

KBC 내진설계기준 수정을 위한 지반분류와 지반계수에 대한 제안



김용석
목포대학교 건축공학과 교수

1. 서언

IBC(International Building Code)와 KBC(Korean Building Code)에서는 1994년 NEHRP(National Earthquake Hazards Reduction Program)에서 제시한 표1에 나타난 것과 같은 지반분류 체계를 채택하여 사용하고 있으나 지진해석을 위한 실무적인 측면에서 지반분류가 세분화 되어 있지 못하고, 지반분류를 위한 지반특성 판정에서도 실무자의 주관적 판단에 따라 큰 차이가 발생하고 있다. 또, IBC와 KBC 기준에서 지반은 상부 100ft(30.48m) 지반의 지반특성치 평균에 따라 분류하도록 규정하고 있는데, 지표면에 놓인 기초의 경우에는 이 규정이 적합하지만 문힌기초(등가원형기초 반경의 1/10 이상 문힌기초)의 경우에는 부적합한 것으로 나타났다. 그리고, 지반분류 체계가 600, 1200, 2500, 5000 ft/sec 등 ft-kips 단위체계에서 개발된 것을 180, 360, 760, 1500 m/sec 등 SI 단위체계로 변환하여 사용함으로써 각 지반종류를 규정한 지반특성치 경계값들이 10진법에 익숙한 SI 단위체계 사용자들에게는 좀 낯설게 보인다.

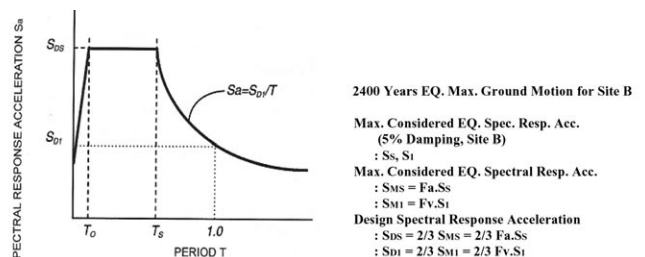
또, IBC에서 지반계수의 입력지진수준에 따른 직선보간은 허용하고 있으나, 각 지반 사이에 해당하는 지반에 대한 지반계수의 보간은 허용하지 않아 지진해석에 대한 합리성이 결여되어 있다. IBC 지반계수는 각 지반종류 별로 하나의 대표적인 지반계수를 제시하고 있지만, 각 지반을 대표하는 지반 특성치는 제시하지 않고 지반종류별 지반 특성치 범위를 계단식으로 규정하여 지반계수의 직선보간이 어렵게 되어 있다. 한편, 지반 특성치에 따른 지반계수의 보간이 허용되지 않고 상부 30m 지반 하부에 지반 특성치 차가 큰 단단한 지반이 존재하는 경우에는 지반 특성치 평균값이 커져 지반분류 경계

치를 약간 만 넘겨도 지반종류가 달라지고 지반계수가 크게 달라져 상당한 과소설계가 되는 문제점이 발생한다.

〈표 1〉 IBC 지반분류

Soil Profile Type	Soil Profile Description	Average Soil Properties for Top 30.48m		
		Shear Wave Velocity (m/sec)	SPT N-value (blows/foot)	Soil Undrained Shear Strength (KPa)
SA	Hard Rock	> 1500	N/A	N/A
SB	Rock	760 - 1500		
SC	Very Dense Soil and Soft Rock	360 - 760	> 50	> 100
SD	Stiff Soil Profile	180 - 360	15 - 50	50 - 100
SE	Soft Soil Profile	< 180	< 15	< 50
SF	Soils Requiring Site-specific Evaluation			

한편, IBC와 KBC 기준의 또 다른 문제점으로는 그림 1에 나타난 지진응답스펙트럼을 작성할 때 필요한 지반계수 F_a 와 F_v 는 동일한 지반에 대해서 구해져야 하기 때문에 F_a 와 F_v 를 규정한 지반 특성치가 같아야 하는데, IBC 기준에 제시된 지반계수에 따른 지반의 전단파전달속도를 역산해 보면 표2에 나타난 것처럼 지반 B를 제외한 모든 지반에서 F_a 와 F_v 를 규정한 전단파전달속도가 상당한 차이를 보이고 있어서 IBC 지진응답스펙트럼의 신뢰성이 크게 떨어지는 것으로 나타났다.



