

시멘트 콘크리트 포장구조계의 구조거동의 해석방법에 관한 비교연구

A Comparative Study on the Analytical Methods for Structural Behavior of Cement Concrete Pavement System

이 승 원* · 김 문 겸** · 황 학 주***
Lee, Seong Won · Kim Moon Kyum · Hwang, Hak Joo

Abstract

Various analytical procedures for the structural behavior of concrete pavement system are studied in order to identify a suitable method which will be incorporated in the pavement management system using nondestructive test and mechanistic evaluation. A typical four layered system is adopted and analyzed using 3 dimensional finite elements, plane strain elements, plates with Winkler foundation, and plates with Burmister foundation. Numerical analysis results of various structural analysis procedures are compared and analyzed based on displacements and stresses. It is concluded, after analysis of merits and demerits of the procedures, that Burmister foundation analysis procedure is the most suitable procedure for implementation for the analysis of stresses and displacements because of its accuracy and simplicity.

要 旨

본 연구에서는 비파괴 시험 및 구조해석에 의한 포장구조계상태의 판단 및 유지관리시스템에 이용하고자 포장구조계의 여러 해석방법을 구조거동면에서 분석하였다. 해석대상으로는 4층 구조체로 된 포장구조계를 택하여 3차원 유한요소, 평면변형률 유한요소, 판과 Winkler 기초, 판과 Burmister 기초로 해석을 실시하였다. 각 해석 방법에 따른 수치해석 결과는 변위와 응력을 기준으로 비교 분석하였다. 각 해석 방법의 장단점을 분석한 후 그 결과 Burmister 기초해석방법이 수치해석이 용이하며 콘크리트 포장구조체의 구조적인 거동과 가장 비슷하므로 포장구조체의 변위 및 응력해석에 가장 효율적인 방법이라는 결론을 얻었다.

*정회원 · 연세대학교 대학원 박사과정, 토목공학과

**정회원 · 연세대학교 공과대학 조교수, 토목공학과

***정회원 · 연세대학교 공과대학 교수, 토목공학과

1. 서 론

최근에 고속도로 가설에 시멘트 콘크리트 포장의 사용이 급증하고 있다. 그러나 우리나라와 같이 산업이 급속도로 발전함에 따라 교통량이 증가하고 차량이 증량화되어 기존 포장의 파손 및 내하력 저하가 가중되고 있는 현실을 볼 때, 보다 과학적인 방법을 이용하여 포장구조의 내구성을 신속히 추정함으로써 보수시기 결정, 잔존수명 예측, 덧씌우기 설계 등을 효율적으로 수행할 필요가 있다. 이와 같이 포장구조체의 내구성을 정확히 추정하기 위해서는 포장구조체의 거동에 대하여 구조해석을 합리적으로 할 수 있는 기법이 요구되고 있다.

시멘트 콘크리트 포장구조체에 대한 구조해석은 1926년 Westergaard에 의해 시도된 이후 수 많은 연구가 수행되었다. Westergaard^(1, 2)는 포장체구조를 Winkler 기초로 모형화된 노상위에 얇은 탄성판이 놓여져 있는 구조로 가정하여, 가장자리, 모서리, 중앙 등 세 경우의 하중위치에 따른 콘크리트 포장판의 응력 및 변위를 산정할 수 있는 이론해를 제안하였다. 1952년 Pickett와 Ray⁽³⁾는 포장체구조를 반무한 탄성체 위에 탄성판이 놓여져 있는 구조로 가정하여 임의의 재하위치에 따른 휨모멘트와 처짐을 계산할 수 있는 영향선도를 해석하였다.

콘크리트 포장구조체의 수치해석적 기법으로 1973년에 Huang과 Wang⁽⁴⁾은 포장체를 Winkler 기초 위에 얇은 판이 놓여 있는 구조로 모형화한 유한요소 해석프로그램을 개발하였다. 이들은 여러가지 포장체를 해석하여 Westergaard의 이론해 및 AASHO의 실험자료 그리고 Pickett와 Ray의 영향선도와 각각 비교하여 개발된 프로그램의 타당성을 검증하고 임계하중 위치에 대하여 연구하였다. 그 후 Huang은 기초를 반무한 탄성체로 해석하는 강성기초와 층탄성체로 해석하는 층기초로 모형화하는 프로그램을 추가하여 Winkler, 강성, 층기초 해석 상호간의 해석결과를 비교분석하였다⁽⁵⁾. 이외에도 최근에는 유한요소법을 이용하여 여러가지의 포장체 구조해석 프로그램이 개발되어 사용되고 있다^(6, 7).

본 연구에서는 현재 콘크리트 포장구조체의 해

석에 사용되고 있는 해석기법들을 비교 분석함으로써 효율적인 해석기법을 제안하여 포장구조체의 비파괴시험과 구조해석에 의한 포장체상태의 판단에 필수적으로 필요한 기본 구조해석방법으로 이용하고자 한다.

2. 시멘트 콘크리트 포장구조체의 해석기법

2.1 기초모형 이론에 따른 분류

시멘트 콘크리트 포장 구조체의 해석기법은 콘크리트 판과 기초를 모형화하는 방법에 따라서 다음과 같이 분류할 수 있다. 콘크리트 판과 기초를 같은 요소이론으로 모형화하는 경우로서는 3차원 요소를 사용한 3차원 유한요소해석, 평면변형률요소 또는 축대칭요소를 사용한 2차원 유한요소해석 등이 있다. 콘크리트 판과 기초를 각각 다른 요소이론으로 모형화하는 경우로서는 콘크리트판은 유한 판요소로 모형화하고 기초는 다층 탄성이론으로 모형화하는 Burmister 기초해석방법, 기초를 탄성기초로 모형화하는 Winkler 기초해석방법, 기초를 반무한대의 탄성체로 가정한 강성기초해석방법 등이 있다⁽⁸⁾.

