

분리형 보강토공법의 고속도로 적용사례

A Case Study on the Discrete Segmental Retaining Wall in Highway Construction

노 한성¹⁾, Han-Sung Roh, 최 영철¹⁾, Young-Chul Choi

¹⁾ 한국도로공사 연구개발실 지반연구그룹 책임연구원, Chief Researcher, Geotechnical Research Group, Highway Research Center, Korea Highway Corporation

SYNOPSIS : The application of mechanically stabilized earth wall(MSEW) with segmental front panel has been increasing in highway construction due to its cost-effectiveness. However, some failures during construction have been reported and many field engineers are reluctant to select this method for important structure. One of the main reasons may be that there is no moderate specification for design and construction of MSEW yet. This paper discussed the main results of analysis on a case of block-type segmental retaining wall in highway construction. Based on the results, some recommendations on design and construction method of MSEW are presented.

Keyword : mechanically stabilized earth wall, block-type, design, construction method

1. 일반현황

지반 중에 인장보강의 효과를 가지는 보강재를 삽입하여 흙이 가지고 있는 역학적인 약점을 보완하는 보강토공법(MSEW : Mechanically Stabilized Earth Wall, RW : Reinforced retaining Wall)은 시공성과 경제성 측면에서 기존의 콘크리트 옹벽(중력식 또는 캔틸레버식) 보다 우수한 경우가 많다. 따라서 현재 관리연장이 2,131km이고 신설 및 확장장인 2,337km의 고속도로 설계·건설시에 여러 종류의 보강토 공법들이 폭 넓게 검토되고 그 사용이 점차 확대되는 추세에 있다(그림 1. 고속도로 현황). 특히, 근래에 국내에 소개된 일반적인 블록식 보강토 공법은 면상의 보강재인 지오그리드를 사용하여 흙과 결속력이 뛰어나며, 시공시 변형에 대한 적응성이 우수하고, 미관이 수려하며 경제성이 우수하여 건설현장에서의 시공실적이 급속히 증가하고 있는 추세이다(표 1. 고속도로 보강토 사용실적). 한편, 벽체 형식이 콘크리트 판넬이나 블록을 사용하는 보강토 공법은 정밀한 시공이 요구되고, 비교적 변형성이 크기 때문에 고속도로 본선과 같은 중요구조물에 적용시에는 적용이 제한되는 경향이 있다. 이것은 90년대 후반에 도입된 블록식 보강토공법의 경우 국내 자체의 기술집약도가 비교적 미흡하여 외국의 설계 프로그램에 의존하여 설계되어 파생하는 문제점에 한 원인이 있다고 사료된다.

본 논문에서는 고속도로 건설공사에 사용 전에 실시한 블록식 보강토 공법의 설계 및 시공 적정성 검토를 중심으로 ① 기존의 적용현황 및 문제점을 도출하고 ② 향후 고속도로에 적용하는 보강토공법의 시공기준 방향을 제안하며 ③ 중요구

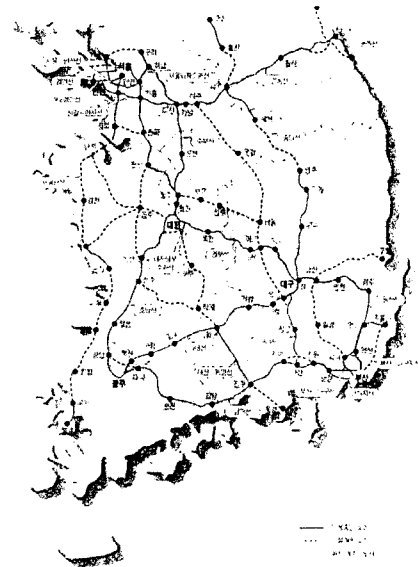


그림 1. 고속도로 현황

표 1. 고속도로 보강토 사용실적(2001.6)

구 간	시공물량 (m ²)	시공연장 (m)	최대성도 높이(m)
유지관리구간	10,855.6	1,418.2	15.2
건설구간	109,785.9	18,522.8	19

조물인 안정한 고속도로 건설공사를 도모함과 동시에 ④ 보강토 공법의 장점을 살려 보다 폭 넓게 적용을 유도하고자 검토대상 구간 중 보강토의 성토높이가 5.0m~10.0m인 구간을 중심으로 하여 기술하고자 한다.

