

平面變形率 狀態에 있는 模型地盤의 變形解析法

Analyzing Method of Deformation of Model Ground in Plane Strain

林 鍾 鐵*¹

Im, Jong-Chul

朱 仁 坤*³

Joo, In-Gon

金 永 仁*⁵

Kim, Young-In

朴 性 栽*²

Park, Sung-Zae

朴 鏞 富*⁴

Park Yong-Boo

Abstract

One of the most important things to analyze model ground test in plane strain is to observe deformation, accurately. In this paper, the analyzing method of ground deformation by using photos of points on membrane attached on transparent acryle plate of side wall of model ground box is described. First order 4-node isoparametric elements are used to calculate strains of elements.

要 旨

평면변형률 상태의 흙구조물에 대한 모형실험을 해석할 때 매우 중요한 것 중의 하나는 지반의 변형을 정도 높게 관찰하는 것이다. 본 논문에서는 모형토조 측벽의 투명한 아크릴판 위에 부착된 고무 멤브레인 위의 절점들을 일정한 시간 간격으로 사진 촬영함으로써, 각 절점의 변위를 구하고, 그 변위를 이용하여 지반의 변형을 해석하는 방법에 대해 기술했다. 요소의 변형률 계산에는 1차의 4절점 등매개변수 요소를 사용했다.

1. 서 론

댐, 사면, 푸팅기초지반 등 많은 흙구조물은 평면변형률 상태에 있다. 이러한 흙구조물의

역학적인 메카니즘을 이해하고 나아가서 설계법을 발전시켜 나가기 위해서 많은 모형실험들이 행해지고 있다. 이런 실험결과를 분석하기 위해서는 지반의 변형과 파괴면의 발달과정을 관찰할 필요가 있다. 변형은 변형률, 변위 등으로 나타내

*¹정회원, 부산대학교 공과대학 토목공학과 조교수

*²정회원, 부산대학교 공과대학 토목공학과 교수

*³정회원, (주) 동아지질 (前부산대학교 대학원 석사과정)

*⁴정회원, 해군시설장교(前부산대학교 대학원 석사과정)

*⁵정회원, 통영수산전문대학 부교수

는데, 파괴면은 정의대로 변위의 불연속면¹⁾이라는 개념을 사용하면 실제로 그면을 찾기가 매우 어렵기 때문에 파괴면을 찾는데 사용되는 실용적인 방법인 최대전단변형률($\gamma_{max} = \epsilon_1 - \epsilon_3$)의 집중면²⁾이라면 개념을 많이 사용하게 된다.

본 논문에서는 사진법을 이용해서 지반의 변형을 해석하는 방법에 대해 기술한다.

2. 사진법

평면변형률 모형토조에서 중간주변형률(ϵ_2)이 작용하는 면을 투명한 아크릴판으로 구속하고 아크릴판과 지반의 사이에는 마찰을 적게 하기 위해서와, 지반의 변형을 관찰하기 위해서 얇은 고무멤브레인을 0.1~0.2mm 정도의 그리이스층을 사용해서 부착한다. 멤브레인과 아크릴판 사이의 마찰각은 극히 작기 때문에, 멤브레인과 그 속에 압입되어 있는 흙입자(거시적으로는 지반)는 거의 동일한 변위를 갖게 된다³⁾. 또, 멤브레인에는 격자형으로 선을 그어서 지반의 유한요소를 나타내게 하고 아크릴판 위에는 두개의 不動點(변형 관찰영역 내에서 두점 사이의 거리가 먼 것이 오차가 적음)을 설치한다. 이 유한요소들을 어떤 시간 간격으로 사진촬영해서, 그 좌표를 좌표표시용 현미경, 디지털이저 등으로 읽는다. 그리고 두 사진상의 부동점의 좌표를 동일하게 해서 좌표변환하여 비교하면, 어느 변형전후의 지반요소의 절점변위가 구해진다. 이때 실험이 끝날 때까지 사진기를 고정해서, 촬영각도나 거리 등에 따른 오차를 줄이는 것이 좋다. 그런데, 현미경을 이용하면 작은 사진이라도 크게 확대해서 좌표를 찾으므로 사진속의 절점좌표를 읽기 쉽고, 또한 오차도 상당히 줄어든다. 반면에 디지털이저를 이용하면 작은 사진속의 절점좌표를 읽는 精度가 떨어지므로 가능한 한 사진을 크게 확대해서 精度를 높이는 것이 좋다. 위와 같은 방법으로 구한 절점변위가 곧 지반의 각 위치에서의 변위이고, 이 절점(사각형 요소일 경우는 4절점) 변위를 이용해서 요소의 여러가지 변형률(또는 변형률중분)의 크기와 방향을 구할 수 있게 되며, 지반해석시 잘 이용되

는 同軸性(co-axiality) 가정(σ_1 방향= $d\epsilon_1$ 방향)을 이용하면 응력의 크기와 방향도 구할 수 있다.

그런데 지반변형의 관찰을 위하여 Takagi등⁴⁾은 X-ray촬영법을, Andraxes등⁵⁾과 Butterfield등⁶⁾은 스테레오 사진법을 이용했는데, 이 방법들은 지반내의 표적 설치에 많은 시간과 노력이 들고 촬영이 번거로워 사용에 어려움이 있고, 또 4에서 언급되어 있는 것처럼 지반요소의 형상에 대한 결점도 있다.

본 연구에서는 고무멤브레인을 지반표적으로 사용함으로써 표적 설치에 시간과 노력이 크게 절약되고, 표적의 갯수에도 제한이 없으며, 또한 일반 사진기를 사용함으로써 특별한 기술없이도 지반변형의 관찰이 가능하도록 했다. 또한, 변형률 해석에는 4절점 등매개변수요소를 사용하여 일반성을 높였다.

