

경계조건의 조절에 따른 합성 데크플레이트 슬래브의 거동특성에 관한 연구

°김 우영* 정 은호* 엄 철환** 김 회철***

A Study on the Dynamic Characteristics of Composite Deck Plate According to the Modification of Boundary Conditions

Woo-Young Kim*, Eun-Ho Jeong*, Chul-Hwan Eom**, Hee-Cheul Kim***

ABSTRACT

As the requirement of high-rise buildings in big cities increases, steel structural system becomes more popular in spite of the relatively higher material cost compared to that of the concrete structural system. Most of the steel structure adopts metal deck floor system because of the easiness in construction. However, the metal deck floor system has a weakness on vibration which became very important factor in office buildings, hotels and residential buildings as the more sensitive machines being used. Therefore, most of the building codes in many countries restrict the natural frequency of the each floor should be higher than or equal to 15 Hz.

Floor vibration of the KEM deck composite floor system which has been developed recently from the engineers and scientists in Korea was measured. Also, the simplified analytical derivation of natural frequency for each floor was studied according to the measured natural frequency for each different boundary condition of the floor. As the length of the slab gets bigger, the natural frequency of the slab becomes lower even though the structural designer still considers it as a one-way slab.

1. 서론

1.1 연구의 배경

현재 철골구조물과 합성구조물은 이용성의 증가 및 시공기술의 발달로 인해 초고층화와 더불어 장스팬화 하는 등 큰 발전을 이루어왔다. 기존 철근콘크리트 구조물에 비해 부재의 질량 감소와 단면감소로 인하여 상대적으로 강성이 낮아지고 구조물의 고유진동수와 감쇄계수 또한 감소하게 되었다. 따라서 기존의 큰 강성을 가진 구조물에서 무

시되어 왔던 진동과 같은 동적거동에 대해 민감하게 반응하는 문제점을 안고 있다.

최근 국내에서도 데크플레이트에 대한 연구가 활발히 진행되어 국내 제작과 시공이 이루어지고 있으며, 앞으로는 철골을 사용한 학교 및 사무실, 아파트와 같은 주거용 건물에도 사용될 전망이다. 그러나 내화구조용 데크플레이트를 사용한 합성슬래브는 사용성에 영향을 줄 수 있는 진동에 대해서 민감하게 반응하는 단점을 가지게 되었다. 이러한 이유 등으로 인하여 일본의 데크플레이트

시공규준^{16), 17)}에서는 데크플레이트를 사용한 합성슬래브의 고유진동수를 15Hz 이상으로 제한하고 있으나 국내에서는 아직까지 데크플레이트에 대한

* 경희대학교 건축공학과 대학원

** 삼성 건설기술연구소 수석연구원

*** 경희원, 경희대학교 건축공학과 조교수

관련법규가 제정되어 있지 않으나 새로 개발된 KEM DECK의 연구 결과²⁾에서는 데크플레이트를 사용한 합성슬래브의 고유진동수를 15Hz이상 되도록 요구하고 있다.

1.2 연구의 목적

데크플레이트를 사용한 합성슬래브의 고유진동수를 예측하는데 있어서 지금까지는 단지 정적하중으로 인한 처짐값을 이용하여 약산법으로 검토되어 왔는데, 이러한 예측방법은 합성슬래브의 고유진동수가 단위 길이당 강성과 하중에만 영향을 받고 있으므로 슬래브의 길이가 길어질 경우 발생할 수 있는 고유진동수의 변화를 파악할 수 없는 단점을 갖고 있다. 또한 현장에서 시공되고 있는 합성슬래브는 콘크리트의 연속타설로 인해 슬래브의 단부지지 조건이 인접 슬래브에 의해 구속될 수 있으며 슬래브 단부가 외부에 노출되어 인접 슬래브에 의한 구속이 해제되는 부분도 발생할 수 있다. 더 나아가 보와 거더에서 발생하는 처짐도 슬래브의 강성을 저하 시키는 요인으로 작용할 수 있다.

따라서 본 연구는 데크플레이트를 사용한 합성 슬래브에 대해 경계조건과 길이가 다른 슬래브의 고유진동수를 측정하고, 이러한 변수를 고려한 해석 결과와 비교 분석 함으로써 시공후 발생할 수 있는 고유진동수 변화와 슬래브의 경계조건과 길이변화가 고유진동수에 미치는 영향을 파악하는 것을 목적으로 한다.

