

堤體의 斜面安定 解析(I)

The Analysis of the Slope Stability in Embankment (I)

최 기 봉*

Gi-Bong Choi

(1997년 10월 21일 접수, 1997년 12월 12일 채택)

ABSTRACT

The stability of an embankment impounding a water reservoir is highly depend upon the location of seepage line with the embankment. To evaluate the accurate safety factor of an embankment, it is important to illustrate the seepage phenomenon.

Of particular interest is the stability following a rapid change (drawdown) of reservoir level. Seepage forces in embankments are easily determined if frictional forces are expressed in relation to hydraulic gradient I . If a piezometer is inserted into a body of embankment, the level to which free water rises is a measure of the energy at that point.

From model test result, it is possible to calculate safety factors of earth embankment. To assure the validity of this research, tests were conducted with numerical experimental models. And the experiment models were constructed with slopes of 1:1.0, 1:1.5, 1:2.0, 1:2.5. Analysis of experimental results, seepage force was analyzed according to downstream time, internal friction angle and cohesion, respectively.

1. 서론

1.1 연구 목적

제방은 긴 구간에 걸쳐 연속된 구조물로 다량의 흙을 필요로 하기 때문에 제방 축조시 구

하기 쉬운 인근 주변의 흙이 이용되므로써 반드시 적절한 토질재료가 이용된 것은 아니다. 따라서 제체구조물의 임의 구간은 불연속성을 가지고 있고 제방의 안정성에는 장소에 따라 상당히 큰 차이가 있다고 볼 수 있다. 더욱이 제체

* 충청전문대학 산업안전과

내부에는 균열과 침하에 의한 공동이 발생해서 특히 안정성이 저하하고 있는 구간, 즉 취약구간이 있을 가능성을 부정할 수 없다.

본 연구는 제체에 침투와 누수가 발생함에 따라 제체에 미치는 영향을 분석한 것으로 제방모형을 이용하여 침투류해석과 안정해석을 행하여 침윤선의 형성·진행상황과 그에 따른 제방의 안정성 고찰을 실험을 통해 검토하고자 한다. 특히 수위가 급격하게 저하될 때의 제체의 안정성에 미치는 영향을 검토했다.

수위의 변화조건이 주어졌을 때 침투·누수에 기인하는 하안, 제방의 주된 붕괴 원인으로 다음 3가지를 생각할 수 있다.

- 1) 침투력에 의한 파이핑 등의 발생
- 2) 流水에 의한 脚部침식
- 3) 유출수 및 강우에 의한 침식

이 3가지 요인은 모두 서서히 진행하고 있던 침식이 수위의 상승 및 하강에 따라 급격하게 위험한 사태를 초래하고, 제체 내외측면의 파괴도 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 sliding과 파괴를 포함해서 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 제체 내외측면의 파괴에 관련한 종래의 연구를 기초로하여 정리하고 취약구간의 침윤선 변화에 따른 침식, 파괴과정에 관해 기초실험을 했다.

그리고 제방을 모형화하여 안정성에 관한 고찰을 하고 수위의 저하 직후의 사면 안정성에 대해서도 검토를 했다.

1.2 연구사

제체에 관해서는 건설구조물로서 붕괴시 경제적피해 뿐만아니라 인명손실등 직간접적으로 위험을 줄 수 있는 구조물이기 때문에 안정성에 대해서는 상당히 많은 연구가 이루어졌다.

일반적으로 사면안정에 관한 연구는 1776년 Coulomb이 전단강도식을 만들어냄으로써 시작되었으며, 1850년대 Collins가 사면파괴 형상을 곡선으로 표현하기 시작했다. 1866년 Culmann은 유한사면에서 파괴면을 직선으로보고 사면의 안전성을 해석했으나 이는 암반사면에는 적합하나 일반사면에는 적용하기 곤란하다.

그 이후 1900년대 초 Fellenius¹⁾(1918년)가 내

부마찰각이 없는 ($\phi=0$)인 경우 절편법을 처음 개발했다. 절편법은 1955년 Bishop²⁾이 절편에 발생하는 모멘트의 평형과 힘의 평형이 같아져야 정확한 안전율을 구할 수 있다는 원리를 발표함으로써 보편화 되었다.

특히 수위의 급저하에 따른 파괴현상은 저수지 내측 사면의 sliding과 제체의 안전성에 대해 연구가 행해졌다.