3. 절점변위의 계산법

두 사진(변형의 전후)에서 두 부동점의 좌표를 동일하게 해서 좌표변환하면, 두 사진의 각 절점에서의 변형 전후의 좌표의 차가 절점변위가 되며, 이 절점변위에다(두 부동점 사이의 실제거리) / (두 부동점 사이의 좌표변환시의 거리)를 곱하면 실제 절점변위가 얻어진다. 절점의 좌표 변환은 다음과 같은 방법을 사용한다. 그림 1과 같이 사진상의 부동점의 좌표를 R_1, R_2 에서 각각 Q_1, Q_2 로 변화시킬 때의 지반요소의 어느 절점P의 좌표(x, y)는 ① 平行移動, ② 回轉移動, ③ 길이의 伸縮 등을 거쳐서 변환된다.

(1) 平行移動

R_1 이 Q_1 으로 평행이동할 때, P 및 R_2 도 동일한 이동을 하게 되는데, 이동후의 좌표 P', R_2' 는 식 (1), (2)와 같다.

$$P' : \begin{cases} x' = x + Q_{1x} - R_{1x} \\ y' = y + Q_{1y} - R_{1y} \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

$$R_2' : \begin{cases} R_{2x}' = R_{2x} + Q_{1x} - R_{1x} \\ R_{2y}' = R_{2y} + Q_{1y} - R_{1y} \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

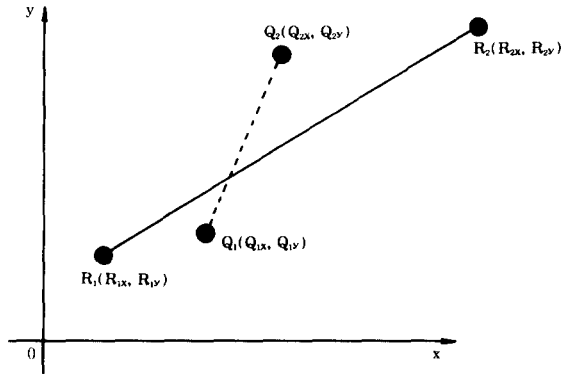


그림 1 Coordinate transformation of two fixed points ($R_1 \rightarrow Q_1, R_2 \rightarrow Q_2$)

(2) 回轉移動

R_1 이 Q_1 으로 이동하고 R_2 가 Q_2 로 이동하고 난 후, R_1 을 중심으로 R_2 가 Q_2 와 동일 선상으로 회전할 때, 동일한 회전이동을 한 후의 P'의 좌표 P''는 식 (3), (4)와 같다.

$$\left. \begin{aligned} x'' &= (x' - Q_{1x}) \cos\theta - (y' - Q_{1y}) \sin\theta + Q_{1x} \\ y'' &= (x' - Q_{1x}) \sin\theta - (y' - Q_{1y}) \cos\theta + Q_{1y} \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

$$\text{단, } \theta = \arctan \frac{Q_{2y} - Q_{1y}}{Q_{2x} - Q_{1x}} - \arctan \frac{R_{2y}' - Q_{1y}}{R_{2x}' - Q_{1x}} \dots (4)$$

(3) 길이의 伸縮

R_1 이 Q_1 으로 이동하고 R_2 가 Q_2 로 신축될 때, 동일한 신축을 한 후의 P''의 좌표 P'''는 최종적으로 다음과 같이 된다.

$$\left. \begin{aligned} x''' &= \frac{Q_{2x} - Q_{1x}}{x'' - Q_{1x}} (x'' - Q_{1x}) + Q_{1x} \\ y''' &= \frac{Q_{2y} - Q_{1y}}{y'' - Q_{1y}} (y'' - Q_{1y}) + Q_{1y} \end{aligned} \right\} \dots (5)$$

4. 지반요소의 변형을 계산법

연속체, 또는 흙과 같이 입상체이지만 거시적으로 연속체로 가정해서 해석할 경우 요소내의 모든 점에서 변위(또는, 정확한 변위함수)가

주어지면, 임의의 점에 대한 변형률은 구할 수 있다. 그러나, 실험으로부터 요소내의 모든 점에서 변위를 구하는 것은 불가능하다. 따라서, 실용적으로는 적당한 크기와 형태를 갖는 요소의 절점변위를 이용해서 요소내의 어느 점에서의 변형률과 변위를 근사식에 의해서 구하는 방법이 사용되고 있다. 그런데, 지반요소의 변형이 작을 때에는 요소 전체에서 거의 균일한 변형을 나타내지만, 변형이 크게 되면 요소내의 어느 면에 따라 집중적으로 변형이 발생하며, 결국 그 면에 따라 파괴가 발생한다.⁷⁾ 지반의 경우는 변위의 불연속면인 이 파괴면은 어느 두께(약 10~20 D_{50})를 갖는 층(전단층, shear band)이 되는데, 그 층의 내부와 그 층 이외의 위치에서의 변형률에는 큰 차가 생긴다. 따라서, 보다 精度가 높은 변형률을 구하기 위해서는 요소의 크기를 대단히 작게(전단층의 폭 보다 작게) 하면 되겠지만, 실험시에는 실용적인 요소의 수와 크기를 절점의 좌표를 읽는 시간까지 고려해서 결정하지 않으면 안된다. 본 논문에 사용된 요소는 한변의 길이가 대략 2cm 전후의 사각형요소인데 파괴가 발생하여 요소내에 불연속면이 생긴 후에도 그림 2와 같이 불연속면이 없는 요소로 가정해서 요소전체의 평균변형률을 구했다.

