

보강토 옹벽의 지진시 거동에 관한 유한요소해석

Finite Element Analysis of Soil-Reinforced Segmental Retaining Walls Subjected to Earthquake Loading

유충식¹⁾, Chungsik Yoo

¹⁾ 성균관대학교 토목공학과 부교수, Assoc. Prof. Sungkyunkwan Univ. Dept. of Civil Engineering

SYNOPSIS : This paper presents the results of finite element analysis on the seismic response of a soil-reinforced segmental retaining wall subjected to a prescribed earthquake record. The results of finite element analysis indicate that the maximum wall displacement occurs at the top, exhibiting a cantilever type of wall movement. Also revealed is that the increase in reinforcement force is more pronounced in the upper part of the reinforced zone, resulting in a more or less uniform distribution. None of the design guidelines appears to be able to correctly predict the dynamic force increase when compared with the results of finite element analysis. The results demonstrated that there exist critical stiffness and length of reinforcement beyond which further increase would not contribute to additional reinforcing effect. Based on the findings from this study, a number of implications to the current design methods are discussed.

Key words : Segmental retaining wall, Reinforced earth, Earthquake, Finite element analysis

1. 서론

우수한 경제성 및 시공성을 바탕으로 우리 나라 뿐만 아니라 전 세계적으로 기존의 중력식 옹벽의 대체 공법으로 인정받고 있는 블록식 보강토 옹벽은 구조적인 유연성으로 인해 내진성이 우수한 것으로 알려져 있으며 이러한 우수한 내진성은 최근 미국 및 일본 등지에서 발생한 강력한 지진에서 확인된 바 있다. 그러나 아직 까지 지진시 역학적 거동 특성에 대한 명확한 이해가 부족한 실정인바 준정적 해석기법에 근거한 내진 설계 기준이 적용되고 있으며, 따라서 이에 대한 체계적인 연구의 필요성이 높아 가고 있다. 최근에 들어와서 우리 나라에서도 지진 발생 빈도가 늘어가고 있는 추세여서 내진설계에 대한 기준이 강화되고 있으며, 이에 따라 각종 토목 구조물의 내진설계에 관련된 시방이 마련되고 있으나 최근에 그 적용성이 급상승하고 있는 블록식 보강토 옹벽의 경우 대부분 내진 설계가 생략되고 있는 실정이며, 따라서 우리 나라 실정에 적합한 블록식 보강토 옹벽의 내진 설계 기준 및 관련 시방의 마련이 요구된다고 하겠다.

보강토 옹벽의 대표적인 설계기준으로 NCMA (National Concrete Masonry Association) 및 FHWA (Federal Highway Administration) 설계기준을 들 수 있으며, 이 두 기관은 최근에 내진설계기준을 제시한 바 있다(NCMA 1999; FHWA 1996). NCMA 설계기준은 Bathurst와 그의 공동연구자들의 연구결과(Bathurst & Cai 1994, 1995; Bathurst 등 1996; Bathurst & Hatami 1998a,b)를 토대로 제시된 설계기준으로서 블록식 보강토 옹벽을 대상으로 하고 있으며, FHWA 설계기준은 Segretin & Bastick (1988)의 연구 결과를 근간으로 제시된 것으로서 포괄적 개념의 보강토 옹벽을 대상으로 하고 있다. 두 설계기준은 M-O 동적토압 이론에 근거한 준정적 해석법을 도입하고 있다는 면에서는 공통점이 있으나 세부 내용에서는 다소 상이한 해석모형을 적용하고 있어 그 결과에서 많은 차이를 나타내므로 합리적인 설계기준의 정립을 위한 체계적이고 종합적인 연구의 필요성이 대두된 바 있다.