2.2 유한 판 요소

콘크리트 판을 유한요소해석하는 경우, 한 요소에서의 평형조건식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다⁽⁹⁾.

$$[K]\{\delta\} = \{F\} \quad (1)$$

여기서 $[K]$ 는 판 구조의 강성도 행렬, $\{\delta\}$ 는 절점 변위벡터, 그리고 $\{F\}$ 는 절점하중벡터이다. 그림 1에서와 같이 각 절점 당 z방향의 처짐 w , x방향의 회전각 θ_x , y방향의 회전각 θ_y 등 3개의 자유도를 가진 4 절점 요소를 사용할 경우에 한 요소의

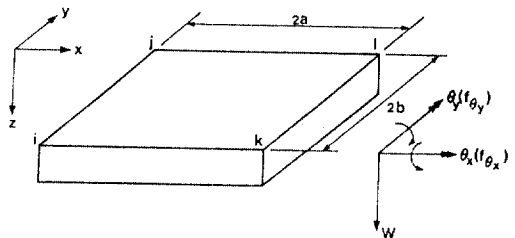


그림 1. 직사각형 판 요소의 처짐과 하중

자유도는 12가 되며 강성도 행렬은 식 (2)와 같이 된다.

$$[K]_{12 \times 12} = \int_v [B]^T_{12 \times 3} [D]_{3 \times 3} [B]_{3 \times 12} dV \quad (2)$$

식 (2)에서 [B]는 절점변위 - 변형을 행렬로서

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 [N_i]}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 [N_j]}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 [N_k]}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 [N_l]}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 [N_i]}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 [N_j]}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 [N_k]}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 [N_l]}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 [N_i]}{\partial x \partial y} & 2 \frac{\partial^2 [N_j]}{\partial x \partial y} & 2 \frac{\partial^2 [N_k]}{\partial x \partial y} & 2 \frac{\partial^2 [N_l]}{\partial x \partial y} \end{bmatrix}_{3 \times 12} \quad (3)$$

이다. 여기서 i, j, k, l은 4개의 절점번호이며, [N]은 형상함수이다. 그림 1에 도시된 좌표축을 그림 2와 같이 요소의 중심에서 (ξ, η)로 다시 설정하면 $\xi = x/a, \eta = y/b$ 이며, [N]은 식 (4)와 같이 할 수 있다.

$$[N_i] = 1/8[(\xi\xi+1)(\eta_i\eta+\eta_1)(2+\xi\xi+\eta_i\eta-\xi^2-\eta^2), \\ b \eta_i(\eta_i\eta+\eta_1)^2(\eta_i\eta-1)(\xi\xi+1), \\ a \xi_i(\xi\xi+1)^2(\xi\xi-1)(\eta_i\eta+1)]_{1 \times 3} \quad (4)$$

여기서 (ξ_i, η_i)는 i 절점에서의 (ξ, η) 좌표를 표시한다. 마찬가지로 절점 j, k, l의 형상함수는 식 (4)에서 i를 각각 j, k, l로 바꾸어 구할 수 있다. 또한 식 (2)에서의 [D]는 판의 물성에 따른 탄성행렬로서 식 (5)와 같다.

$$[D] = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\mu)/2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 E와 μ 는 각각 판의 탄성계수와 포아손비이며 t는 판두께이다.

절점하중벡터와 절점변위벡터는 다음과 같이 정리할 수 있다.

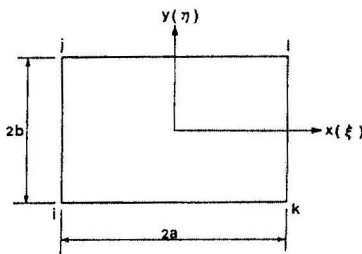


그림 2 직사각형 판 요소의 ξ - η 좌표축

$$\{F\}^T = \{f_{w_i}, f_{x_i}, f_{y_i}, f_{w_j}, f_{x_j}, f_{y_j}, f_{w_k}, f_{x_k}, f_{y_k}, f_{w_l}, f_{x_l}, f_{y_l}\}^T \quad (6)$$

$$\{\delta\}^T = \{w_i, \theta_{x_i}, \theta_{y_i}, w_j, \theta_{x_j}, \theta_{y_j}, w_k, \theta_{x_k}, \theta_{y_k}, w_l, \theta_{x_l}, \theta_{y_l}\}^T \quad (7)$$

식 (2), (6), (7)로 구성되는 식 (1)은 다음에 기술되는 기초의 강성도와 결합되어 일반적인 조합 방법에 의하여 전체 구조계의 평형방정식을 구성하게 된다.

2.3 Burmister 기초해석

Burmister 기초해석방법은 포장구조체를 콘크리트 판과 다층탄성기초로 나누고 각 이론에 따라 강성을 구한 다음 이를 접침법에 의해 포장체 전 구조의 강성도 행렬을 구하는 방법이다. 그러므로 포장구조계 거동의 기본식은 하나의 판요소에 대하여 식(8)과 같이 수정된다.

$$\{F\} = [K]\{\delta\} + [H]\{\delta'\} \quad (8)$$

여기서 [H]는 기초의 강성도 행렬이고, $\{\delta'\}$ 은 기초에 의하여 강성이 추가되는 자유도로서 판의 회전에 대한 기초의 강성을 무시하면 식 (9)와 같이 된다.

$$\{\delta\}^T = \{w_i, 0, 0, w_j, 0, 0, w_k, 0, 0, w_l, 0, 0\}^T \quad (9)$$

기초의 강성도 행렬 [H]는 Burmister의 다층탄성 이론에 의해 기초 즉, 노상 및 보조기층의 물성에 따른 유연도 행렬을 구하고 이의 역행렬로서 구해진다. 포장체기초를 물성이 상이한 다층탄성구조체로 해석할 수 있는 다층탄성이론은 Burmister, D. M.⁽¹⁰⁾에 의해 발표되었으며, Michelow, J.⁽¹²⁾는 이를 확장하여 매트릭스를 사용한 다층탄성이론을 정립하였다.