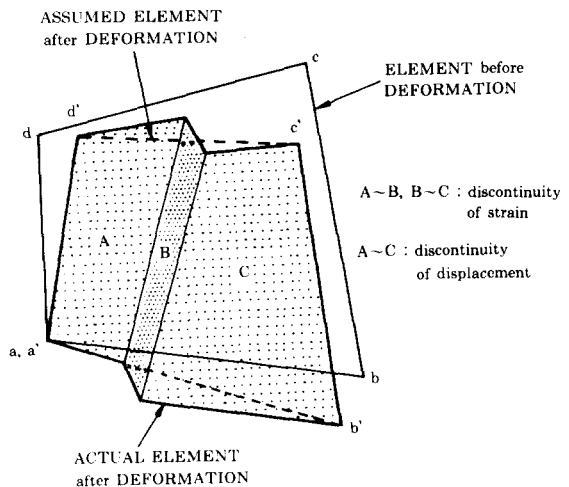


그림 2 Assumed element after development of discontinuous surface

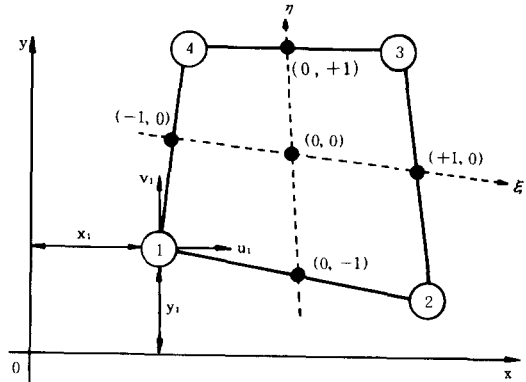
절점의 변위로 부터 요소내의 어느 점의 변위를 구하는 근사식으로서는 간단하며 실용적인 1차식을 사용했다. 본 연구처럼 요소의 크기가 작고, 변형전의 요소의 각 변을 직선으로 할 때는, 파괴면이 발생하기 전에는 요소 전체의 변형이 거의 균일하게 되므로 변형 후의 각 변도 직선에 가깝게 된다. 따라서, 절점의 수를 늘여서 근사식의 차수를 높여 곡선식으로 해도 계산이 복잡하게 될 뿐 그 다지 의미가 없으며, 실제로 여기서처럼 2cm 정도의 요소변내에 절점을 더 넣은 사각형요소를 사용하기 위해서는 사진상에서 각 절점의 좌표를 精度 높게 읽는 것 만으로도 대단한 시간과 노력이 드는 등 실용적이지도 못하다. 파괴면이 발생한 후에도 근사식의 차수를 높인다고 해서 요소의 평균변형률의 精度가 반드시 높아진다고는 할 수 없다.

요소의 형상으로는 삼각형, 장방형, 사각형 등 여러가지가 있는데, 여기서는 1차의 4절점 등매개변수(isoparametric) 요소를 사용했는데, 그 이유는 다음과 같다. 삼각형요소는 2차원 문제에 대해서, 어떤 경계 형상에도 근사시킬 수 있고 이론적으로도 쉬운 등의 이점이 있다. 그러나, 일반적으로 임의의 형상의 2차원 영역을 취급할 경우, 삼각형요소에 의한 분할로서는 절점수가 증가하면, 계산효율에 문제가 생기기 때문에, 장방형요소로 분할하는 일이 많다. 즉, 같은 정도의 요소의 크기로서 생각하면 장방형요소보다 精度가 떨어지는 것이 결점으로 되어 있다. 그 이유는, 3점보다 4점에 의한 근사식 쪽이 精度가 좋아지기 때문이다. 그 이상의 精度를 원한다면 상당히 정밀하게 분할하지 않으면 안된다. 그러나, 정밀한 분할로써 계산하기 위해서는 계산시간이 걸리고 입력데이터의 작성에도 번거로움이 더한다. Andrawes등⁵⁾이 사용한 장방형요소는 이론적으로도 간단하고, Takagi등⁴⁾에 의한 삼각형요소보다 精度도 높으나, 요소의 형에 제약이 있어서, 실험중 이동하는 절점들을 장방형 유한요소로써 근사시키는 데는 오차가 커서 곤란할 경우가 많다. 그래서, 본 논문에서는 이론은 조금 복잡하지만 요소의 형상도 장방형이나 사각형, 또 근사식의 차수를 높이면 곡선의 변을 허용하

는 등, 일반성이 높은 등매개변수 요소를 사용하게 되었다.

4.1 四節点 等媒介變數要素

여기서는 장방형요소의 결점으로 되어 있는 형태에 대한 제약을 없앤 일반적 사각형요소의 변형률분포를 구하는 방법에 대해서 기술한다. 장방형요소와 같이 변이 x, y 축에 평행인 경우에는, 그 변상에서 각각 y, x 좌표값이 고정되어서, 변위는 x, y 좌표에 따라 직선적으로 변한다. 따라서, 인접요소와의 변위의 연속성은 보장된다. 그림 3과 같은 일반적 사각형에 적용하는 자체에 별 어려움은 없으나, x 또는 y 축에 대해서, 경사진 선에 따라 변위함수가 일반적으로는 선형이 아니고, 또한 요소에 따라 다르므로, 인접요소간의 변위의 연속성이 보장되지 않는다. 이 점을 극복하기 위해서는 임의의 사각형의 변에 따라 일정값을 가져, 연속성이 보장되도록 하는 특별한 좌표계를 사용해서 회망하는 다항식을 쓰는 것이 편리하다.



u_i, v_i : nodal displacement of (x, y) direction (global coordinate system)
 $(0, 0), (0, +1) \dots$: coordinate by local coordinate system (ξ, η)

그림 3 Global and local coordinate of 4-node isoparametric element

새로운 좌표계 ξ, η 는 ξ (및 η)=일정인 선이 직선을 나타내고, 사각형의 변상에서 ξ, η 가 ± 1 의 값을 갖도록 되어 있다(좌표값은 각각의 선상에서 직선적으로 변화한다). 요소내의 어느 점의 전체좌표 (x, y) 를 국소좌표 (ξ, η) 를 사용하여

1차근사식으로 나타내면 식(6)과 같다.

$$\left. \begin{aligned} x &= \alpha_1 + \alpha_2 \xi + \alpha_3 \eta + \alpha_4 \xi \eta \\ y &= \alpha_5 + \alpha_6 \xi + \alpha_7 \eta + \alpha_8 \xi \eta \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

위의 식에서 절점 i에서의 전체좌표(x_i, y_i)와 국소좌표(ξ_i, η_i)의 관계를 이용하여 α_i를 소거하면 식(7)과 같이 된다.

$$x = \sum_{i=1}^4 N_i x_i, \quad y = \sum_{i=1}^4 N_i y_i \quad (7)$$

여기서, N_i는 형상함수라고 하며 식(8)과 같다.

