

# Crib Wall System 변위해석에 관한 연구

## A Study on the Displacement of Crib Wall System

김 두 준\* 이 송\*\*

Kim, Doo-Jun Lee, Song

### Abstract

Crib wall system is one of segmental crib type wall. Crib walls are constructed from separate members with no bonds between them other than frictional. The wall units are divide into two main types termed headers and stretchers. The headers run from the front to the back of the wall, perpendicular to the wall face. The cells are created by forming a grid by stacking individual wall components known as headers and stretchers. The body of wall consists of a system of open cell which are filled with a granular material. The design of crib retaining wall is usually based on conventional design methods derived from Rankine and Coulomb theory so that is able to resist the thrust of soil behind it, because it may be assumed that the wall acts as a rigid body. However, deformation characteristics of crib walls cannot be assumed as monolithic. They consist of individual members which have been stacked to creat a three dimensional grid. Therefore, the segmental grid allows relative movement between the individual member within the wall. The three dimensional flexible grid leads to stress distribution by interaction behavior between soil and crib wall. Therefore, in this study, in order to analysis the trends of deflection of crib wall system, new numerical models based on the results of Brandl's full scale test are introduced for design concept.

### 요 지

Crib wall system은 일반적으로 segmental crib type의 옹벽형식으로 stretcher라는 전·후면 가로보와 세로 방향으로 header라는 버팀보를 연속적으로 쌓아 올리는 공법이다. 이때, stretcher와 header로 구성된 골격 내부에는 흙으로 속채움을 하여 다져, 본 구조체가 일체거동이 가능한 강성체(rigid body)를 형성 시킴으로써 배면의 토압에 대하여 저항하는 구조물이다. 따라서, 안정성 해석은 일반적으로 기존의 철근콘크리트 옹벽과 같이 전체 옹벽이 하나의 강성체로 작용한다고 가정하여 토압이론에 의하여 평가하고 있다. 그러나, 변형문제에 있어서 본 구조물은 단순히 하나의 구조체로 가정하여 해석하기가 곤란하다. 왜냐하면, stretcher와 header는 일반 보강토옹벽의 전면 벽체 부재와는 달리 뒷채움재 내에 어떠한 인장 보강재도 삽입되지 않기 때문에 독립된 변위거동을 나타낸다. 또한, 각각의 독립부재로 구성된 재료와 내부채움재의 힘과 변형은 3차원적으로 거동하며 수평토압에 의하여 복합적인 상호거동을 일으키기 때문이다. 따라서, 본 연구는 Crib wall system의 변위경향을 보다 엄밀하게 해석하기 위하여 Brandl(1985)의 full scale 시험 결과를 바탕으로 수치해석 모델을 제시하였다.

**keywords** : Cib wall system, Stretcher, Header, Interface elements, Displacement, Numerical analysis

\* 정희원, 인덕대학 건설정보시스템과 교수

\*\* 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 교수

E-mail : doojun@mail.induk.ac.kr 011-665-2466

• 본 논문에 대한 토의를 2002년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2003년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

Crib wall system은 일반적으로 segmental concrete Crib type의 옹벽형식으로 stretcher라는 전·후면 가로보와 세로 방향으로 header라는 버팀보를 연속적으로 쌓아 올리는 공법이다.(1999) 이때, stretcher와 header로 구성된 골격 내부에는 흙으로 속채움을 하여 다져, 본 구조체가 일체거동이 가능한 강성체를 형성시킴으로써 배면 뒷채움재로 인한 수평 토압에 대하여 저항하는 구조물이다. 그러므로, Crib wall system은 일반적으로 기존의 철근콘크리트 옹벽과 같이 전체 옹벽이 하나의 강성체로 작용한다고 가정하여 Rankine이나 Coulomb토압에 의하여 그 안정성을 평가하고 있다.(Hunt, 1986, Terzaghi, 1943)그러나, 변형문제에 있어서 본 구조물은 단순히 하나의 구조체로 가정하여 해석하기가 곤란하다. 왜냐하면, stretcher와 header는 일반 보강토 옹벽의 전면 벽체 부재와는 달리 뒷채움재 내에 어떠한 인장 보강재도 삽입되지 않기 때문에 독립된 변위거동을 나타낸다. 또한, 각각의 독립부재로 구성된 재료와 내부채움재의 힘과 변형은 3차원적으로 거동하며 수평토압에 의하여 복합적인 상호거동을 일으키기 때문이다.