이러한 맥락에서 본 연구에서는 블록식 보강토 옹벽에 대한 지진해석을 수행하여 블록식 보강토 옹벽의 지진시 거동 메카니즘을 분석·고찰하였으며, 그 결과를 토대로 현재 적용되고 있는 NCMA 및 FHWA 내진설계법에 대한 타당성을 검토하였다. 한편 본 연구에서는 지진하중 작용시 보강재의 강성 및 포설 길이 등 보강조건이 옹벽의 거동에 미치는 영향에 대한 고찰에 주안점을 두고 다양한 조건에 대한 매개변수 연구를 수행하였다.

2. 블록식 보강토 옹벽의 지진시 거동에 관한 유한요소해석

본 연구에서는 블록식 보강토 옹벽의 지진시 거동메카니즘에 관한 이해도를 높이고 NCMA 및 FHWA 설계기준의 타당성을 검토함과 아울러서 보다 개선된 설계기준을 제시하고자 유한요소해석 프로그램 DIANA를 이용하여 블록식 보강토 옹벽의 지진시 거동에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. DIANA는 네덜란드 TNO사와 Delft 공대가 공동으로 개발한 범용 유한요소해석 프로그램으로서 유층식과 그의 공동 연구자들의 연구(유층식과 이광문 1998, 유층식 1999)에서 블록식 보강토 옹벽 해석에의 적용성이 확인된 바 있다. 본 장에서는 이에 대한 구체적인 내용을 다루었다.

2.1 해석 조건

본 연구에서는 그림 1에서 보이는 바와 같이 매우 견고한 지반(non-yielding foundation)에 시공되는 높이(H) 8m의 옹벽을 고려하였다. 여기서 벽체는 높이(H_w)와 폭(L_w)이 각각 0.2 m와 0.5 m인 블록으로 형성되며, 배수성이 우수한 양질의 사질토가 뒤채움층으로 사용되는 것으로 가정하였다. 표 1은 본 연구에서 고려한 기본조건과 함께 해석 조건을 나열하고 있다.

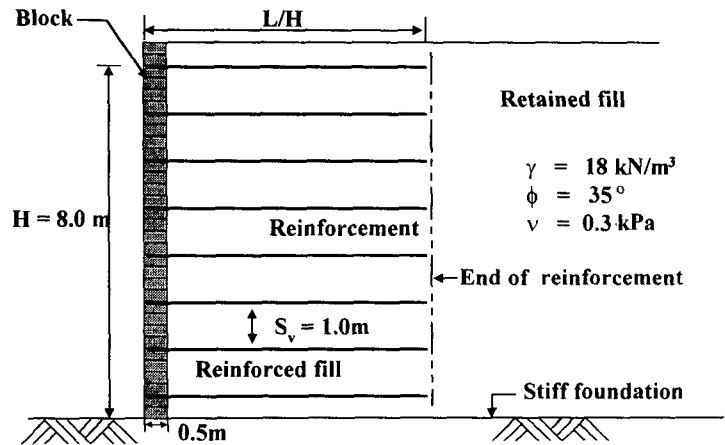


그림 1. 해석대상 옹벽 단면도

표 1. 매개변수 연구 조건

	보강재 강성 J (kN/m)	보강재 길이 (L/H)	포설패턴
기본 조건	2000	1.0	Case A
해석 범위	500, 2000 5000, 10000, 20000	0.7, 1.0, 1.2, 1.5	Case A, B, C (그림 9참조)

한편, 본 해석에서는 Akita 지진기록을 최대 수평가속도가 0.2g가 되도록 축소하여 입력지진으로 적용하였으며, 그림 2는 지진의 기준 수평 가속도-시간 이력(Base Reference Horizontal Acceleration-Time History)을 보여주고 있다.