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= (1-\xi)(1-\eta)/4 \\ N_2 &= (1+\xi)(1-\eta)/4 \\ N_3 &= (1+\xi)(1+\eta)/4 \\ N_4 &= (1-\xi)(1+\eta)/4 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

그런데, 등매개변수요소란 요소내의 변위분포를 나타내는 함수(변위함수)를, 요소의 형상을 나타내는 함수(형상함수)와 동일하게 선정하는 요소를 말하므로, 요소내의 어느 점(ξ, η)에서의 변위는 식(9)와 같이 된다.

$$u = \sum_{i=1}^4 N_i u_i, \quad v = \sum_{i=1}^4 N_i v_i \quad (9)$$

미소변형이론에 의해 2차항을 무시하면 변형률은 식(10)과 같다. 단, 수직변형률은 압축, 전단변형률은 반시계방향을 정으로 한다.

$$\left\{ \begin{aligned} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{yx} \end{aligned} \right\} = \begin{bmatrix} \partial[N]/\partial x & 0 \\ 0 & \partial[N]/\partial y \\ \partial[N]/\partial y & \partial[N]/\partial x \end{bmatrix} \left\{ \begin{aligned} \{u\} \\ \{v\} \end{aligned} \right\} = [B]\{\delta\} \quad (10)$$

여기서, [N], {u}, {v}는 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} [N] &= [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4] \\ \{u\} &= [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T \\ \{v\} &= [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4]^T \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

국소좌표계에 의한 N_i의 편미분을 전체좌표계

로 나타내면 다음과 같다.

$$\left\{ \begin{aligned} \partial N_i / \partial x \\ \partial N_i / \partial y \end{aligned} \right\} = [J]^{-1} \left\{ \begin{aligned} \partial N_i / \partial \xi \\ \partial N_i / \partial \eta \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

여기서, [J]는 야코비의 행렬로서 역행렬 [J]⁻¹는 식(14)와 같으며 식(12)의 우변의 편미분값은 식(8)로부터 구한다.

$$[J] = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -(1-\eta) & (1-\eta) & 1+\eta & -(1+\eta) \\ -(1-\xi) & -(1+\xi) & 1+\xi & 1-\xi \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ x_4 & y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$[J]^{-1} = \frac{1}{|J|} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix}, \quad |J| = \det \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

4.2 ε_x, ε_y, γ_{yx}를 이용해서 구해지는 값

(1) 최대 및 최소 주변형률(ε₁, ε₃)

ε_x, ε_y, γ_{yx}가 위의 방법으로 구해지면, 변형률의 모아원을 이용하여 그림 4와 같이 ε₁, ε₃의 크기와 방향이 구해진다.

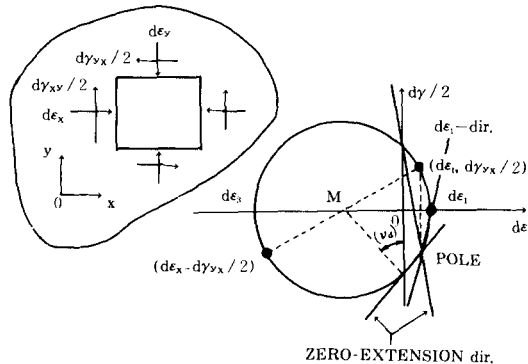


그림 4 Magnitude and direction of strain(increment)

(2) 無伸縮方向과 그 방향의 전단변형률

무신축방향(zero extension direction)은 수직변형률이 0인 방향인데, 그림 4에서 처럼 한 요소에서 2개의 방향이 정의된다. 이 방향은 지반의

경우, 파괴면의 방향과 거의 일치하는 경우^{8,9}가 많고, 직접전단시험이나 단순전단시험에서의 전단방향과도 일치하며, 또한 고체표면과 흙 사이의 전단면의 방향과도 일치한다.¹⁰⁾ 따라서 무신축 방향은 전단면의 위치를 구하는 등 해석상 대단히 중요한 의미를 갖고 있다.

그림 4의 ν_d 는 다이러턴시角으로서, 요소의 전단에 따른 체적팽창을 正으로 하면, 식(15)와 같이 나타낼 수 있다. 이론적인 정의는 변형률중분으로 나타내지만, 실험에서는 어느 변형의 전후(가능한 한 작은 변형(微分)이 좋으나, 너무 작으면 변형률의 정도가 낮아진다)에서의 변형률로써 구하는 방법을 이용한다.

$$\nu_d = \arcsin \frac{-(d\epsilon_1 + d\epsilon_3)}{d\epsilon_1 - d\epsilon_3} = \arcsin \frac{d\epsilon_v}{d\gamma_{\max}} \quad (15)$$

단, $d\epsilon_1, d\epsilon_3$: 압축+, $d\epsilon_v$: 체적팽창+

또, $d\epsilon_3$ 방향과 무신축방향이 이루는 각도 θ 는 식(16)과 같이 나타내어진다.

$$\theta = 45^\circ + \nu_d / 2 \quad (16)$$

그림 4 또는 식(15), (16)을 이용해서, 무신축 방향의 전단변형률(γ_{ZE})을 구하면 식(17)과 같다.

$$\gamma_{ZE} = \frac{d\gamma_{\max}}{2} \cos \nu_d = \frac{d\epsilon_1 - d\epsilon_3}{2} \cos \nu_d \quad (17)$$

5. 등고선 작도법

변형의 크기를 등고선으로 나타내면 최대전단 변형률의 집중면을 이용하여 비교적 쉽게 파괴면의 발달위치를 찾을 수 있다. 여기서는 γ_{\max} , x축 및 y축 방향의 변위, ϵ_v 등과 같은 값들을 등고선으로 나타내는 방법에 대해 기술한다. 그림 5에 등고선을 구하는 전체적인 흐름을 나타내고 있는데, 이를 설명하면 다음과 같다.