中村·土野(1986년)^{3,4)}는 댐 저수위의 변동에 따른 저수지 사면에서의 sliding을 대상으로 연구하였고 지하수 침투를 Relaxation method를 이용한 차분법에 의해 해석하였다. 그리고 얻어진 결과를 이용하여 모델사면을 대상으로한 사면안정 해석을 하고 수위변동이 사면안정에 미치는 영향에 대해 검토하였다.

駒田(1975년)⁵⁾는 Zone type 혈땀에 있어서 제체수위 급강하에 의하여 상류측 사면 내에 생기는 잔류공극수압의 분포상황이 제체의 안정성에 주는 영향을 검토하기 위해 비정상침투류 해석을 실시했다. 그 결과를 Hele-Shaw모델 모형실험과 이론계산을 비교하는 것에 의해 수치해석법의 타당성을 확인함과 동시에 그 결과에서 제체내의 침투력을 구하고 그것을 이용해서 제체의 안정해석을 했다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구는 京都대학방재연구소 宇治川수리시험소에 보유하고있는 실험장치를 이용하였다.

장치본체는 알루미늄제 Channel을 용접해서 제작한 길이 8000 mm, 높이 500 mm 폭 500 mm, 두께 12 mm의 투명아크릴 판을 두장씩 붙여서 수조전·후면에 panel을 설치하였다. 수조 전면 panel 하부의 4곳에 slider가 장치되어 있어 폭방향의 이동이 가능하도록하여 수조의 내폭을 쉽게 바꿀 수 있게 되어 있다.

수조 뒷면 panel 아크릴판에는 공극수압 측정용의 stand pipe를 8 mm의 실리콘·튜브로 연결하여 설치했다. 또 공극수압 측정점의 변동 및 추가를 위해 100 mm간격으로 작은 구멍을 뚫었지만 나사로 막았고 필요에 따라 개방할 수

있으며 수조저면으로부터 450 mm까지의 수위조절이 가능하도록 하였다.

실험시에는 소형수증 펌프를 접속시켜 제체의 상류측에 물을 공급하고 상류측 배수구에서 급수용 탱크로 귀환시켜 실험중에 일정 수위를 유지하도록 순환시켰다.

본 실험에서는 제체모형의 설정을 쉽게 하기 위해서 높이 10 cm마다 단계적으로 제체의 제작이 가능한 목제형 틀을 소정구배(1:1~1:2.5)로 수조의 전내쪽에 맞추어 제작했다.

2.2 실험조건

실험조건은 Table 1과 같고 제체모형의 형상은 실험장치의 크기와 실험시 제체 규모를 감안하여 제체고 35 cm, 천단폭 10 cm로 하고 사면경사는 상·하류측 사면으로 실제의 제체에 잘 견줄수 있는 1:1.0, 1:1.5, 1:2.0, 1:2.5로 정하였다.

Table 1 Experimental conditions

slope	B1(cm)	B2(cm)	H1(cm)	model type
m=1.0	10	80	35	
m=1.5	10	115	35	
m=2.0	10	150	35	
m=2.5	10	185	35	

제체재료의 토질 강도정수는 직접계측하는 것이 바람직하지만 샘플링을 한 실내토질시험을 통해 파라메타를 구했다.

본 연구에서는 토질 파라메타를 적당히 변화시켜 계산을 수행하였으며 해석의 대상이 되는 모형제체의 구성재료의 점착력 c 값은 0.5, 1.0, 1.5 kg/cm²으로 했다. 또한 c 의 값은 포화, 불포화영역을 같은 값으로 정했다. 이것은 불포화영역에 따른 모관수대에서 볼 수 있는 점착력 및 포화영역에 따른 공기폐쇄에 대한 영향을 고려한 것이다.

다음으로 내부마찰각 ϕ 의 값에 대해서는 사질토에 대해 통상 생각할수 있는 것으로 비교적 광범위한 값을 고려해서 16°, 26°, 36°로 했다. 따라서, 종래부터 행해 왔던 계산결과와 경우로부터 단위체적중량 γ 범위의 변화에 대해서는 입계활동면의 형상은 거의 변화하지 않는다. 한편 그와 대응하는 최소안전율의 값은 γ 의 값이

증가할수록 증가하고 그변화는 γ 값이 1.7 kg/cm³으로부터 1.9 kg/cm³까지의 변화에 대해서 수 %의 영향이 있다(3.4~5.7%). 따라서 본 연구에서는 γ 의 값으로 1.8 kg/cm³의 것을 사용했다. 본 실험에 사용한 모형제체 재료의 비중 G_s 는 2.74의 값을 갖는다.

