약한지를 쉽게 판단할 수 있다. 또, 느슨한 사질토 지반에 있어서는 조사 결과로부터 다음의 두 가지 항목에 대해서 고찰하면, 대책을 생각할 때에 유효하다.

- ① 전심도에 걸쳐 지반이 이완된 지점의 추출(예를 들면, N 값 4이하 정도의 느슨한 지반이 연속적으로 이어지는 지점)
- ② 국소적으로 공동에 가까운 부분의 존재(예를 들면, N 값 1이하 정도의 매우 느슨한 지반이 존재하는 지점)

상기 두 가지 항목에 해당하는 지점이 조사 개소 내의 몇 점에서 보이는가에 따라 구조물을 피해정도로 분류하면, 대상 구조물 마다의 지반 지지력의 평가와 대책공의 필요성, 적절한 대책공법의 종류에 대한 검토가 용이해진다.

역상화에 의한 피해 지역의 대책공법의 목적은 이하의 3가지로 분류할 수 있다. 또, 대책안으로서는 표 3에 제시된 4케이스의 대책을 생각할 수 있다.

- ① 경사, 침하 된 구조물의 보수를 목적으로 하는

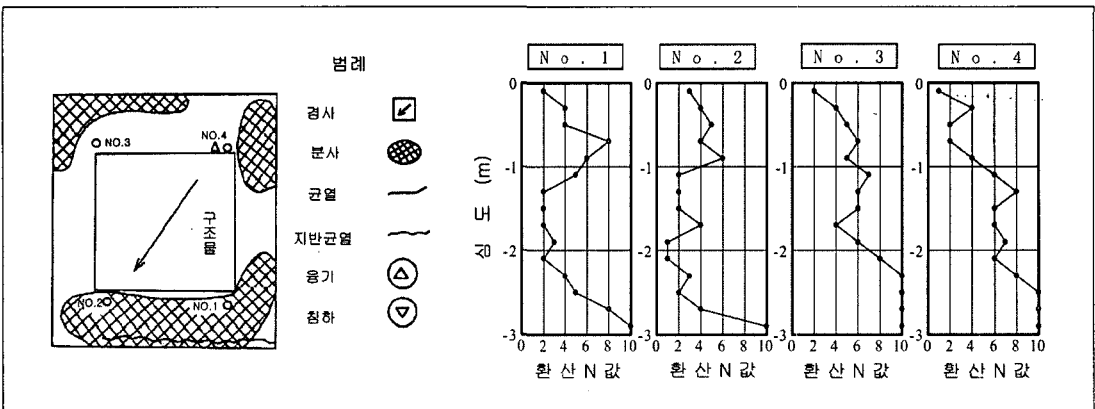


그림 5. 조사결과와 정리 예

액상화에 의한 피해 주택의 조사와 대책

대책

② 액상화에 의해 이완된 기초 지반의 개량을 목적으로 하는 대책

③ 대지진이 향후 발생해도 문제가 없는 대책

여기서는, 상기②의 기초 지반의 개량을 목적으로 하는 대책에 대해서 서술한다. 표 4는 최적 대책공법을 선정할 경우의 착안점과 판정방법의 일례를 제시한 것이다. 또, 표 5는 기설 구조물을 이설하지 않고 제한된 시공공간에서 강구할 수 있는 대책공법을 제시한 것이다. 여기서 이용되는 피해 정도는 기초지반 특성의 좋고 나쁨을 나타내는 것이며, 조사결과로부터 얻어진 구조물 주위의 기초지반의 이완 발생 상황으로 판정할 수 있다. 또, 이 피해 정도에 따라 적절한 대책공법을 선정할 수 있다.

