

동시베리아 지역의 지진 증폭 특성

Seismic Amplification Characteristics of Eastern Siberia

박 두 희¹ Park, Du-Hee

곽 형 주² Kwak, Hyung-Joo

강 재 모³ Kang, Jae-Mo

이 용 국⁴ Lee, Yong-Gook

Abstract

The thickness of permafrost in Eastern Siberia is from 200 to 500 meters. The seasonally frozen layer can vary from 0 to 4m depending on ground temperature and its location. The shear wave velocity varies from 80m/s in summer to 1500m/s in winter depending on soil type. When melted, large impedance will occur due to the difference between the shear wave velocity of seasonally frozen soil and that of permafrost layer. Large displacement may occur at the boundary of the melted and the frozen layer, and this phenomenon should be considered in a seismic design. In this research, one-dimensional equivalent linear analyses were performed to investigate the effects of the seasonally frozen layer on ground amplification characteristics. Soil profiles of Yakutsk and Chara in Eastern Siberia were selected from geotechnical reports. 20 recorded ground motions were used to evaluate the effect of input motions. As the thickness of seasonally frozen layer and the difference in the shear wave velocity increases, the amplification is shown to increase. Peat, very soft organic soil widely distributed throughout Eastern Siberia, is shown to cause significant ground motion amplification. It is therefore recommended to account for its influence on propagated motion.

요 지

동시베리아 지역에 분포하는 영구 동토층의 두께는 평균적으로 200~500m이며, 기온에 따라 지반물성이 변화하는 계절 동토층이 지역에 따라 지표면에서 약 0~4m까지 형성되어 있다. 계절 동토의 전단파 속도는 흙의 종류에 따라 여름에는 약 80m/s에서 겨울철 동결상태에서는 약 1500m/s까지 크게 변이한다. 융해시 계절 동토층과 하부의 영구 동토층 사이의 전단파 속도 차이 때문에 매우 큰 임피던스가 발생하고 이로 인해 지진파가 증폭될 수 있다. 특히, 경계면에서 큰 변위가 발생할 수 있으므로 내진설계 시 이의 영향을 고려해야 한다. 본 연구에서는 계절 동토층의 두께와 전단파 속도 변화에 따른 영향이 지반 증폭특성 및 지반변형에 미치는 영향을 규명하기 위하여 1차원 등가정적 지반응답해석을 수행하였다. 동시베리아의 Yakutsk와 Chara 지역에 대한 지질보고서를 바탕으로 지반주상도를 선정하였으며 입력지진파의 영향을 증명하기 위해 총 20개의 계측지진파를 사용하였다. 계절 동토층의 두께가 증가할수록 증폭현상이 크게 발생하였으며, 계절 동토층과 영구 동토층 사이의 전단파 속도 차이가 클수록 증폭계수가 증가하는 것으로 나타났다. 특히 동시베리아 지역에 넓게 분포되어 있는 유기질토인 토탄은 증폭에 큰 영향을 미치므로 설계시 이를 반드시 고려해야 할 것으로 판단된다.

Keywords : Seasonally frozen layer, Pemafrst, Site response analysis, Eastern Siberia, Amplification factor

1 정희원, 한양대학교 건설환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ., Tel: +82-2-2220-0322, Fax: +82-2-2220-1945, dpark@hanyang.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 비희원, 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

3 정희원, 한국건설기술연구원 전임연구원 (Member, Researcher, Korea Institute of Construction Technology)

4 비희원, 한양대학교 건설환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Hanyang Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

영구 동토는 수년 이상 동안 지속적으로 지반 온도가 0°C 이하인 지반을 말한다(Davis, 2001). 동시베리아 지역의 영구동토 기온은 평균 -13~5°C를 나타내며 남쪽으로 갈수록 평균 토양온도가 증가하는 경향을 나타낸다. 이 지역의 계절동토는 0.15~0.3m의 토탄 및 실트질 퇴적층과 0.9~1.5m의 모래질 퇴적층으로 형성되어있다(Gavrilova, 1978). 영구 동토층의 두께는 동시베리아 지역의 대부분이 약 200m에서 500m이다. 이는 지역에 따라 큰 편차가 있으며, 남부 지역으로 갈수록 두께가 감소한다(Ahonen, 2001).

동시베리아 지역에는 다수의 지진이 발생하였다. 1999년 2월, 바이칼 호수 남서부지역에서 $M_w=5.9(M_s=6.1)$ 의 강진이 일어났다. 또한 바이칼 호수 북동부지역에서 1999년 3월에 $M_w=5.9(M_s=6.1)$, $M_w=5.9(M_s=6.0)$ 의 강진이 발생하였다(Nevskiy et al., 2003). 그러므로 계절동토 및 영구동토가 형성된 지역에서 발생한 지진이 구조물에 미치는 영향을 파악하는 것이 중요하다.

일부 연구자들은 실내 및 현장시험을 통해 동토의 동적 특성을 연구하였다(Vinson, 1978; Leblanc et al., 2004; Wang et al., 2006; Qi et al., 2006; Meng et al., 2008). 온도에 따라 변하는 토양의 동적 특성은 지반응답에 큰 영향을 미친다. 그러나 일부 연구만이 계절동토가 지반응답에 미치는 영향을 분석하였다(Wang et al., 2006; Qi et al., 2006; Xu et al., 2011; Yang et al., 2011). 이들 연구에서는 계절 동토층의 존재로 인해 지반응답이 감소하는 경향을 밝혀내었다.

본 연구에서는 Sigma Spectra(Kottke et al., 2008)을 활용하여 입력지진파를 생성하였으며, Strata(Kottke et al., 2008)를 이용하여 1차원 등가선형해석을 수행하였다. 동시베리아 지역을 대상으로 계절동토의 두께에 변화를 주어 계절 동토층이 용해되는 과정을 알아보고, 지반응답 및 지반변형을 관찰하고자 하였다. 또한 이를 정량화하기 위하여, 확률론적 지진계수를 적용하여 증폭계수를 도출하였다.

2. 동토 지역의 지반 주상도에 관한 기존 연구

본 절에서는 계절적 동적 물성의 변화가 지진 응답 특성에 미치는 영향에 관한 연구를 정리하였다. 이와 같은 연구의 가장 큰 어려움은 계절적으로 변화하는 지반 주상도의 선정이다. Qi et al.(2006)은 중국 Zhanggye 지

역에서 계절 동토가 지진 응답 특성에 미치는 영향을 규명하였다. Zhanggye 지역은 중국 북부에 위치하며 계절에 따라 동결과 용해를 반복하는 계절 동토층은 존재하나 영구 동토층은 존재하지 않는다. 따라서 이 지역에서 겨울철에 상부층이 동결함에 따라 유발되는 지진 증폭 특성을 조사하였다. 측정 결과 동결층은 연중 약 4~5개월 동안 존재하고, 최대 1.2m이지만 보수적인 예측을 위하여 0m에서 6m까지 적용하였다.

Yang et al.(2011)은 알래스카 지역에서 계절 동토가 지진응답에 미치는 영향을 규명하였다. 사용된 주상도는 Goldstream Creek 교량 부지(위도: 64.9119N, 경도: 147.8318W)에서 측정되었다. 동결층의 깊이는 0m에서 40m까지 적용하였다. 이 주상도에서 영구 동토층의 심도는 51m, 기반암의 심도는 66m가 적용되었다. 즉, 영구 동토 심도인 51m 하부에는 지반이 동결되지 않은 상태라고 가정되었다. 계절 동토의 전단파 속도는 200~500m/s가 적용되었다. 동결토와 비동결토 사이에는 transition 층을 적용하여 높은 임피던스 비로 인한 과도한 증폭 또는 반사가 발생하는 것을 방지하였다. 동토에 대해서 적용된 V_s 는 1500m/s이며 transition 층은 동결토의 절반인 750m/s를 적용하였다.

Xu et al.(2011)은 마찬가지로 알래스카 지역 영구동토층에서의 지반응답 특성을 분석하였으나 지반 주상도는 크게 상이한 것으로 나타났다. 앵커리지의 O'Malley 교량 부지(위도: 64.9119N, 경도: 147.8318W)의 지반은 두께 7.5m의 실트질 사질토, 두께 14m의 빙하 퇴적토, 그리고 두꺼운 Bootlegger Cove 점성토로 구성되었다. 이 지반은 중국 Zhanggye 지반과 마찬가지로 영구동토층은 없으며 깊이 10.5m까지 겨울철에 동결되는 것으로 조사되었다. 동결토는 1500m/s로 가정하였으며 Xu et al.(2011)과 마찬가지로 동결토의 상하부에 transition 층을 적용하였다.

기존의 연구를 조사한 결과, 영구 동결토와 계절 동토의 심도 및 강성은 부지에 따라서 크게 변이하는 것으로 조사되었다. 이는 알래스카라는 동일지역에서도 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 지진 응답 해석의 결과는 동결심도와 비동결토의 전단파 속도에 크게 영향을 받는 것을 감안하면 정확하게 지반 주상도의 계절적 변이 특성을 규명하는 것은 매우 중요하다고 판단된다.