콘크리트 포장구조계는 최하단의 반무한 층 위에 물성이 상이한 일련의 수평층으로 구성된 그림 3과 같은 다층탄성구조체로 이상화될 수 있다. 그림 3은 지반 및 하중조건의 대칭성을 고려하여 다층탄성구조체를 3차원 극좌표계로 나타낸 것이다.

탄성해석을 위해 각 층은 균질, 등방인 이상적인 탄성체로서 수평방향으로 무한하게 놓여 있으며, 모든 층들은 완전 접합되어 있어 각 층의 경계면에서 변위 및 응력은 연속이라고 가정한다. 이러한 구조체의 i 번째 층에 있어서 평형방정식과 적합방정식을 만족시키는 조건은 다음과 같이 응력함수

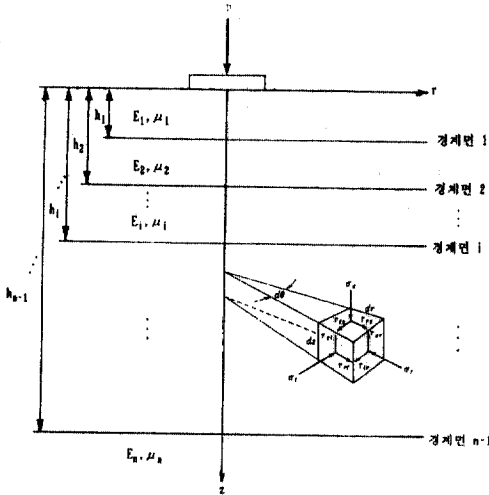


그림 3 다층 탄성구조

ϕ 를 사용하여 쓸 수 있다⁽¹³⁾.

$$\nabla^4 \phi_i = 0 \quad (10)$$

식 (10)을 만족시키는 일반해로서 식 (11)과 같은 0차 1종 Bessel함수 $J_0(mr)$ 과 적분상수 A, B, C, D를 포함하는 함수를 사용할 수 있다.

$$\phi_i(r, z, m) = J_0(mr) \{ (A_i + B_i z) e^{mz} + (C_i + D_i z) e^{-mz} \} \quad (11)$$

이에 따른 i번째 층에서의 응력 및 변위는 식 (12)-식 (15)와 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_z^i = m^2 J_0(mr) \{ (1 - 2\mu_i) [B_i e^{mz} + D_i e^{-mz}] - m [(A_i + B_i z) e^{mz} - (C_i + D_i z) e^{-mz}] \} \quad (12)$$

$$\tau_{rz}^i = m^2 J_1(mr) \{ \mu_i [B_i e^{mz} - D_i e^{-mz}] + m [(A_i + B_i z) e^{mz} + (C_i + D_i z) e^{-mz}] \} \quad (13)$$

$$w^i = \frac{1 + \mu_i}{E_i} m J_0(mr) \{ 2(1 - 2\mu_i) [B_i e^{mz} - D_i e^{-mz}] - m [(A_i + B_i z) e^{mz} + (C_i + D_i z) e^{-mz}] \} \quad (14)$$

$$u^i = \frac{1 + \mu_i}{E_i} m J_1(mr) \{ B_i e^{mz} + D_i e^{-mz} + m [(A_i + B_i z) e^{mz} - (C_i + D_i z) e^{-mz}] \} \quad (15)$$

식 (11)-식 (15)의 상수들은 표면에 $p(m)$ $J_0(mr)$ 의 하중이 작용할 때 표면에서 $\tau_{rz}=0$ 이고 $\sigma_z = -p(m) J_0(mr)$ 이 되어야 하고, 각 층의 접합면에서 응력과 변위는 연속적이며, 최하단에서의 응력과 변위가

무시될 수 있다는 조건으로부터 결정될 수 있다⁽¹³⁾. 따라서, 임의의 수직변위 자유도에 주어진 단위하중에 의한 임의의 절점에서의 수직변위를 구할 수 있으므로 판 요소의 각 절점에 대한 기초의 유연도 행렬을 구할 수 있다. 기초의 강성도 행렬 $[H]$ 는 이 유연도 행렬의 역행렬이 된다.

2.4 Winkler 기초해석

Winkler 기초해석방법은 포장구조체를 콘크리트 판과 Winkler 기초로 나누어 각각의 강성도 행렬을 구하는 방법이다. 즉, 판 하부 임의의 지점에서 판에 대한 지반의 반력은 그 지점의 처짐에 비례한다고 보는 것이다. 그러므로 포장 구조체 거동의 기본식은 식 (16)과 같이 된다.

$$\{F\} = [K]\{\delta\} + [W]\{\delta'\} \quad (16)$$

여기서 $[W]$ 는 기초의 강성도 행렬로서 기초의 지반지지력계수를 k 로 일정하다 할 때, 한 요소 내의 지반강성을 lumped 시키면 $[W]$ 는 각 수직변위 자유도에 대하여 $k \cdot a \cdot b$ 의 강성을 갖는 대각행렬이 된다. 여기서 $a \cdot b$ 는 그림 1에서 1개 요소의 1/4 면적이다.