표 3. 대책목적과 대책내용

	개 요	대책의 목적		
		①	②	③
Case 1	대책 필요 없음	×	×	×
Case 2	구조물만 대책	○	×	×
Case 3	구조물과 지반 대책	○	○	×
Case 4	향후의 대지진 대책	○	×	×

표 4. 대책공 선정시의 착안점

착안점	기 준	판 정
1.지반의 이완 2.국소적 공동	N≤4 N≤1	2종의 착안점에서, 조사결과를 종합적으로 판정하고 피해 정도 A~C로 판정

표 5. 피해 정도와 대책공법

피해 정도	대 책 공 법
A	• 주입공법 • 심층혼합처리공법
B	• 고강성 전면기초 공법 • 단말뚝 타설공법
C	• 대책 불필요

5. 피해조사 사례

조사대상 지역은 한신 지역의 임해부에 위치하는 매립지이다. 효고현 남부지진에 대해서는 해당 매립지 내의 많은 구역에서 액상화에 따른 분사 및 분수가 확인되고, 호안, 도로, 교량 등의 구조물에서 저·중·고층의 건축물까지 다양한 피해가 발생했다. 특히, 저층 건축물의 침하와 경사에 의한 피해가 현저했다. 액상화 현상에 의한 매립지반의 변형 정도의 파악을 목적으로 하여 실시된 토질 조사 결과를 다음과 같이 나타내었다.

본 지역의 토층구성은, 그림 6에 나타난 대로 지표면에서 순서대로 매립지(B), 충적점토층(Ac), 홍적사층(Ds)으로 구성되어 있다. 또, 매립층은 상부로부터 사력층(B1), 시층(B2), 사력층(B3)으로 나뉘어 있다. 효고현 남부지진 당시에 본 지역의 지표면 부근에 어느 정도의 수평가속도가 발생했는지는 관측 기록이 근처에 없어서 불분명하지만, 별도 실시한 본 지역에서의 동적 응답해석 결과에 의하면, 지표면 상에서 수평가속도 370gal의 발생이 추정된다. 그림 7에 수평 가속도 370gal을 이용하여 실시한 액상화 판정결과(FL치 분포)를 나타내었다. 그림 7에서 지

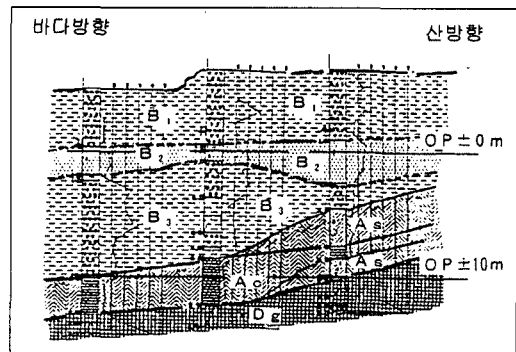


그림 6. 토층구성 상황

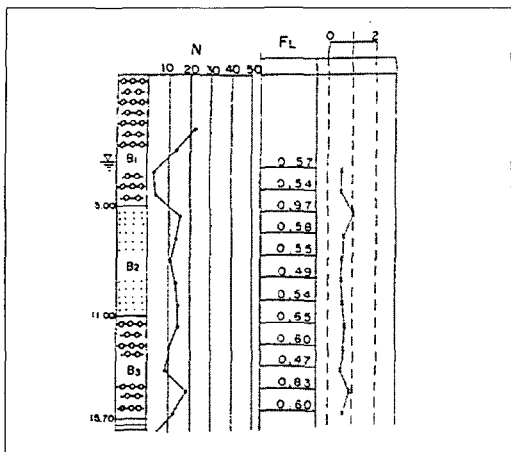


그림 7. 액상화 판정 결과

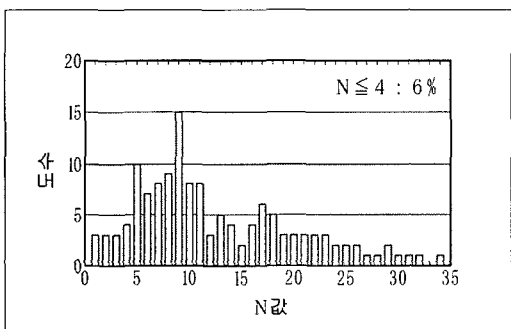


그림 8. 지진재해 전의 N값 분포(B1층)