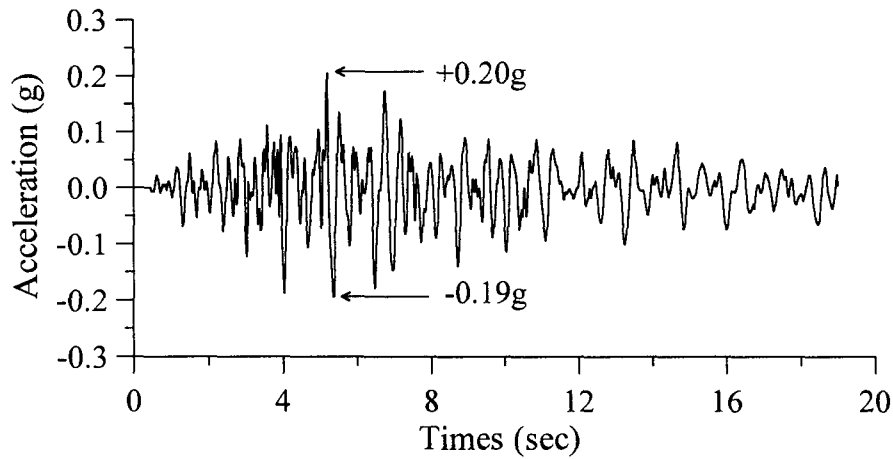


그림 2. 입력지진의 시간-가속도 이력

2.2 유한요소 모델링

2.2.1 이산화 및 경계조건의 설정

유한요소해석 결과는 해석영역의 모델링 방법에 따라서 그 타당성이 좌우된다. 특히 경계조건 설정 및 이질 매체의 경계면 거동에 대한 모델링 방법은 구조체의 응력-변형을 거동에 지대한 영향을 주는 매우 중요한 항목이라 할 수 있다. 해석영역을 설정하는데 있어 본 연구에서는 예비해석을 통해서 배면토 영역(retained zone)의 크기가 해석 결과에 미치는 영향을 검토하고 그 결과를 토대로 벽체 전면으로부터 벽체의 높이에 약 5배에 해당하는 연직롤러를 설치하였으며, 기초지반의 하부에는 힌지를 설치하여 해석영역을 설정하였다. 해석 모델링에서 지반은 4절점 평면변형률 요소를 이용하여, 그리고 보강재는 2절점 트러스 요소를 이용하여 모델링하였다. 한편, 블록/보강토, 기초지반/보강토의 경계면 거동은 4절점 Goodman 등(1968)의 경계면요소를 적용하여 상호면 거동을 모사 하였다. 그림 3과 4는 각각 해석에 적용된 유한요소망과 경계면 요소 적용 상세도를 보여주고 있다.