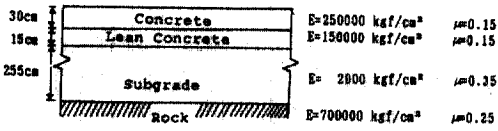
지반지지력계수 k 는 지반의 상대적인 물성에 따라 결정되는 계수로 Vesic 등⁽¹⁴⁾은 이에 대하여 식 (17)과 같은 식을 추천하였다.

$$k = (E_i/E_c)^{1/3} E_i / [(1 + \mu_i^2) h] \quad (17)$$

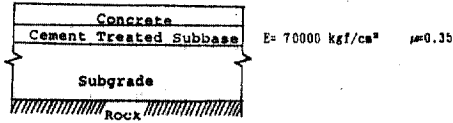
여기서 E_i 와 μ_i 는 각각 기초의 탄성계수와 포아손비이며 E_c 는 콘크리트의 탄성계수, h 는 콘크리트의 두께이다.

3. 해석모형

본 연구에서는 시멘트 콘크리트 포장구조체에 대하여 3차원과 2차원 유한요소해석, 그리고 Burmister 기초해석, Winkler 기초해석을 각각 실시하고 그 결과를 비교분석하기 위하여 다음과 같은 해석모형을 설정하였다. 해석대상인 포장구조체는 그림 4(a), (b)와 같이 국내에서 일반적으로 사용되는 바와 같이 4개의 층으로 이루어진 구조이다. 시멘트 콘크리트판은 $4m \times 6m$ 인 경우를 택하였다. 그림 4(a)는 무근 콘크리트와 빈 배합 콘크리트, 노상과 암반으로 층이 구성된 경우이고, 그림 4(b)는 빈 배합 콘크리트 대신 안정처리 보조 기층을 사용한 경우이다. 하중은 실제 설계하중을 고려하여 중앙 (P1)과 가장자리 (P2) 그리고 모서리 (P3)에



a) 빈 배합 콘크리트 층을 사용한 경우



b) 안정처리 보조기층을 사용한 경우

그림 4. 해석 대상

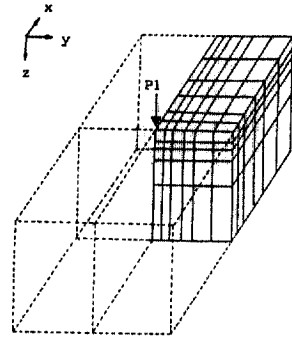
4100kgf의 집중하중이 작용하는 경우를 고려하였다.

그림 5(a), (b), (c)는 각 하중경우에 대하여 3차원 유한요소해석을 실시할 때의 요소망이다. 그림 5(a)와 같이 판 중앙에 하중이 가해지는 경우 해석대상은 x, y축에 대하여 대칭성을 가지고 있으므로 전체의 1/4 영역을 요소망으로 구성하였다. 그림 5(b)와 같이 판 가장자리에 하중이 가해지는 경우에는 해석대상은 x축에 대하여 대칭성을 가지고 있으므로 전체의 1/2 영역을 요소망으로 구성하였다.

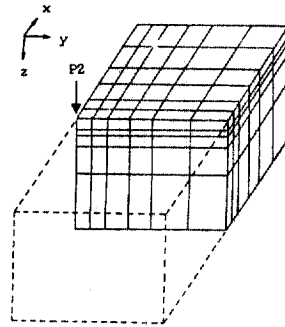
그림 6(a), (b)는 각 경우의 평면변형을 유한요소망이다. 이 경우의 하중은 판과 기초의 경계면에서 하중재하점 하부에서의 수직변위가 3차원 해석치와 일치하도록 등가선하중으로 환산하여 해석하였다. 이 경우도 y축에 대한 대칭성을 이용하여 1/2 영역을 요소망으로 구성하였다. 본 연구에서 평면변형을 및 3차원 유한요소해석은 SAP4를 사용하여 수행하였다⁽¹⁵⁾.

그림 7은 Winkler 기초를 사용한 경우의 해석모형이다. 지반 지지력 계수 k는 판구조가 콘크리트와 빈 배합 콘크리트 또는 안정처리기층 등 2층으로 되어 있으므로 Vesic식 내 E_c 의 결정에 있어서 k의 상함으로써 콘크리트 층의 값(Winkler 1), 하함으로써 보조층의 값(Winkler 2)을 각각 사용하였다.

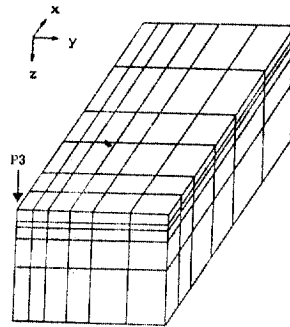
그림 8은 Burmister 기초를 사용한 경우의 해석모형이다. Winkler 및 Burmister 기초해석에서 콘크리트 층과 빈 배합 콘크리트 혹은 안정처리 보



a) 판 중앙에 하중이 가해지는 경우



b) 판 가장자리에 하중이 가해지는 경우



c) 판 모서리에 하중이 가해지는 경우

그림 5. 3차원 유한요소망

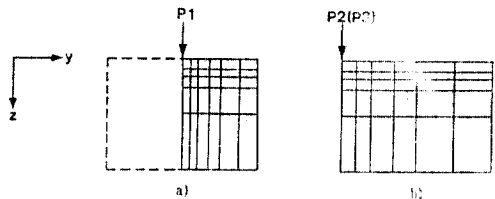


그림 6. 2차원 유한요소망

조기층은 모두 판 구조로 해석하였다.