2. 보강토공법

2.1 설계개념

보강토옹벽은 일반 콘크리트 옹벽에서 가정하는 토압, 지진하중에 대한 말뚝기초의 저항과는 달리 보강재가 토과 내부로부터 구속하여 안정한 상태를 이루어 자립성을 향상시키는 개념이다. 이들 보강토 공법은 토목섬유를 사용하는 방식에 의해 여러 가지 공법들이 개발되고 연구되고 있으며, 이중 우리나라에서 도로 성토용으로 폭 넓게 쓰이는 공법에는 판넬식과 블록식이 있다. 이들 벽면을 가지는 보강토 공법에서는 여러 가지 설계법이 제안되어 있으나, 보강토 옹벽의 비면의 주동영역을 상정하여 벽면에 작용하는 주동토압을 상정하여 이에 저항하는 보강재의 배치, 길이를 구하는 것이 일반적이다. 이 경우 저항영역에서의 보강재 인발저항에 의해 평형을 이루는 것으로 가정하며, 대표적인 보강토공법의 설계절차와 고려 사항을 그림 2에 나타내었다.

보강토의 형식이 선정된 경우는 사용 보강재의 설계강도는 재료의 장기 안정성과 보강 구조물의 전체적인 내구성을 고려하여 결정해야 한다. 일반적으로 사용하는 보강재의 허용인장강도는 부분안전율 개념을 도입하여 재료의 극한인장강도를 감소계수 또는 안전계수로 나눈 값이 된다. 적용되는 감소계수는 설치시 손상, 화학적 및 생물학적 조건에 의한 영향, 지오그리드의 발생 가능한 크리프 변형 고려 및 접점연결에 대한 항목이 적용된다. 또한 그림 2의 고려사항들을 검토하여 보강토 옹벽의 구조가 보강재의 내적, 외적안정 및 벽체에 작용하는 토압이나 기타 외력에 의해 발생하는 단면력에 대해 충분한 안정성을 확보하도록 선정한다.

2.2 현장시공단면 검토

2.2.1. 검토 일반

검토대상이 되는 대표적인 단면(H=7.0m)에 대한 초기 설계도가 그림 3에 나타내었다. 검토는 1) 보강성토체의 내적안정, 2) 벽면공의 파괴에 대한 검토, 3) 보강된 성토체의 외적안정에 대한 검토, 4) 기초지반의 침하에 대한 검토로 구성되며, 본 논문에서는 현재 설계단계에서 간과하기 쉬운 사항과 보강된 성토체의 외적안정중 전체 활동에 대한 검토와 시공시의 변형을 중심으로 기술하고자 한다.

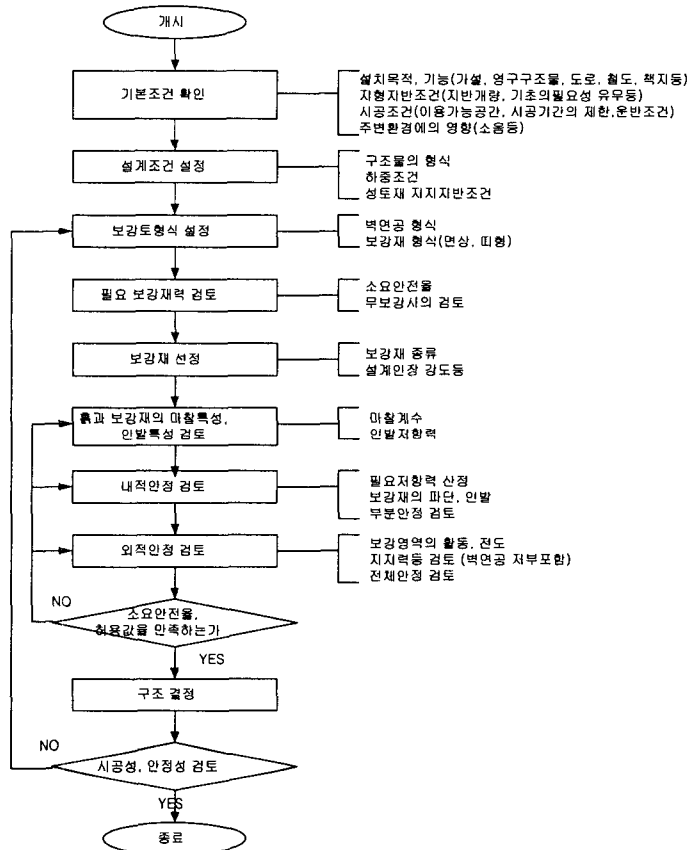


그림 2. 보강토 설계 및 시공절차

2.2.2 보강재의 설계강도 및 보강 간격

보강재는 같은 생산제원의 연성·견성 보강재라도 생산공정 및 방법, 품질관리에 따라 그 특성이 크게 다르므로 실제 사용되는 보강재의 설계 인장강도를 사용해야 한다. 검토대상 현장에 사용되는 지오그리드는