〈그림 1〉 IBC 응답스펙트럼

〈표 2〉 Fa, Fv 지반계수에 따른 전단파전달속도 Cs

입력 지진수준	지반종류	A	B	C	D	E	비고
0.10	Fa	0.8	1.0	1.2	1.6	2.5	Fa= (1050/Cs) ^{0.35}
	Cs(m/sec)	1986	1050	624	274	77	
	Fv	0.8	1.0	1.7	2.4	3.5	Fv= (1050/Cs) ^{0.65}
	Cs(m/sec)	1480	1050	464	273	153	
0.20	Fa	0.8	1.0	1.2	1.4	1.7	Fa= (1050/Cs) ^{0.25}
	Cs(m/sec)	2563	1050	506	273	126	
	Fv	0.8	1.0	1.6	2.0	3.2	Fv= (1050/Cs) ^{0.6}
	Cs(m/sec)	1523	1050	480	331	151	

2. 지반분류 체계에 대한 수정안

〈표 1〉에 제시된 IBC 지반분류는 앞에서 언급한 것처럼 지표면에 놓인 기초를 대상으로 ft-kips 단위체계에서 마련되었기 때문에 SI 단위체계에서 지진계수의 직선보간이 용이하지 않다. 또, 그 동안의 연구결과들에 의하면 대부분의 기초가 실제적으로 암반까지의 깊이가 유한한 지반에 얽게 묻혀 있기 때문에 지반특성을 지표면 30m 깊이까지 지반을 기준으로 산정하는 것은 비합리적이고 기초 밑 30m까지 지반을 고려하는 것이 합리적이다. 그런데, 묻힌 깊이가 깊은 기초의 경우에 대해서는 새로운 기준이 마련되어야 하지만 깊게 묻힌 기초의 경우에 묻힘에 따른 상당히 많은 변수들이 존재하기 때문에 통일된 기준안을 마련하는 것에는 상당한 제약이 있어 개별적인 구조물-지반 상호작용 해석에 의한 문제해결이 필요하지만 기초 밑 30m 지반을 기준으로 지진해석을 수행하는 것이 구조물-지반 상호작용 해석을 하는 것보다 안전 측의 지진해석이 가능하기 때문에 현실적으로는 큰 문제가 없는 것으로 평가된다. 한편, 지반을 분류하는 지반종류 별 전단파전달속도 영역의 경계치들도 SI 단위체계의 10진법에 기초하여 200, 400, 800, 1600 m/sec로 변경하는 것이 지반특성치에 따른 지반계수의 직선보간을 편리하게 할 수 있다. 따라서 현재 사용되고 있는 〈표 1〉에 나타난 지반분류 체계는 〈표 3〉처럼 수정하는 것이 합리적인 것으로 평가되었다.

〈표 3〉 수정 제안된 지반분류

Soil Profile Type	Soil Profile Description	Average Soil Properties for 30m below Shallow Embedded Foundation		
		Shear Wave Velocity (m/sec)	SPT N-value (blows/30cm)	Soil Undrained Shear Strength (KPa)
A	Hard Rock	> 1600	N/A	N/A
B	Rock	800 - 1600		
C	Very Dense Soil and Soft Rock	400 - 800	> 50	> 100
D	Stiff Soil Profile	200 - 400	10 - 50	50 - 100
E	Soft Soil Profile	< 200	< 10	< 50
F	Soils Requiring Site-specific Evaluation			

3. 지반계수의 직선보간에 대한 검토

지반계수의 직선보간 가능성 여부를 검토하기 위해 지반종류 별 전단파전달속도 경계치에서 지반계수를 1994년 Borchardt가 제시한 식(1)을 이용하여 먼저 구하고, 기준에 정의된 지반계수와 그 지반계수에 해당하는 전단파전달속도를 추론하여 각 지반의 경계치전단파전달속도에서 지반계수를 직선보간법으로 구하였다.

$$Fa = (1050/Cs)^\alpha$$

$$Fv = (1050/Cs)^\beta \quad \langle \text{식 1} \rangle$$

여기서, 입력지진수준이 0.1g와 0.2g일 때 α 는 각각 0.35와 0.25이고, β 는 0.65와 0.6이다.