2. 슬래브 진동의 발생 원인

진동이란 물체가 정위치에서 시간이 경과함에 따라 상·하 또는 전·후 등으로 반복하는 움직임을 말한다.⁶⁾ 슬래브에서 발생할 수 있는 진동의 원인으로서는 실내에서 사용되는 작은 기계나 교통 수단으로 사용되는 자동차 및 인간의 움직임에 의해서 발생할 수 있다.

그중 자동차에 의해 발생하는 진동은 사람이 거주하고 있는 슬래브까지의 발생경로가 복잡할 뿐만 아니라 먼 거리에서 발생하는 것이 일반적이다. 따라서 고차 진동수 성분은 전달 경로에 존재하는 매질의 영향에 의해 쉽게 감쇠가 되므로 낮은 진

동수 성분만 슬래브에 전달될 수 있다. 또한 실내에서 사용하는 소형 기계에 의해 발생하는 진동 중 저차 진동수 성분이 사람들에게 불편함을 발생시킬 수도 있으나 일반적으로는 고차의 진동수 성분이 주류를 이루고 있다. 사람의 물리적 활동은 다양한 동적하중을 발생시킬 수 있으며 슬래브 위에서 직접 발생하고 불규칙적인 진동을 발생시킬 수 있다. 또한 사람에 의해 발생하는 하중은 경우에 따라 주기적으로 혹은 일시적으로 슬래브에 발생할 수 있는데 진동이 발생하는 구조물이 낮은 강성을 가지거나 자중이 클 경우 저차의 진동수를 발생시키게 된다. 또한 슬래브에서 발생하는 진동은 수평성분과 수직성분으로 나눌 수 있는데 수평 성분은 진동 에너지가 아주 적기 때문에 쉽게 상쇠되고 수직성분이 슬래브에 주로 작용하게 되며 이러한 수직진동이 거주자들에게 불쾌감을 발생시켜 사용성에 영향을 미치게 된다.

3. 합성슬래브의 수직진동 측정

내화구조용 데크플레이트인 KEM-DECK을 사용한 합성슬래브의 고유진동수를 경계조건과 길이의 변화에 따라 측정을 수행하였다. 측정위치의 선정은 동일 슬래브에서 3개의 장소로 나누어 측정 하므로써 각 장소에 따른 고유진동수의 변화 정도를 살펴보았다.

3.1 측정기기

슬래브의 고유진동수를 측정하기 위해 사용한 장비와 가속도 센서는 Table 1.과 같다.

Table 1. Vibration measurement equipment

Model Name	Model Number	Sensitivity (<i>mV/g</i>)
signal analyzer	SA 390	
	3191A	4910
Accelerometer	3191A	5110

3.2 측정방법

본 측정에서는 합성슬래브의 고유진동수를 측정하기 위해서 10kg의 모래주머니를 50cm 높이에서

떨어뜨렸으며, 한 장소에서 6회 이상 반복 측정을 수행하였다. 측정 위치를 선정하는데 있어서 고려되는 점은 슬래브의 중앙지점에 보가 지나가기 때문에 측정위치를 기둥에 의해 구별되는 큰 슬래브와 보에 의해 구분되는 작은 슬래브로 구분하였으며, 보가 위치한 곳에서 고유진동수를 측정하여 보에 의한 고유진동수의 변화를 조사하였다. 슬래브 내에서의 측정위치는 Fig. 1에 나타난 바와 같다.

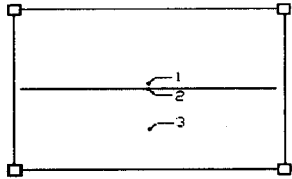


Fig. 1 Measuring Points on Slabs

3.3 측정 대상 구조물의 개요

합성슬래브에서 사용된 데크플레이트의 규격은 KEM-DECK75-1.2t이며, 콘크리트의 토핑은 80mm이고 와이어메쉬는 $\varnothing 6-100 \times 100$ mm을 사용하였다. 데크플레이트의 형상과 합성슬래브의 형태는 Fig. 2와 같다. Fig. 3은 측정 대상인 건물의 3층 평면도이며, 빗금친 부분은 측정을 시행한 슬래브를 나타내고 있다. 또한 Table 2는 측정 슬래브의 크기와 주요단면 치수를 나타낸 것이다.