S사의 제품이므로 이 제품에 대한 감소계수를 사용하여 구한 보강재의 장기 설계인장강도 값을 사용하는 것으로 한다. 또한 보강재의 간격에 대한 미연방도로국(FHWA)의 규정은 보강토 옹벽 전체 높이에 대해, 일정한 보강단면과 간격을 사용할 경우 상부는 통상적으로 소요 안전을 보다 크게 되는 경향이 있으므로, 깊이에 따라 보강밀도를 변화시키는 것을 허용하고 있다. 그러나, 수직 주 보강 간격은 시공시와 장기 안정성을 확보하기 위해서, 최대 수직 보강간격은 블록 깊이의 두 배를 넘지 않고, 최대 800mm를 넘지 않도록 규정하고 있다. 보강 밀도를 변화시키는 방법은 보강재의 수직 간격을 변화시키는 방법과 뒷채움재의 다짐과 설치상의 여건을 고려한 경우에는 일정한 보강 간격을 유지하는 대신, 사용 보강재의 강도를 변화시키는 방법이 있다. 또한 보강재의 최상단열은 수직 보강간격의 1/2로 해야 한다고 규정되어 있다.

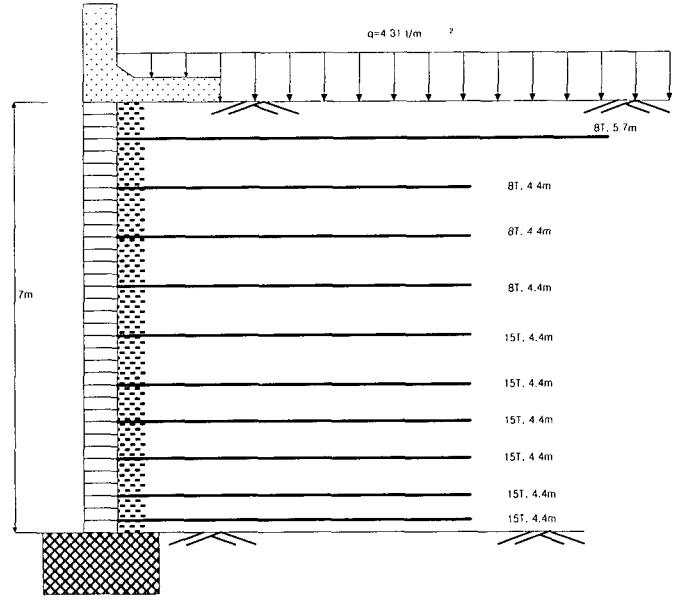


그림 3. 블록식 보강토옹벽 검토단면(H=7.0m)

따라서 현재 우리나라에서는 보강재의 배치와 간격에 대해서 규정하고 있지 않으나, 중요구조물인 고속도로 현장에서 사용하고자 할 경우에는 상기 규정을 고려한 지침반영이 필요하다.

2.2.3 보강토 옹벽이 시공되는 기초지반의 물성치

보강토 옹벽의 기초지반으로 사용되는 지반은 사질토, 화강풍화토 및 사력토 등의 지반으로 되어야 하며, 특별한 경우를 제외하고는 뒷채움재료로 점성토, 실트질토, 유기질토 등을 사용해서는 안되며, 전단파괴(식1)와 침하량 조건을 만족해야 한다.

$$q_{all} = \frac{q_u}{3} \geq (\text{사하중} + \text{활하중}) \tag{식(1)}$$

$$q_{all} = \frac{q_y}{2} \geq (\text{사하중} + \text{활하중})$$

위의 (식1)에서 구한 값 중 작은 값을 허용 지지력으로 채택한다.

2.2.4 보강토체에 사용되는 흙의 물성치

보강토 옹벽의 보강토체에 사용하는 흙은 모래나 사질토를 사용하는 것을 원칙으로 한다. 단, 큰 입경이 큰 암석재료가 다수 포함된 흙은 성토재료로 사용해서는 안된다. 보강토체에 사용하는 흙의 물성치는 직접 실내의 실험을 통하여 결정하는 것을 원칙으로 하나, 기존의 자료를 사용하는 경우에는 감독관의 승인을 받아 다음과 같은 물성치를 사용할 수 있다. 따라서 본 검토에서는 이들을 고려하여 해석단면의 물성 값을 선정하였다.