〈표 4〉, 〈표 5〉에 나타난 것처럼 식(1)과 직선보간에 의한 두 결과를 비교해 보면, 입력지진가속도수준에 관계없이 전반적으로 식(1)로 구한 지반계수와 직선보간으로 구한 지반계수의 차이가 10%이내이고, 직선보간법으로 구한 지반계수가 정확하게 식으로 구한 지반계수보다 크기 때문에 실무적 관점에서도 안전 측에 있기 때문에 지반계수의 직선보간은 가능한 것으로 판단되었다.

〈표 4〉 지반분류 경계전단파전달속도에서 Fa 지반계수 보간

입력지진수준	지반종류	비고									
		A	B	C	D	E					
0.10	Cs (m/sec)	1986	1500	1050	760	624	360	274	180	77	Fa= (1050/Cs) ^{0.35}
	식 (1)	0.8	0.883	1.0	1.120	1.2	1.454	1.6	1.854	2.5	
	직선보간	-	0.904	-	1.136	-	1.502	-	2.029	-	
	error (%)	-	2.4	-	1.5	-	3.3	-	9.4	-	
0.20	Cs (m/sec)	2563	1500	1050	760	506	360	273	180	126	Fa= (1050/Cs) ^{0.25}
	식 (1)	0.8	0.915	1.0	1.084	1.2	1.307	1.4	1.554	1.7	
	직선보간	-	0.941	-	1.107	-	1.325	-	1.590	-	
	error (%)	-	2.8	-	2.1	-	1.4	-	2.3	-	

〈표 5〉 지반분류 경계전단파전달속도에서 Fv 지반계수 보간

입력지진수준	지반종류	비고									
		B	C	D	E						
0.10	Cs (m/sec)	1500	1480	1050	760	464	360	273	180	153	Fv= (1050/Cs) ^{0.65}
	식 (1)	0.793	0.8	1.0	1.234	1.7	2.005	2.4	3.147	3.5	
	직선보간	-	0.802	-	1.346	-	2.081	-	3.253	-	
	error (%)	-	0.3	-	9.1	-	3.8	-	3.4	-	
0.20	Cs (m/sec)	1523	1500	1050	760	480	360	331	180	151	Fv= (1050/Cs) ^{0.6}
	식 (1)	0.8	0.807	1.0	1.214	1.6	1.901	2.0	2.881	3.2	
	직선보간	-	0.810	-	1.305	-	1.922	-	3.007	-	
	error (%)	-	0.4	-	7.5	-	1.1	-	4.4	-	

4. 제안된 지반분류에 따른 지반계수 검증

IBC 지반계수의 직선보간에 대한 검토에서 직선보간이 가능한 것으로 판명되어, 수정 제안된 지반분류에 따른 지반계수의 직선보간을 용이하게 하고 보간치의 정확도를 높이기 위해 B, C, D, E 지반의 전단파전달속도 영역을 표6에 나타난 것처럼 한 단계씩 세분화하였다. 또, 지반계수 산정을 위한 기준지반 B의 대표 전단파전달속도를 1050m/sec에서 1000m/sec로 수정하기 위해 지반종류에 따라 규정된 전단파전달속도에서 IBC2003에서 사용한 식(1)에 의한 지반계수 F_a 와 F_v 를 표6과 7에 나타난 것처럼 먼저 산정하고, 산정한 지반계수들이 식(2)에 가장 적합하도록 α, β 값을 최적화하였는데, 입력지진수준이 0.1g와 0.2g에서 α 는 각각 0.36과 0.26으로, β 는 0.66과 0.62로 나타났다.

$$F_a = (1000/C_s)^\alpha$$

$$F_v = (1000/C_s)^\beta \quad \text{〈식 2〉}$$

수정 제안된 식(2)에 의해 구한 지반계수 F_a 와 F_v 를 IBC2003에서 사용한 식(1)로 구한 지반계수와 다시 비교한 결과, 표6과 7에 나타난 것처럼 그 오차 범위가 -6.5%에서 5.3%로 나타나 수정 제안된 전단파전달속도에 따른 지반분류와 지반계수 산정식이 타당한 것으로 검증되었다.