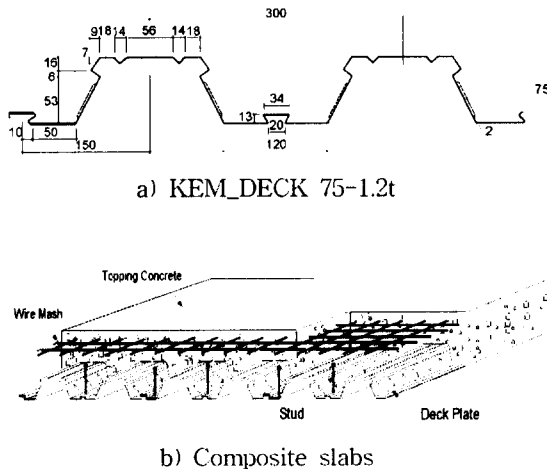


Fig. 2 Deck Plate and Composite Slabs

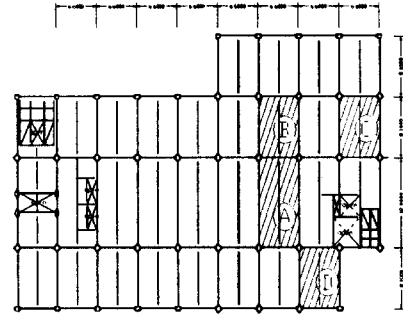


Fig. 3. plan view

Table 2. Slabs and Main Member Size

Data Name	Member Size (mm)		slab size (m)
	A	Girder	
	Beam	H 506x201x11/19	
B	Girder	H 500x200x10/16	8.1x6.6
	Beam	H 500x200x10/16	
C	Girder	H 500x200x10/16	8.1x6.6
	Beam	H 506x201x11/19	
D	Girder	H 500x200x10/16	8.1x6.6
	Beam	H 506x201x11/19	

3.4 측정결과 및 분석

합성슬래브의 고유진동수 측정결과를 Table 3에 나타냈다. 슬래브의 길이 변화에 따른 고유진동수 변화를 살펴보면 장변방향 길이가 8.1m인 B 슬래브의 고유진동수는 15.652Hz이며 길이가 12m인 A 슬래브의 경우 10.533Hz로 나타났다. 슬래브의 장변 방향의 길이가 3.9m 증가함에 따라 5.1Hz의 고유진동수 변화가 발생됨을 알 수 있었다.

슬래브의 연속성에 따른 고유진동수 변화를 살펴보면 슬래브의 장변방향만 불연속인 슬래브 C의 경우 슬래브 B에 비해 약 0.29Hz 떨어진 15.368Hz로 나타났으며, 장변과 단변방향 모두 불연속인 슬래브 D에서는 약 1Hz 떨어진 14.698Hz로 나타나고 있음을 알 수 있었다.

또한 측정위치에 따른 고유진동수의 변화를 살펴보면 보에 의해 구분되는 작은 슬래브의 3번 위

치에서 가장 작은 값이 나타났다. 큰 슬래브에 위치한 1,2번 지점에서는 C슬래브를 제외한 A, B, D 슬래브에서 거의 같은 값을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

Table 3. Natural Frequency of Test Result

Data Name	Test Point	Test Number						Average
		1	2	3	4	5	6	
A	1	10.59	10.59	10.56	10.53	10.6	10.59	10.577
	2	10.59	10.59	10.56	10.53	10.6	10.59	10.577
	3	10.53	10.53	10.53	10.55	10.59	10.47	10.533
B	1	15.72	15.72	15.66	15.66	15.66	15.66	15.680
	2	15.72	15.72	15.66	15.66	15.66	15.66	15.680
	3	15.66	15.69	15.66	15.65	15.65	15.6	15.652
C	1	15.4	15.34	15.41	15.4	15.31	15.28	15.375
	2	17.03	17.16	17.16	17.03	16.91	16.91	17.033
	3	15.34	15.35	15.48	15.36	15.4	15.28	15.368
D	1	14.67	14.77	14.73	14.61	14.7	14.72	14.700
	2	14.67	14.77	14.73	14.63	14.7	14.7	14.700
	3	14.7	14.72	14.67	14.7	14.7	14.7	14.698

