

동하중에 의한 노상의 지지력 평가

Evaluate of bearing capacity by dynamic load in base

김종렬¹⁾, Jong-Ryeol Kim, 박달수²⁾, Dal-Su Park, 박정훈³⁾, Park Jung Hun

¹⁾ 전남대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Chonnam

²⁾ 전남대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Chonnam

³⁾ 전남대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Chonnam

SYNOPSIS : Present all sorts of failure or no failure test methods are done for evaluate structural ability of pavement. It are Plane Plate Test, CBR Test, Benkelman Beam Test, FWD, Dynaflect, etc. but, each method of test not expect compatibility because the result very different by each method of test. Now among pavement's method of evaluation, no failure test gradually use because It quickly and simply obtain pavement's elastic modulus of each layer. But, It accompany expensiveness equipment, and It's degree of trust is lower against expensiveness equipment.

Therefore this research practice comparative trustworthy Plane Plate Test, comparative low cost and quick Small FWD Test. And analyzed relation of Plane Plate Test with Small FWD Test.

주요어(Key words) : Small FWD, Dynamic Load, Bearing Capacity, Base Layer, No Failure.

1. 서론

현재 우리나라 도로의 총 연장 길이는 약 87000 km이며, 포장도로는 약 65000 km이다. 그리고 우리나라 정부는 연간 13조 3000억원을 도로에 투자하고 있으며 그 중의 20%인 2조원은 도로 포장에 투자하고 있다. 이러한 수치들이 말해주듯이 도로는 우리나라 사회발전과 경제발전을 위하여 토목인들이 관심을 가지고 연구해야 할 중요한 사회기간 구조물중 하나이다.

도로를 효율적으로 사용하고 수명을 연장하기 위해서는 효율적인 유지·관리·보수가 필요하며 이는 지역사회의 발전과 국고의 절약에 직접적인 연관이 있다. 이러한 도로의 효율적인 유지·관리·보수를 위해서는 도로포장체의 파손의 특성과 파손이 일어나는 이유를 설명할 수 있는 포장체의 역학적 특성을 이해하여야 한다.

현재 도로 포장층의 구조적 능력을 평가하기 위해서 평판재하시험, CBR시험, 벤켈만빔 시험, FWD, Dynaflect등 여러 파괴 및 비파괴 시험들이 행해지고 있으나, 각 방법에 따라 결과치가 상이한 경우가 많아 각 시험방법에 따른 결과의 호환성을 기대하기 어렵다. 현재 포장층 평가 방법 중 비파괴 시험 방법이 역산에 의해 포장 각 층의 탄성계수를 비교적 신속하고 용이하게 얻을 수 있다는 장점으로 점차 사용되고 있으나, 고가의 장비를 수반하며, 고가 장비에 비해 신뢰도가 떨어지고 있는 실정이다.

그러므로 비교적 신뢰성이 있는 평판재하시험을 실시하고, 비교적 저가이며 용이하고 신속한 소형 FWD시험을 병행하여 실시함으로써 평판재하시험과 소형 FWD 시험결과의 상관관계를 분석하고자 한다.

2. 노상에서의 소형 FWD 시험

2.1. 소형 FWD의 제원

소형 FWD는 센서(Accelerometer-가속도계)가 부착된 재하판, 하중낙하장비, 전자침하측정장비 및 데이터 출력기로 구분할 수 있다. 센서는 그림과 같이 재하판 위에 내장되어 있고 추가로 가속도계나 속도계를 구입하여 측정할 수 있다.

소형 FWD의 총무게는 15kg, 낙하추의 무게는 10kg, 최대 충격력은 7.07kN이다. 재하판은 직경 300mm, 처짐 측정범위는 0.1~2.0mm ±0.02mm이다. 이상과 같이 소형 FWD는 해석방법에 따라 비선형 거동을 고려해야 하며, 충격하중이 기존 FWD에 비해 훨씬 작아서 실제 포장체가 받는 하중조건과 상이하다는 단점이 있지만 기존 FWD에 비하여 상대적으로 저가이고 경량이며 조작성이 간편하여 각 지방자치단체의 도로포장 유지관리에 이용이 용이한 장점이 있다. 그림 1은 소형 FWD의 개략도이다.

2.2. 소형 FWD의 개요

소형 FWD의 동작 원리는 낙하하중의 충격력을 정적인 하중으로 간주하고 지반을 균질한 탄성체로 가정하였으며, 재하판 중심의 센서를 통해 측정되는 처짐을 이용하여 탄성론으로부터 처짐에 따른 탄성계수를 얻게 된다. 동탄성계수를 얻기 위한 계산 과정을 살펴보면 다음과 같다.

지반을 균질한 탄성체로 가정하면, 지반에 원형 등분포 하중이 작용할 때 탄성론에 의해 지반의 응력 상태는 그림 2와 같다.

이는 탄성론의 축대칭 문제로서 하중에 임계 응력, 변형률, 처짐은 축대칭인 원형면적의 중심아래에서 발생한다. 여기서 $\tau_{rz}=0$, $\sigma_r=\sigma_t$ 이므로 σ_z, σ_r 은 주응력이다.

$$\sigma_z = q \left[1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{q}{2} \left[1 + 2\nu - \frac{2(1+\nu)z}{(a^2 + z^2)^{0.5}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_t)] \quad (3)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_t + \sigma_z)] \quad (4)$$

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} [\sigma_t - \nu(\sigma_z + \sigma_r)] \quad (5)$$

$$\tau_{rz} = 0, \sigma_r = \sigma_t \quad (6)$$

탄성론에 의해 대칭 하중을 받는 대칭축 중심에서의 응력 및 변형률은 식 (1)~(6)과 같다.