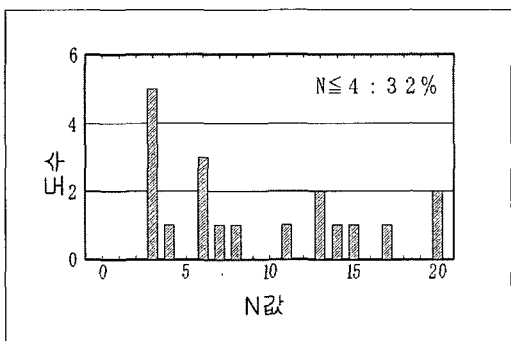


그림 9. 지진재해 후의 N값분포(B1층)

하수위 이하의 거의 모든 매립층(B2층 및 B3층)에서 액상화가 발생한 것을 알 수가 있다.

표 6. 지진 전후의 N값의 변화

토층	보링No.	조성완료후의 N값	재해후의 N값	평균치의 증감
B1	1	10(10)	6~15(9)	- 1
	2	8~30(15)	8~29(14)	- 1
	3	3~20(11)	3(3)	- 8
	4	7~30(15)	10~22(17)	+ 2
	5	7~28(19)	11~34(19)	0
	6	14~27(19)	3~17(9)	-10
	7	2~36(16)	3~22(11)	- 5
B2	1	4~12(8)	7~18(13)	+ 5
	2	-	21(21)	-
	3	6~19(10)	7~8(8)	- 2
	4	-	-	-
	5	7~14(12)	6~22(13)	+ 1
	6	5~20(12)	11~14(12)	0
	7	9~19(15)	11~15(13)	- 2
B3	1	3~6(5)	6(6)	+ 1
	2	6~35(17)	5~22(13)	- 4
	3	10~16(13)	4~28(16)	+ 3
	4	7~25(17)	12~22(15)	- 2
	5	10~16(12)	-	-
	6	6~15(11)	5~18(8)	- 3
	7	9~26(17)	8~18(12)	- 5

() : 평균치

기존의 데이터와 지진 재해 후의 데이터의 비교로 본 지역의 매립층의 N값의 변화를 정리한 것이 표 6이다. 액상화가 발생되었다고 여겨지는 B2층 및 B3층에서는 N값의 변화가 증가 혹은 감소하는 일정한 경향은 확인되지 않는다. 한편, 지하수위보다 위쪽에 분포하는 B1층에 대해서는 지진 후에 N값이 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 또, 그림 8, 그림 9는 지진 재해 전 및 지진 재해 후의 B1층의 N값의 도수 분포를 나타낸 것인데, 느슨한 모래층이라고 생각해도 되는 N값 4이하가 되는 데이터의 비율은 지진 전에 약 6% 이었던 것이, 지진 후에는 약 30%로 증가하

액상화에 의한 피해 주택의 조사와 대책

표 7. 기초지반 조사결과





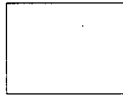
	[피해 정도 1] 4지점 모두 이완 발생	[피해 정도 2] 3지점에서 이완 발생	[피해 정도 3] 2지점에서 이완 발생	[피해 정도 4] 1지점에서 이완 발생	[피해 정도 5] 이완지점 없음
이 완 발 생 상 황	× ×  × ×	× ×  × o	× ×  o o	o ×  o o	o o  o o
	29%	50%	14%	7%	0%

표 8. 적용 가능한 대책공법

공법	개요	적용성
고강성 전면기초공법	콘크리트의 고강성 전면기초를 만들어 지반의 지지력을 증가시킴과 동시에 부등침하가 발생하기 어렵게 한다.	피해 정도 2~4
단말뚝 타설공법	기초지반 내에 나무 말뚝 등을 조밀하게 타설하고, 지반을 다짐한다.	피해 정도 2~4
심층혼합 처리공법	고압분사 · 교반공법에 의해 지반개량을 하고, 지반을 고결시킨다.	피해 정도 1~2
주입공법	시멘트 계의 주입재를 지반내에 주입하고, 지반을 고결시킨다.	피해 정도 1~2
말뚝 기초공법	가옥을 직접 지지하는 말뚝 기초를 시공하고, 가옥의 침하를 방지한다.	근본적인 대책이 되며 적용성은 낮다.