표 2. 사질토 지반의 대표적인 물성치

구분	N 치	단위체적중량 ($\gamma_t, t/m^3$)	내부마찰각 (°)	점착력
사질토	50이상	2.0	$\phi = \sqrt{(15N)} + 15 (N \geq 25) \text{ or}$ $\phi = 0.3N + 27$	무시 (c=0)
	40~50	1.9		
	30~40	1.8		
	20~30	1.8		

3. 검토구간의 해석

보강토 옹벽에 대한 검토는 내적 안정, 외적 안정, 전체안정성 및 지지력(침하) 검토를 실시한다. 기사문보고서 검토 및 현지조사 결과, 기초지반의 지지력은 충분하다고 판단되어 지지력에 대한 검토는 생략하였다. 또한 블록식 보강토공법의 경우 블록간 연결부를 핀 또는 앵커를 이용하고 있으므로 불가피하게 불연속적인 면을 형성하게 된다. 따라서 본 검토에서는 안정성에 미치는 영향이 큰 외적안정성, 전체안정성 및 보강토 옹벽의 변위에 대해서 검토한다.

3.1 보강토 옹벽의 내·외적 안정성 검토

블록식 보강토 옹벽 내적안정성을 고려하여 외적안정성 해석 결과 전도에 대한 안전율은 2.274, 슬라이딩에 대한 안전율은 3.219로 나타내고 있어 이에 대한 문제는 없을 것으로 판단된다.

3.2 보강토 옹벽의 전체 안정성 검토

보강토 옹벽의 전체 안정성 검토는 보강토옹벽과 지오그리드로 보강된 성토체를 일체로 하여 보강토 옹벽의 높이 7.0m, 10.0m 에 대해 원호활동에 대한 검토를 실시하였다. 옹벽을 포함한 보강토체 전체의 활동에 대한 검토는 사면안정 프로그램인 SLOPE/W를 이용하여 수행하였다. 해석에 이용한 기본적인 지반 물성치는 기사문보고서의 물성치를 참고하였으며, 방음벽체에 미치는 풍화중의 영향도 일부 고려하였다. 또한, 보강토 옹벽의 외적 안정성을 검토하기 위해서, 보강토체 내의 파괴를 피하기 위해, 보강토체 및 보강토 옹벽의 물성치를 높게 설정하여, 검토를 시행하였다. 보강토 옹벽의 활동에 대한 해석 단면을 그림 6에, 그리고, 해석결과를 그림 7, 8, 9에 나타내었다. 보강토 옹벽의 높이 7.0m인 경우, 활동에 대한 최소 안전율은 1.416으로 나타났고, 보강토 옹벽의 높이 10.0m인 경우의 활동에 대한 최소 안전율은 1.351로 나타나, 본 공사에서 발행한 “특수공종 시공 및 품질관리 지침서”에서 명기한 최소 안전율 1.3을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

표 3. 보강토 옹벽의 활동에 대한 주요 해석 물성치

구분	단위체적중량 ($\gamma_t, t/m^3$)	점착력 ($c, tf/m^2$)	내부마찰각 ($\phi, ^\circ$)	비고
원지반	1.9	0	30	
보강토체	1.9	100	35	
일반 성토체	1.9	1.5	30	
보강토 옹벽	2.3	100	45	
포장체	1.9	0	35	
방음벽기초	2.3	100	45	

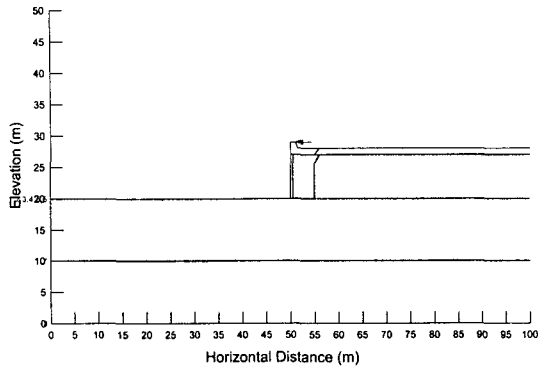


그림 4. 외적안정(활동)에 대한 해석단면도
(보강토 옹벽 높이 = 7.0m)