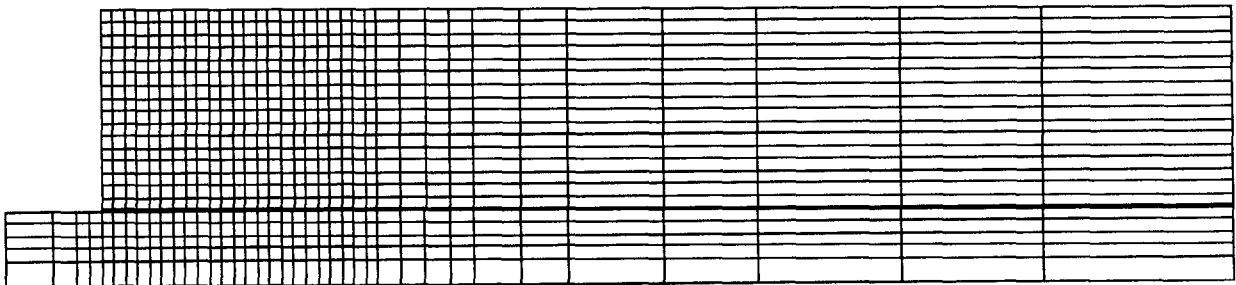


그림 3. 해석에 적용된 유한요소망

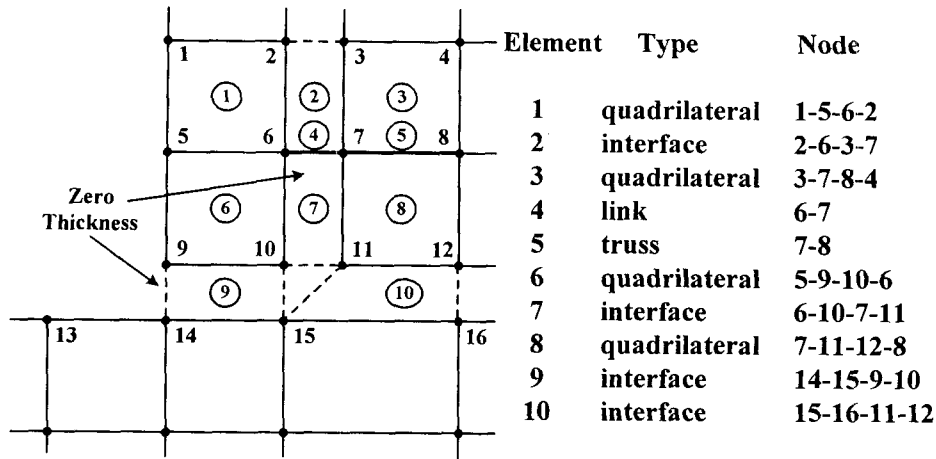


그림 4. 벽체/보강토/기초지반 경계면 모델링 상세도

재료의 모델링에 있어서 보강토 및 배면토는 Mohr-Coulomb 항복 기준과 관련 유동법칙(Associated Flow Rule)을 따르는 탄성 재료로 간주하였다. 한편, 기초지반은 단단한 암반으로 구성된 것으로 가정하여 탄성재료로 간주하였으며, 블록 및 상호면, 보강재는 탄성 재료로 간주하였다. 표 2는 각각 해석에 적용된 각 구성 재료에 대한 입력정수를 보여주고 있다.

표 2. 해석에 적용된 입력정수

구분	탄성계수 (kPa)	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (degree)	포아송비	휨강성(EI) (kN-m ²)
뒤채움흙	3.0×10^4	20	0	35	0.3	-
보강재	2.0×10^8	0.1	-	-	0.25	-
블록벽체	-	20	-	-	0.3	50,000
경계면 구분		연직강성 (kPa/m)		전단강성 (kPa/m)		
블록/보강토		1×10^7		5×10^5		
기초지반/보강토		1×10^7		1×10^9		

2.2.2 해석단계

토류 구조물의 지진시 해석을 위해서는 지진하중 작용전의 초기응력 상태를 정적해석을 통해 재현하여야 한다. 따라서 먼저 블록설치 ⇒ 보강재 포설 ⇒ 뒤채움흙 포설 및 다짐의 과정으로 이어지는 일련의 시공과정에 대한 총 10단계의 시공단계별 정적 해석을 수행하였으며 정적 해석 완료후 지진하중을 작용시켰다. 예비해석 결과 입력 지진 작용시 시간간격을 0.05 sec 이하로 유지할 경우 안정된 해석결과를 얻을 수 있는 것으로 나타나 $\Delta t=0.05s$ 의 시간간격으로 총 10초 동안 작용시켰으며, 각 단계에서의 수치적분은 Newmark 기법을 적용하였다. 한편, 동적해석시 요구되는 지진하중에 대한 지반의 감쇠효과를 고려하기 위한 감쇠비의 적용에 있어서 토류 구조물에는 2~5%의 감쇠비를 적용하는 것이 타당하다는 연구결과를 토대로 5%의 감쇠비를 적용하였다.

3. 지진하중 응답 특성

본 절에서는 기본조건($J=2000 \text{ kN/m}$, $L/H=1.0$)에 대한 해석 결과를 토대로 벽체 변위 및 유발인장력 분포등 블록식 보강토 옹벽의 전반적인 거동 특성을 분석·고찰하였다.