〈표 6〉 제안된 지반분류에 의한 F_a 지반계수

지진 계수	지반종류	A B C D E										비 고
		Cs (m/sec)	2200	1600	1000	800	600	400	300	200	100	
0.10	IBC2003	0.772	0.863	1.017	1.1	1.216	1.402	1.55	1.787	2.277		$F_a = (1050/C_s)^{0.35}$ $F_a = (1000/C_s)^{0.36}$
	Fa	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.3		
	error (%)	3.6	4.3	-1.7	0	-1.3	-0.1	3.2	0.7	1.0		
0.20	IBC2003	0.831	0.9	1.012	1.07	1.15	1.273	1.368	1.514	1.8		$F_a = (1050/C_s)^{0.25}$ $F_a = (1000/C_s)^{0.26}$
	Fa	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.8		
	error (%)	-3.7	0	-1.2	2.8	4.3	2.1	2.3	-0.9	0		

〈표 7〉 제안된 지반분류에 의한 F_v 지반계수

지진 계수	지반종류	A B C D E										비 고
		Cs (m/sec)	2200	1600	1000	800	600	400	300	200	100	
0.10	IBC2003	0.618	0.76	1.032	1.193	1.439	1.873	2.258	2.938	4.61		$F_v = (1050/C_s)^{0.65}$ $F_v = (1000/C_s)^{0.66}$
	Fv	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.8	2.2	3.0	4.6		
	error (%)	-2.9	5.3	-3.1	0.5	-2.7	-3.9	-2.6	2.1	0.2		
0.20	IBC2003	0.642	0.777	1.03	1.177	1.399	1.784	2.121	2.705	4.099		$F_v = (1050/C_s)^{0.6}$ $F_v = (1000/C_s)^{0.62}$
	Fv	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.8	2.1	2.7	4.1		
	error (%)	-6.5	3.0	-2.9	2.0	0.1	0.9	-1.0	-0.2	0		

5. 수정 제안된 지반분류에 의한 KBC기준을 위한 제안

수정 제안된 지반분류 체계와 지반계수 산정 식을 KBC기준에 적용하기 위해 KBC 입력지진수준을 기준에 따라 지반계수를 산정하였다. 지반분류 체계는 표8에 나타난 것처럼 얇게 묻힌기초 밑 30m 지반특성 평균값에 따라 지반종류를 결정하도록 수정하고, 표준관입 시험 N-값에 의한 지반분류 경계치도 약간 수정하였는데, 지반 D에서 전단파전달속도와 N-값의 비교는 1977년 Imai가 제시한 다음 식(3)을 이용해서 수행할 수 있다

$$C_s = 91 N^{0.337} \quad \text{〈식 3〉}$$

〈표 8〉 KBC를 위해 수정 제안된 지반분류

지반 종류	지반종류의 호칭	얇게 묻힌기초 밑 30m에 대한 평균 지반특성		
		전단파전달속도 (m/sec)	SPT N-값 (타격횟수/30cm)	비배수전단강도 x 0.1 (N/cm²)
A	경암 지반	> 1600		
B	보통암 지반	800 - 1600	-	-
C	매우 조밀한 토사 지반 또는 연암 지반	400 - 800	> 50	> 100
D	단단한 토사 지반	200 - 400	10 - 50	50 - 100
E	연약한 토사 지반	< 200	< 10	< 50

KBC기준을 수정 제안하기 위한 가속도계수 F_a 와 F_v 를 수정 제안된 지반분류 체계에 따라 산정하기 위해 입력지진수준을 1000년 재현주기 지진수준에 따라 0.09g와 0.15g로 수정하고, 식(2)에 나타난 지수들도 직선보간하여 수정하였다. 수정 제안된 지반계수 산정 식에 따른 입력지진수준별 지반계수 F_a 와 F_v 값은 표9와 표10에 나타나 있다. 표11에서는 KBC를 위해 수정 제안된 지반분류에 따라 구한 가속도계수를 KBC2005에 나타난 가속도계수와 비교하고, 지반종류 별 지반계수를 KBC 지진지역에 따른 가속도계수 표기방식으로 제시하였다.