따라서, 본 연구는 Crib wall system의 변위해석을 보다 엄밀하게 해석하기 위하여 Brandl(1985)의 현장 모형 시험결과를 바탕으로 수치해석 모델을 제시하고 향후의 현장계측결과로부터 그 적합성을 연구하는데 목적이 있다.

## 2. Crib wall system 구조

Crib wall은 전·후면에 가로보와 버팀보 부재가 접착력이 없이 독립적으로 단순히 마찰에 의해서만 지지된다. header는 Fig. 1과 같이 옹벽 전면에서 후면으로 놓여지며 옹벽면에 직각방향으로 설치된다. stretcher는 토압을 지지하기 위하여 옹벽의 전면과 후면에 각각 놓여지며 옹벽면 방향으로 설치된다.

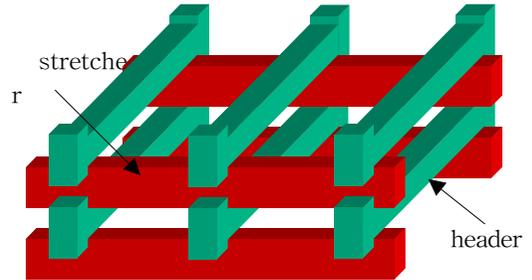


Fig. 1 Crib wall system의 기본 구조

## 3. Crib wall system 설계

### 3.1 토압

Coulomb 혹은 Rankine의 해석법에 따라 벽체에 작용하는 토압을 산정할 수 있으나 Brandl(1985)의 현장모형시험에 따르면 Coulomb토압이 실제 거동에 근접한 것으로 판명되었다. Rankine 방법은 벽체와 뒷채움재 사이의 마찰각을 무시하고 있어 토압이 대부분의 경우 적게 판단되어졌다. 반면에, Coulomb의 해석방법은 실제 거동에 좀더 가깝게 접근하며 이후의 시험결과에서도 그 경향이 확인되었다.(Bullen, 1992)

일체형 옹벽이론으로 concrete crib 형태의 구조물에 작용하는 토압과 그 안정성을 평가할 수 있다. 그러나 Brandl에 의하면 Crib wall에 작용하는 토압은 Coulomb 토압에 의해 예측된 것보다 더 작게 나타나 안정한 것으로 계측되었다.

### 3.2 벽체에서의 인장거동

벽체에 작용하는 모든 힘에 대한 합력이 벽체 기초 폭의 중앙 1/3지점에 작용한다면, 벽체의 배면에 작용하는 인장력이 하부로 갈수록 증가하는 현상을 간단한 정역학적 이론과 휨이론에 의해 증명할 수 있다. 더욱이, Crib wall의 각 부재들은 서로 물리적으로 결속되지 않았기 때문에 벽체는 인장저항력이 없으므로 서로 분리·이탈되어질 가능성이 있다. 그러나, 시험결과 현저하게 분리된 Crib wall은 각 후면 stretcher

에서 생성되는 주동압력에 의해 충분히 지지될 수 있는 것으로 나타났다.

### 3.3 설계기준

Crib wall은 일반적으로 일체형 옹벽이론을 사용하여 설계한다. 이에 따라, 옹벽의 파괴는 전도, 활동, 기초지반 지지력, 배면의 원호활동 파괴 중의 하나이며, 또한, Crib wall의 구조적 특성상 벽체의 전단변형, 인장파괴, 각 부재의 과부하에 의한 국부파괴와 같은 서로 다른 두개의 메카니즘에 의한 파괴도 고려되어야 한다.

### 3.4 파괴 형상

Brandl의 시험결과에 따르면 Crib wall의 전도는 일반적으로 단일벽체와 같은 거동을 따르지 않았다. Fig. 2와 같이 벽체의 각 층은 그 아래층 보다 위 층이 벽체 전면방향으로 보다 더 미끄러지며 변형된다.

벽체 시공 후 뒷채움하는 경우, 변형의 크기는 벽체 시공 중 뒷채움하는 경우보다 현저하게 크게 나타났다. 또한, 계측된 최대 변형량은 뒤채움재의 주동상태에서 예측되는 값보다 다소 크게 나타났다. 따라서, Brandl은 배면하중의 크기를 Coulomb 토압으로 해석하는 것이 타당함을 입증하였다.