(1) 인접 4요소에서 $\xi = \eta = 0$ (즉, 중심)에서의 값을 사용해서 요소를 만든다. 중심점은 A, B, C, D이며 각 점에서의 값은 a, b, c, d이다.

(2) 요소 ABDC에서의 a, b, d, c를 이용해서 $\xi = \eta = 0$ (즉, 중심)에서의 값e를 구하고, 4개의

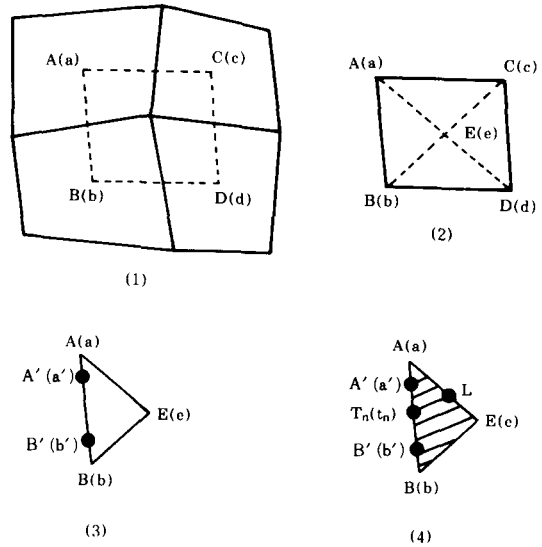


그림 5 Drawing method of contour

삼각형요소로 분할한다.

(3) 삼각형 중의 ABE를 예로 들면, a, b, e의 크기의 순서를 정하고(여기서는 $a > e > b$ 라고 가정한다), 선분 AB에서 등고선의 최소치와 증분을 고려해서, 등고선을 그리는 값 중에서 a보다 크거나 같은 값으로 A에 근접한 위치와 B보다 작거나 같은 값으로 B에 근접한 위치에서의 값을 구하고, 그 점을 A'(a'), B'(b')한다. 이때 AB에서의 값은 직선적으로 변화한다고 가정한다.

(4) 선분 A'B'를 증분의 개수 만큼 등분(n 등분)한다. A'B'를 등분할 해서 얻어진 점 중의 하나를 $T_n(t_n)$ 이라 하면, $b \leq t_n \leq a$ 이므로 변AE 또는 변EB 상에는 반드시 t와 같게 되는 점이 하나 존재한다. 이것을 L이라고 한다. AB, BE, AE상의 값이 모두 선형으로 변화한다고 가정하면, 직선 $T_n L$ 상의 값은 모두 같아진다. 따라서, $T_n L$ 을 이은 모든 선분이 等高線群으로 된다.

6. 컴퓨터 프로그램

변형률을 계산하는 컴퓨터 프로그램의 흐름도는 그림 6과 같다. 각 프로그램을 설명하면 다음과 같다.

- (1) R-AREL : ① 사각형요소의 절점번호 (요소데이터)와
② 등고선 작도용 사각형요소의 절점번호(등고선용 요소 데이터)를 자동적으로 제작한다($\xi=\eta=0$ 의 경우)
- (2) LINEAR : 디지털라이저나 좌표읽기용 현미경을 사용하여 절점좌표를 읽어서 데이터화일(변형 전후의 각각 1개씩)을 제작한다.
- (3) COORD : 변형 전후의 절점의 좌표를 아크릴판에 부착된 두 부동점을 기준으로 해서 좌표변환하여 좌표데이터를 작성한다(3 참조).
- (4) R-STRN : 변형 전후의 각 절점의 변위와 각 요소의 변형률(4 참조) 및 전체영역의 변형률이나 변위 등의 등고선(5 참조)을 계산하여 출력한다. 입력데이터로는 요소데이터, 등고선용 요소데이터, 변형 전후의 좌표 변환된 절점좌표데이터가 사용된다.

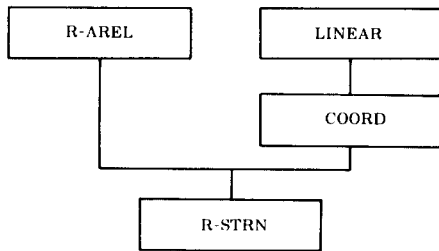


그림 6 Flow chart of computer program for calculating strain

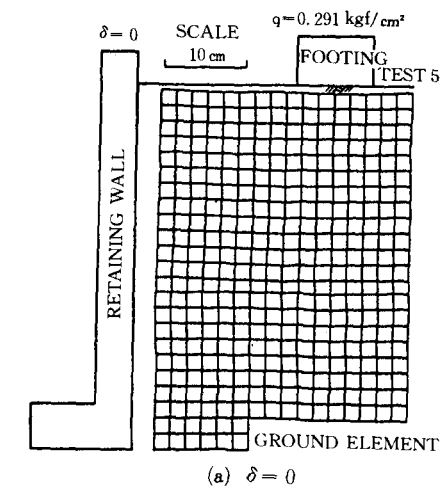
7. 모형실험 예

그림 7~14는 공기건조 합천사를 사용한 모형 지반내의 옹벽을 外側으로 수평이동($\delta=0\sim 12$ mm) 시켰을 때의 지반요소의 변형과 옹벽표면