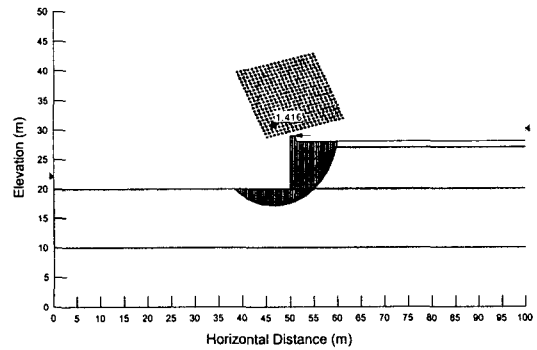


그림 5. 외적안정(활동)에 대한 해석 결과도(보강토 옹벽 높이 = 7.0m)

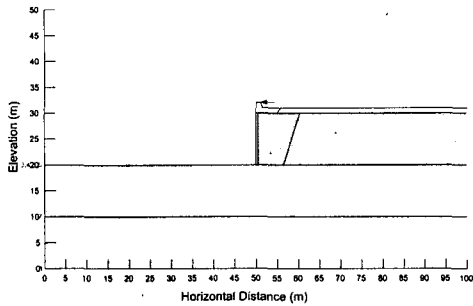


그림 6. 외적안정(활동)에 대한 해석 단면도(보강토 옹벽 높이 = 10.0m)

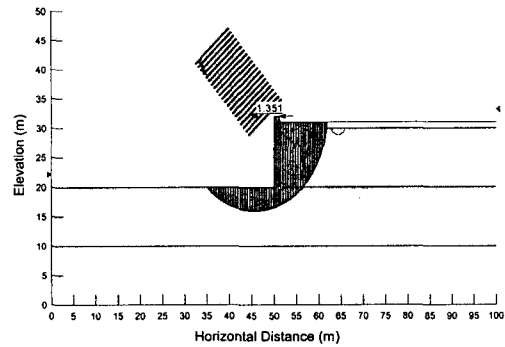


그림 7. 외적안정(활동)에 대한 해석 결과도(보강토 옹벽 높이 = 10.0m)

3.3 보강토 옹벽의 변위에 대한 검토

보강토 옹벽의 안정검토는 한계평형해석이기 때문에, 시공중이나 준공후의 보강토 옹벽의 발생변위에 대해서는 고려할 수 없다. 따라서, FEM 해석(PENTAGON)을 실시하여 시공중, 공사 완료후의 변위를 추정하였다. 본 검토의 해석단면은 보강토 시공높이 7.0m인 경우를 선정하였으며, 지오그리드 설치 단수를 기준으로 해석을 실시하였다. 지오그리드는 Truss 요소로 고려하였으며, 보강토 블록의 변위를 고려하기 위해 지오그리드가 연결되는 보강토 블록과 지오그리드가 연결되지 않고 조적만 되는 블록으로 구별하여 각각 물성치를 입력하였다. 다음의 표 4는 본 공사의 지침서에서 제안한 지반의 물성치이며, 유한요소 해석시 참고자료로 사용하였다(표 5).

표 4. 보강토 옹벽 해석에 사용한 지반 물성치

구분	위치	제안값	비고
접착력 (c, tf/m ²)	보강토체(성토체)	0.5	화강풍화토
	필터층	0.0	쇄석골재
	기초	실내시험으로 결정	
내부마찰각 (φ, °)	보강토체(성토체)	20	화강풍화토
	필터층	30	쇄석골재
	기초	35	잡석다짐
단위중량 (γ, t/m ³)	보강토체(성토체)	1.9	
	필터층	1.9	
	기초	2.2	

표 5. 유한요소해석을 위한 주요 재료물성치

재료 물성치	원지반	성토부	보강블럭 (1)	보강블럭 (2)	포장부	지오그리드		방음벽
						15t	8t	
E	-	--	2.1×10^9	2.1×10^9	2.1×10^9	50000	25000	2.1×10^9
단위체적중량	1.9	1.9	2.3	2.3	2.3	1.37	1.37	2.3
점착력	1.0	0.5	9.41	300	300	2.5	2.8	300
마찰각	35	20	47	47	47	15	16.5	47
압축강도	-	--	2,400	2,400	2,400	-	-	2,400
인장강도	0.2	0.1	300	300	300	12.649	7.552	300
면적						0.003	0.003	

유한요소 해석을 위한 단면을 그림 10에 표시하였다. 지오그리드는 10단을 설치하였으며, 방음벽까지 시공하는 순서까지 고려하였다. 다음의 그림 11은 지오그리드의 설치현황을 자세히 나타내기 위해 검토 단면을 확대한 그림이다. 지오그리드는 총 10단을 사용하였다.