3. 동토지역 동적 물성에 관한 기존 연구

문헌조사를 통해 지반응답해석에 적용된 전단파 속

도와 동적곡선 등 동적물성을 조사하였다. Table 1에 점토, 실트, 사질토, 자갈, 그리고 토탄의 전단파 속도를 나타내었다. 일반적으로 동토의 전단파 속도는 온도, 함수비, 흙의 종류, 그리고 구속응력 등에 의해 변화하며 (Tsytoich et al., 1975; Vinson, 1978), 특히 온도는 흙의 강성에 미치는 중요한 요소이다(Wu et al., 1993). Wang et al.(2006)은 Harbin clay, Lanzhou loess, Peking fine sand에 대한 초음파 시험을 수행하였다. 흙의 온도가 0°C 이하로 내려가면, 물이 동결이 되면서 얼음 함유량이 증가한다. 얼음 입자들의 강성과 점착력에 의해 흙의 강성이 증가하고, 이에 따라 전단파 속도가 증가한다. 큰 함수비를 가지는 점토는 작은 함수비를 가지는 사질

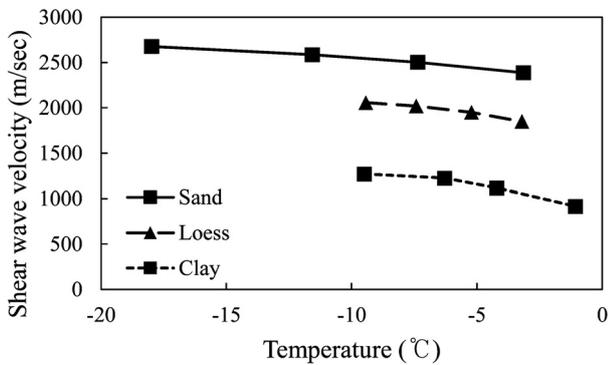


Fig. 1. Shear wave velocities versus temperature for frozen soils (Wang et al., 2006)

토에 비해 온도가 감소할수록 큰 전단파 속도 변화를 나타낸다(Fig. 1). Meng et al.(2008)은 다른 함수비를 가지는 Lanzhou loess(지름 0.075mm 이하 입자 89%)를 이용하여 인공시료를 제작하였고, 초음파법을 적용하여 전단파 속도를 측정하였다. 함수비가 증가할수록 전단파 속도가 증가하는 경향을 나타낸다(Fig. 2).

Qi et al.(2006)은 중국 북부에 위치한 Zhanggye 지역에서 채취한 시료를 활용하여, 동적 삼축압축시험을 수행하였다. 시료에 사인파 하중을 가해주어 점토, 실트, 자갈질 사질토, 그리고 동결토의 정규화된 전단탄성계수 및 감쇠계수를 도출하였다(Fig. 3). 동결토의 경우 -5°C 이하에서 계절 동토가 존재하는 실트질 점토층에서 채취한

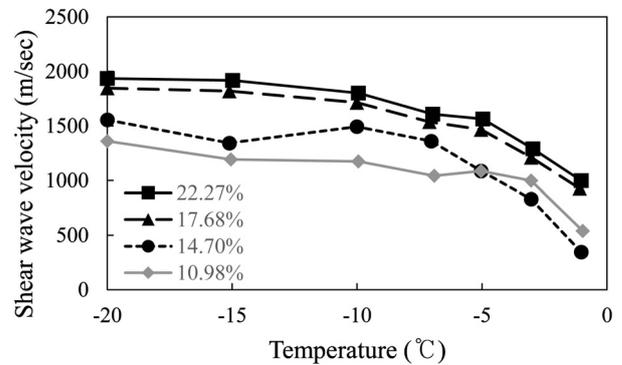


Fig. 2. Shear wave velocities versus temperature with different water cotents (Meng et al., 2008)

Table 1. The shear wave velocities for soils

Type	Measurement	Temperature (°C)	Water content (%)	Vs (m/s)	Reference
Clay	Ultrasonic measurement	-10~-2	31	900~1270	Wang et al. (2006)
Clay	Ultrasonic measurement	-10~0	29	800~1000	King et al. (1982)
Clay	Ultrasonic measurement	-5	-	900~1260	Zimmerman et al. (1986)
Silt with clay	Resonance column test	-17~11	11	176~1800	KICT (2010)
			8.3	184~1836	
Silt with clay	Ultrasonic measurement	-5	-	1150~1400	Zimmerman et al. (1986)
Silt	Ultrasonic measurement	-10~-4	18.86	1850~2050	Wang et al. (2006)
Silt	Ultrasonic measurement	-10~0	22	1200~1500	King et al. (1982)
Silt (loess)	Ultrasonic measurement	-20~0	10.98	400~1400	Meng et al. (1982)
			14.70	500~1500	
			17.68	900~1800	
			22.27	1000~1900	
Silt	Ultrasonic measurement	-2.0~-1.5	-	< 1900	Nakano and Froula (1973)
Silt	Ultrasonic measurement	-5	-	1500~1900	Zimmerman et al. (1986)
Gravel	Down-hole test	-	-	380	Suzuki et al. (1992)
Peat	Cyclic triaxial test	13	150~240	80~90	Boulanger et al. (1998)
Sand	Ultrasonic measurement	-18~-4	17.6	2375~2680	Wang et al. (2006)
Sand	Resonance column test	-4~10	19	150~2376	KICT (2010)
			20.5	147~2339	

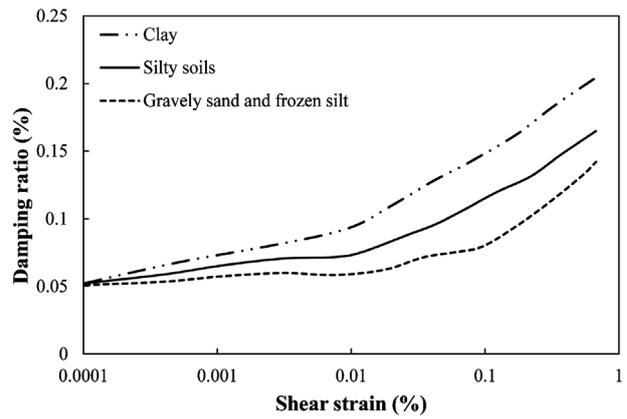
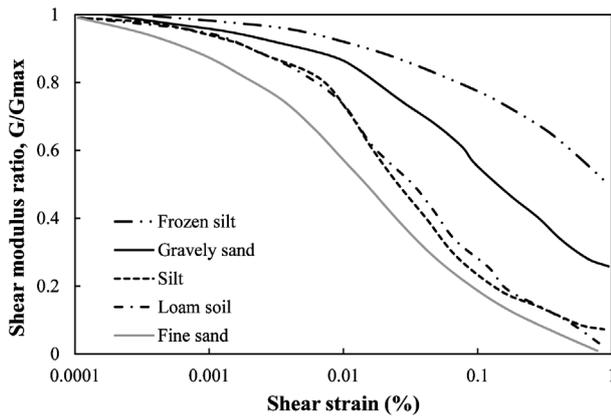


Fig. 3. Dynamic curves (Qi et al., 2006)

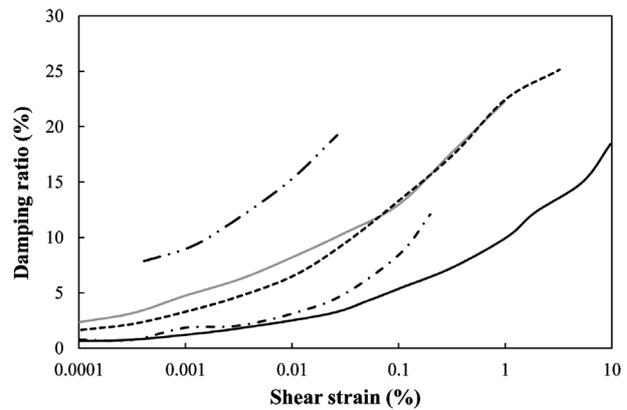
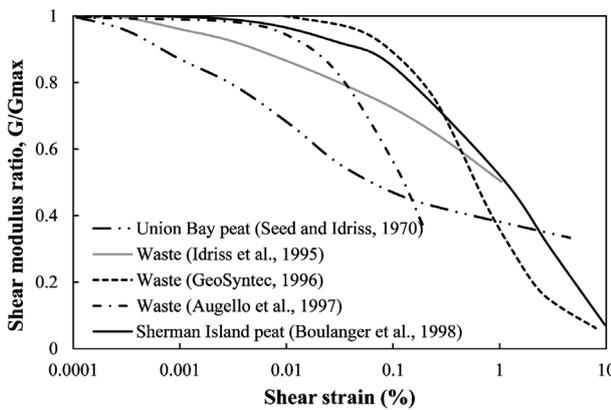


Fig. 4. Dynamic curves (Boulanger et al., 1998)

비교란 시료를 사용하여 시험을 수행하였다. 동시베리아의 경우, 상부층에 유기질토인 토탄이 넓게 분포하는 것으로 조사되었다(Sazonova et al., 2004). Boulanger et al.(1998)은 미국 북부 캘리포니아 지역의 Sherman island에서 토탄이 존재하는 층의 시료를 채취하여 동적 삼축 시험을 수행하였다. 이를 통해 도출된 동적 곡선을 Seed et al.(1970)에 의해 만들어진 토탄의 동적곡선과 비교하였다(Fig. 4). Seed et al.(1970)의 동적곡선에 비해 정규화된 전단탄성곡선은 크게 나왔으며, 감쇠비 곡선은 작게 도출되었다.

위와 같이 분석된 동적물성과 곡선은 지반응답해석에 사용되었으나, 토탄의 경우, 동결된 시료에 대한 동적곡선은 아직 시험결과가 제시되지 않았다.

4. 동시베리아 지역 지반주상도 산정

본 연구에서는 Sazonova et al.(2004), Konstantinov et al.(2008), Stanilovskaya et al.(2008) 등의 연구 결과를 토대로 동시베리아 지역의 지반 주상도를 산정하였다.

동시베리아에는 알래스카와 같이 실 계측된 주상도가 없는 관계로 지질 연구를 토대로 지반 주상도를 산정하였음을 밝혀둔다. 추후 현장에 대한 지반주상도를 조사하여 본 연구를 검증할 필요가 있다고 판단된다.