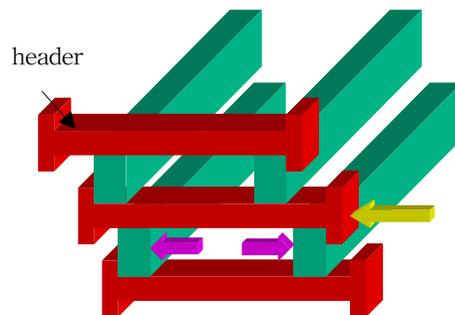
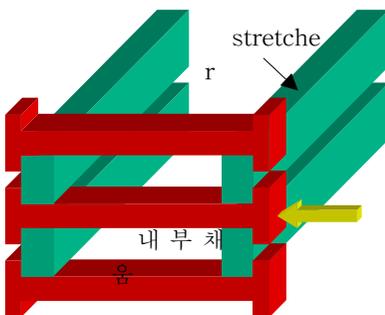


Fig. 2 Crib wall의 파괴 형태

### 3.5 응력 분포

Crib wall은 연성벽체 거동을 나타내므로 벽체를 따라 뚜렷한 응력재분배가 일어난다. 즉, 벽체의 응력 분포는 변형이 발달됨에 따라 초기에 최대응력이 작용하는 영역은 감소하고 최소응력이 작용하는 영역은 증가한다. Fig. 3에서와 같이 벽체 전면에서의 압축응력,  $\sigma_1$ 은 일체형 벽체에서 예측되는 압축응력 보다 점진적으로 증가하며 벽체 배면에서의 압축응력,  $\sigma_2$ 는 예측되는 값 보다 인장응력으로 감소한다.

이러한 사실은 Crib wall이 중력식 옹벽에 비하여 더 큰 상재하중이나 더 큰 벽체 높이, 즉 보다 큰 수평토압에 이르러서야 전도가 발생함을 의미한다. 따라서, 전도에 대한 안전율은 기존의 중력식 옹벽보다 큰 값을 가질 수 있다.

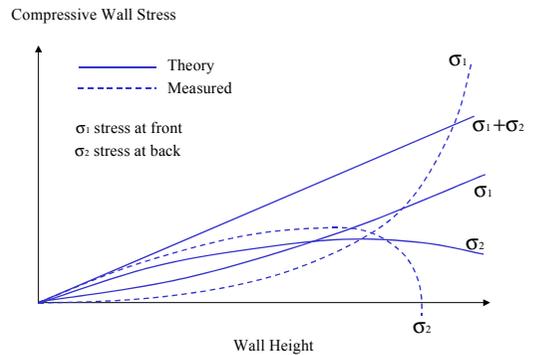


Fig. 3 Crib wall의 높이에 따른 응력 분포

Brandl의 시험에 의하면, 일체형 옹벽이론에 의한 전도안전율이 0.3에서 0.7사이의 벽체도 어떠한 붕괴 조짐이 없는 것으로 관찰된 바 있다.(Bullen, 1992)

### 3.6 축소 모형 시험

Crib wall의 파괴모형을 명확히 이해하기 위하여 Brandl은 실내 모형시험을 수행하였다. 이 모형은 약 1:5의 비율로 높이 0.625m 길이 1.4m의 축소모형으로 header 길이는 140mm, stretcher는 400mm, 마감재 300mm로 구성되었다. 축소 모형의 개념도는 Fig. 4와 같다. 앞서 언급한 본 옹벽의 변형거동에 따라 그 양상을 그림으로 도시하면 Fig. 5와 같다. 즉, 배면에 토압이 작용할 때 stretcher와 header는 서로 종속적으로 움직일 것이며, 이때 stretcher사이의 내부채움재는 압축변형과 동시에 header의 중심축(접선면)을 따르는 A-A'면에 전단변형을 수반하게 된다. 즉,  $\delta_b$ 는 A-A'면의 전단변형과 내부채움재의 압축변형으로 인한 변위량이다.