Fig 4.와 Fig 5.에서는 보에 의해 구분되는 작은 슬래브에 대한 F.F.T 분석 그래프와 기둥에 의해 구분되는 큰 슬래브에 대한 F.F.T 분석 그래프를 진동수에 따른 가속도 레벨로써 표현하고 있다. 그래프에서 보는 바와같이 슬래브의 고유진동수에 보에 의한 영향이 크게 작용하는 것을 알 수 있으며 이후 모델링에서도 슬래브와 보의 동일한 경계 조건으로 거동하는 것으로 고려하였다.

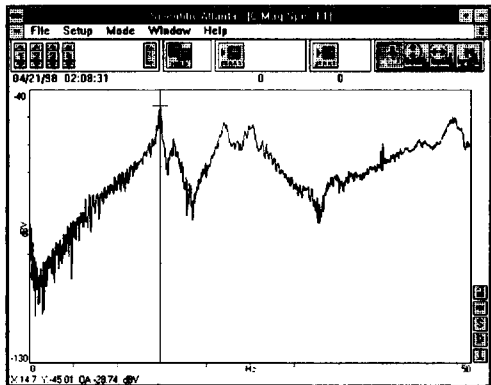


Fig 4. The Natural Frequency of the slabs

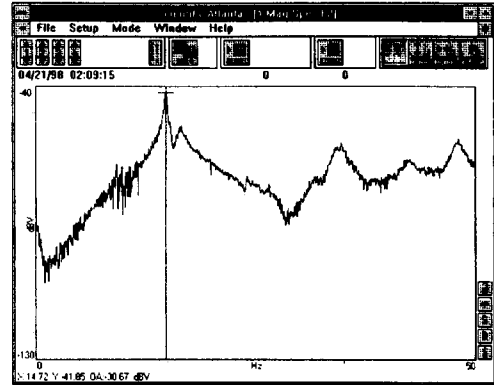


Fig 5. Natural Frequency on the slabs on the beam

4. 합성슬래브에 대한 동적해석

4.1 동적해석 모델

합성슬래브를 해석하기 위한 모델링에서 데크 플레이트와 콘크리트를 분할할 경우, 자유도수의 급격한 증가로 슬래브를 포함하는 전체 구조물의 해석에 소요되는 시간과 많은 노력이 요구되므로 해석의 효율을 위해 모델을 단순화시킬 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 합성슬래브를 데크플레이트와 콘크리트가 일체성을 가진다는 가정하에 단일 재료로 된 콘크리트 슬래브로 단순화시켰으며, 데크플레이트와 와이어 메쉬 또한 같은 강성을 가진 콘크리트로 환산하여 슬래브의 두께를 결정하였다. 또한 슬래브 하중을 환산된 두께에 맞는 콘크리트의 단위중량으로 환산 하였으며 Table 4. 는 환산 결과를 나타낸 것이다.

콘크리트 강성으로 환산시키기 위해서는 철과 콘크리트의 탄성계수비인 n 을 사용할 수 있는데 단면환산에는 n 의 값을 15로 적용하였다.

Table 4. Thickness and mass density of the slab for the analysis

thickness (cm)	mass density (kg/cm ³)
15.54	0.00206

Table 4.에서 보는 바와 같이 콘크리트의 중량은 290kg/m³, 데크플레이트의 중량은 20kg/m³이며 마감하중은 10kg/m²만을 고려하였다. 또한 슬래브의

강도는 270kg/cm²이며 탄성계수는 243997kg/cm²으로 하였고, 철골부재의 탄성계수는 2.1×10⁶kg/cm²으로 하였다. 포아송비는 콘크리트를 0.167 철골은 0.3으로 고려하였다. 슬래브의 고유진동수를 계산하기 위해 사용된 전산해석 프로그램은 포스코에서 개발한 MIDAS GEN V3.1이며, 슬래브를 모델링하기 위해 사용한 요소는 플레이트이고 요소의 이름은 MITC4 이다.