2.3 실험방법

수조내에 stand pipe를 10 cm간격으로 설치하고 stand pipe 내부의 공기를 제거한다. 제체를 축조한후 수위를 최상부까지 상승시켰다 서서히 하강시켜 물다짐을 행한다.

제체의 준비가 완료되면 배수구를 닫고 급수용 탱크에서 소형수증 펌프로 급수를 시작한다. 상류측의 수위를 조절해서 제체높이의 85%에 상응하는 30 cm정도의 수위를 일정하게 유지시킨 후 제체내의 공극수압을 계측한다.

침투현상의 진행에 대한 거의 일정시간 간격마다 침출수를 하류단에서 배수통 안에 설치한 비이커로 받아서 그 침출유량을 측정하고 동시에 수온을 급수용 탱크안에 설치한 수온계에서 상류측 수위를 각각 측정한다.

제체현상 및 stand pipe의 수두변화는 각각 2대의 모터드라이브 카메라를 사용하여 타이머로 연동시켜 동시 촬영하고 그때의 시간 측정을 하였다.

동시에 2대의 VTR에서도 실험결과를 모니터링하고 촬영한 stand pipe 및 제체형상 변화의 연속적인 기록에서 사진촬영에 의한 데이터를 보완함과 동시에 파이핑 개시시각과 사면파괴시각을 확인하였다.

2.4 제체의 안정성에 관한 분석 및 고찰 방법

침윤선의 발생·진행에 의한 제체의 파괴과정을 예측하기 위해서는 우선 제체내의 침투류 해석을 실시하여 파이핑의 발달에 따른 침투유량과 공극수압의 변화를 관측하고 얻어진 공극수압 분포를 이용해서 제체사면의 sliding에 대한 안정해석을 실시하므로써 sliding 파괴에 대한 안정성을 검토할 수 있다. 제체의 침식과정의 각단계에 있어 이 해석을 복합적으로 적용함

으로서 제체의 침식상황에 따른 안정성을 검토할 수 있다.

제체의 변형개시 직전의 단계에 대해 등방성 정상포화 침투류 해석을 실시해서 얻어진 공극수압분포를 이용하여 간이 Bishop법에 의한 안정해석을 적용한 결과를 분석하고, 홍수가 장시간 계속된 후에 상류측 수위가 급하강한 경우 제체의 상류측 사면의 안정성에 대해 동일하게 간이 Bishop법에 의한 안정해석을 적용해서 검토한 결과에 대해 분석했다.

과피의 현상 및 상류측 수위의 변화에 대해 우선 제체내의 등방성 정상포화 침투류 해석을 실시하고 제체내 유속분포, 제체내 stand pipe의 수두분포, 침출유속, 침출유량 및 유출점 높이를 구한다.

그리고 각각의 경우 제체내 stand pipe 수두분포에서 제체내 공극수압분포를 구하고 그것을 이용하여 간이 Bishop법에 의한 안정해석을 토질점수를 변화시켜서 최소안전율과 경계 sliding 면을 구하여 그 결과를 검토하였다.

침투류해석의 결과 얻어진 홍수시 제체내의 공극수압 분포를 이용하면 장시간 홍수가 계속된 후에 상류측 수위가 급격히 저하한 경우의 제체 상류측 사면의 안정성에 대해서도 안정해석을 적용하여 검토할 수 있다.

제체모형에 대해 상류측 수위가 제체고의 85%로 장시간 일정하게 유지된 후에 급격히 저하한 경우의 제체 상류측 사면의 안정 해석을 하고 토질강도정수 C, ϕ 를 변화시켜 간이 Bishop법을 이용해서 실시하였다. 수위급강하시의 level로는 제체고의 0~85%까지 20%마다 변화시킨 5종류의 것을 이용하였다. 그리고 계산의 결과 얻어진 최소안전율과 경계 sliding의 변형에 대해 검토를 더했다.