### 4. 현장 모형 시험

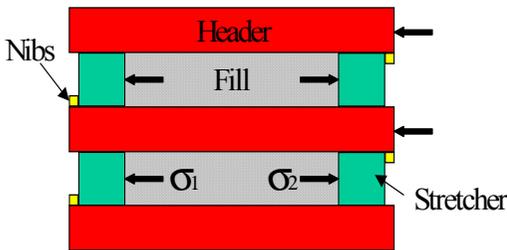


Fig. 4 Crib wall의 축소 모형

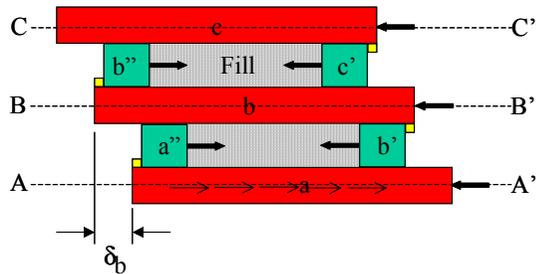
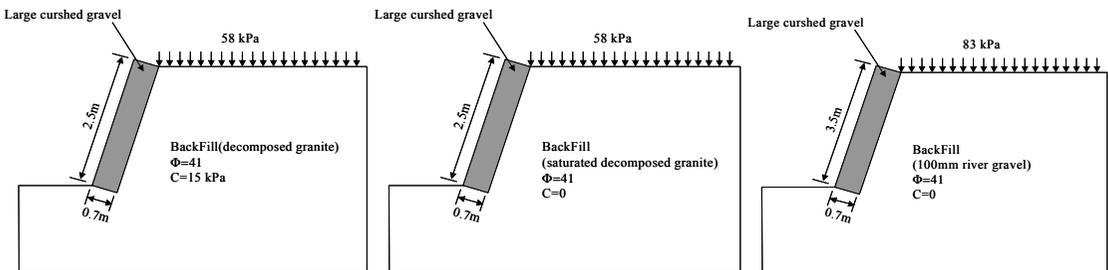


Fig. 5 Crib wall 축소모형의 변형



(a) H=2.5m, 풍화토 뒷채움

(b) H=2.5m, 뒷채움토 완전포화

(c) H=3.5m, 강자갈 뒷채움

Fig. 6 시험 옹벽의 case study 예

Brandl은 현장모형시험을 실시하여 Crib 옹벽의 거동에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구는 당시 수행된 시험 규모를 수치해석 모델로 재현하여 실제 거동과 이론적 거동 사이의 상관 관계를 규명하고 보다 개선된 수치모델을 개발하고자 한다.

첫 번째 시험은 Fig. 6-(a)와 같이 높이 2.5m, 연장 8.0m Crib wall로 시험되었다. 속채움은 깎자갈로 채워졌으며 뒷채움은 화강토풍화토로 시공되었다. 본 시험은 상재하중을 58 kPa로 재하시켜 벽체변위 계측결과 최대 변위량은 3mm로 측정되었다.

두 번째 모형은 Fig. 6-(b)와 같이 첫 번째 모형과 동일하며, 불포화된 사질토에서 나타나는 걸보기 점착력이 사라지도록 뒤채움흙을 완전포화시켜  $c=0$  조건으로 시험하였다. 상재하중 또한 58 kPa로 재하였으며 벽체 변위 계측결과 최대 변위량이 3mm~5mm 정도로 나타났다.

세 번째 모형은 Fig. 6-(c)와 같이 옹벽 높이가 3.5m이며 화강토 대신에 10mm 강자갈로 뒷채움을 실시하였다. 본 재료의 내부마찰각은  $41^\circ$ 이었고, 현장 여건상 가할 수 있는 최대 하중인 83 kPa까지 재하하였으며 벽체 최대변위는 100mm까지 도달하였다.

## 5. 변위 해석

### 5.1 FDM에 의한 수치해석

Crib wall system의 배면토압에 따른 변위 거동을 확인하기 위해 유한차분법을 이용한 해석 프로그램을 사용하였다. 유한차분 해석은 Newton의 운동법칙과 재료의 구성법칙으로부터 가속도에서 속도를 구하고 속도로부터 변형을 구하는 해석 방법이다. 즉, 유한차분법은 모든 주요 공식의 유도함수를 해석영역 내의 선별된 점들에서의 필드변수(응력 또는 변위 등)의 연산식으로 직접 바꾸어 주어진 조건을 해석하게 된다.

유한차분 해석은 FLAC 2D(Fast Lagrangian Analysis of Continua) 프로그램을 사용하여 해석하였으며, Crib wall system에서 stretcher, header 및 내부에 채워지는 토사는 하나의 집합체처럼 거동하므로 유한차분 해석시, 각각의 stretcher, header 및 내부토사 사이를 접촉요소로 모델링하여 Crib wall system의 개별적인 거동을 해석하였다. (Itasca, 1997) 여기서, 접촉요소(interface element)는 Fig. 7과 같이 해석시 불연속면의 성질을 나타내는 접촉 수직강성률과 접촉 전단강성률에 의해 토압에 저항하는

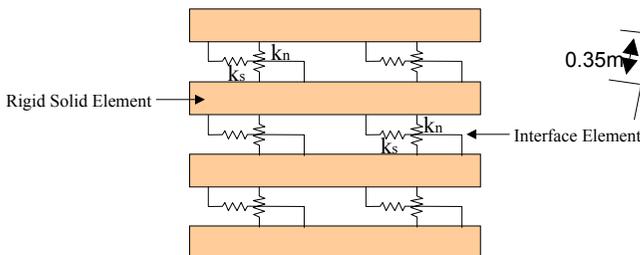


Fig. 7 Crib wall system 해석을 위한 접촉요소(interface element) 모델링

것으로 해석된다. (Tohda, 1991)