대상 지역은 풍부한 지질 연구 결과가 발표된 Yakutsk가 위치한 Central Yakutia와 Chara 지역으로 국한하였다. Sazonova et al.(2004)은 동시베리아 지역에 대한 포괄적인 지질 보고서를 작성하였으며 상당 부분을 Central Yakutia 지역에 할애하였다. Central Yakutia 지역의 평균 기온은 남쪽에서는 $-4 \sim -2^{\circ}\text{C}$ 북부에서는 $-9 \sim -7^{\circ}\text{C}$ 이고, 영구 동토층의 온도는 $-6 \sim -3^{\circ}\text{C}$ 이다(Ivanov, 2004). 강수량은 매우 적지만 증발량 또한 제한적이므로 지반의 함수비는 높은 편이다. 전 지역은 영구 동토층으로 분류되며 심도는 100~900m이다. 산지 정상부에서 영구 동토층은 700~900m로 가장 깊으며 하저에서 100~200m로 가장 낮다. 동토에서의 얼음함유량은 대략 5~10% 사이에 존재한다. 계절 동토는 토탄과 실트 지반에서는 0.5~1m이며 사질토에서는 1~2m이다(Dunaeva et al., 2009). 동시베리아 지역 대부분의 흙은 퇴적토로 신생

대 제4기에 형성되었으며 하부에는 중생대 및 고생대에 형성된 기반암이 위치한다. 퇴적토는 대부분 사질토 또는 실트로 구성되어 있으며 일부 지역에는 자갈질 토층이 존재한다. 이 지역 사질토 및 실트질의 특징은 상당한 유기질을 함유하고 있다는 점이다. 또한 모든 강 인근에는 토탄이 존재하며 두께는 40~50cm부터 1m까지 매우 다양하다. Spekor et al.(2008)은 50m 깊이의 시추공 조사를 통해 Yakutsk 부근 지역이 사질 실트와 실트로 구성되어 있다고 보고하였다. Konstantinov et al. 2008)은 Yakutsk 부근 지반의 계절동토 깊이에 대한 영향을 연구하였다. 남부지역의 계절 동토층은 대부분 고운 입자를 가진 사질토(건조 단위중량 : 1100~1800kg/m³; 75~85% 사질토, 8~11% 실트, 6~15% 점토)와 사질 실트(건조 단위중량 : 1200~1750kg/m³; 61~67% 사질토, 25~29% 실트, 6~10% 점토)로 구성되어 있는 반면, 북부지역의 계절 동토층은 실트질(건조단위중량 : 960~1700kg/m³; 19~47% 사질토, 41~66% 실트, 7~20% 점토)로 구성되어 있으며 두께는 약 1.4~2.0m로 나타났다. 종합하면 Yakutia 지역 지반의 상부층은 유기질 성분이 포함된 실트, 실트질 사질토, 또는 토탄으로 구성되며 심도는 2m 내외인 것으로 조사되었다.

위와 같은 정보를 기반으로 Yakutsk의 지반 주상도를 다음과 같이 산정하였다. 계절 동토층의 심도는 보수적인 예측을 위하여 0m, 2m, 4m를 적용하였다. 비동결된 상태의 토탄의 전단파 속도는 Boulanger et al.(1998)의 연구 결과를 기반으로 80m/s를 적용하였으며 실트질 사

질토는 250m/s를 적용하였다. 실트는 실트질 사질토와 강성이 동일하다고 가정하여 추가적인 해석은 수행하지 않았다. 영구동토층은 Spekor et al.(2008)의 연구 결과를 참고하여 사질 실트로 가정하였다. 사질 실트의 현장 함수비는 8.7%로 조사되었으며(Sazonova et al., 2004), 10m에서의 온도는 -2°C로 나타났다(Skryabin et al., 2007). 이에 상응하는 조건에서의 전단파 속도는 1000m/s로 조사되어(Meng et al., 2008) 이를 균일하게 영구동토층에 적용하였다. 단, 계절동토층과 영구동토층 사이에 급격하게 강성이 변하지 않으며 점진적인 변화가 있을 것으로 예측되어 사이에 1m 두께의 전단파 속도가 600m/s인 Transition 층을 적용하였다(Fig. 5(a), 5(b)).

Stanilovskaya et al.(2008)은 바이칼 호수 인근 Northern Transbaykalia에 위치한 Chara(위도: 56.9°N, 경도 118.4°W) 및 인근지역에 대하여, 공내시험을 통해 지반조사를 수행하였다. 이 지역은 영구동토층이 연속적으로 형성되어 있으며 남서쪽에서 북동쪽으로 길이 120km, 폭 30~35km로 뻗어있다. 1987년부터 2007년까지 20년간 높은 고도에 위치한 20m 깊이의 약 200개의 시추공 조사를 통해 온도변화를 관찰하였다. 이들 중 대표적인 7개 시추공에 대해 자세히 설명하였다(Table 2). 이 중 3개 지역(#6, #38, Pecki-1)은 암으로 구성된 부지이며 20m까지 계절별 온도변화가 발생하는 것으로 조사되었다. 나머지 4개 지역(Zagryazkin-1, Ushelistiy-1, Belenkiy-1, Azarova-1)에는 토사로 구성된 계절 동토층이 존재하며 심도는 최대 2.2m인 것으로 조사되었다. 계절 동토층에

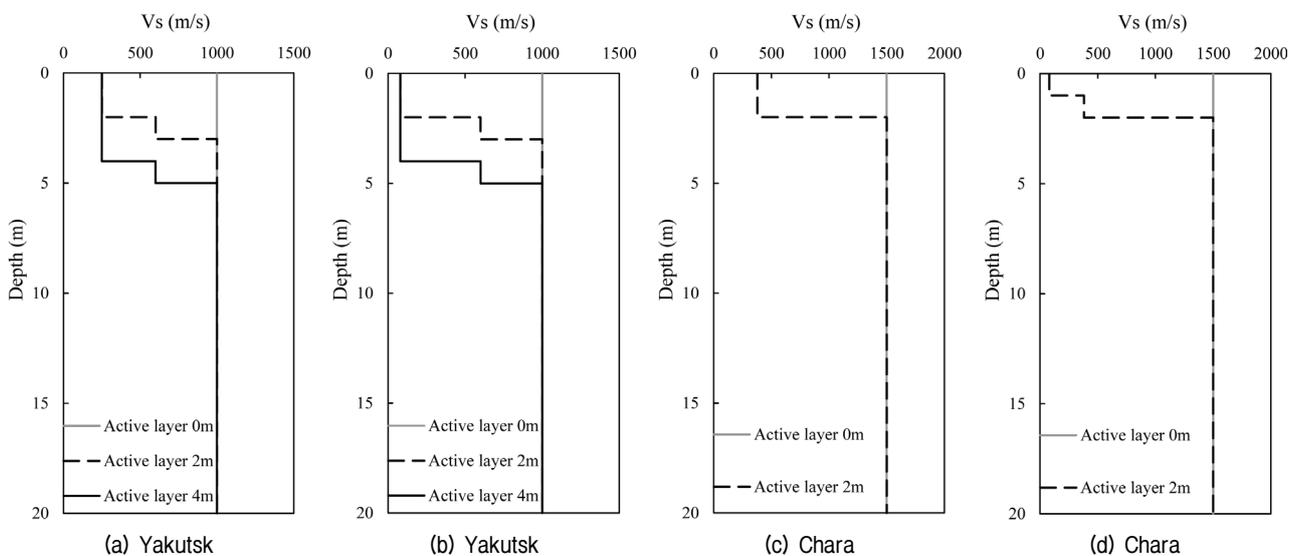


Fig. 5. Soil profiles – (a) Yakutsk : Active layer (Silt), (b) Yakutsk : Active layer (Peat), (c) Chara : Active layer (Debris), (d) Chara : Active layer (Peat over Debris)

Table 2. The data of the monitoring sites at Chara area (Stanilovskaya et al., 2008)

Site number / Characteristics	#6	#38	Pecki-1	Zagryazkin-1 (kurum's pit #5301)	Ushelistiy-1	Belenkiy-1	Azarova-1
Latitude and longitude	N56°36.329' E118°25.591'	N56°40.017' E118°21.648'	N56°50.33.33' E118°09'15.93'	N56°40.567' E118°21.621'	N56°40.017' E118°21.648'	N56°45'39.63' E118°11'24.53'	N56°54'23.33' E117°34'41.64'
Borehole depth (m)	20	19	15.33	2.05	0.33	1.3	1
Elevation (above sea level, m)	1712	1464	767	1155	1651	720	2036
Geology (brief description of bedrock, sediments)	0.0~5.5 m : coarse debris 5.5~20.0 m : quartzite sandstone of Early Proterozoic Age	0.0~3.5 : coarse debris eluvium with sand 3.5~19.0 m : quartzite sandstone of Early Proterozoic Age	Sands	0.0~2.2 m : Active layer in kurum with large blocks (0.2~1.0 m) 2.2~8.0 m : moraine deposits with ice 8.0~20.0 m : quartzite sandstone of Early Proterozoic Age	0.0~0.38 m : dark-brown peat 0.38~0.45 m : peat; 0.45m~ : ice wedge	0.0~0.1 m : green moss 0.1~0.2 m : brown peat 0.2~1.3 m : dark-brown clay snad with ice wedge	0.0~1.0 m : coarse debris with sand
Permafrost presence	Permafrost	Permafrost	No permafrost	Permafrost	Permafrost	Permafrost	Permafrost

서의 온도는 계절에 따라 약 -25~15°C이며, 심도 2m에서도 계절에 따라 0°C 이상으로 상승한다. 영구 동토층에서의 온도는 -12.0~0°C이며, 심도는 1200m까지 형성되어 있다. 계절 동토층은 빙퇴석이 풍화되어 퇴적된 데브리(Debris) 층 또는 토탄(Peat)으로 구성되는 것으로 조사되었다. 계절 동토층 하부에는 모레인(Moraine)이라 불리는 빙퇴석으로 이루어진 퇴적층과 사암(Sandstone)이 존재한다. 빙퇴석은 계절에 무관하게 단단한 특성을 보일 것으로 예측되어 계절 동토층의 심도는 0m 그리고 2m를 적용하였다. 계절 동토층은 풍화토 그리고 토탄과 풍화토가 혼재된 지반을 적용하였다. 토탄의 심도는 1m를 적용하였다. 풍화토의 전단파 속도는 Suzuki et al.(1992)이 제시한 자갈질 사질토의 속도인 380m/s를 적용하였다. 토탄은 Yakutsk 지역과 동일하게 80m/s를 적용하였다. 빙퇴석은 전단파 속도로 1500m/s를 적용하였다. 빙퇴석은 암반 층이므로 Yakutsk 주상도와는 다르게 Transition 층을 적용하지 않았다(Fig. 5(c), 5(d)).