3.1 지반내 수평변형을 및 유발인장력 분포

그림 5는 지진하중 작용후 지반내 수평변형을(ϵ_x) 분포경향을 도시하고 있다. 이 그림에서는 보이는 바와 같이 보강토 영역의 수평변형을 수준이 배면토 영역에 비해 현저히 낮으며 벽체상단부 보강재 끝단 $1/3H$ 영역에서 수평변형을 집중되는 경향을 관찰할 수 있는데 이는 벽체-보강재-뒤채움흙으로 구성된 보강토체가 일체의 중력 복합체로 작용하여 지진하중에 저항함에 따른 것으로 판단된다. 한편, 수평변형율이 집중되는 영역으로부터 파괴면을 유추할 경우 파괴면은 보강영역저부에서 시작하여 보강토체의 끝단에서 약 30° 의 경사를 가지고 상부로 전파되는 쌍일차 쐐기(Bilinear Wedge) 형태를 나타내고 있는데 이러한 경향은 Tatsuoka 등 (1997)의 진동대 시험결과와 Bathurst & Hatami(1999)의 유한차분해석 결과와 유사한 것으로 나타났다.

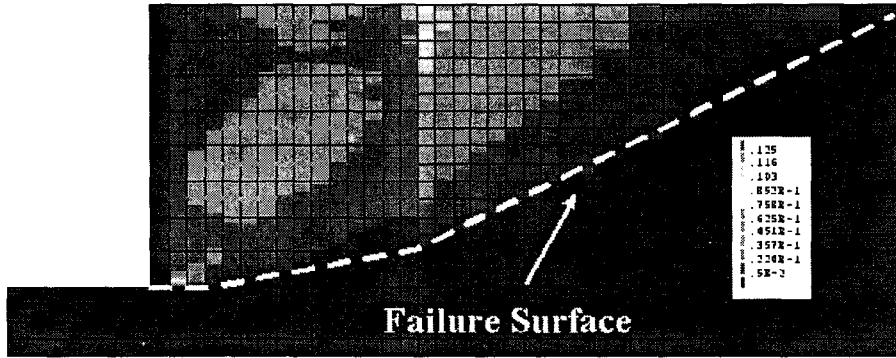


그림 5. 수평변형율(ϵ_x) 분포경향

그림 6은 지진하중 작용으로 인한 증분 유발인장력(ΔF_{dyn}) 분포경향을 NCMA 및 FHWA 설계 기준으로 계산된 결과와 함께 도시하고 있다. 먼저 유한요소해석 결과와의 정량적인 비교에서는 유한요소해석에서 얻어진 ΔF_{dyn} 가 두 설계기준 보다 현저히 큰 것으로 나타났는데 이는 NCMA 및 FHWA 준정적 설계 기준이 지진하중의 주 진동수(Predominant Frequency), 지속기간(Duration) 등의 지진특성을 고려하지 못하는 제한성에 기인하는 것으로 판단되며, 정성적인 분포경향에 있어서는 벽체 전반에 걸쳐 증가량이 거의 일정하게 나타나고 있어 NCMA 및 FHWA에서 채택하고 있는 검토 모형과는 다소의 차이를 보이고 있다.