4.2 동적해석시 고려한 가정

슬래브의 고유진동수를 구하기 위한 플레이트 요소는 크기가 30cm일 경우 해석결과가 거의 수렴하고 있으므로 30cm×30cm으로 해석을 수행하였으며 보와 거더의 요소 크기도 30cm로 분할하였다. 슬래브내 수평진동은 무시할 만큼 작고 수직진동이 주된 관심의 대상이므로 유한요소의 모든 절점에서 수평방향 변위와 수평면내 회전변위를 구속하였다. 슬래브 단부의 경계조건은 회전과 처짐을 허용하였고 비틀림은 거더의 강성으로 인해 구속되는 것으로 보았다.

거더의 단부 지지조건은 철근콘크리트 기둥속에 고정되어 있으므로 고정단으로 하였으며, 거더 요소간 경계조건에서 처짐은 허용하고 회전은 구속하였는데 일반적인 해석방법에서는 거더의 강성이 슬래브 강성에 비해 크기 때문에 처짐과 회전이 구속되는 것으로 생각할 수 있다. 그러나 처짐과 회전을 고정시킬 경우 거더의 지나친 강성 증대로 인해 고유진동수를 너무 크게 볼 수 있으므로 거더의 처짐이 발생하는 조건으로 거더의 강성을 고려하였다.

보의 단부 지지조건은 거더에 의해 회전과 비틀림이 구속되며 처짐은 허용하는 것으로 볼 수 있다. 보 요소간 경계조건에서는 보와 슬래브가 일체 거동한다는 가정하에 회전과 비틀림을 해제시켰다. 결국 보 요소간 경계조건은 슬래브와 동일한 조건으로 볼 수 있다.

슬래브가 불연속일 경우 이웃한 슬래브에 의한 구속이 해제되어 거더의 비틀림 뿐 아니라 회전도 발생하는 것으로 보고 강성을 저하시켰으며, 거더와 보가 교차된 지점에서만 보의 강성으로 거더의 회전과 비틀림이 구속된다고 보았다. 해석대상 슬래브의 크기와 단부조건을 Fig 6.에서 나타내고 있다.

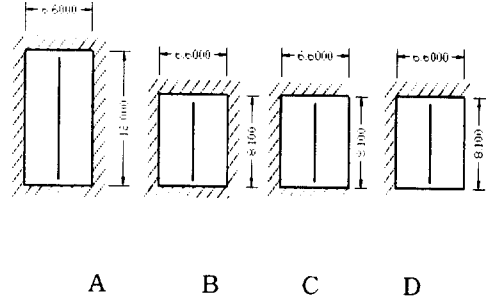


Fig 6. Boundary Conditions of Analysis Models

5. 실측 및 해석결과에 대한 비교 분석

측정에 의한 고유진동수는 가장 작은 값이 문제가 되므로 측정에서 가장 작은 값을 전산해석에 의한 결과와 비교하였으며 그 결과는 Table 5.에 나타내었다.

Table 5 Results of the analysis and measurement

Data Name	Natural Frequency(Hz)	
	실측치	해석치
A	10.533	10.4270
B	15.652	16.8853
C	15.368	16.4351
D	14.698	15.2832

전산해석에 의한 결과를 측정결과와 비교할 경우, 슬래브 A에서는 거의 일치하고 있었으나 B, C, D 슬래브에서는 약 0.59Hz~1.23Hz 정도로 비교적 큰 차이를 보이고 있으며 Fig 7.에서는 측정결과를 기준으로 한 해석결과의 상대적 오차를 나타내었다. 슬래브 장변방향이 불연속인 슬래브 C의 경우, 거더의 회전구속을 해제시킨 결과 16.4351Hz로 B 슬래브에 비해 약 0.45Hz가 떨어지는 경향을 보였으며, 이는 측정에 의한 결과치인 0.29Hz와는 0.16Hz의 차이를 나타냈다.

단변방향이 불연속인 경우 15.6144Hz로 약 1.2Hz정도 떨어졌으며, 장변과 단변이 모두 불연속인 슬래브 D의 경우 15.2832Hz로 슬래브 B의 결과치인 16.8854Hz보다 1.6Hz가 떨어져 측정에 의해 알 수 있는 차이인 1Hz와는 약 0.6Hz의 오차가 발생하고 있음을 알 수 있다.