5. 지반응답해석

지반응답해석에 적용된 입력지진파는 동시베리아 지

역에서 발생한 지진파의 계측자료 부족으로 Sigma Spectra (Kottke et al., 2008)를 통해 계측지진파의 조합을 사용하여 생성하였다. Sigma Spectra는 PEER(Pacific Earthquake Engineering Research)에서 제공하는 계측지진파 데이터를 사용하며, 계측지진파의 가속도 시간이력으로부터 생성된 응답스펙트럼을 조합하여 지반응답해석에 사용되는 입력지진파를 생성한다. 이때, 관심주기영역에 해당하는 목표 응답 스펙트럼(Target Response Spectrum)과 각각의 주기에서 목표 응답스펙트럼으로부터의 분산정도를 나타내는 목표 표준편차(Target Standard Deviation)를 설정하여 입력지진파의 조합을 생성한다. Rathje et al.(2010)은 입력지진파의 조합을 생성할 때 발생하는 불확실성이 지반응답해석에 미치는 영향을 고려하여, 최소 10개의 지진파를 사용하도록 제안하였다. 본 연구에서는 Rathje et al.(2010)의 논문에 제시된 목표 응답스펙트럼과 목표 표준편차를 사용하였으며, 목표 응답스펙트럼의 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)는 시베리아 지역을 대표하는 500년 재현주기 지진지해도(Ivanov, 2004)를 통해 산정하였다. 동시베리아 지역의 PGA는 약 0.4~0.6g의 범위 내에 분포하므로 입력지진파 생성 시 적용되는 목표 응답스펙트럼의 PGA는 0.4g와 0.6g로 스케일링 하였다. Table 3과 4는 각각 PGA

0.4g와 0.6g에 해당하는 입력지진파 조합이며, 각각 10개의 계측지진파에 대한 정보를 나타낸다.

Fig. 6에는 Yakutsk와 Chara 지역의 지반물성에 따라 적용한 비선형 동적설계 곡선을 제시하였다. 동결 실트는 Qi et al.(2006)의 동적곡선을 적용하였으며, 동결 사질토는 Vinson et al.(1977)의 동적곡선을 사용하였다.

또한, 데브리와 풍화암의 경우 각각 자갈(Seed, 1986)과 풍화암(Schnabel, 1973)에 해당하는 동적곡선을 적용하였다. 선정된 해석부지에 대해 1차원 지반응답해석 프로그램인 Strata(Kottke et al., 2008)를 사용하여 등가선형해석을 수행하였다. 유효전단변형률은 65%를 적용하였으며 기반암의 전단파속도는 1500m/s, 감쇠비는 1%

Table 3. Input motions (PGA 0.4 g)

Station	Event	Scale	PGA (g)	PGV (cm/s)	D ₅₋₉₅
DUZCE 1060-N	Duzce	5.9876	0.1695	65.9688	19.06
HECTOR HEC090	Hector mine	1.3427	0.4522	56.031	9.65
NORTHR 0141-360	Northridge	2.3217	0.3798	31.4391	11.87
NORTHR 5080-360	Northridge	2.2891	0.4088	19.2594	8.715
NORTHR CHL360	Northridge	2.0632	0.4652	34.2068	9.09
NORTHR H12180	Northridge	2.4402	0.6275	21.6358	9.81
NORTHR HOW060	Northridge	2.7219	0.3259	25.8973	11.7
NORTHR VAS090	Northridge	2.1862	0.304	24.1789	7.32
NORTHR WON095	Northridge	2.887	0.3243	24.9912	8.75
SFERN L09291	San Fernando	3.169	0.4242	12.185	11.82
DUZCE 1060-N	Duzce	5.9876	0.1695	65.9688	19.06

Table 4. Input motions (PGA 0.6 g)

Station	Event	Scale	PGA (g)	PGV (cm/s)	D ₅₋₉₅
DUZCE 1060-N	Duzce	8.9814	0.2542	98.9532	19.06
HECTOR HEC090	Hector mine	2.0141	0.6783	84.0465	9.65
NORTHR 0141-360	Northridge	3.4825	0.5696	47.1586	11.87
NORTHR 5080-360	Northridge	3.4337	0.6133	28.8891	8.715
NORTHR CHL070	Northridge	3.0948	0.6979	51.3102	9.09
NORTHR H12180	Northridge	3.6604	0.9412	32.4536	9.81
NORTHR HOW060	Northridge	4.0828	0.4888	38.8459	11.7
NORTHR VAS090	Northridge	3.2793	0.456	36.2683	7.32
NORTHR WON095	Northridge	4.3304	0.4864	37.4869	8.75
SFERN L09291	San Fernando	4.7535	0.6363	18.2775	11.82
DUZCE 1060-N	Duzce	8.9814	0.2542	98.9532	19.06

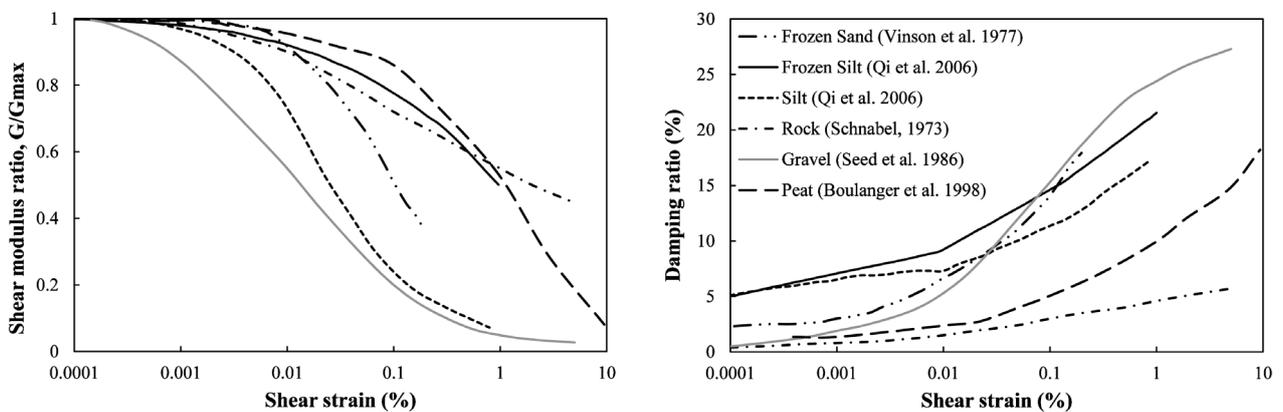


Fig. 6. Dynamic curves for frozen and unfrozen soils

를 적용하여 지반응답해석을 수행하였다.

6. 수치해석결과

Fig. 7, 8, 9에는 각각 계절 동토층의 층상구조와 두께 변화에 따른 최대지반가속도(Peak ground acceleration, PGA), 최대전단변형률 주상도, 그리고 응답스펙트럼을 도시하였다. 그림에 도시된 응답은 모두 평균 곡선이다. 계절 동토층은 지반의 동적 응답에 매우 큰 영향을 미치며 계절 동토층의 두께가 증가할수록 응답이 크게 증가하는 것으로 나타났다. Yakutsk의 경우, 동결 지반에 비하여 PGA는 심도 4m일 경우 2배 이상 증폭 되는 것을 확인할 수 있다. 지반 증폭은 특히 지표면이 토탄으로 구성되었을 경우 큰 것으로 계산되었다. 토탄은 전단파속도가 80m/s로 매우 연약하기기에 토탄과 하부 동결층과의 임피던스비가 크며 이로 인하여 지진파가 보다 증폭되기 때문이다. 토탄층은 동시베리아 지역에 넓게 분포하고 있어 이 지역 시설물의 지진 성능에 큰 영향을 줄 것이다. 입력지진파의 PGA가 0.4g에서 0.6g로 증가

함에 따라 발생하는 PGA의 차이는 지역에 따라 그 정도는 다르지만 증가하는 경향을 나타낸다. Chara 지역의 계절 동토층에 의한 지반 증폭의 크기는 Yakutsk보다 작은 것을 확인할 수 있다. Chara 지역은 동결 심도가 Yakutsk보다 작으며 데브리 층은 전단파속도가 380m/s로 Yakutsk 실트 및 토탄 층보다 크기 때문에 지반의 응답이 작게 계산되었다. 이 지역은 상부층이 토탄으로 구성될 경우에만 주목할만한 증폭이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 토탄으로 구성된 지반에서는 Yakutsk 지역에 비해서는 작지만 상당히 응답이 증폭되는 것을 확인할 수 있다.