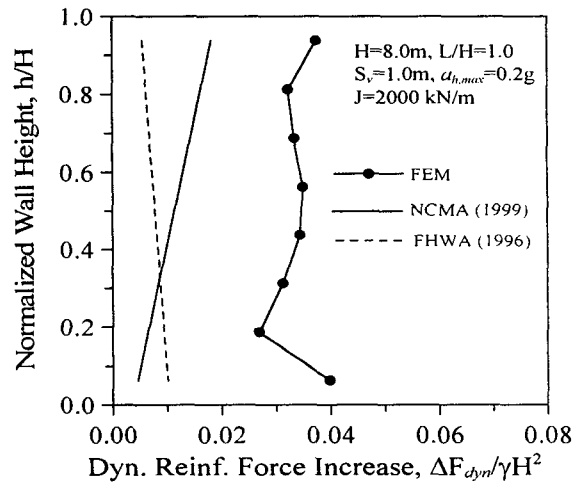


그림 6. 동적 증분 유발인장력 분포

3.2 보강조건이 벽체의 변위에 미치는 영향

3.2.1 보강재 강성의 영향

블록식 보강토 옹벽의 시공중 거동에 관한 연구결과(유충식과 이광문 1999)에 따르면 옹벽의 거동은 보강재의 강성에 많은 영향을 받는 것으로 나타났으며 따라서 지진시 거동 또한 보강재의 강성에 많은 영향을 받을 것으로 판단되나 NCMA 혹은 FHWA의 준정적 설계/해석법에서는 보강재의 강성의 영향을 전혀 고려하지 않고 있다.

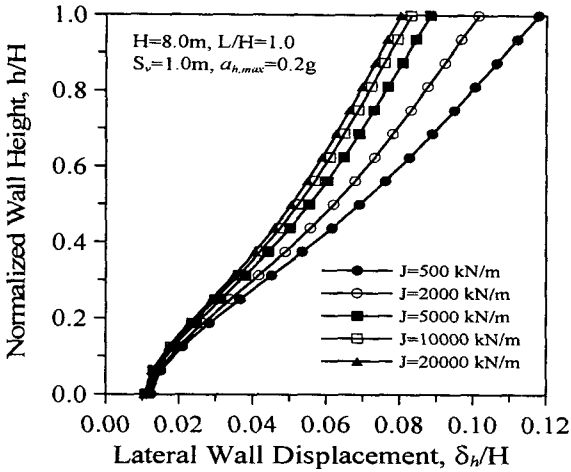


그림 7. 보강재강성에 따른 벽체변위분포

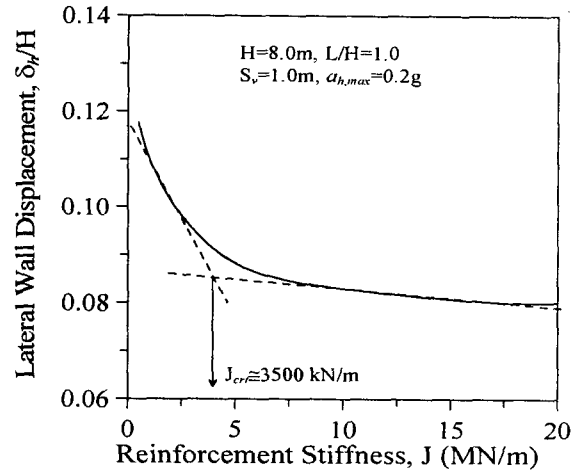


그림 8. 보강재강성에 따른 최대 벽체변위

이러한 경향은 보강재의 강성에 따른 벽체변위 분포 및 최대 변위($\delta_{h,max}$) 변화경향을 보여주고 있는 그림 7과 8에서 잘 관찰할 수 있다. 그림 7에서 보이는 바와 같이 벽체 변위곡선은 $J > 5000$ kN/m의 범위에서는 거의 동일하게 나타나고 있으며, 보강재의 강성 J 에 따른 최대변위 변화 경향을 나타내는 그림 8에서 $J \approx 3500$ kN/m에서 최대변위가 수렴하는 경향으로부터 더욱 뚜렷하게 관찰할 수 있다. 이는 임의 조건에서 변위억제에 대한 임계강성(J_{cr})이 존재함을 의미하는데 이는 내진 측면에서 벽체 변위 억제를 위한 수단으로서 보강재의 강성만을 조절하는 한계가 있음을 보여주고 있다.

3.2.2 포설패턴 및 길이의 영향

NCMA 설계기준의 지진시 내적 안정성을 만족시키기 위해서는 상단부 보강재의 길이 증가시켜야 한다. 본 연구에서는 보강재의 포설패턴 및 길이에 따른 벽체의 변위 거동을 고찰하여 NCMA 설계기준의 타당성을 검토하고 내진설계 측면에서의 최적 포설 패턴을 검토하였다. 포설 패턴은 $L/H=1.0$ 을 기준으로 그림 9의 내부에 도시된 바와 같이 세 가지 조건을 설정하여 상·중·하단부 보강재의 길이가 옹벽의 거동에 미치는 영향을 고찰하였다.