3. 침투류 및 사면안정해석

3.1 침투류해석

우수침투 및 내부저류가 없는 경우 제체내의 등방성 정상포화침투류의 기초식의 속도포텐셜 $\phi = -KH(H=z+p/\rho g)$ 을 이용하고, 좌표계는 제체의 하류측사면 toe부분을 원점으로 해서 상

류측을 향해 수평에 y축을 취하고 연직 윗방향을 향해 z축을 취하면 다음의 Laplace식이 된다.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

한편 경계조건은 상류측사면 윗쪽 및 파이프 개구부의 침식면에 있어서

$$H=H_0 \text{ on } \Gamma_1 \dots\dots\dots (2)$$

침윤면(제체내의 자유수면)으로

$$k \frac{\partial H}{\partial y} n_{fy} + k \frac{\partial H}{\partial z} n_{fz} = 0 \text{ on } \Gamma_2 \dots\dots\dots (3)$$

하류측법면위의 침출면으로

$$k \frac{\partial H}{\partial y} n_{sy} + k \frac{\partial H}{\partial z} n_{sz} = -V_s(y, z) \text{ on } \Gamma_2 \dots\dots\dots (4)$$

$$H=Z_s(y) \text{ on } \Gamma_1 \dots\dots\dots (5)$$

이 된다.

여기에 Γ_1 은 수두의 경계를, Γ_2 는 유속의 경계를 나타내고 H는 stand pipe의 수두, ρ 는 물의 밀도, g는 중력가속도, k는 투수계수, H_0 는 상류측 수위, n_f, n_s 는 각각 제체내의 자유수면 및 유출면에 세워진 바깥쪽의 단위법선 벡터, 침자는 그 방향성분, $z(y)$ 는 침윤선의 높이, $V_s = (y, z)$ 는 침출면에서 유속의 사면경사 방향 성분 그리고 $z_s(y)$ 는 침출면의 높이이다.

3.2 침투력의 이론적 해석

침투력이란 침윤선이 형성됨에 따라 흙입자간을 물이 통과할때 점성마찰에 의해 흙과 물사이에서 생기는 하나의 에너지의 향으로 생각할 수 있다. 여기서 발생하는 에너지의 손실은 손실수두의 향으로 나타낼 수 있으며, 이러한 에너지 변환에 따른 힘을 침투력이라 한다. 흙속에서 발생하는 침투의 단위체적당 활동력을 고려한다면 Fig. 1의 연직축상에 나타난 바와 같고, 이것은 흙입자 사이를 통과하는 단위체적당 유체정역학적 힘(Hydrostatics Forces)인 식(6)으로 표시된다.

$$\text{grad } P = \gamma_w(-i) - j\gamma_w \dots\dots\dots (6)$$

식(7)은 Fig. 1에서 삼각형 OO'M'으로 표시된다. 여기서 $i\gamma_w(OM)$ 은 단위 체적당 침투력의 향을 나타내고, 등 Potential선과 연직방향이 된다. 힘 R(O'M)은 흙속의 임의점에서의 공극수내에

작용하는 단위체적당 합력의 방향과 크기를 나타낸다.

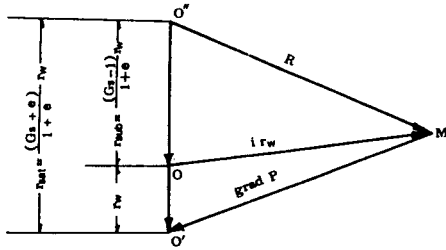


Fig. 1 The diagram of seepage force

- ① $D = \gamma_w i = -(\text{grad } P + j \gamma_w)$ (7)
 $D = \gamma_w i$ (침투력) = 동수경사 \times 물의 단위중량
 $\text{grad } P$ = 임의점에서의 압력
 $j \gamma_w$ = 단위백타를 고려한 물의 단위중량
- ② $D = \gamma_w i = R - \gamma_{\text{sub}}$ (8)
 R = 공극수내에 작용하는 단위체적당 합력
 γ_{sub} = 수중단위중량

3.3 Bishop의 간편법을 기초로한 침투력 수정 식⁶⁾

침투력은 분사현상이나 침투가 일어나는 흩 구조물의 안정해석에 매우 중요한 영향을 미친다. 이상과 같은 침투력의 개념을 고려한 사면 안정이론을 정립하면 다음과 같다.

$$F = \frac{1}{\Sigma (W_1 + W_2) \sin \alpha} \Sigma [C_i' b + \tan \phi_i' \{ (W_1 + W_2) - U b - D b \tan \alpha / F \}] \frac{1}{m_a} \dots\dots\dots (9)$$

$$m_a = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi_i'}{F} \right) \dots\dots\dots (10)$$