최대전단변형률은 계절 동토층이 위치한 심도에서 크게 발생하였다. Yakutsk 지역에서는 계절 동토층이 실트로 이루어진 경우 최대 0.2%, 토탄으로 이루어진 경우 최대 0.7%의 전단변형률이 발생하였다. Chara 지역에서는 계절 동토층이 데브리로 이루어진 경우 최대 0.005%, 데브리와 토탄이 혼재하는 경우 최대 0.09%의 전단변형률이 발생하였다(Fig. 8). 이는 풍화암과 입자 크기가 큰 데브리로 이루어져있는 Chara 지역은 실트질

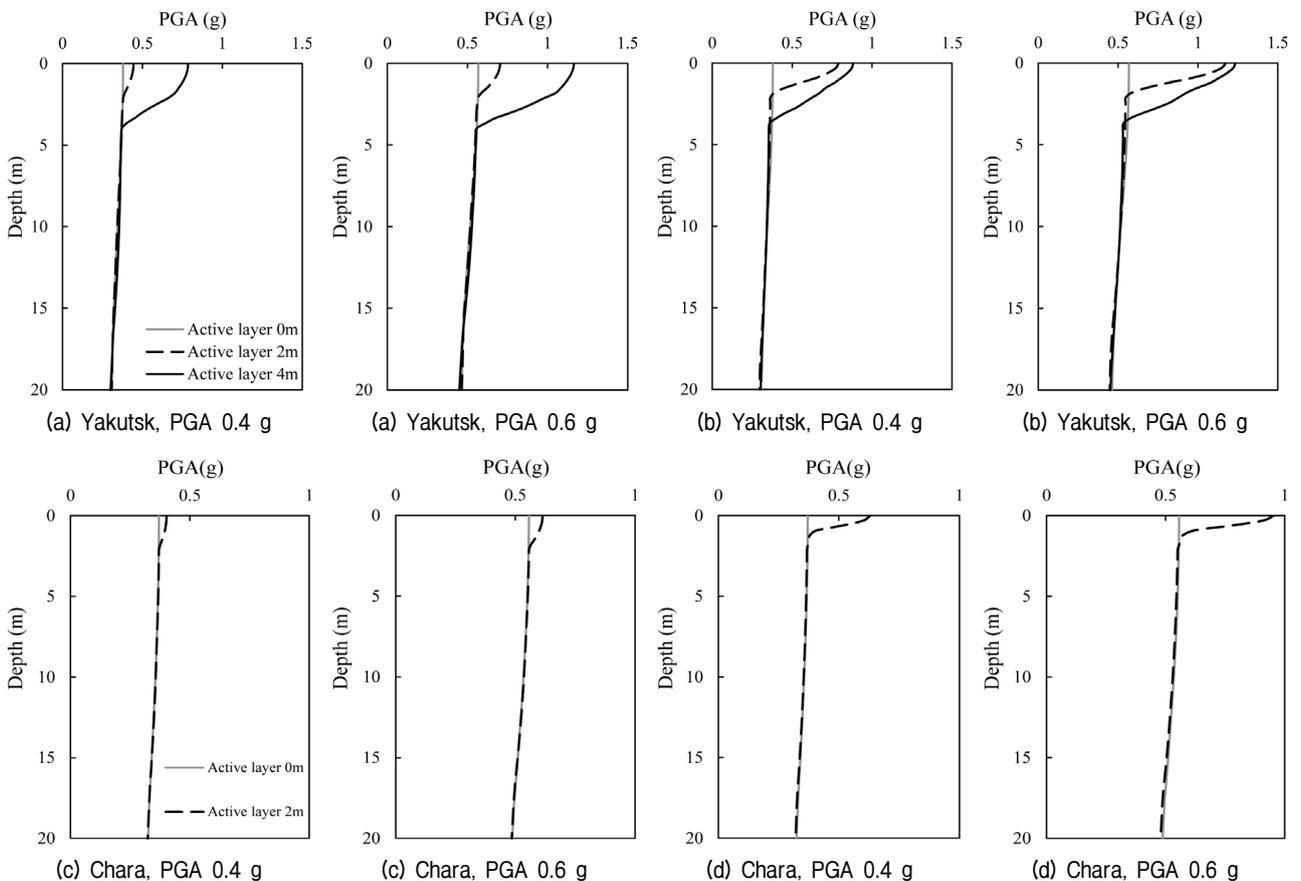


Fig. 7. PGA profile – (a) Yakutsk : Active layer (Silt), (b) Yakutsk : Active layer (Peat), (c) Chara : Active layer (Debris), (d) Chara : Active layer (Peat over Debris)

로 이루어진 Yakutsk보다 상대적으로 지반변형이 작게 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 토탄의 두께가 크지 않을 경우, Chara 지역의 결과에서 보여지듯이, 변형률의 크기는 상대적으로 두꺼운 토탄층이 존재하는 Yakutsk에 비해서는 작은 것으로 나타났다.

Fig. 9는 두 지역에 대해 지반응답해석을 수행하여 계산한 응답스펙트럼이며, 이를 통해 PGA의 변화 및 계절 동토층 두께의 변화가 지반응답에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 계절 동토층의 두께와 PGA가 증가할수록 각 주기에서의 스펙트럴 가속도는 증가하는 반면 1초 이상의 장주기 영역에서는 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. Yakutsk 지역의 경우, 계절 동토의 심도와 지층 구성에 따라서 스펙트럴 가속도가 크게 변화하는 특성을 보였다. 실트층으로 구성된 지반의 경우, 계절 동토의 두께가 2m일 경우에는 크게 증폭되지 않으나 4m로 증가할 경우, 응답이 급격하게 커지는 것을 확인할 수

있다. 토탄으로 구성된 지반에서는 계절 동토의 두께는 스펙트럴 가속도의 최대값에는 큰 영향을 미치지 않으나, 탁월 주기는 변화하는 것을 확인하였다. Chara 지역의 경우, 지역에서는 데브리 지반에서는 증폭이 크지 않으며 토탄으로 구성된 지반에서만 스펙트럴 가속도가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

부지의 설계응답스펙트럼을 결정하기 위해서는 지진 계수가 필요하다. 주기별 지반증폭효과를 고려한 지표면에서의 지진계수는 기반암에서의 응답스펙트럼과 지표면에서의 응답스펙트럼의 비(RRS, Ratio of Response Spectrum)를 통해 도출할 수 있다. 지표면에서의 가속도 시간이력은 입력 지진파가 대상지반을 통과하면서 그 특성이 변하게 되는데 이때 발생하는 지반증폭효과를 정량적으로 나타내어 지진계수를 산정하였다. 본 연구에서는 1997 NEHRP(FEMA, 1997)에서 제시한 방법을 이용하여 Yakutsk와 Chara 지역의 증폭계수를 도출하

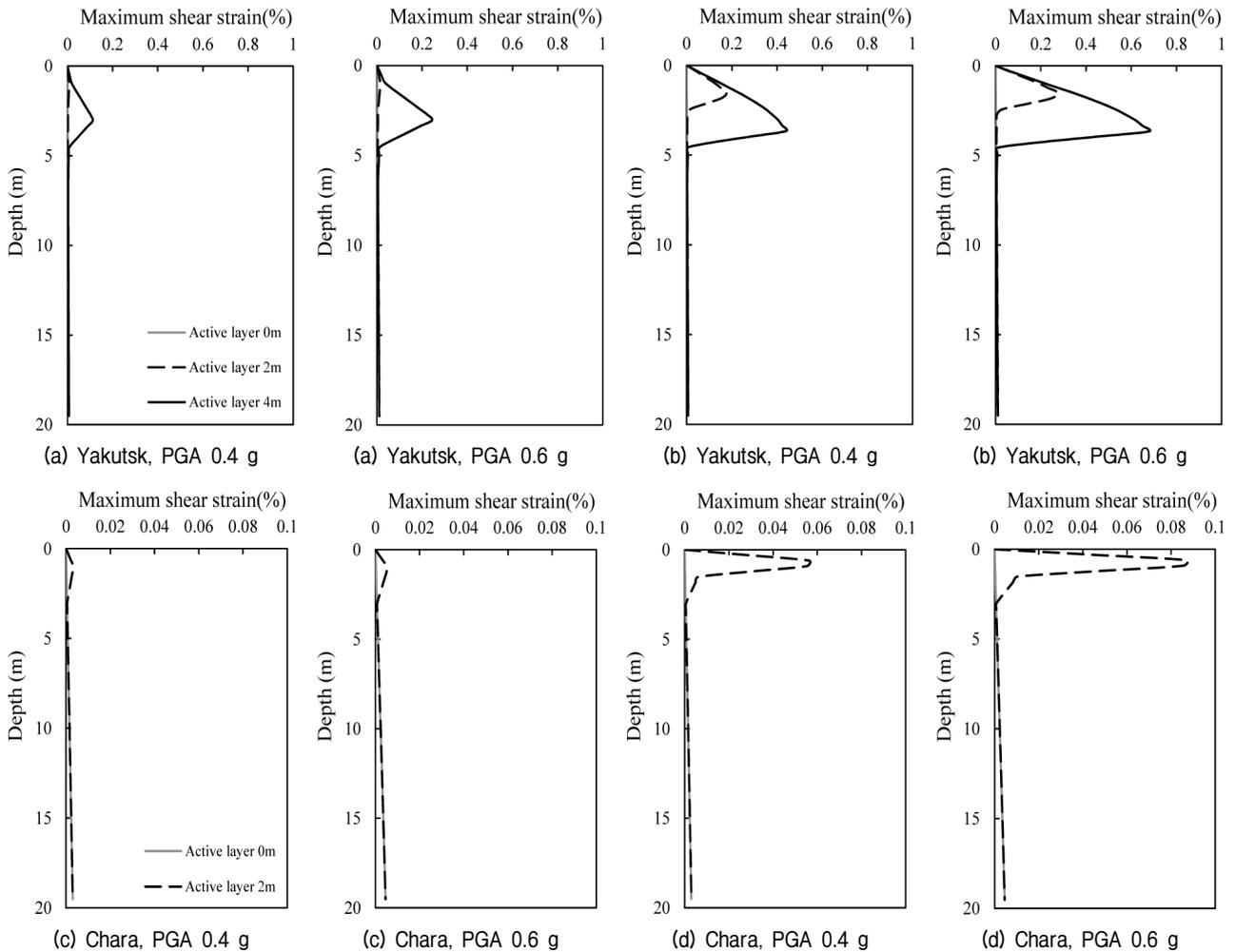
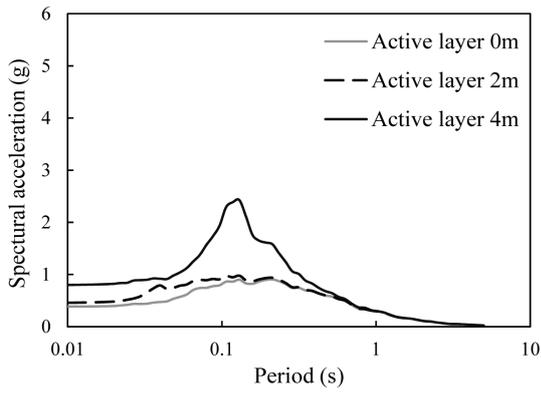
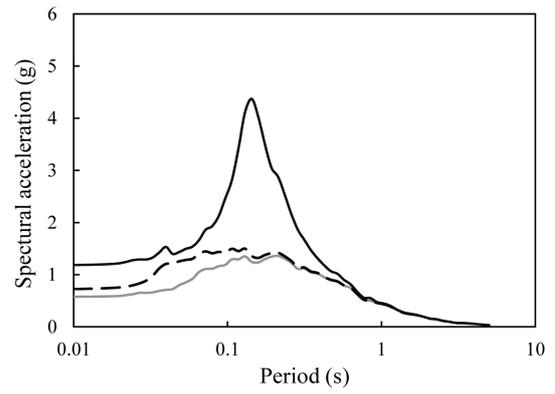