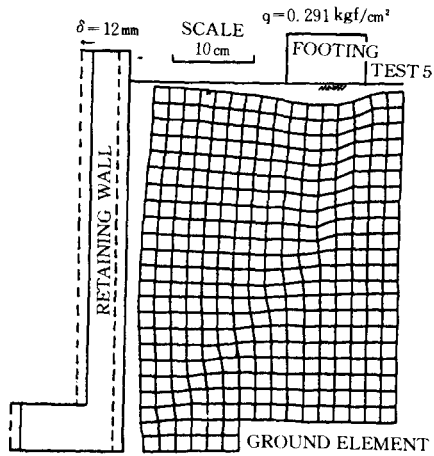
의 수직응력(수평토압)을 나타낸다. 상재하중으로는 $0.291\text{kgf}/\text{cm}^2$ 의 정하중을 가했으며, 지반의 건조밀도 $\gamma_d=1.62\text{gf}/\text{cm}^3$ 이다. 실험방법 등 상세한 것은 문헌 11), 12)를 참조 바란다. 그림 7은 지반요소의 변형을, 그림 8은 각 절점에서의 변위를 나타낸다. 그림 7, 8에서, 변위의 불연속면이라는 파괴면의 정의로부터 대략적인 파괴면의 위치를 구할 수 있다. 그러나, 보다 명확한 파괴면의 위치는 1에서 언급했듯이 최대전단변형률(γ_{\max})의 집중면으로 정의할 수 있다. 그림 9(a)에는 γ_{\max} 의 크기를 원으로 나타내었고, (b)는 γ_{\max} 의 등고선을 나타내고 있는데, 이를 이용하면 γ_{\max} 의 집중면의 위치를 비교적 쉽게 구할 수 있게 된다. 그림 10, 11은 각각 주변형률과 무신축방향(및 그 방향의 전단변형률)을 나타내고 있다. 그림 11에서, 파괴면의 방향은 무신축방향과 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림 12는 각 요소의 체적변형률(ϵ_v)의 크기로서, \bigcirc 가 체적팽창(+다이러턴시), \square 가 체적수축(-다이러턴시)을 나타낸다. 이 그림에서 파괴면 상에서 전단변형률이 가장 크므로, 집중적으로 체적팽창이 발생하고 있다는 것을 알 수 있다. 그림 13은 옹벽의 각 변위(δ)에서의 옹벽표면의 수직응력을 나타내고 있다. $\delta=12\text{mm}$ 의 경우, 옹벽 상부의 응력은 감소하고 32cm 정도의 깊이에서는 응력이 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 그림 7에서 볼 때, 옹벽의 상부 근방의 지반을 중심으로 하부지반이 회전함으로써 발생한다고 생각할 수 있다. 이와 같이, 지반의 변형과 응력을 연관시켜 생각하면, 보다 정확한 메카니즘을 알 수 있고 해석에도 큰 도움이 될 것이다. 그림 14는 보강재를 설치했을 때의 γ_{\max} 를 나타내고 있다. 보강재가 없는 경우의 그림 9(a)와 비교해 볼 때, 보강재에 의해서 지반변형이 대단히 크게 억제되며, 이에 따라 옹벽표면의 수직응력도 크게 감소된다는 것을 알 수 있다.

8. 결 론

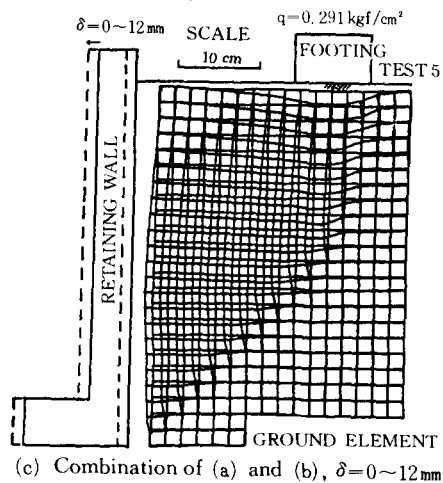
투명한 아크릴판 위에 고무메브레인을 부착해서 사진법으로 지반의 변형을 분석하는 위의 방법의 특징은 다음과 같이 요약될 수 있다.



(a) $\delta = 0$



(b) $\delta = 12\text{mm}$



(c) Combination of (a) and (b), $\delta=0\sim 12\text{mm}$

그림 7 Deformation of ground elements during horizontal movement(δ) of retaining wall outwards

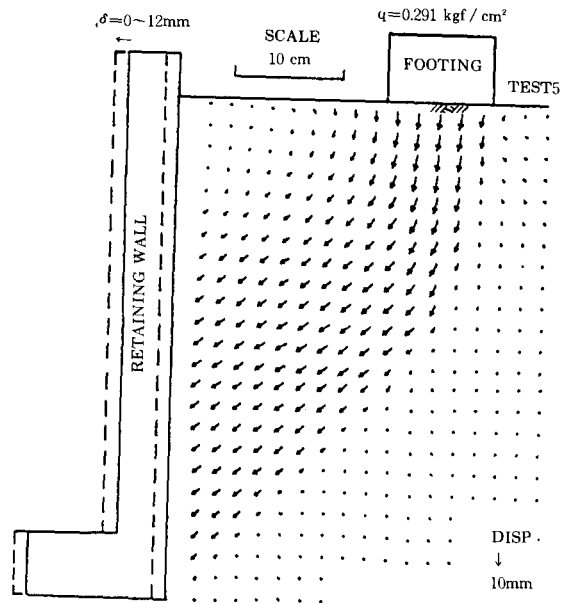
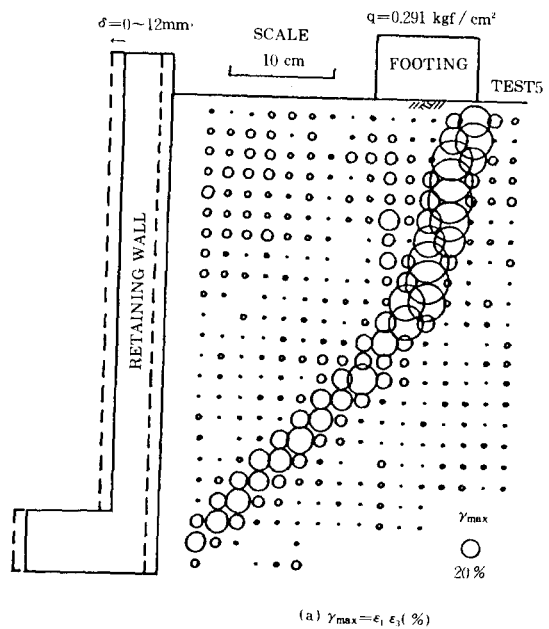
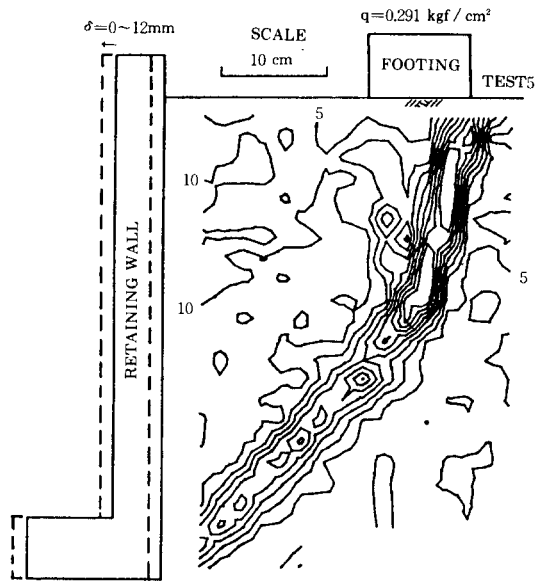