3.4 Bishop 간편법의 이론 해석

제체에 작용하는 압축이나 인장에 대한 외력 해석은 1955년 Bishop에 의해 연구되었고, 사면의 활동면이 지나가는 부분을 경계로하여 활동토체를 일정간격의 절편으로 나누어 다음과 같은 평형방정식을 정립했다.

$$F = \frac{1}{\Sigma W \sin \alpha} \Sigma [C_i' b + \tan \phi_i' (W - ub)] \frac{1}{m_a} \dots\dots\dots (11)$$

$$m_a = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi_i'}{F} \right) \dots\dots\dots (10)$$

4. 실험결과와 그 검토

4.1 파괴과정의 특징

실험사진으로부터 그래픽 디지털이저로 읽어 내어 제체형상의 변화를 전실험에 대해 표시한 것이 Fig. 2이다.

제체의 파괴는 제체내측면 유출이 발생하면서 부터 시작되는 것을 확인할 수 있었고 기본적으로 절편 분할의 간격은 일정하게 10 cm로 정했다. 그러나 쇄굴의 위치가 하류측 사면 가까이에서 발생하는 경우에는 임계활동면의 위치를 변화시켜 계산을 수행하여 최소안전율 값을 구하였다.

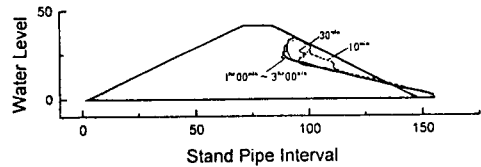


Fig. 2 Failure shape of the embankment

실험결과 제체내측면에서 제체의 침식과 활동파괴가 동시에 발생하였고 그 침식과 파괴는 사면의 윗부분으로 급속하게 이동·전달되었다. 그러나 침식이 사면의 중앙부 부근에 도달하면 그 후의 침식속도는 급속하게 저하하는데 그 위치는 제체의 변형을 구속하고 있는 유출점높이에 의해 결정된다.

침식속도가 저하한 뒤 유출수가 존재하는 사면에서의 모래 입자는 흐름이 빠르게 되며, 이와같은 국부적인 파괴는 하류측 사면부근까지 진행했다.

또 국부파괴의 진행속도가 하류측 사면 위쪽 부근에서 급격히 저하한 원인으로서는 침식·유송된 부분적인 불포화토의 모관section에 의한 점착력의 증가로 생각할 수 있다.

이상의 파괴과정의 특징에서 알 수 있었던 사항은 동일 입경이고 미세한 재료로 축조한 제체는 높은 수압이 작용하면 유송되기 쉽기 때문에 크게 불안정하지만 section에 의한 점착력의

발생에 의한 침투경로의 폐쇄현상이 생기면서 제체전체의 안정성은 크게 회복된다는 것을 지적할 수 있다.

4.2 침투류 해석결과와 고찰

침투류해석에 따른 결과의 정확도를 검토하기 위해 수위 30cm의 경우 하류측 수위에 대한 실험결과를 Cassagrande의 기본 포물선과 비교하면 Fig. 3과 같다. 이 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 실험의 결과 얻은 침윤면의 위치와 기본 포물선과는 잘 일치하며 Casagrande의 위치보다 약간 높았다.

다음으로 본 실험으로부터 구한 유속벡터도 및 등포텐셜선을 표시하면 Fig. 3과 같다.

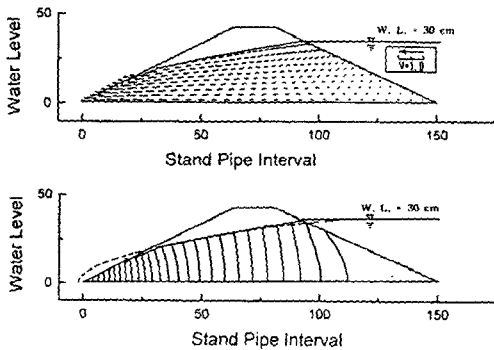


Fig. 3 Equipotential line and unit stream vector

제체의 toe 부분에 있어 유속은 크게 되고 그 방향은 하류측사면에 연직이 되는것을 알 수 있다. 또 등포텐셜선은 파이프이 발생하는 윗부분보다 하류측으로 향하고 있으며 그 방향은 수평에 가깝다. 유출점 높이는 누수 현상이 발생함에 따라 상승하고 침윤면은 원호모양임을 확인할 수 있다.