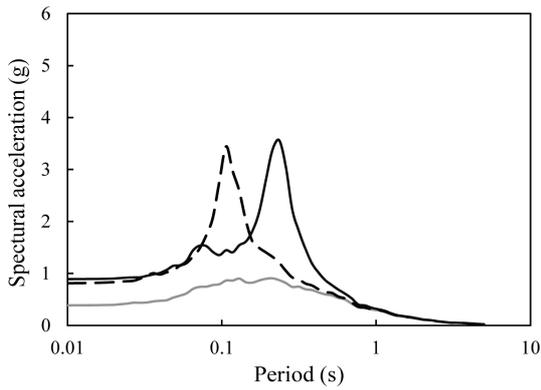
Fig. 8. Maximum shear strain profile - (a) Yakutsk : Active layer (Silt), (b) Yakutsk : Active layer (Peat), (c) Chara : Active layer (Debris), (d) Chara : Active layer (Peat over Debris)



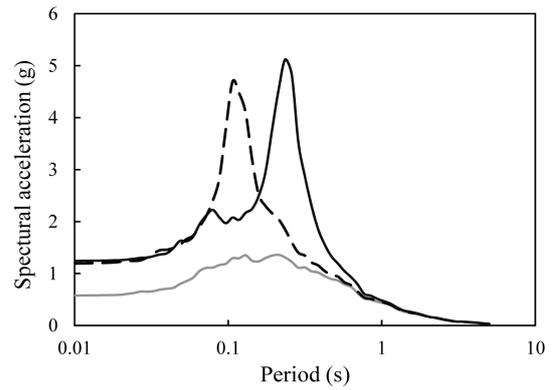
(a) Yakutsk, PGA 0.4 g



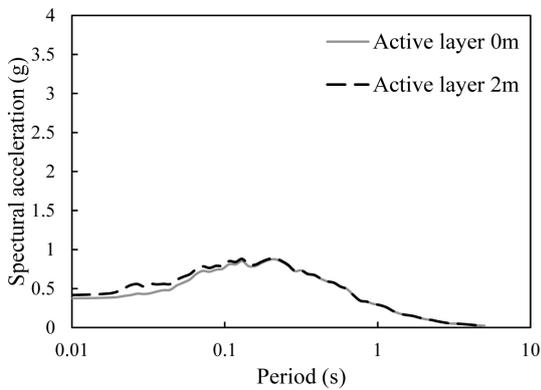
(a) Yakutsk, PGA 0.6 g



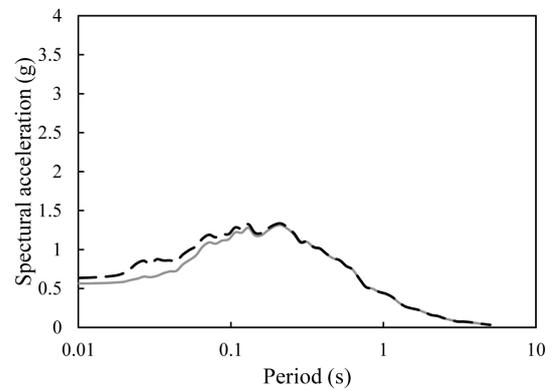
(b) Yakutsk, PGA 0.4 g



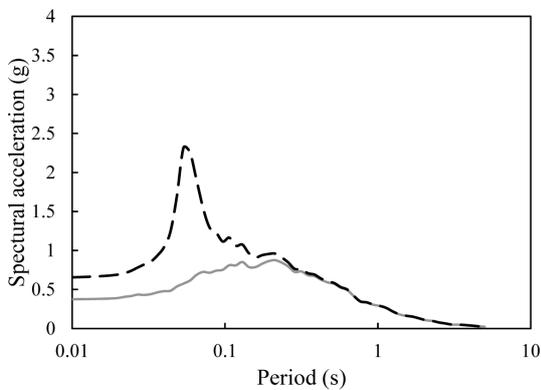
(b) Yakutsk, PGA 0.6 g



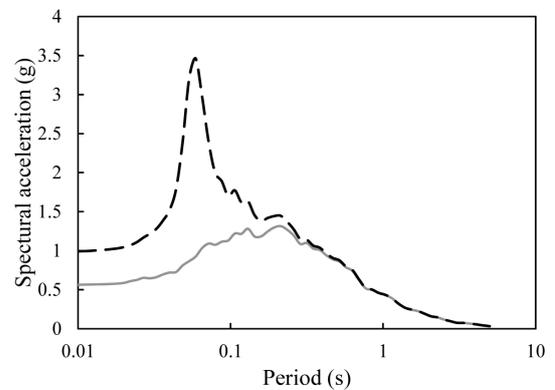
(c) Chara, PGA 0.4 g



(c) Chara, PGA 0.6 g



(d) Chara, PGA 0.4 g



(d) Chara, PGA 0.6 g

Fig. 9. Response spectrum – (a) Yakutsk : Active layer (Silt), (b) Yakutsk : Active layer (Peat), (c) Chara : Active layer (Debris), (d) Chara : Active layer (Peat over Debris)

였으며, 이 때 지진계수는 각각 식 (1), 식 (2)를 이용하여 계산하였다.

$$F_a(RRS) = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{4} \int_{0.1}^{0.5} \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rock}(T)} dT \quad (1)$$

$$F_v(RRS) = \frac{R_{soil}}{R_{rock}} \frac{1}{1.6} \int_{0.4}^{2.0} \frac{RS_{soil}(T)}{RS_{rock}(T)} dT \quad (2)$$

여기서 F_a 와 F_v 는 각각 단주기 증폭계수, 장주기 증폭계수를 의미하며, RS_{soil} 와 RS_{rock} 은 각각 주기 T 에 따른 토층과 암반노두의 스펙트럴 가속도(S_a)를 나타낸다. NEHRP의 내진설계기준에서는 RRS를 통해, 각각 단주기 증폭계수(F_a)의 적분구간을 0.1~0.5초, 장주기 증폭계수(F_v)의 적분구간을 0.4~2.0초로 설정하였다. R_{soil} 과 R_{rock} 은 각각 토층과 암반노두의 기록지점과 지진원과의 이격거리이다(Kwak et al., 2009). 진원으로부터 거리가 멀어지면, R_{soil} 과 R_{rock} 은 큰 차이가 없으므로, 본 연구에서는 R_{soil} / R_{rock} 은 1로 가정하였다.