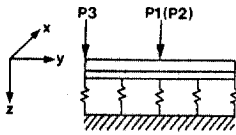


그림 7. Winkler 기초모형

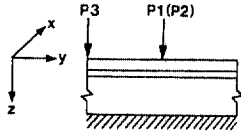


그림 8. Burmister 기초모형

4. 결과분석

4.1 판 중앙에 하중이 가해지는 경우

빈 배합 콘크리트 층을 사용한 경우의 수치해석 결과를 그림 9(a)로 부터 9(d)까지 도시하였다. 그림 9(a)와 9(b)는 노상과 판의 경계면에서의 y축 방향으로의 수직변위의 변화를 비교한 것이다. 2차원 해석의 경우, 재하점 하부의 수직변위를 등가로 하기 위한 등가선하중은 7.93kgf/cm이다. 2차원 해석치는 3차원 해석치에 비하여 하중점에서 벗어날 수록 그 크기가 커지는데 이는 2차원 해석의 경우에 사용된 하중이 등가선하중으로써 그 실제 크기는 3차원 하중의 크기보다 크기 때문으로 사료된다. 또한 Burmister 해석치는 3차원 해석치에 비하여 하중점 부근에서는 약간 큰 값을 보이나 점차 차이가 줄어들다가 포장체 끝 부분에서는 작은 값을 갖는다. 이는 Burmister 기초해석의 경우 기초가 x, y축방향으로 무한대의 경계를 갖고 포장체 끝 부분에서는 자유단이기 때문이며 이는 실제 시멘트 콘크리트 포장구조체의 거동과 비슷하다고 판단된다. 그림에서 Winkler 1과 2의 추정된 지반 지지력계수는 각각 7.66kgf/cm³과 9.09kgf/cm³인데, 이 계수의 적절한 추정치 해석결과에 크게 영향을 미침을 알 수 있다.

그림 9(c)와 9(d)는 노상과의 경계면에서의 y방향응력을 y축상에서 비교한 것이다. 재하점 하부의 응력에서 각 해석결과에 차이가 있음을 알 수 있

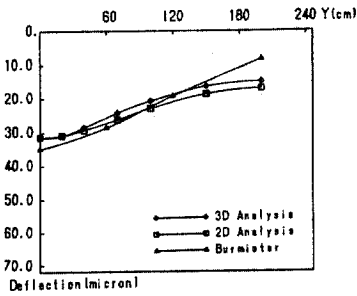
다. 2차원 및 3차원 해석의 경우는 요소 내의 응력 분배에 의하여 응력집중부의 응력경사를 정확히 해석하지 못한다고 사료된다. Burmister 기초와 Winkler 기초의 경우는 근사한 해석결과를 보이고 있다. 즉, Winkler 기초해석의 경우 콘크리트 포장 판하부의 응력은 지반지지력계수의 영향을 크게 받지 않고 콘크리트판의 제원 및 물성에 크게 좌우됨을 알 수 있다.

그림 9(e)에서 9(h)는 안정처리 보조기층을 사용한 경우의 해석결과이다. 2차원 유한요소해석의 경우, 등가선하중은 8.45kgf/cm이고 추정된 지반지지력계수는 각각 7.66kgf/cm³과 11.71kgf/cm³이다. 그림 9(e)와 9(f)는 수직변위, 그림 9(g)와 9(h)는 y방향응력을 비교한 것이다. 빈 배합 콘크리트를 사용하는 경우와 동일한 경향을 관찰할 수 있다.

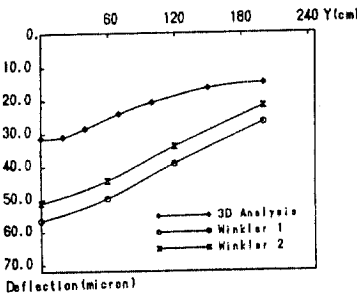
4.2 판 가장자리에 하중이 가해지는 경우

빈 배합 콘크리트층을 사용한 경우의 수치해석 결과를 그림 10(a)에서 부터 10(d)까지 도시하였다. 앞서와 마찬가지로 그림 10(a)와 10(b)는 노상과 판의 경계면에서의 y축 방향으로의 수직변위의 변화를 비교한 것이다. 2차원 해석의 경우, 재하점 하부의 수직변위를 등가로 하기 위한 등가선하중은 13.78kgf/cm이다. Burmister 기초해석치는 3차원 해석치보다 작음을 알 수 있다. 이는 3차원해석치는 y방향으로의 경계조건으로 하중이 y방향으로 충분히 분산되지 못한 결과라고 판단된다. 판 가장자리에 하중이 가해지는 경우도 Burmister 기초해석의 경우 기초가 x, y축 방향으로 무한대의 경계를 갖고 포장체 끝 부분에서 자유단이기 때문에 하중분산을 충분히 고려할 수 있으므로 실제 거동과 비슷하다고 판단된다. Winkler 기초해석의 경우에는 재하점 부근에서 3차원해석치와 큰 차이를 보이며 또한 Winkler 1, 2의 해석치 간 차이가 하중이 판중앙에 가해지는 경우보다 더 큼을 알 수 있다.