### 5.2 매쉬(mesh) 형성과 요소 물성치

Stretcher, header 및 내부채움재는 하나의 집합체로 거동하기 때문에 유한차분 해석에서는 이를 암반으로 간주하였으며 접촉요소를 통해 암반 사이를 분리하여 해석시 입력되는 interface의 물성치인 수직강성률과 전단강성률에 의해 거동하도록 하였다.

Fig. 8과 같이 Crib wall의 설치 각도는 시공시 일반적으로 적용되고 있는  $78.6^\circ$ 로 보았다. 또한, 접촉요소 사이의 거리는 0.25m와 0.35m로 하였으며 접촉요소의 길이는 0.7m로 모델링하였다.

또한, 해석모델은 Crib wall system의 경우 탄성모델(elastic model)로, 배면토사의 경우에는 Mohr-Coulomb 모델로 모델링하였다. Crib wall system의 역학적 거동을 모델링하기 위해 입력한 배면토사, 접촉요소 및 접촉요소로 둘러싸인 내부채움재의 물성치는 Table 1, 2와 같다. <NAVFAC, 1982, Sinha, 1991, TDOT, 2001)

### 5.3 수치해석 모델

적용된 격자망 크기는  $50 \times 50$ 이며 mesh의 형태는 Fig. 9와 같다. 또한, Fig. 10과 같이 Crib wall은 탄성 모델로, 뒷채움 및 기초지반은 Mohr-Coulomb 모델로 crib 블럭과 블럭, 블럭과 뒷채움, 블럭과 기초지반은 접촉요소로 구성하였다.

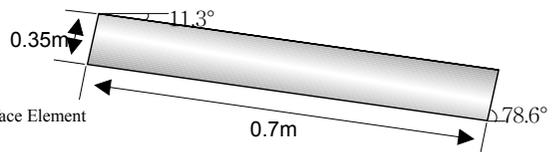


Fig. 8 Crib wall 모델링을 위한 블럭(block)

Table 1 실험 1의 지반 물성치

구 분		단위중량 ( $\gamma$ , t/m <sup>3</sup> )	탄성계수 (K, N/m <sup>2</sup> )	포아슨비	내부마찰각 (°)	점착력 (C, N/m <sup>2</sup> )
배면토사	모형 1	1.9	$9 \times 10^7$	0.3	41	15000
	모형 2	2.0	$9 \times 10^7$	0.3	41	0
	모형 3	1.9	$9 \times 10^7$	0.3	41	0
내부채움재	모형 1	2.5	$2.6 \times 10^{10}$	0.3	-	-
	모형 2	2.5	$2.6 \times 10^{10}$	0.3	-	-
	모형 3	2.5	$2.6 \times 10^{10}$	0.3	-	-

Table 2 Interface 물성치(실험 1, 2, 3 모두 동일)

구 분	수직 강성률 (normal stiffness) (Kn, N/m <sup>2</sup> )	전단 강성률 (shear stiffness) (Ks, N/m <sup>2</sup> )	내부마찰각 (°)	점착력 (C, N/m <sup>2</sup> )
inter-block	$1 \times 10^9$	$1 \times 10^7$	41	0
Rear wall	$1 \times 10^9$	$1 \times 10^9$	41	0
Base	$1 \times 10^9$	$1 \times 10^9$	41	0