그림 9에서는 각 조건에 대한 변위곡선을 도시하고 있는 데 보이는 바와 같이 상단부 $1/3H$ 영역에 포설되는 보강재의 길이만을 증가시킨 CASE 1의 경우가 CASE 2와 3과 거의 동일한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 내진측면에서의 최적설계를 위해서는 상단부 $1/3H$ 영역에 포설된 보강재의 길이를 증가시킬 경우에도 충분한 변위 억제 효과가 있음을 의미하며, 이는 상단부에서의 가속도 증폭현상에 대비한 보강재 길이를 증가시킬 것을 제안하고 있는 NCMA 설계기준과 잘 부합되는 것으로 나타났다.

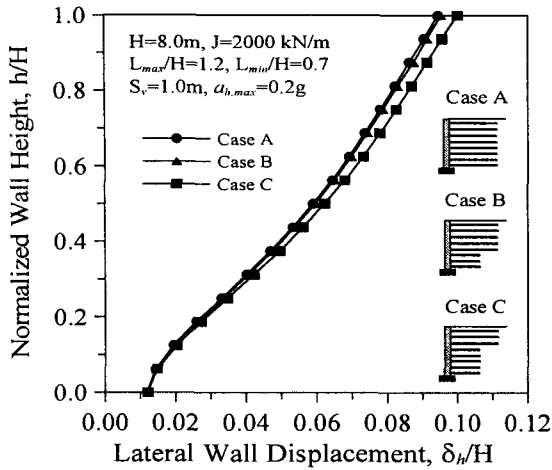


그림 9. 포설패턴에 따른 벽체 변위 분포

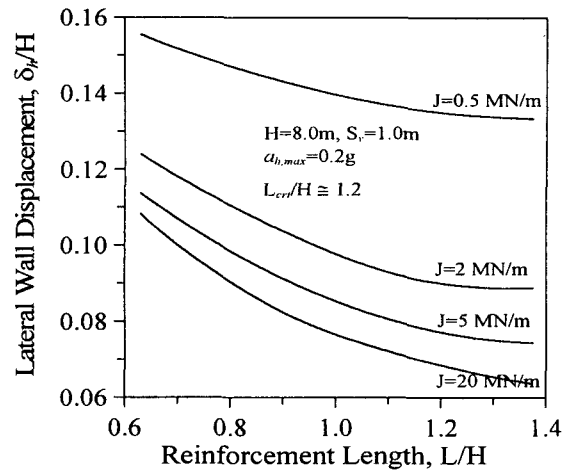


그림 10. 보강재 길이에 따른 최대 벽체 변위

보강재의 길이가 벽체의 최대 수평변위 ($\delta_{h,max}/H$)에 미치는 영향이 그림 10에 제시되어 있다. 여기서는 전체 보강재의 길이를 $L/H=0.7\sim 1.5$ 로 변화시켜서 얻어진 결과를 다양한 보강재의 강성에 대하여 도시하였는데 보이는 바와 같이 L/H 가 증가함에 따라 $\delta_{h,max}/H$ 가 현저히 감소하다 $L/H\cong 1.0\sim 1.2$ 정도에서 수렴하는 경향을 보이고 있어 임계 보강재 길이는 보강재의 강성에 관계없이 $L_{crit}/H=1.0$ 정도로 간주할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 경향은 앞서 관찰한 보강재의 강성의 영향과 마찬가지로 임의조건에서 보강재의 길이를 증가시켜서 벽체의 변위를 경감시킬 수 있는 정도가 한정되어 있음을 의미하며, 보강재의 강성에 관계없이 $L/H=1.0$ 정도를 유지할 경우 벽체변위를 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 이 그림에서는 보강재의 강성이 클수록 보강재의 길이 L/H 증가에 따른 변위 감소율이 큰 것으로 나타나 저강성의 보강재의 길이를 증가시키는 방법보다는 고강도의 보강재를 적용하는 것이 내진측면에서 유리할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석기법을 이용하여 블록식 보강토 옹벽에 대한 지진해석을 수행하여 블록식 보강토 옹벽의 지진시 거동 메카니즘을 분석·고찰하였으며, 그 결과를 토대로 보강 조건에 따른 옹벽의 지진하중 응답 특성을 고찰하였다.