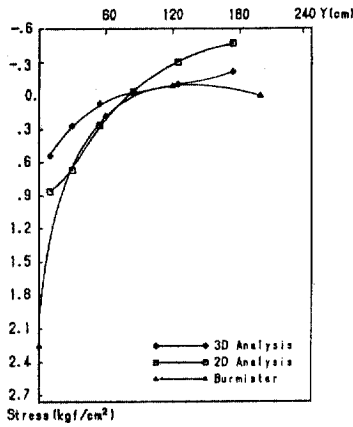
그림 10(c)와 10(d)는 노상과의 경계면에서의 y방향응력을 y축상에서 비교한 것이다. Burmister 기초해석과 Winkler 기초해석은 2차원 및 3차원해석보다 실제 콘크리트 포장구조체의 거동과 비슷하다고 판단된다. 안정처리 보조기층을 사용한 경우의 해석결과도 빈 배합 콘크리트를 사용하는 경우와 동일한 경향을 관찰할 수 있었다.



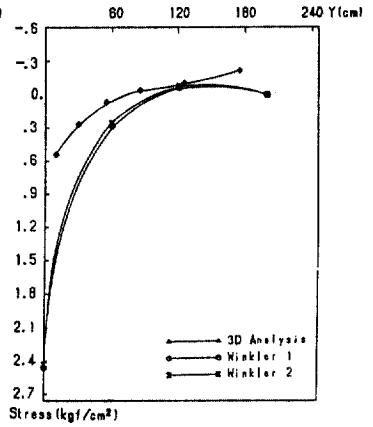
a) 빈 배합 콘크리트 층의 경우, 수직변위의 비교 1



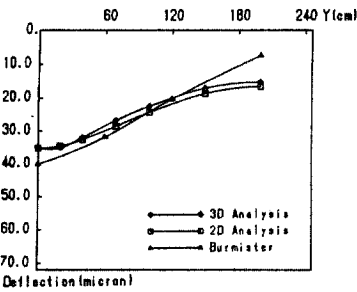
b) 빈 배합 콘크리트 층의 경우, 수직변위의 비교 2



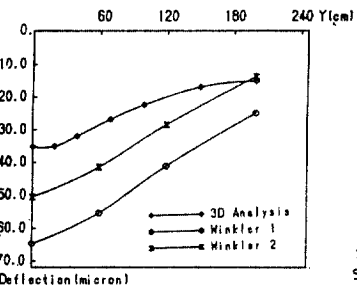
c) 빈 배합 콘크리트 층의 경우, 수평응력의 비교 1



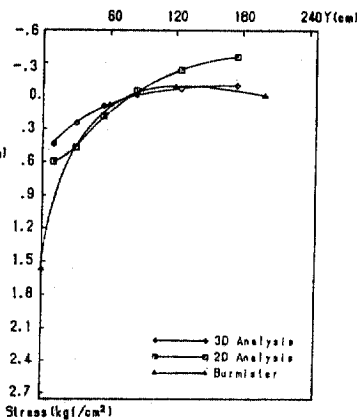
d) 빈 배합 콘크리트 층의 경우, 수평응력의 비교 2



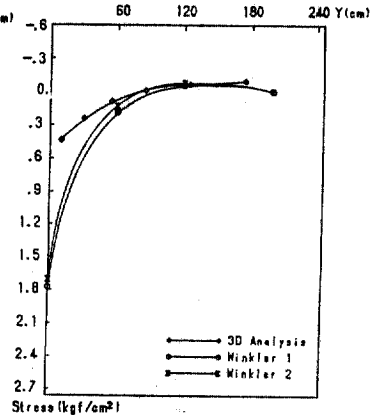
e) 인경처리 보조기층의 경우, 수직변위의 비교 1



f) 인경처리 보조기층의 경우, 수직변위의 비교 2

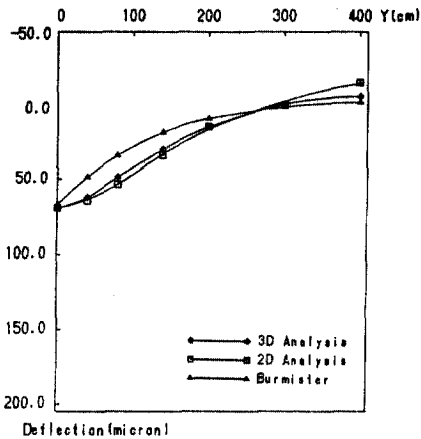


g) 인경처리 보조기층의 경우, 수평응력의 비교 1

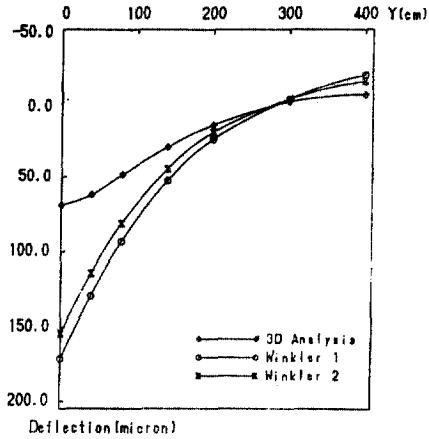


h) 인경처리 보조기층의 경우, 수평응력의 비교 2

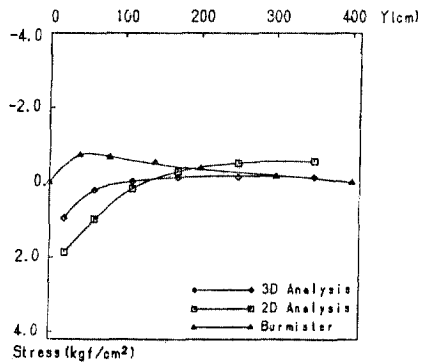
그림 9. 판 중앙에 하중이 가해지는 경우



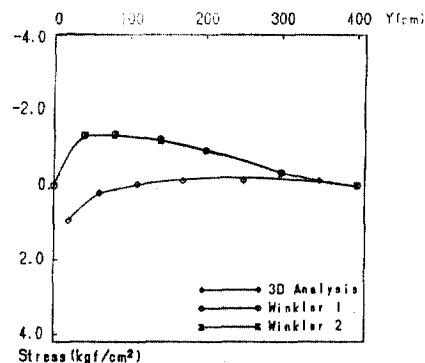
a) 빈 배합 콘크리트층의 경우, 수직변위의 비교 1



b) 빈 배합 콘크리트층의 경우, 수직변위의 비교 2



c) 빈 배합 콘크리트층의 경우, 수평응력의 비교 1



d) 빈 배합 콘크리트층의 경우, 수평응력의 비교 2