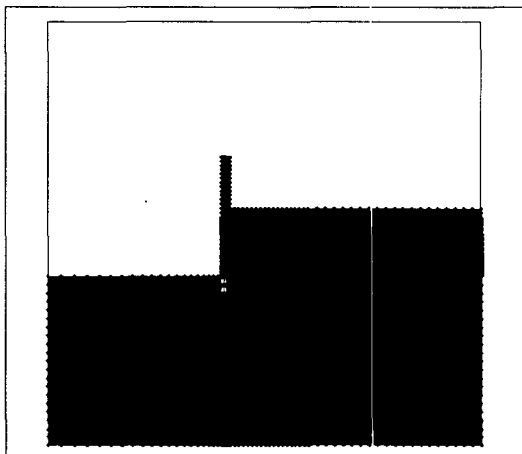


그림 8. 유한요소 해석을 위한 해석단면도

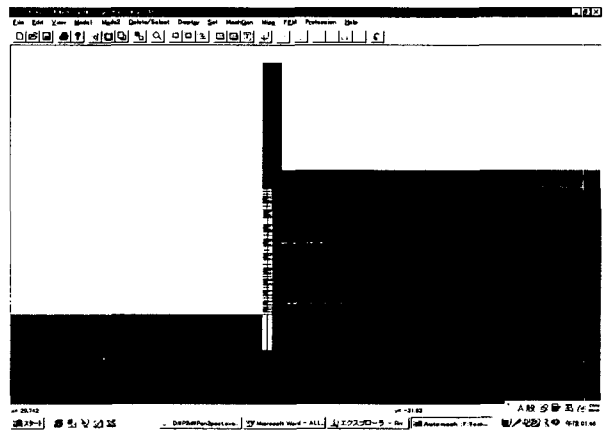


그림 9. 검토단면 확대(지오그리드 설치)

최하부 1단부터 9단까지의 지오그리드 길이는 4.5m, 최상단 10단 지오그리드의 길이는 6.0m로 설정하였다. 1단부터 7단까지의 지오그리드의 설치 인장력은 15ton/m이고, 8, 9, 10단의 지오그리드 설계 인장력은 8ton/m를 사용하였다. 1단과 2단사이의 보강재 설치간격은 400mm, 2단부터 5단사이의 보강재 설치간격은 600mm이고, 5단부터 10단사이의 보강재 설치간격은 800mm으로 하여 실제 시공조건에 최대한 근접시켰다. 그림 11에서 보는 바와 같이 지오그리드 보강재를 블록의 중심부까지 연장하여 블록식 보강토옹벽과 보강재가 인발에 함께 저항하도록 하였다.

3.4 보강토 옹벽의 변위에 대한 유한요소 해석결과

보강토 옹벽의 변위에 대한 해석결과를 그림 12, 13, 14, 15에 나타내었다.

그림 12는 지오그리드가 설치 완료된 후의 옹벽의 변위를 색상을 이용하여 표시한 것이며, 그림 13은 변위벡터를 이용한 표시한 것으로, 지오그리드의 설치가 완료된 후의 옹벽의 최대변위 발생지점은 옹벽의 중간부분에서 12.0cm 정도의 수평변위가 발생하였다. 그림 14, 15는 방음벽 및 포장이 완료된 후의 변위를 나타낸 것으로 그림 12, 13과 비교해 보면, 최대 변위 발생지점이 옹벽의 하단으로 이동한 것을 알 수 있다. 이들 그림 14, 15로부터 보강토 옹벽 하단 1/3지점 주위에서 최대 변위가 14cm 정도 발생하는 것을 알 수 있다.