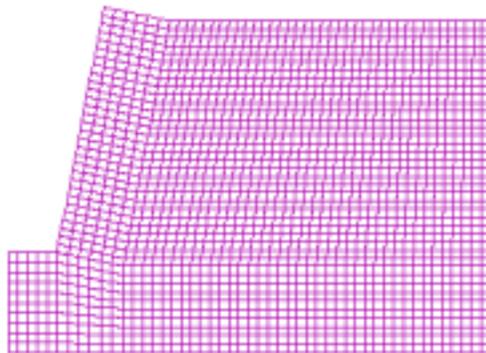


Fig. 9 실험 옹벽의 mesh

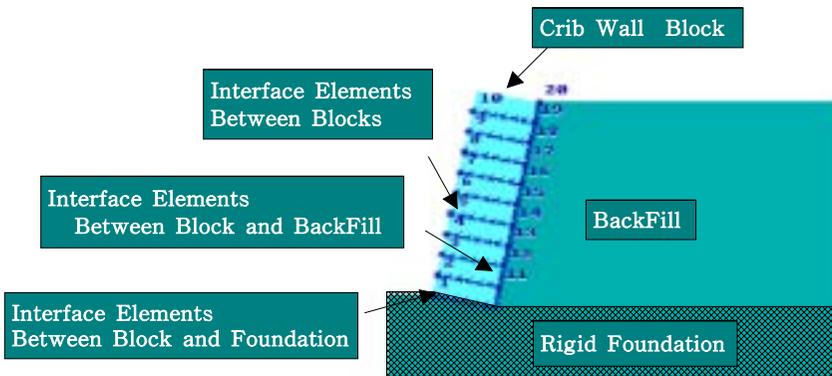


Fig. 10 실험 옹벽의 구성 model

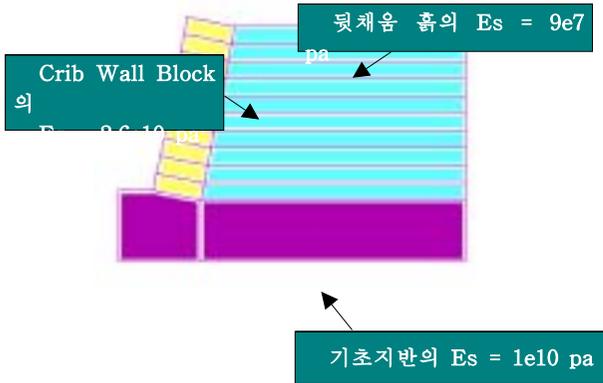


Fig. 11 영역별 변형 계수

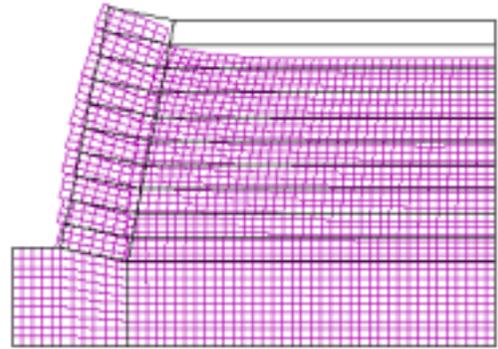


Fig. 12 실험 1 옹벽의 요소망(mesh) 변형도

## 5.6 해석결과

Crib wall system에 대한 수치해석 결과는 Fig. 12~Fig. 18과 같으며 변위 거동은 축소 모형시 및 현장 모형시험 결과와 유사한 경향을 나타내었다. 각 옹벽별 해석결과는 다음과 같다.

실험 1은 벽체 축조와 뒷채움 성토를 동시에 시공한 조건으로 해석한 결과 지반 거동 및 벽체 변위는 Fig. 12, Fig. 13, Fig. 18과 같이 현장 모형시험에서 계측된 거동과 유사한 경향을 나타내었다.

그러나, 벽체 최대 수평변위량은 0.48mm로 실제 거동과는 큰 차이를 보여 주었다. 그 원인은 실제 구조계와 단순화된 수치모델과의 차이 뿐만 아니라, 벽체 거동의 주요 인자로 작용하는 경계면 특성치의 가정으

로 인한 오차로 판단된다.

반면에, 벽체 수평변위 곡선은 실제 모형시험에서 구해진 곡선 경향과 같이 벽체 중앙부에서 최대로 나타났다. 이러한 사실로부터 본 해석에 적용된 수치 모형은 적법한 것으로 판단된다. 따라서, Fig. 7에서 제시한 접촉강성률의 정확한 값을 얻기 위하여 실내시험 및 파라미터 스터디를 수행하여 모델의 정밀도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

실험모형 2는 실험모형 1 옹벽에 대하여  $c=0$  조건하의 시험으로 해석 결과 Fig. 14와 같이 뒷채움의 소성파괴가 나타났으며 벽체 최대 변위량은 1.37mm로 해석되었다. 그러나 실제 현장시험은 3.0~5.0mm의 벽체 최대 수평변위가 관측되어 test-1과 비교해 볼 때 큰 변화가 없는 것으로 나타났다.