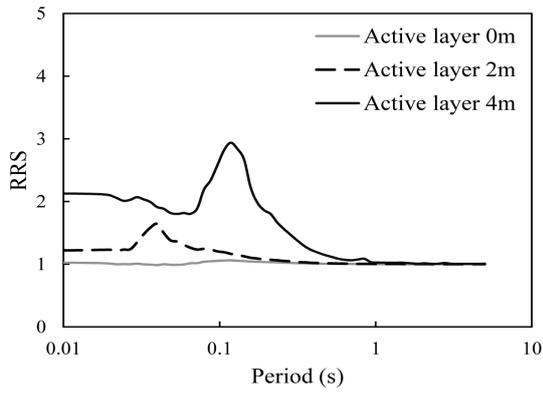
Yakutsk와 Chara 지역에 대한 지진계수를 계산하여 Table 5에 정리하였으며, Fig. 10에는 두 지역에 대해 지반응답해석을 수행한 결과를 RRS의 평균값으로 나타내었다. Fig. 10(a)와 Fig. 10(b)를 통해 계절 동토층의 두께 변화가 증폭계수에 미치는 영향을 분석한 결과, 계절 동토층의 두께가 증가함에 따라 고유주기가 증가하며 이로 인해 더 큰 주기에서 RRS의 최대값이 나타났다. 또한 토탄이 포함된 지반의 경우에는 융해시 계절 동토층의 전단파속도가 더 크게 감소하기 때문에 지반의 고유주기가 증가하여 RRS의 최대값이 더 큰 주기에서 발생하는 것으로 판단된다(Fig. 10(b)). 실트가 포함된 Yakutsk

의 경우 입력지진파의 PGA가 증가함에 따라 각 주기에 해당하는 RRS도 증가하는 것으로 나타났지만, 나머지 경우에는 PGA의 영향이 작은 것으로 나타났다. Yakutsk에서 실트로 구성된 계절 동토가 존재할 경우 PGA가 증가함에 따라 F_a 가 증가하며, 계절 동토가 토탄일 경우에는 F_v 가 증가하는 것으로 나타났다. Chara 지역도 Yakutsk와 유사하게 토탄을 포함한 계절 동토층이 존재할 경우 F_v 가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 계절 동토에 포함된 토탄으로 인해 지반이 상대적으로 연약해져 지반의 고유주기가 증가하기 때문이며 이와 같은 변화는 상부구조물에 영향을 미치므로 증폭계수 산정시 매우 중요한 부분이라고 판단된다. Fig. 10(c)와 Fig. 10(d)를 통해 계절 동토층에 매우 얇은 토탄층(약 1m)이 존재할 경우 단주기 영역에서의 증폭이 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있으며, 2.5배에서 최대 3.5배까지 증폭되는 것으로 나타났다. 이를 통해 토탄층의 두께가 1m 임에도 불구하고 증폭현상이 크게 나타나며 계절 동토층을 구성하고 있는 성분에 따라 지반응답이 매우 상이하게 나타나기 때문에 동토지역의 지반응답해석시 정확한 조사를 바탕으로 한 지반주상도 작성이 필요하다고 판단되었다.

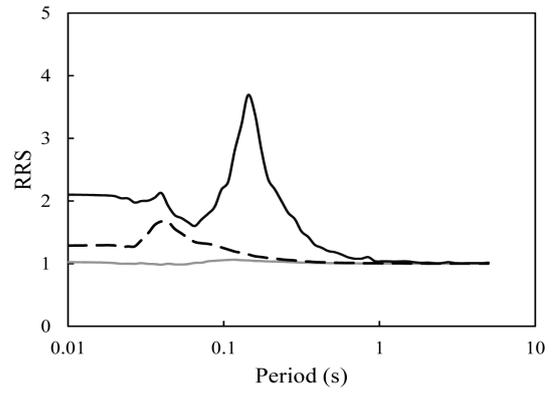
본 연구에서 도출된 증폭계수는 KBC에 제시되어 있는 증폭계수를 비교하였다. Yakutsk의 경우, 계절 동토층이 동결시 S_B , 융해시 S_C 지반으로 분류되며 계절 동토층의 두께와 PGA가 증가할수록 KBC에서 제시한 증폭계수보다 단주기 증폭계수는 크며, 장주기 증폭계수는 작게 나타났다. Chara 지역의 경우, S_B 지반으로 분류되었으며 KBC의 증폭계수와 큰 차이를 보이지 않았다 (Table 5).

Table 5. The short-period amplification factor and the long-period amplification factor of Yakutsk and Chara

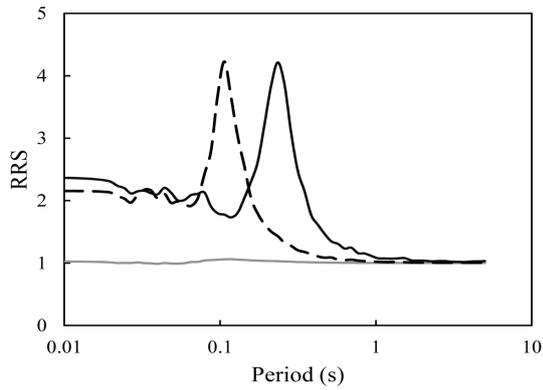
Site	Thickness of Active layer	0.4 g		0.6 g		KBC (2009)	
		F_a	F_v	F_a	F_v	F_a	F_v
(a) Yakutsk	0 m	1.025	1.002	1.025	1.002	1.0	1.0
	2 m	1.056	1.005	1.065	1.006	1.0	1.0
	4 m	1.627	1.045	1.881	1.062	1.2	1.6
(b) Yakutsk	0 m	1.025	1.002	1.026	1.002	1.0	1.0
	2 m	1.555	1.028	1.575	1.030	1.2	1.6
	4 m	2.410	1.136	2.389	1.146	1.2	1.6
(c) Chara	0 m	0.998	0.999	0.999	0.999	1.0	1.0
	2 m	1.010	1.000	1.012	1.000		
(d) Chara	0 m	0.998	0.999	0.999	0.999	1.0	1.0
	2 m	1.084	1.006	1.089	1.006		



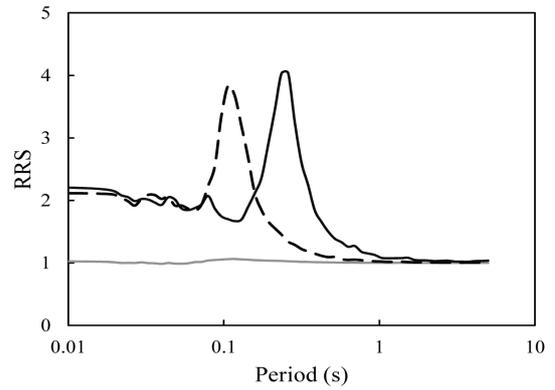
(a) Yakutsk, PGA 0.4 g



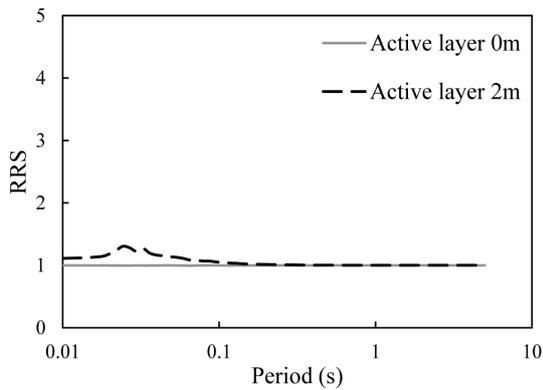
(a) Yakutsk, PGA 0.6 g



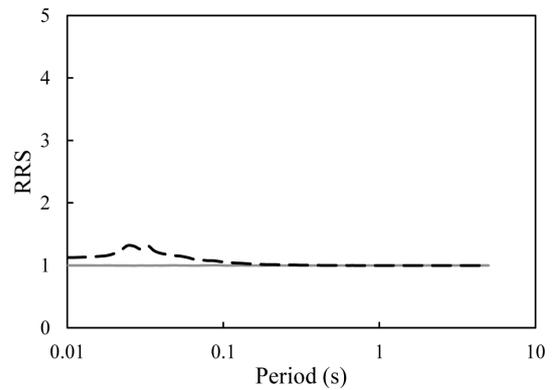
(b) Yakutsk, PGA 0.4 g



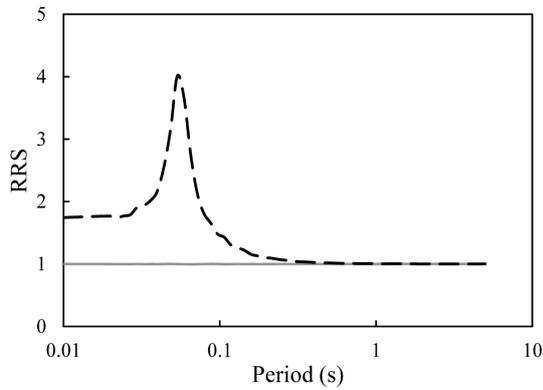
(b) Yakutsk, PGA 0.6 g



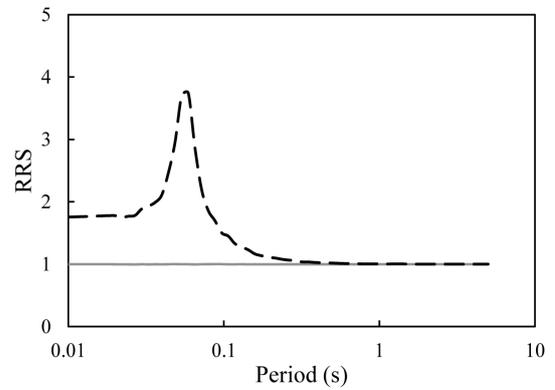
(c) Chara, PGA 0.4 g



(c) Chara, PGA 0.6 g



(d) Chara, PGA 0.4 g



(d) Chara, PGA 0.6 g

Fig. 10. RRS (Ratio of Response Spectrum) - (a) Yakutsk : Active layer (Silt), (b) Yakutsk : Active layer (Peat), (c) Chara : Active layer (Debris), (d) Chara : Active layer (Peat over Debris)