고 있다. 이는 B1층이 액상화를 일으킨 B2층, B3층으로부터의 분사 · 분수가 통과하는 길이 되어, 파이핑 현상으로 B1층에 이완이 발생했기 때문이라고 생각된다.

앞서 기술한 바와 같은 액상화에 의해 지반 재해를 입은 매립지에 대해 본 편에서 제안하는 조사 방법을 이용하여 피해 주택의 기초지반 조사를 실시했다. 즉, 피해가 비교적 현저했던 심수 건의 주택을 조사 대상으로 하고, 각 주택의 모서리부 4점에서 간이 동적 콘 관입 시험 혹은 탄성과 탐사에 의한 조사를 실시하였다.

표 7은 조사결과에서 얻어진 액상화에 따른 각 주택의 기초지반의 이완 발생 상황을 나타낸 것이다. 조사 주택의 반 수 이상이 구조물 주위 4개소 중에 3개소 이상에서 이완이 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

표 8은 지진재해로 이완된 기초지반의 개량을 목적으로 한 적용 가능한 대책공법을 나타낸 것이다. 표 8에서 피해 정도에 따라 적용성이 높은 대책공법을 선정할 수가 있다.

6. 맺음말

본 보고에서는 액상화 발생 지역에 대한 피해 주택의 기초지반 조사 방법에 대해서 제안하였다. 간이 동적 콘 관입 시험은 심도 방향의 미묘한 지지력 특성에 대한 액상화 후의 변화를 파악할 수 있으며, 액상화에 의해 부등침하가 발생한 소규모 구조물의 대책을 강구하는데 유효한 조사 방법이라고 생각한다. 그러나 조사위치, 수량 등의 조사 계획의 입안이

조사의 성공 여부에 크게 관여되어 있어 향후 본 방법의 적용성에 대해서 검토를 더욱 진행시킬 필요가 있다. 대책공법에 대해서도 대책공법의 효과 확인을 포함한 사례 수집이 필요하며, 데이터를 더욱 집적하고자 한다.

Liquefaction at seaside of Nishinomiya city, 3rd Kansai International Geotechnical Forum, Kobe, 1997

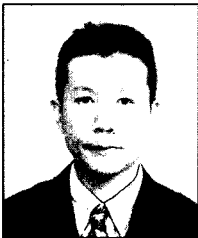
3. Takahashi Y. and Tanimoto K. : Change of SPT N-values measured on reclaimed land due to the 1995 Hyogo-ken nambu earthquake, 3rd Kansai International Geotechnical Forum, Kobe, 1997

4. 金村和生, 高林茂夫, 林健二: 簡易動的コーン貫入試験の基礎地盤調査への適用性, 第31回 地盤工学 研究発表會, 1996

참고 문헌

1. 土木学会 阪神大震災震災調査・第2次報告會資料, 土木学会, 1995
2. Shibata T., Ishikawa T. and Hayashi K. :

필자 소개



林 健二
HAYASHI Kenji

공학박사, 기술사, APEC엔지니어, 포레스트 엔지니어링 대표. 1985년 오사카대학 공학부 토목공학과 졸업, 1987년 오사카대학 대학원 석사 졸업, 2003년 오사카대학 대학원 박사 졸업. 석사 졸업후 (주)中央復建 컨설턴트에 입사하여 오사카 지반관계의 컨설턴트 업무에 종사. 주로 연약지반, 항만시설 및 지진·쓰나미의 방재에 관한 계획·조사·해석·설계·계측을 실시. 2005년부터는 건설 컨설턴트 업무를 하는 포레스트 엔지니어링을 설립하여 대표직을 맡음. 지금까지 집필한 논문은 압밀, 액상화, 사면안정, 보강토공법, 지중연속벽, 내진설계 등, 다양한 분야에 걸쳐 집필. 또한 오사카만을 테마로한 서적 「Bay area의 지반과 건설」을 집필분담하는 등의 활동 중.