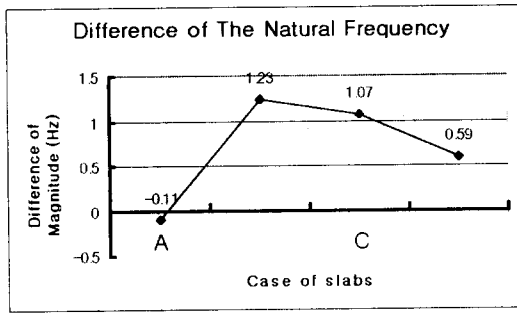


Fig. 7 Difference of the Measuring and Analysis Result

6. 결론 및 향후 연구과제

6-1 결론

본 연구에서는 충격진동 실험을 통하여 합성슬래브의 고유진동수를 측정하였으며 전산해석 프로그램을 사용하여 구한 결과와 고유진동수를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 건물의 내부에 위치한 슬래브 보다 외부에 면한 슬래브에서 고유진동수가 떨어지고 있었는데 장변이 불연속인 경우 약 0.29Hz, 단변이 불연속인 경우 약 1Hz 정도로서 단변방향이 불연속인 경우 고유진동수에 미치는 영향이 큰 것을 알수있으며 슬래브의 외부에 면한방향에 의해서 고유진동수의 변화하는 정도가 다르게 나타나는 것을 알 수 있다.

2. 일방향으로 간주하여 설계되고 있는 데크플레이트 슬래브도 전체크기에 따라 고유진동수가 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 슬래브의 길이가 증가함에 따라 진동수가 감소하여 건물의 사용성에 많은 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

3. 측정결과와 동적해석 결과의 비교시 장변방향 길이가 12m인 슬래브 A의 고유진동수는 비교적 잘 일치하고 있으나 슬래브의 장변방향 길이가 3.9m 줄어든 슬래브 B, C, D에서는 측정결과와 동적해석 결과가 0.59~1.23Hz정도 나타나고 있음을 알 수 있다. 그러나 슬래브의 단부가 외부에 면할 경우에 발생하는 고유진동수의 감소는 측정결과와 해석결과의 차이가 0.16Hz~0.6Hz로 약간의 오차만 발생할 뿐 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

따라서 본 논문에서 가정한 경계조건에 의해 간단하게 데크플레이트를 사용한 합성슬래브의 고유진동수를 예측할 수 있으며 외부에 면한 슬래브에서 발생하는 진동의 영향뿐 아니라 길이변화에 의한 영향도 파악할 수 있다.

6-2. 향후 연구과제

보다 다양한 슬래브 크기에 따른 고유진동수의 측정을 통하여 면적변화에 따른 고유진동수 변화를 알아내고 전산프로그램을 사용한 동적해석과 비교하여 데크플레이트를 사용한 합성슬래브의 고유진동수를 가능한한 정확하게 예측할 수 있는 방법에 대한 연구가 계속되어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 대한건축학회, Composite Metal Deck Slab system 연구, 1996
2. 최성모 외, 합성슬래브 설계·시공의 요약(연구 결과 발표회), 강구조학회지, 1997
3. 우은택 외, 구조용 내화 데크플레이트를 이용한 합성슬래브의 고유진동수와 강성과의 관계, 대한건축학회학술발표논문집, 1997
4. 최동섭 외, 합성데크플레이트 슬래브의 수직진동에 대한 사용성 평가, 대한건축학회학술발표논문집, 1997
5. 차일환, 옥정권, 소음진동공학, 문운당, 1994
6. 천병식, 지반진동 영향과 대책, 건설연구사, 1993
7. Allen D.E and T.M.Murray, Design Criterion for Vibration Due to walking, AISC Engineering Journal 4th, 1993
8. H.Bachmann, Vibration Problems in structures, Birkhäuser Verlag, 1995
9. H.Bachmann, W.Ammann, Vibrations in structures, IABSE-AIPC-IVBH, 1987
10. J.F Wis and R.A Parmele, Human Perception of Transient Vibration, Structural Divisin, 1974
11. Lloyd C.P.Yam, Design of Composite Steel-Concrete Structures, Surrey University, 1981
12. 合成スラブ工業會, 合成スラブの設計・施工マニュアル
13. テツキプレート床構造 設計・施工規準