그림 10. 판 가장자리에 하중이 가해지는 경우

4.3 판 모서리에 하중이 가해지는 경우

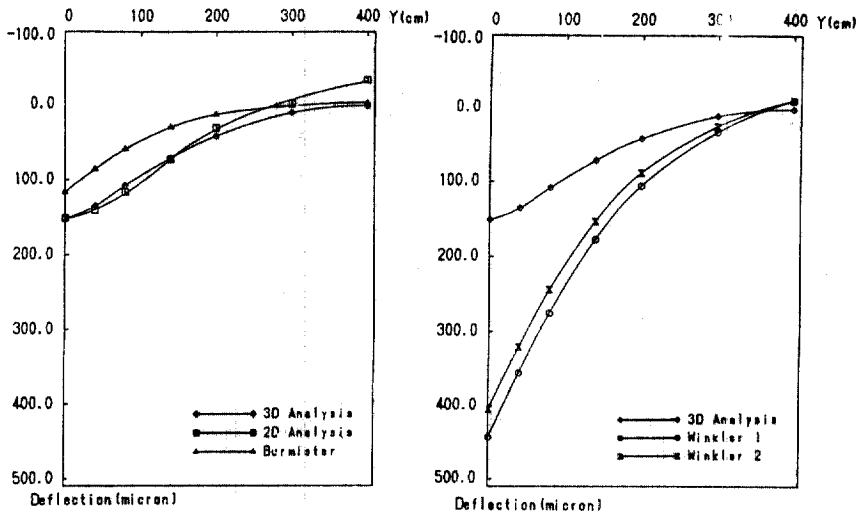
빈 배합 콘크리트층을 사용한 경우의 수치해석 결과를 그림 11(a)에서 부터 11(d)까지 도시하였다. 그림 11(a)와 11(b)는 노상과 판의 경계면에서의 y 축 방향으로의 수직변위의 변화를 비교한 것이다. 2차원 해석의 경우, 재하점 하부의 수직처짐을 등가로 하기 위한 등가선하중은 30.12kgf/cm이다. Burmister 기초해석치가 3차원 해석치보다 작으며 그 차이는 판 가장자리에 하중이 가해지는 경우에 비해 더 큼을 알 수 있다. 이는 3차원 해석치는 x, y 방향으로의 경계조건으로 하중이 x, y 축 방향으로 충분히 분산되지 못하므로 해석치가 크게 된 것으로 판단된다.

그림 11(c)와 11(d)는 노상과 경계면에서의 y방

향 응력을 y축상에서 비교한 것이다. 이 경우도 판 가장자리에 하중이 가해지는 경우와 비슷한 경향을 보이므로 Burmister 기초해석과 Winkler 기초해석이 실제 콘크리트 포장구조체의 거동과 비슷하다고 판단된다. 안정처리 보조기층을 사용한 경우의 해석결과도 빈배합 콘크리트를 사용하는 경우와 동일한 경향을 관찰할 수 있었다.

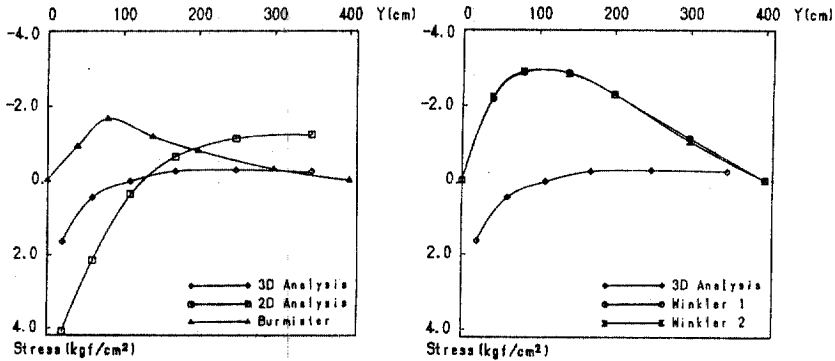
4.4 해석결과의 비교분석

2차원 유한 요소해석은 하중에 따라 등가선하중을 적절히 산정해야 하며 또한 등가선하중은 실제의 작용하중 조건과는 일치되지 않기 때문에 그 해석의 용이함에도 불구하고 해석조건상 어려움을 가지고 있다. 그러나, 등가선하중의 산정이 적절히 될 경우에는 3차원 해석한 결과와 상당히 유사한



a) 빈 배합 콘크리트 층의 경우, 수직변위의 비교 1

b) 빈 배합 콘크리트 층의 경우, 수직변위의 비교 2



c) 빈 배합 콘크리트 층의 경우, 수평응력의 비교 1

d) 빈 배합 콘크리트 층의 경우, 수평응력의 비교 2

그림 11. 판 모서리에 하중이 가해지는 경우

결과를 얻을 수 있다.