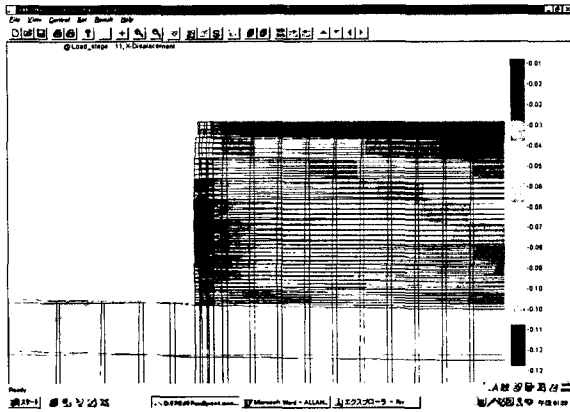


그림 10. 지오그리드 10단 설치 완료후 변위

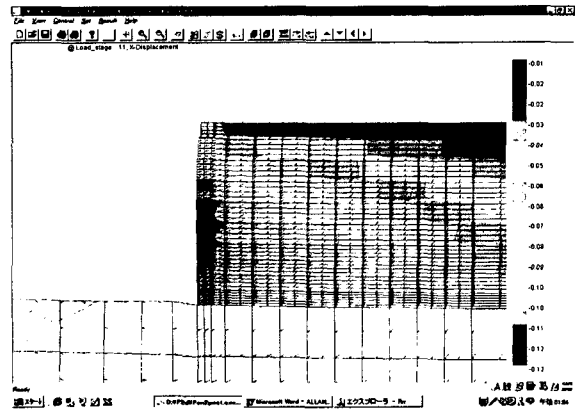


그림 11. 지오그리드 10단 설치완료후 변위(변위벡터)

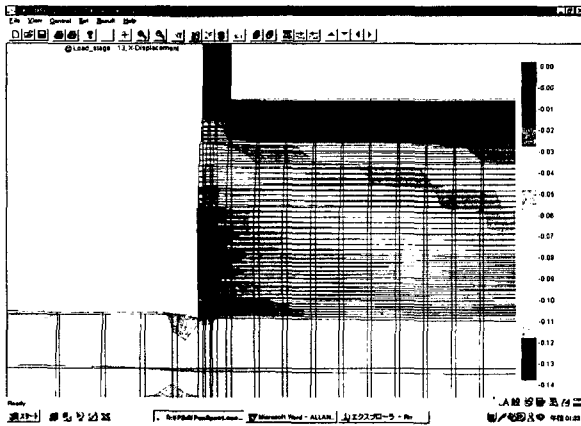


그림 12. 보강토 옹벽시공완료후 변위

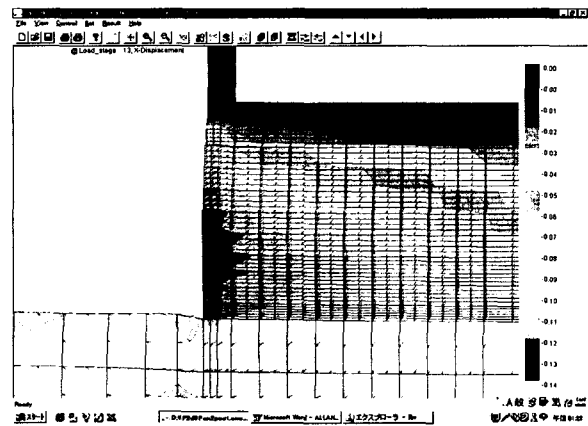


그림 13. 보강토 옹벽시공완료후 변위(변위벡터)

3.5 보강그리드에 작용하는 인장력에 대한 유한요소 해석결과

보강그리드에 대한 인장력에 대한 해석결과를 다음의 그림 14에 나타내었다. 시공완료된 후의 발생하는 블록식 보강토 옹벽의 변위에 대응하여 보강재의 인장력이 변하는 것을 알 수 있다. 또한 보강토옹벽의 상부에 매설된 보강재 8,9,10단에서는 하부 7단들보다 인장력이 매우 작게 작용하고, 7단에서 가장 큰 인장력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한, 7단 하부에 매설된 나머지 보강재에 작용하는 인장력은 감소하고 있으나 상부에 비해서는 매우 큰 인장력을 유지하고 있다. 이것으로 보강재에 작용하는 인장력은 상부 상재하중에 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 한편 블록과 토사가 접하는 부분의 보강재에 가해지는 인장력이 매우 크게 나타났으며, 하부 1,2,3,4단의 경우에는 보강재의 중간에 인장력이 증가하는 추세를 보이고 있는 반면에 나머지 6단들의 경우에는 보강토 옹벽의 전면에 큰 인장력이 작용하고, 보강토 옹벽의 후면으로 갈수록 인장력이 줄어드는 추세를 보이고 있다.