〈표 9〉 제안된 지반분류에 의한 KBC F_a 가속도계수

지반종류	A B C D E										비 고
	전단파전달속도 (m/sec)	2200	1600	1000	800	600	400	300	200	100	
입력지진	0.09	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.3	$F_a = (1000/C_s)^{0.36}$ $F_a = (1000/C_s)^{0.31}$
수준계수	0.15	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.4	1.5	1.7	2.1	

〈표 10〉 제안된 지반분류에 의한 KBC F_v 가속도계수

지반종류	A B C D E										비 고
	전단파전달속도 (m/sec)	2200	1600	1000	800	600	400	300	200	100	
입력지진	0.09	0.6	0.7	1.0	1.2	1.4	1.8	2.2	2.9	4.6	$F_v = (1000/C_s)^{0.66}$ $F_v = (1000/C_s)^{0.64}$
수준계수	0.15	0.6	0.7	1.0	1.2	1.4	1.8	2.2	2.8	4.4	

〈표 11〉 KBC2005 및 수정 제안된 설계스펙트럼 가속도계수 비교

(a) KBC2005 설계스펙트럼 가속도계수

지반종류	단주기영역 가속도계수		주기1초 가속도계수	
	지진지역		지진지역	
	1	2	1	2
SA	2.0	1.8	0.8	0.7
SB	2.5	2.5	1.0	1.0
SC	3.0	3.0	1.6	1.6
SD	3.6	4.0	2.3	2.3
SE	5.0	6.0	3.4	3.4

(b) 수정 제안된 설계스펙트럼 가속도계수지반종류

지반종류	지반특성		단주기영역 가속도계수		주기1초 가속도계수	
	전단파전달 속도(m/sec)	SPT N-값	지진지역		지진지역	
			1	2	1	2
A	2200	-	2.0	2.0	0.6	0.6
B	1600	-	2.2	2.2	0.7	0.7
	1000	-	2.5	2.5	1.0	1.0
C	800	-	2.7	2.7	1.2	1.2
	600	-	3.0	3.0	1.4	1.4
D	400	50	3.4	3.5	1.8	1.8
	300	30	3.7	3.9	2.2	2.2
E	200	10	4.2	4.5	2.8	2.9
	100	0	5.1	5.8	4.4	4.6

6.결언

앞에서 지적한 IBC와 KBC의 지반분류 체계상 문제점과 지반계수의 직선보간에 대한 불합리한 점을 개선하기 위해서 차기 KBC 내진 설계기준 수정 시에는 표8에 제시된 지반분류 체계와 표11 (b)에 제시된 가속도계수가 기준에 반영되었으면 한다.

참고문헌

Borcherdt, R.D. (1994), "Estimates of site-dependent response spectra for design (methodology and justification)", Earthquake Spectra, 10, 617-653.

BSSC (1997), NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 2: Commentary (FEMA 303), 362.

Dobry, R. et al. (2000), "New Site Coefficients and Site Classification System Used in Recent Building Seismic Code Provisions", Earthquake Spectra, Vol.16, No.1, Feb., 41-67.

International Conference of Building Officials (ICBO) (1997), "Uniform

Building Code", Vol.2, California, 2-9. ~ 2-38.

International Building Code Council (IBC) (2002), 2003 International Building Code (IBC2003), 301 ~ 343.

Shamsher Prakash & Vijay K. Puri (1988), "Foundations for Machines : Analysis and Design", John Wiley and Sons, 656.

김용석 (2005), "구조물-지반 상호작용과 지진해석", 한국지진공학회, 구미서관, 105.