유속 벡터는 하류측사면에 대해서 연직방향보다 윗쪽에 나타나고 있고 그 절대치는 특히 큰값을 갖는다. 하류측사면의 유속도 같은형태로 크게 되며 그 방향은 역시 하류측 사면에 대해 직각이 된다. 또한 파이프 개구부 상방의 수두가 상승하고 등포텐셜선의 간격은 현저하게 좁아지며 그 형태도 파이프 개구부로부터 연직 방향을 향하며 강한 침투류가 발생하는 것을 알 수 있다. 이 해석결과는 국부파괴를 유도하는

급속한 분사가 발생하고 기존의 실험결과와 일치한다고 판단된다.

제체높이 35cm의 경우에 대해서 투수계수 k 를 소거하여 무차원 침출유속 V_v/k 의 분포형상을 표시하면 Fig. 4와 같이 된다. 침출유속의 분포는 거의 변화가 없었지만 하류측 toe 부근에서 높이가 가파른 최고점을 확인할 수 있었고 이 부근에서 분사현상이 발생할 가능성이 높다는 것을 나타내고 있다. 또한 이와같은 분포형상은 상류측 수위변화 및 파괴 형상의 차이등에 대해 그다지 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

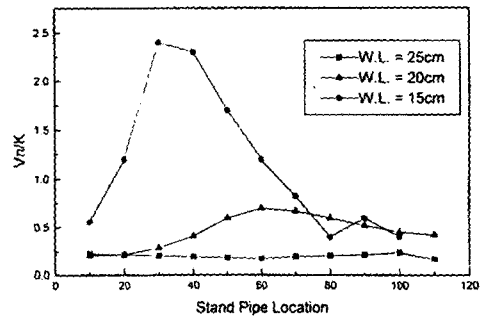


Fig. 4 Dimensionless of the velocity of flow

여기서 전 침출유량 q/k 을 유출점 높이 Z_0 로 무차원화하면 Fig.5와 같이 되고 침출유량은 유출점의 높이의 범위로 결정됨을 알 수 있다.

Fig.5에서 침출유속의 변화형태는 제체높이 및 상류측 수위의 변화에 따라 변화하고 제체사면경사와 상류측수위에 비례한다.

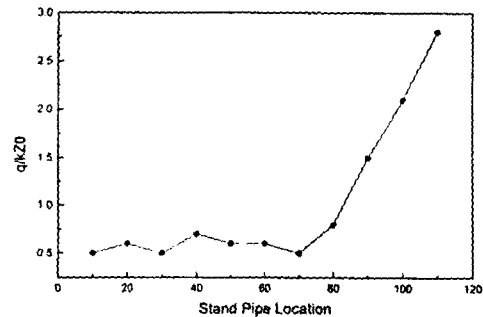


Fig. 5 Dimensionless of the discharge

이와 같은 침투유량과 침출점 높이가 증가함에 따라 하류측사면 중앙부근까지가 분사가 발생하는 경계위치에 있다고 추측된다. 침출점 높이

와 침투유량이 급증함으로써 하류측 사면에 근접하면 국부파괴 발생과 그것이 진행됨에 따른 제체의 전면파괴의 위험성이 높아지는 것을 확인 할 수 있었다.

4.3 안정해석결과와 고찰

전술의 침투해석 결과를 이용한 안정해석 수행결과 최소안전율 F_s 를 종축으로 잡고 횡축에 파이프 위치를 정한다. 토질강도정수 ϕ 를 파라메타로해서 각각을 표시하면 Fig. 6과 같이 된다.

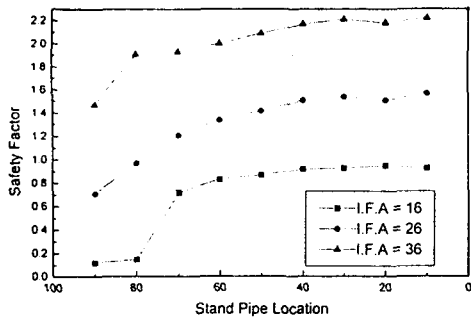


Fig. 6 The variation of safety factor (internal friction angle)

본 해석에서는 제체재료의 토질 파라메타 변화에 따른 경향을 추적하기 위해 내부마찰각 ϕ 를 3종류 변화시켜 계산했다. 그결과 $16^\circ \sim 36^\circ$ 에 걸친 ϕ 의 변화에 대해서 안전율 F_s 는 증가함을 알 수 있었다.