그림 8 Displacement of nodes of ground elements during horizontal movement(δ) of retaining wall outwards($\delta=0\sim 12\text{mm}$)



(a) $\gamma_{\max} = \epsilon_1, \epsilon_2 (\%)$



(b) CONTOUR of γ_{max} (%)
form 5% to 40%, increment 5%

그림 9 Maximum shear strain($\gamma_{max}=\epsilon_1, \epsilon_3$) of ground during horizontal movement(δ) of retaining wall outwards($\delta=0\sim 12mm$)

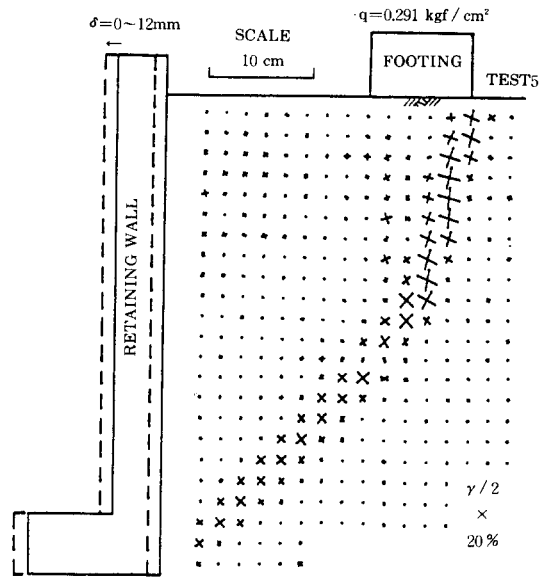


그림 11 Zero-extension direction of ground during horizontal movement(δ) of retaining wall outwards($\delta=0\sim 12mm$)

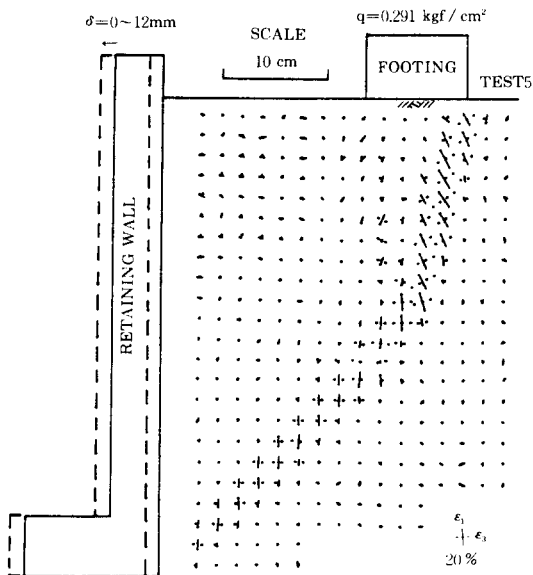


그림 10 Major(ϵ_1) and minor(ϵ_3) principal strain of ground during horizontal movement(δ) of retaining wall outwards($\delta=0\sim 12mm$)

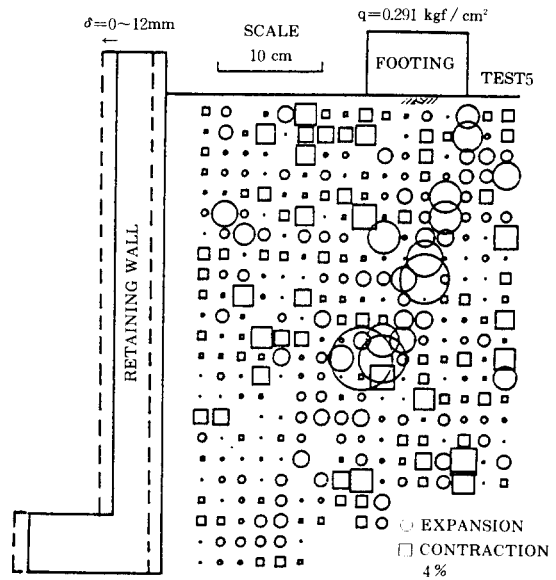


그림 12 Volumetric strain(ϵ_v) of ground during horizontal movement(δ) of retaining wall outwards ($\delta=0\sim 12mm$)