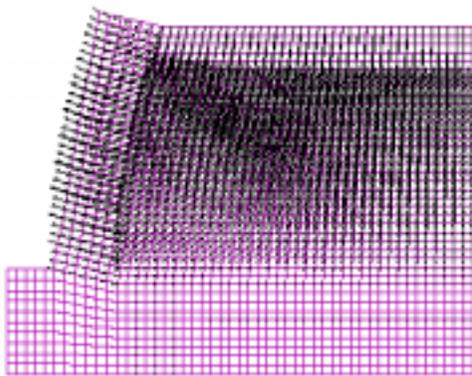


Fig. 13 실험 1 옹벽의 변위 벡터 분포도

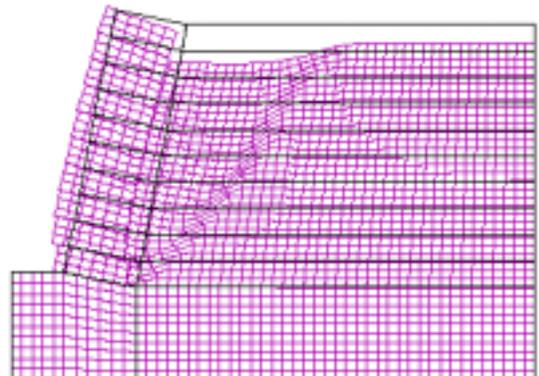


Fig. 14 실험 2 옹벽의 mesh 변형도

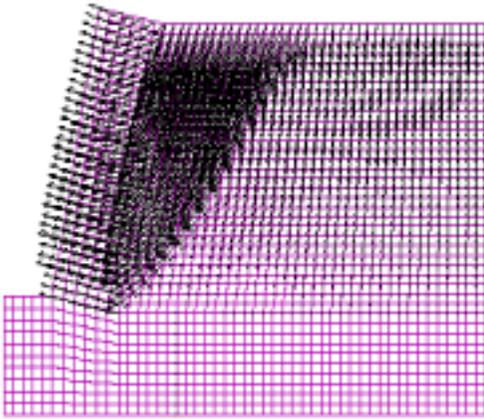


Fig. 5 실험 2 응벽의 변위 vector 분포도

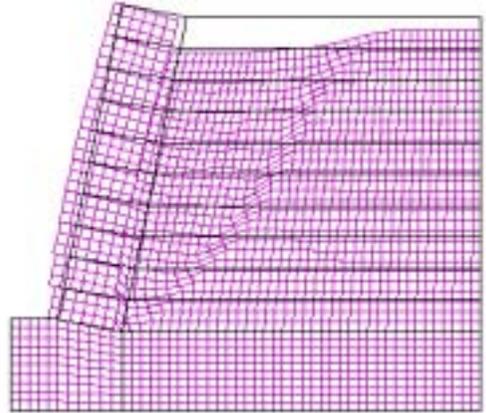


Fig. 16 실험 3 응벽의 mesh 변형도

이 원인 또한 실험 1의 경우와 마찬가지로 수치 모델의 지나친 단순화와 접촉 강성률의 부정확성에 기인한 것으로 사료되며 다양한 계측사례를 통하여 수치모델의 보다 정밀한 개선이 필요한 것으로 판단된다.

반면에, Fig. 18의 벽체 변위곡선은 test-1과 달리 파괴시 벽체 최대변위가 중앙부에서 벽체 하단으로 발달되며 실제 파괴사례와 일치한다는 것을 알 수 있다. 실험모형 3의 경우는 실험모형 2 응벽과 같이 뒷채움 흙의 소성파괴로 나타났으며 벽체 최대 수평변위량이 3.36mm로 해석되었다.