유한요소해석을 이용한 지진해석 결과 지진시 블록식 보강토 옹벽의 변위는 벽체 상단부에서 가장 두드러지게 나타나 캔틸레버 형태의 변위형상을 보이며, 이러한 결과는 지진피해지역에서의 피해사례조사 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 한편, 지진시 보강재 유발인장력 분포 양상은 NCMA 및 FHWA 설계기준에서 제시하는 분포양상과는 다소 차이가 있으며 전반적으로 과소평가 하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 준정적 해석법에 근거한 NCMA 및 FHWA 설계기준에서는 지진의 주 진동수 및 지속시간 등의 지진하중의 특성을 반영하지 못하는데 그 원인이 있다.

한편, 지진시 보강토 옹벽의 변위를 억제하는 수단으로서 보강재의 강성 및 길이를 증가시키는 방안 에 대한 매개변수 연구결과, 임의의 조건에서 보강재의 임계 강성 및 길이가 존재하는 것으로 나타나 효율적인 변위억제 효과를 얻기 위해서는 강성과 길이에 대한 종합적인 검토가 수반되어야 할 것으로 판단된다. 한편, 옹벽 하단부 보강재의 길이 증가는 변위억제에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났으며 따라서 내진설계 측면에서의 상단부 보강재의 길이가 옹벽의 전반적인 거동에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 '98 자유공모과제 연구비 지원사업(1998-001-E01927)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 유충식(1999), 보강토 옹벽의 내진설계, 1999년도 토목섬유 학술발표회 논문집, pp.71~83.
2. 유충식, 이광문(1998), 블록식 보강토 옹벽의 거동 특성 연구, 한국지반공학회 논문집, 제15권, 제1호, pp.53~62.
3. Bathurst, R.J. and Cai, Z.(1994,) *In-isolation cyclic load-extension behavior of two geogrids*, Geosynthetics International, Vol. 1, No.1, pp.3~17.
5. Bathurst, R.J. and Cai, Z.(1995), *Pseudo-static seismic analysis of geosynthetic-reinforced segmental retaining walls*, Geosynthetics International, Vol. 2, No. 5, pp.787~830.
6. Bathurst, R.J. and Hatami, K.(1998), *Seismic Response Analysis of a Geosynthetic-Reinforced Soil Retaining Wall*, Geosynthetics International, Vol. 5, Nos. 1-25, pp.127~166.
7. Bathurst, R.J. and Hatami, K.(1998), *Influence of Reinforcement Stiffness, Length and Base Condition on Seismic Response of Geosynthetic Reinforced Retaining Walls*, Proc. 6th Int. Conf. on Geosynthetics, Atlanta, USA, Vol 2, pp.613~616.
9. Federal Highway Administration(1996), *Mechanically stabilized earth walls and reinforced soil slopes design and construction guidelines*, FHWA Demonstration Project 82, (Elias, V. and Christopher, B.R.), Washington, DC., USA, 364p.
10. National Concrete Masonry Association(1999), *Segmental Retaining Walls-Seismic Design Manual*, First Edition (Authored by Bathurst, R.J.), Virginia, USA, 119p.
11. Segrestin, P. and Bastick, M.(1988), *Seismic design of reinforced earth retaining walls-the contribution of finite element analysis*, Proceedings Int. Geotech. Sym. on Theory and Practice of Earth Reinforcement, Japan, pp.577~582.