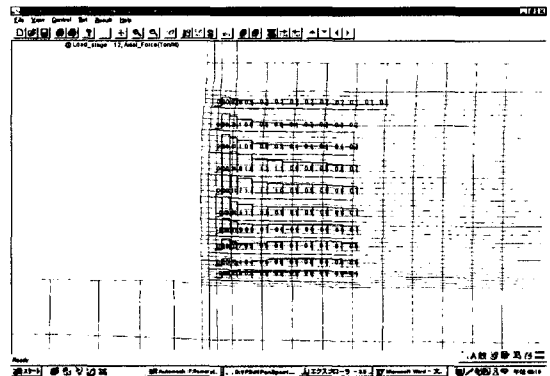


그림 14. 보강토 옹벽시공완료후 보강재에 작용하는 인장력

4. 검토결론

현장적용을 목적으로 설계한 블록식 보강토 옹벽의 안정성에 대하여 전도와 보강토체의 활동과 보강토 옹벽의 전체적인 사면안정성과 보강토 옹벽의 변위에 대한 검토결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 보강토공법은 간편한 시공성, 경제성, 미관 및 내진성 등의 장점을 가지고 있어 우리나라에서도 여러 종류의 보강토 공법들이 점차 확대되는 추세에 있다. 그러나, 보강토공법에 대한 품질관리기준이 아직 정립되지 않은 실정으로 설계 및 시공시에 불확실성이 비교적 많이 존재하고 있다. 따라서, 이들 보강토 공법은 공법의 다양성과 대상구조물에 대한 요구 안정성이 다르므로 고속도로 건설현장에 사용되는 지침의 확보가 필요하다는 인식아래 현재 기존 건설경험과 외국의 사례를 참조하여 작성 중에 있다.
2. 사례로서 기 설계된 보강토 옹벽의 외적 안정성 검토결과, 전도와 슬라이딩에 대한 안전율은 본 공사에서 제시한 최소 안전율을 만족하는 것으로 나타났다. 전체 사면 안정성도 최소 안전율을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나, 실제적으로 보강그리드와 성토의 역학적 특성이 보강성토체의 안정성에 큰 영향을 미치므로 설계 및 해석의 기본 가정을 만족하고 시공 및 장기 안정성을 확보하기 위해서는 다음사항에 대한 시공관리가 필요하다.
 - 최근의 외국사례를 보면 지진이나 유지관리시의 파괴 메카니즘으로부터 각 블록들이 주 부재(CM:Critical Member)가 됨을 알 수 있다. 따라서 중요구조물에서의 적용을 위해서는 이에대한 반영이 필요하다고 판단된다.
 - 사용된 보강 그리드 품질과 다짐시공에 세심한 주의와 보강토 배면에 배수층의 확실시공이 요구된다.
 - FHWA의 규정에 의한 최대 수직 보강 간격은 블록 깊이의 2배로 제한하고 있으므로, 이를 적용하는 경우에는 사용하고 있는 블록의 깊이는 305mm 이므로, 최대 수직 보강 간격은 610mm→600mm가 되어야 한다.
 - 보강성토체의 안정성에 크게 영향을 미치는 성토구간의 적절한 다짐관리를 위해서는 성토재의 최대 입경에 대한 주의가 특히 중요하며, 블록의 채움공의 경우는 블록내부의 인터로킹 효과를 고려하므로 충분히 다져 채우도록 한다. 이 경우 블록의 균열손상이 유발될 수 있으므로 이에 대한 주의가 요망된다.
3. 수치해석결과, 보강토 옹벽 시공시 발생하는 벽체의 변위는 12cm 로 나타났으며, 이때 최대 변위 발생위치는 벽체의 중앙부이다. 또한, 보강토 옹벽과 방음벽 시공완료후의 벽체의 변위는 최대 14cm까지 발생하고, 최대 변위 발생위치는 벽체 하단 1/3의 위치에서 나타났다. 즉, 시공이 진행함에 따라 최대변위 발생위치가 하향하는 것을 알 수 있다. 따라서, 시공중에 이에 대한 고려로써 최종성토 블록식 보강토 옹벽면의 조정을 통해 배부름 현상에 의한 파괴를 고려하는 것이 바람직하다.

5. 참고문헌

1. 盧翰成(1999), “粘性土の補強工法に關する基礎的研究”, 博士論文, 東京大學.
2. 조삼덕(2001), “국내 블록식 보강토옹벽의 개선방향 및 전망”, 한국토목섬유학회 창립기념 학술발표회, 한국토목섬유학회, pp43~53.
3. 한국도로공사(1998), 고속도로공사 전문시방서(토목편).
4. 한국도로공사(1997), 특수공종 시공 및 품질관리 지침서.
5. Kanazawa.Y, Ikeda.K, Murata.C, Tateyama.M and Tatsuoka.F(1994), “Geosynthetic -reinforced soil retaining walls for reconstructing railway embankment at Amagasaki”, Recent case histories of permanent geosynthetic-reinforced soil retaining walls, Tatsuoka and Leschinsky(eds), Balkema, pp233-242.
6. FHWA(1996), Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slope Design and Construction Guidelines.
7. L.Palossy, P.Scharle and I.Szalatkay(1993), Earth Walls, Ellis Horwood.