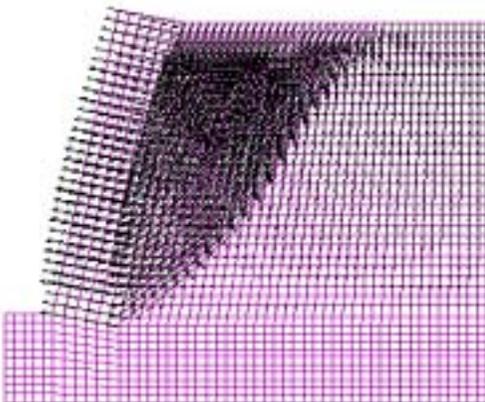


Fig. 17 실험 3 응벽의 변위 vector 분포도

### 실험1,2,3 응벽 벽체 수평변위도

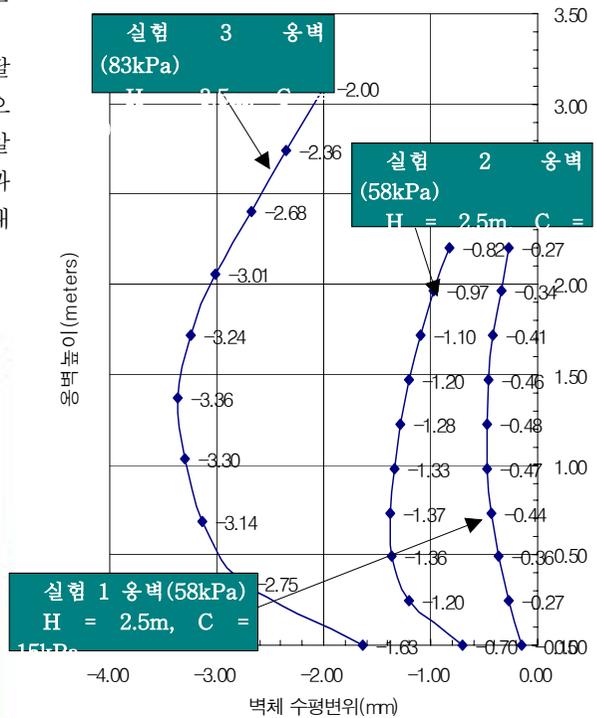


Fig. 18 실험 응벽별 벽체 수평변위 변위도

## 6. 결 론

앞 절에서 제시된 수치 모델에 따라 해석한 결과, Crib wall 및 배면 지반 거동은 현장 모형시험과 유사한 경향을 나타내었다. 그러나 정량적 거동은 실제와 큰 차이를 나타내었다. 그 원인은 Crib wall system의 복잡한 구조계의 단순화와 그 단순화를 극복하기 위한 접촉요소의 특성치에 대한 부정확성에 기인한 것으로 판단된다. 반면에 Fig. 18에 나타낸 바와 같이 뒷채움 흙의 소성 파괴전 벽체거동과 파괴후 거동은 실제 관측된 결과와 정성적으로 동일함을 알 수 있다. 따라서, 다양한 계측결과를 바탕으로 파라미터 스터디를 통하여 보다 정밀한 수치모델의 개선이 가능할 것으로 판단된다.

또한, 개별요소 해석으로 Crib wall system을 모델링하는 경우, 개개의 stretcher, header 및 내부에 채워지는 토사는 하나의 집합체처럼 거동한다고 보고 해석시 블록으로 간주하여 해석할 수 있다. 각각의 블록은 접촉요소로 연결되어 있으며 접촉요소에서 정의되는 수직강성률과 전단강성률에 의해 거동하게 된다. Crib wall system에서는 수직강성률과 전단강성률로 표현되는 수직변형과 전단변형이외에도 Nibs와 토압에 의한 내부채움재의 압축변형이 발생한다. 그러나 개별요소 해석시 내부채움재의 수직변형과 전단변형은 고려할 수 있으나 압축변형은 고려할 수 없다.

따라서, 향후 현장 대규모 계측결과를 수행하여 변형에 따른 압축특성 및 전단 특성치를 정밀하게 규명하고, 내부채움재의 횡방향 압축변형을 고려하기 위해서는 stretcher, header 및 내부채움재를 나타내는 개개의 블록을 강제블럭이 아닌 변형이 가능한 블록으로 모델링할 필요가 있으며 변형이 가능한 블록의 내부는 유한차분법이나 유한요소법을 이용하여 연속체 요소로 분할하여 해석할 필요가 있다.

## 참고문헌

1. AASHTO(1999), Standard Specifications for Construction of Roads and Bridges on Federal Highway Project, US Department of Transportation.
2. Bullen, F., Boyce, B., Fidler, C.(1992), The Design and Performance of Segmental Concrete Crib Retaining Wall, Physical Infrastructure Centre, Research Report 92-9,
3. Hunt, R. E.(1986), Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation, McGraw-Hill, pp. 542~544.
4. ITASCA(1997), FLAC Manual, Itasca Consulting Group, Minnesota
5. ITASCA(2000), UDEC Manual, Itasca Consulting Group, Inc.
6. NAVFAC(1982), Soil Mechanics Design Manual, NAVFAC.
7. Sinha, RS(1991), Underground Structures - Design and Construction, Elsevier, 1991.
8. Tohda, J., Mitsutake, Y. & Nara, T., Ito, S.,(1998). Mechanical Behavior of Crib Retaining wall, Proc. Int. Conf. Centrifuge 98, Tokyo, Vol. 1, pp.679-684
9. TDO(2001), Earth Retaining Structures Manual, Tennessee Department Of Transportation
10. Terzaghi, K.(1943), Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York, pp. 100~120.

(접수일자 : 2001년 10월 31일)