일반적으로 ϕ 의 값이 증가하면 활동면의 형상은 약간 작게되는 경향이 있으나 안정성이 현저하게 커지고 임계활동면을 형성하게 된다. 한편 점착력 c 의 값이 변화함에 따라 안전율 F_s 의 값은 크게 변화하고 있어서 점착력의 증가가 제체의 안정성을 증대시키는 것을 Fig. 7로부터 확인할 수 있다.

본 실험과 같은 스케일이 작은 모형제체에 대해서는 공기패쇄, 모관 section 등에 따른 점착력의 발생이 그 안정성에 대해서 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한 c 의 증가가 안전율 F_s 의 값을 크게 증가시키는 이유는 제체가 견고한 지반상에 축조되어 있고 제체저면에 발생하는 활동면이 발생하지 않는 실험조건에도

있다고 생각된다. 또한 c 의 값이 크게되면 활동면의 형상은 크게되는 경향이 있지만 이번의 해석에서는 그와같은 활동면의 형상은 해석의 대상에 포함시키지 않았다.

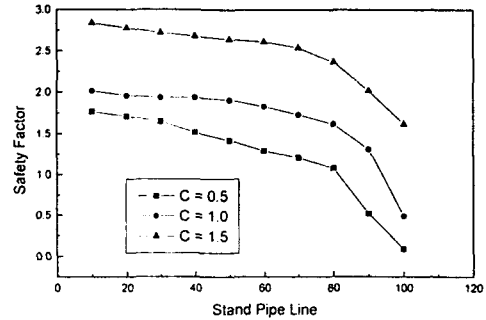


Fig. 7 The variation of safety factor (cohesion)

4.4 수위의 급저하에 따른 제체의 불안정화에 관한 고찰

전절에서 구한 바와 같이 수위변동시에 발생하는 제체내의 공극수압분포를 이용한다면, 장시간 홍수가 연속된 후에 상류측 수위가 급격하게 저하한 경우의 제체 상류측 사면의 안정성에 대해서도 검토할 수 있다.

계산조건은 전절에 제시한 제체고 35 cm이고 상류측 수위의 초기치(홍수시의 수위)는 제체높이 85%인 경우에 대해 사용했다. 수위의 하강 간격은 제체높이의 0~85%까지 20%씩 변화시킨 5종류를 적용했으며, 토질 파라메타 γ , c , ϕ 에 대해서는 전절과 같은 값을 사용했다. 제체에 대해서 상류측의 초기수위와 급격하게 하강한후의 수위 및 c , ϕ 의 변화에 대해서 최소안전율 F_s 와 그것에 해당된 임계활동면의 형상을 구했다.

해석의 결과로 얻을 수 있었던 최소안전율 F_s 를 종축에 잡고, 제체높이에서부터 급저하후의 상류측 수위를 횡축에 잡는다. 여기서 얻은 최소안전율에 관한 임계활동면의 형상 내에 상류측 초기수위가 제체높이의 85%로 20%간격으로 급저하시에 대해서 도시하면, Fig. 8과 같다.

안전율의 계산결과는 상류측 초기수위의 변화에는 그다지 영향을 받지 않으며 내부마찰각 ϕ 의 증가와 점착력 c 의 증가에 따른 안정성의

증대가 커진다.

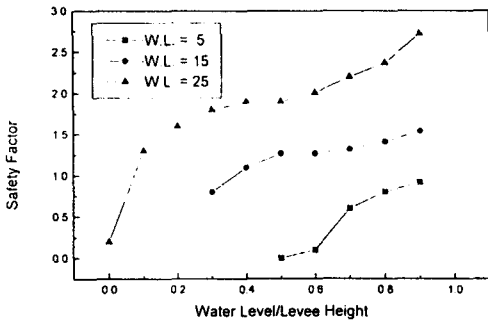


Fig. 8 The variation of safety factor (Water level/Levee height)

상기 그림에서 알 수 있는 바와같이 어느 계산조건에서도 수위저하의 간격이 20%씩 하강할수록 제체의 안정성은 크게 손상되는 것을 알 수 있다. 임계활동면의 형상은 c값이 작은 경우에는 급저하후의 수위보다 상부의 부근에서의 국부적인 파괴를 나타내고 있으며, 잔류공극수압에 따른 제체의 불안정화 영향이 나타난다고 생각된다. c의 값이 큰경우의 활동면은 제체 저부까지 도달하며 그 형상은 Fig. 9와 같다. 따라서 수위 급하강후의 상류측수위에 대한 사면안정성 분석결과 최소안전율 F_s 의 값이 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