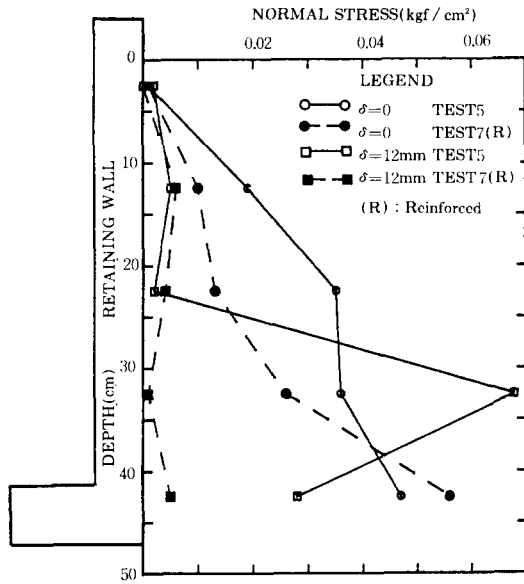


그림 13 Normal stresses on the surface of retaining wall along depth during horizontal movement ($\delta=0\sim 12\text{mm}$) of retaining wall in case that ground is reinforced or unreinforced by steel net

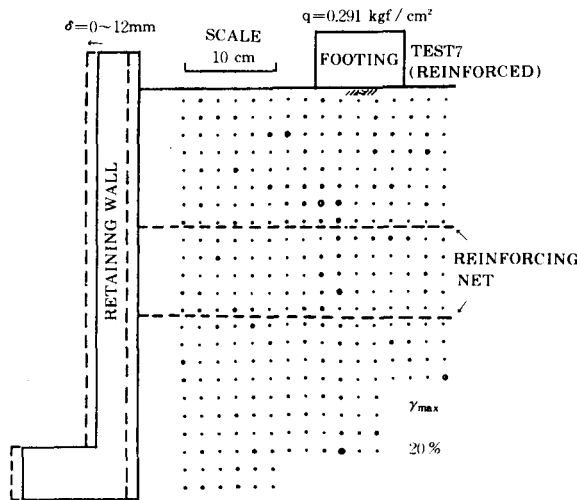


그림 14 Maximum shear strain ($\gamma_{\max}=\epsilon_1-\epsilon_3$) of ground during horizontal movement ($\delta=0\sim 12\text{mm}$) of retaining wall in case that ground is reinforced by steel net

(1) 지반내부의 변형을 아크릴판에 부착된 멤브레인을 통해 비교적 용이하게 관찰할 수

있으며, 멤브레인 상의 변형과 내부지반의 실제 변형의 오차는 극히 작다.

(2) 1차의 4절점 등매개변수 요소를 사용하면 실험 중 요소가 어떻게 변형되더라도 精度 높게 변형률을 구할 수 있다.

(3) 위와 같은 방법으로 구한 지반의 변형률로써 파괴면의 위치, 주변형률의 방향, 체적변형률 등을 구할 수 있다. 또한, 주변형률증분의 방향을 구함으로써 同軸性가정을 사용하면 주응력의 방향을 알 수 있으며, 또한 요소시험(예를 들면, 평면변형률 압축시험)에서 얻은 응력-변형률 관계를 이용하면 요소에 작용하는 주응력의 크기와 방향도 알 수 있다. 따라서, 퇴적면과 주응력 방향의 각도에 따른 강도의 이방성까지도 고려가 가능하게 된다. 이에 대해서는 연구가 진행중이며 사진기 및 지반의 위치에 따른 사진상의 誤差 補正도 앞으로의 과제라 하겠다.

參考文獻

1. Frydman, S. and Beasley, D.H. "Centrifugal modelling of riverbank failure," J. Geotech. Engng. Div., Proc. ASCE, Vol. 102, 1976, pp. 395-409.
2. Baker, R. "Determination of the critical slip surface in slope stability computations," International Journal for Numerical and Analytical methods in Geomechanics, Vol. 4, 1980, pp. 333-359.
3. 谷 和夫, "砂地盤上の浅い基礎の支持力機構," 東京大学修士論文, 1986. 3.
4. Takagi, N., Nishio, N., Yoneyama, K. and Shimamura, K., "Development of a strain measurement system for soils and its application to sand around a buried pipe," Soils and Foundations, Vol. 23, No. 3, 1983. 9, pp. 65-79.
5. Andrawes, K.Z. and McGown, A., "Stereo-photogrammetric measurements of the kinematics within plane strain model of reinforced embankments," Developments in Soil Mechanics and Foundation Engineering-1, pp. 231-261.
6. Butterfield, R., Harkness, R.M. and Andrawes, K. Z., "A stereo-photogrammetric method for measuring displacement fields," Geotechnique, Vol. 20, No. 3, 1970, pp. 308-314.
7. 中村 伸也, 龍岡 文夫, 新野 太, "砂の平面ひずみ Ⅱ"

- 縮試験におけるひずみ分布,” 第22回土質工学研究発表
会, 1987. 6, pp. 349-352.
8. Roscoe, K.H., “The influence of strains in soil
mechanics,” *Geotechnique*, Vol. 20, No. 2, 1970, pp.
129-170.
9. 林 鍾鐵, 龍岡 文夫, 朴 性裁, “平面變形率狀態에 있는
鉛直地盤앵커의 破壞모-드,” 大韓土質工學會誌, 第6
卷 第1號, 1990. 3, pp. 43-56.
10. Tatsuoka, F., “On the angle of interface friction for
cohesionless soils,” *Soils and Foundations*, Vol. 25,
No. 4, 1985. 12, pp. 134-141.
11. 주 인곤, 임 중철, 박 성재, “보강토공법에 의한 옹벽의
토압경감효과,” 대한토목학회 발표회, 1990.10, pp.
458-461.
12. 朴 鐫富, 林鍾鐵, 朴 性裁, “擁壁에 作用하는 土壓과
壁面摩擦角에 대한 考察,” 1990. 10, pp. 454-457.

(접수일자 1991. 7. 15)