7. 결론

- (1) 본 연구에서는 동토지역의 증폭특성을 규명하고 이를 정량화하기 위해 동시베리아 지역의 지반물성과 동적특성에 대해 문헌조사를 수행하였으며, 동토지역의 토층 분포 및 특성에 대해 분석하였다. 동시베리아 지역의 계절 동토층은 지표면으로부터 대략 0~4m 내에 존재하며, 계절의 변화에 따라 동결과 용해를 반복한다. 계절 동토층의 전단파속도는 온도변화에 따라 80~1500m/s의 범위 내에서 변화하는 것으로 보고되었다. 영구 동토층은 대부분 계절 동토층 하부에서 약 200~500m의 두께로 형성되어 있다. 동시베리아 지역의 또다른 특징은 유기질토인 토탄이 넓은 지역에 걸쳐 지표면에 분포하고 있다는 점이다.
- (2) 동시베리아 Yakutsk와 Chara 지역에 대한 대표 지반주상도를 지질보고서, 실내시험 등 포괄적인 문헌조사를 통하여 결정하였다. 주상도는 여름과 겨울에 대해서 각각 결정하였으며 외기온도에 따라서 변화하는 계절 동토층의 전단파 속도를 고려하였다. 계절 동토의 심도와 강성, 그리고 지층 구성은 Yakutsk와 Chara 지역 각각 다르게 적용하였다. 이와 같이 생성된 지반주상도는 지반응답해석에 사용되었다.
- (3) 지반응답해석 수행결과, 계절 동토층이 위치하는 심도에서 PGA와 최대전단변형률이 상대적으로 크게 나타났으며, 계절 동토층의 두께가 증가할수록 증폭현상이 크게 발생하였다. 입력지진파의 PGA가 증가함에 따라 증폭되는 경향이 나타났으며, 특히 계절 동토층에 토탄이 포함될 경우 큰 지반 증폭 특성과 고유주기가 증가하는 현상이 나타났다. 이는 용해시 계절 동토층의 전단파 속도감소가 크게 발생하기 때문이며 동토층을 구성하는 성분에 따라 다르게 나타나는 것으로 판단된다. 지반의 증폭은 특히, 토탄층에서 크게 발생하는 것으로 나타났다. 즉, 토탄으로 구성된 지반에서는 이의 영향을 명확하게 고려해서 설계하는 것이 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 본 연구에서 수행한 지반응답해석 결과를 토대로 계산한 증폭계수와 2009 KBC에서 제시한 증폭계수를 비교하였다. Yakutsk는 계절적 영향에 따라 지반 분류가 달라진다. 반면 Chara두 지역의 지반은 계절적 영향을 고려해도 S_B 지반으로 분류되어 2009 KBC 지진계수는 변하지 않는다. 비교 결과, KBC 지진계

수에 비하여 Yakutsk 지역의 증폭계수는 크게 상이한 반면, Chara 지역의 경우는 큰 차이를 보이지 않았다. 단, Chara 지역도 토탄으로 구성된 지반에서는 증폭이 발생하며 이는 설계기준에 제시된 스펙트럼으로는 모사하지 못하는 것으로 분석되었다.

- (5) 결론적으로 동시베리아에서 지반의 계절적 변화를 고려하지 않을 경우, 지반의 응답을 크게 과소예측할 수 있는 것으로 나타났다. 특히 관심 지역인 동시베리아에 넓게 분포하고 있는 유기질토인 토탄은 지진파를 크게 증폭할 수 있으므로 설계 시 이를 반드시 고려해 주어야 할 것으로 판단된다. 단, 본 연구는 제한된 자료를 토대로 도출된 결론이며 추후 탄성과 탐사로 계측된 전단파 속도 주상도와 토탄에 대한 동적 시험을 통하여 계산된 응답의 검증이 필요해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업의 연구비지원(13IFIP-B06700801)에 의해 수행 되었습니다.

참고문헌 (References)

1. Ahonen, L. (2001), "Permafrost: occurrence and physicochemical processes", Vol.5, Posiva, 2001.
2. Boulanger, R.W., Arulnathan, R., Harder, L.F., and Torres, R.A. (1998), "Dynamic properties of Sherman Island peat", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, No.124, Vol.1, 1998, pp.12-20.
3. Davis, N. (2001), "Permafrost : a guide to frozen ground in transition. Fairbanks, Alaska", University of Alaska press, 2001.
4. Dunaeva, E.N. and Kondratieva, K.A.(1989), "Seasonal freezing and thawing of soils", Geocryology of the USSR: Middel Siberia, pp.68-71.
5. FEMA (1997), "NEHRP recommendation provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part I", pp.337.
6. Gavrilova, M.K. (1978), "Climate and Long-Term Freezing of Soils", Nauka, Moscow, pp.214.
7. Ivanov, M.S. (2004), "Cryogenic Structure of Quaternary Deposits of the Lena-Aldan Depression", Novosibirsk: Nauka, pp.126.
8. KICT (2010), "Development of site investigation and monitoring system for extreme cold region".
9. Konstantinov, P.Y., Argunov, R.N., Herasimov, E.Y., and Ugarov, I.S. (2008), "The Influence of the Winter Season on Active layer Depth in Taiga Landscapes, the Yakutsk Vicinity, East Siberia", the Ninth International Conference on Permafrost, Vol.1, pp.983-986.
10. Kottke, A.R. and Rathje, E.M. (2008), "Sigma Spectra", University of Texas at Austin, Version alpha, Revision, 2008.
11. Kottke, A.R. and Rathje, E.M. (2008), "Strata", University of Texas

- at Austin, Version alpha, Revision, 2008.
12. Kwak, D. Y., Jeong, C. G., Park, D. H., and Lee, H. S. (2009), "Development of Probabilistic Seismic Coefficients of Korea", *JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY*, No. 10, Vol.25, pp.87-97.
 13. Leblanc, A.M., Frotier, R., Allard, M., Cosma, C., and Buteau, S. (2004), "Seismic cone penetration test and seismic tomography in permafrost", *Canadian geotechnical journal*, No.41, Vol.5, 2004, pp.796-813.
 14. Melnikov, P.I. (1988), "Map of landscapes and permafrost conditions in Yakutia (scale 1:2,500,000)", *Permafrost Inst., Siberian Branch, Acad. of Sci. of the USSR, Yakutsk*.
 15. Meng, Q., Li, D., Chen, J., Xu, A., and Huang, S. (2008), "Experimental Research on Physical-Mechanical Characteristics of Frozen Soil Based on Ultrasonic Technique", the Ninth International Conference on Permafrost, Vol.2, pp.1179-1183.
 16. MLTM (2009), "Korean Building Code (KBC)", pp.81-85.
 17. Nevskiy, M.V., Zavyalov, A.D., Gliko, A.O., Grachev, A.F., Ulomov, V.I., and Khrometskaya, E.A. (2003), "Presented to the XXIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics, National report", *RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES NATIONAL GEOPHYSICAL COMMITTEE*.
 18. Qi, J., Ma, W., Sun, C., and Wang, L. (2006), "Ground motion analysis in seasonally frozen regions", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.44, pp.111-120
 19. Rathje, E.M., Kottke, A.R., and Trent, W.L. (2010), "Influence of Input Motion and Site Property Variabilities on Seismic Site Response Analysis", *Journal of ASCE*, Vol.136, pp.617-619.
 20. Romanovsky, V.E., Sazonova, T.S., Balobaev, V.T., Shender, N.I., and Sergueev, D.O. (2007), "Past and recent changes in air and permafrost temperatures in eastern Siberia", *Global and Planetary Change*, Vol.56, pp.399-413.
 21. Sazonova, T.S., Romanovsky, V.E., Walsh, J.E., and Sergueev, D.O. (2004), "Permafrost dynamics in the 20th and 21st centuries along the east siberia transect", *Journal of Geophysical Research*, Vol.109.
 22. Schnabel, P.B. (1973), "Effects of local geology and distance from source on earthquake ground motions", Ph.D. Thesis, University of Calif., Berkeley.
 23. Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M., and Tokimatsu, K. (1986), "Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.112, No.11, pp. 1016-1032.
 24. Skryabin, P., Varlamov, S., and Skachkov, Y.(2007), "Monitoring of the Thermal Regime of Permafrost in Central Yakutia", *Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia*.
 25. Speker, V.B., Speker, V.B., and Bakulina, N.T. (2008), "New Data on the Ice Complex of the Lena-Amga Rivers Plain (Central Yakutia)", the Ninth International Conference on Permafrost, Vol.2, pp.1681-1684.
 26. Stanilovskaya, J., Ukhova, J., Sergeev, D., and Utkina, I. (2008), "Thermal State of Permafrost in Northern Transbaykalia, Eastern Siberia", the Ninth International Conference on Permafrost, Vol. 2, pp.1695-1700.
 27. Suzuki, Y., Hatanaka, M., Ishihara, K., Konno, T., and Akino, K. (1992), "Engineering properties of undisturbed gravel sample", *Earthquake Engineering, Tenth World Conference, 1992, Balkema, Rotterdam*.
 28. Tsytoovich, N., "The Mechanics of Frozen Ground", Translated by Scripta Technical Inc., New York. Published by McGraw-Hill Book Co., New York; 1975.
 29. Vinson, T.S. (1978), "Response of frozen ground to dynamic loadings", *Geotechnical Engineering for Cold Regions, McGraw-Hill Book Company; 1978. Chap. 8, pp.405-458*.
 30. Wang, D.Y., Zhu, Y.L. Ma, W., and Niu, Y.H. (2006), "Application of ultrasonic technology for physical-mechanical properties of frozen soils", *Cold regins Science and Technology*, No.44, Vol.1, pp.12-19.
 31. Wu, Z.W. and Ma, W. (1993), "Strength and Creep of Frozen soil", *Lanhou University Press. (In Chinese)*
 32. Xu, G., Yang, Z., Dutta, U., Tang, L., and Marx, E. (2011), "Seasonally frozen soil effects on the seismic site response", *Journal of Cold Regions Engineering*, Vol.25, No.2, June 1, 2011., ASCE, pp.53-70.
 33. Yang, Z.J., Dutta, U., Xu, G., Hazirbaba, K., and Marx, E.E. (2011), "Numerical analysis of permafrost effects on the seismic site response", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.31, No. 3, pp.282-290.
 34. Zimmerman, R.W. and King, M.S. (1986), "The effect of the extent of freezing on seismic velocities in unconsolidated permafrost", *Geophysics*, Vol.51, No.6, 1986, pp.1285-1290.

Received : September 17th, 2014

Revised : September 29th, 2014

Accepted : September 29th, 2014