Winkler 기초해석의 경우는 다른 해석방법보다 계산량이 적으므로 용이하고 경제적인 해석방법이나 포장구조체의 지반을 가상의 일정 지반지지력 계수 k 로 추정하여 해석하여야 하므로 실제 여러 층으로 이루어진 지반의 물성을 정확히 고려할 수 없는 단점이 있다. 그러나 콘크리트 포장판의 응력만을 산정하고자 할 때는 응력의 크기가 지반지지력 계수에 의하여 크게 좌우되지 않으므로 효율적인 방법이 될 수 있다. 다만, 응력이 정확히 산정된다고 하여도 이에 대응되는 변위는 다른 해석결과와 큰 차이를 보이는 것에 주의할 수 있다.

Burmister 기초해석의 경우는 기초가 만무한체의 층구조로 모형화 되므로 기초 각 층의 물성을

고려할 수 있다. 그리고 Burmister 기초해석치를 3차원 해석치와 비교하여 볼때 변위는 비슷하나 응력은 차이를 보임을 알 수 있다. 일반적으로 3차원 유한요소해석에서 변위는 비교적 실제 상황에 근접하나, 응력집중부의 응력경사를 정확히 해석해 내지 못하는 단점이 있고, 콘크리트층 밑의 기초에 인위적인 경계조건을 주어 해석하게 되므로, 기초에서의 응력집중과 하중분산을 충분히 고려하는 Burmister 기초해석에서의 응력해석이 보다 정확한 것으로 유추된다. 또한 Burmister 기초해석은 3차원 해석에 비하면 모형화 및 수치해석이 용이한 장점을 갖는다.

그러므로 위의 여러가지 해석방법중에서 Burmister 기초해석이 실제 콘크리트 포장구조체의 응

력 및 변위 거동을 합리적으로 해석할 수 있고, 모형화 및 수치해석이 용이하므로 포장구조계의 역학적 평가(mechanistic evaluation)에 가장 유용한 해석방법이라고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 포장구조계의 비파괴 시험 및 구조해석에 의한 포장체상태의 판단에 이용하고자 여러 해석방법을 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 2차원 유한요소해석은 등가 선하중 산정의 문제점과 포장판 하부 기초에 인위적인 경계조건을 주어 해석해야 하므로 지반에의 하중분산을 충분히 고려하지 못하는 단점이 있다.

(2) Winkler 기초해석은 지반지력계수를 적절히 산정할 수 있다면 계산량이 적으므로 포장구조계의 응력해석에 용이하고 타당성이 있는 해석방법이라고 판단된다. 그러나 변위해석에는 정확도가 부족한 것으로 사료된다.

(3) Burmister 기초해석은 3차원 해석치와 비교하여 볼 때 모형화 및 수치해석이 용이하며 콘크리트 포장구조계의 응력 및 변위 거동과 근사한 결과를 주므로 포장구조계의 변위 및 응력해석에 가장 합리적이고도 효율적인 기법이라고 판단된다.

감사의 말

본 연구는 1988년도 과학기술처의 지원으로 수행된 연구의 일부이며, 본 연구를 위하여 지원해준 정부기관에 감사할 따름이다.

참 고 문 헌

1. Westergaard, H. M., "Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis," *Public Road*, pp. 25-35.
2. Westergaard, H. M., "New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields," *Transactions, American Society of Civil Engineering*, Vol. 113, 1948, pp. 425-439.
3. Pickett, G. and Ray, G. K., "Influence Charts for Concrete Pavements," *Transactions, American Society of Civil Engineering*, Vol. 116, 1951, pp. 49-73.
4. Huang, Y. H. and Wang, S. T., "Finite Element An-

- alysis of Concrete Slabs and Its Implications for Rigid Pavement Design," *Highway Research Record*, No. 466, 1973, pp. 55-79.
5. Huang, Y. H., "A Computer Package for Structural Analysis of Concrete pavements," *Proceedings, Third International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation*, Purdue University, 1985, pp. 295-308.
6. Chou, Y. T., "Comparative Analysis of Rigid Pavement," *Journal of Transportation Engineering Division, American Society of Civil Engineering*, Vol. 109, 1983, pp. 669-688.
7. Ioannides, A. M., Thompson, M. R., and Barenberg, E. J., "Finite Element Analysis of Slabs-on-Grade Using a Variety of Support Modes," *Proceedings, Third International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation*, Purdue University, 1985, pp. 309-324.
8. Macleod, D. R. and Monismith, C. L., "Comparison of Solutions for Stresses in Plain Jointed Portland Cement Concrete Pavements," *Highway Research Record*, No. 888, 1982, pp. 22-31.
9. Hinton, E. and Owen, D. R. J., *Finite Element Programming*, Academic Press, London, 1979.
10. Burmister, D. M., "The Theory of Stress and Displacement in Layered Systems and Applications to the Design of Airport," *Proceedings, 3rd Annual Meeting, Highway Research Board*, 1943, pp. 126-148.
11. Burmister, D. M., "The General Theory of Stresses and Displacement in Layered System," *Journal of Applied Physics*, Vol. 16, 1945, pp. 89-94.
12. Michelow, J., *Analysis of Stresses and Displacements in an n-Layered Elastic System under a Load Uniformly Distributed on a Circular Area*, California Research Cooperation, California, 1963, pp. 1-33.
13. 김수일, 김문겸, 유지형, "치검곡선을 이용한 3층 아스팔트 포장구조체의 물성추정에 관한 연구," **대한토목학회논문집**, 제 9 권 제 1 호, 1989, pp. 97-107.
14. Vesic, A. S. and Saxena, K., *Analysis of Structural Behavior of AASHTO Road Test-Rigid Pavements*, NCHRP Rep. No. 97, Highway Research Board, 1974.
15. Bathe, Y. J., Wilson, E. L., and Peterson, F. E., *SAP 4, A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear System*, University of California, Berkeley, California, April, 1974.

(接受 : 1989. 11. 29)