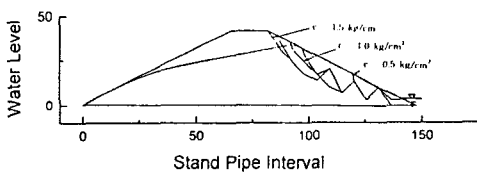


Fig.9 The shape of critical surface

6. 결론

본 논문은 침윤선형성에 따른 제체의 파괴발생과 진행에 대한 모형제체의 파괴과정에 관한 기초실험을 한 것으로 파괴형상과 그 위치를 찾고 상류측수위를 변화시켜서 등방성 정상포화 침투류해석을 수행했으며 유속 벡터, stand pipe의 수두, 침출유속, 침출유량, 그리고 유출점 높이의 변화상태에 관해 고찰을 했다.

이상에서 얻어진 주요 결과와 이후의 과제에

대해 정리하여 결론을 지으면 다음과 같다.

- 1) 국부파괴속도는 빠르게 진행하고 그 위치가 사면중앙 부근까지 진행하였으며 그후의 파괴 진행속도는 급격하게 둔화됐다.
- 2) 침투류해석의 결과 침윤면 위치 및 유출점높이가 Casagrande이론식과 잘 일치함에따라 본 해석이 타당하다는 결론을 얻었다.
- 3) 침투류해석의 결과 얻은 제체내 공극수압분포를 사용해서 원호 활동면에 기초를 둔 제체의 활동파괴에 대해서 최소안전율 및 그때의 임계활동면의 형상을 구했다. 해석결과로부터 구한 계산된 최소안전율은 침투류해석결과와 일치한다.
- 4) 유출점 높이와 침투유량이 급증함으로써 하류측 사면에 근접하면 국부파괴 발생과 그것이 진행됨에 따른 제체의 전면파괴의 위험성이 높아지는 것을 확인 할 수 있었다.
- 5) 일반적으로 ϕ 의 값이 증가하면 활동면의 형상은 약간 작게되는 경향이 있으나 안정성이 현저하게 커지고 임계활동면을 형성하게 된다.
- 6) 점착력 c의 값은 작은 값의 범위로 변화되나 안전율 F_s 의 값은 크게 변화하고 있어서 c의 증가가 제체의 안정성을 증대시키는 것을 알 수 있다.
- 7) 정상상태로부터 상류측수위 급하강후 제체의 사면안정성 분석결과 최소안전율 F_s 의 값이 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

이상 본 연구에서는 수위변화에 따른 제체 및 하안의 안정성에 대해서 미시적 관점에서 고찰을 하였다. 이후의 연구보완 과제는 침투류에 따른 토입자의 침식과정을 해석하는 것이 필요하며, 해석방법적인 면에 있어서는 측면수위의 고찰방법에 문제가 있다고 생각되므로 금후에는 이점을 보완하여 수위저하시의 비정상 침투류해석을 조합시켜 완성하는 것이 필요하다.

본 연구는 日本 京都大學의 Post-Doc. 연구결과이며 연구를 지원해준 한국과학재단 관계자와 京都大學 防災研究所 관계자에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) W. Fellenuus, "Calculation of the Stability of Earth Dams", Trans Sewnd Cong., on Large Dams. 4, Washirgatiohton, 1936.
- 2) A.W. Bishop, "The Use of Slip Circles in the Stabilit Analysis of Earth Slopes", Geotechnique, Vol. 5, pp. 7~17, 1955.
- 3) 中村活之・土屋智, "貯水池周邊地すべり斜面での浸透流解析と安定計算", 土木技術資料, 第28卷, 第9號, pp. 32~37, 1986.
- 4) 中村活之・土屋智, "貯水變動に伴う地すべりの浸透實驗と安定度の検討", 地すべり, 第23卷, 第4號, pp. 28~35, 1986.
- 5) 駒田廣也・金沒紀一, "Fill Dam 貯水池水位急降下時周の非定常浸透流解析および安定解析", 土木學會論文報告集技, 第240號, pp. 51~62, 1975.
- 6) 최기봉, "침투력을 고려한 사면안정의 이론적 해석", 한국산업안전학회지, Vol. 11, No. 4, pp. 151~155, 1996.