식 (1)과 식 (2), 식 (6)을 식 (3)~(5)에 각각 대입하면 식 (7), (8)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - 2\nu(\sigma_r)] \\ &= \frac{1}{E} \left[q \left\{ 1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right\} - 2\nu q \left\{ 1 + 2\nu - \frac{2(1+\nu)z}{(a^2 + z^2)^{0.5}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right\} \right] \\ &= \frac{(1+\nu)q}{E} \left[1 - 2\nu + \frac{2\nu z}{(a^2 + z^2)^{0.5}} - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_r &= \frac{1}{E} [\sigma_r(1-\nu) - \nu(\sigma_z)] \\
&= \frac{1}{E} \frac{q}{2} (1-\nu) \left\{ 1 + 2\nu - \frac{2(1+\nu)z}{(a^2+z^2)^{0.5}} + \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{1.5}} \right\} - \nu q \left\{ 1 - \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{1.5}} \right\} \\
&= \frac{(1+\nu)q}{2E} \left[1 - 2\nu - \frac{2(1-\nu)z}{(a^2+z^2)^{0.5}} + \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{1.5}} \right] \quad (8)
\end{aligned}$$

식 (7)로부터 하중 작용 중심에서의 연직 변형은 식 (9)와 같다.

$$w = \frac{(1+\nu)qa}{E} \frac{a}{(a^2+z^2)^{0.5}} + \frac{1-2\nu}{a} [(a^2+z^2)^{0.5} - z] \quad (9)$$

식 (9)에서 지반의 포아손비(ν)를 0.5라 가정하면 식 (10)과 같이 쓸 수 있다.

$$w = \frac{3qa^2}{2E(a^2+z^2)^{0.5}} \quad (10)$$

식 (10)으로부터 $z=0$ 일때 즉, 지표면에서의 연직 변형은 다음 (11)식에서 구할 수 있다.

$$w_o = \frac{2(1-\nu^2)qa}{E} \quad (11)$$

이때 q 는 원형 등분포 하중이고, a 는 원형 등분포하중의 반경, ν 는 지반의 포아손비이고, E 는 지반의 탄성계수이다.

소형 FWD에 작용하는 등분포하중(q)은 재하판에 낙하하는 낙하추의 충격하중을 재하판의 면적으로 나눈 값이다.

소형 FWD 시험기기의 충격하중을 구하기 위해서 그림 3과 같이 모델링 하였으며, (a)그림은 무게 m 인 재하판에, 질량 M 인 추의 정적인 하중에 의한 정적인 처짐(δ_{st})을 나타낸 것이고, (b)는 질량 M 인 추가 낙하높이 H 에서 질량 m 인 재하판에 떨어졌을 때의 충격하중에 의한 최대 처짐(δ_{max})을 나타낸 것이다.

(b)그림에서 질량 M 에 해당하는 무게를 W_1 이라 하고, 질량 M 에 의한 정적인 처짐을 $\delta_{st,1}$ 이라하면, 에너지 보존법칙으로부터 외부일과 내부 에너지는 같으며, 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$W_1(h + \delta_{max}) - \frac{1}{2}k\delta_{max}^2 = 0 \quad (12)$$

식 (12)에서 k 는 스프링 계수이다. 식 (12)를 풀어 쓰면 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{2}k\delta_{max}^2 - W_1\delta_{max} - W_1 = 0 \quad (13)$$

근의 공식에 의해 식 (13)을 풀면 식 (14)와 같이 최대 처짐을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\delta_{max}^2 &= \frac{W_1 \pm \sqrt{W_1^2 + 2kW_1h}}{k} \\
&= \frac{W_1}{k} \pm \sqrt{\left(\frac{W_1}{k}\right)^2 + 2\frac{W_1}{k}h} \\
\delta_{max} &= \delta_{st,1} \pm \sqrt{\delta_{st,1}^2 + 2\delta_{st,1}h} \quad (14)
\end{aligned}$$

식 (14)를 $\delta_{st,1}$ 으로 나누면 식 (15)와 같다.

$$\frac{\delta_{\max}}{\delta_{st,1}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\delta_{st,1}}} \quad (15)$$

식 (15)의 값을 충격계수라 하고, 정적하중을 충격하중으로 환산하면 정적 하중에 충격계수로 곱한 식 (16)과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$P_{dyn} = W \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\delta_{st,1}}} \right) \quad (16)$$

식 (16)의 충격하중을 재하판의 면적으로 나누면 등분포하중 q 이다.

그러나, 사실상 충격력을 매번 계산하기 힘들고 사용상 번거로움이 있으므로 단위 거리를 이동하는데 소요되는 힘인 에너지(E_p)를 정적인 하중으로 가정하여 식 (16)에 의해 계산하면 식 (17)를 구할 수 있다.

$$P_{dyn} = E_p = Wkh = F \quad (17)$$

식 (17)에서 W 는 낙하추의 무게이고, h 는 낙하거리이며 소형 FWD 시험기기에서 $W=10\text{kg}$, $h=72\text{cm}$ 이므로 최대 충격력(F)는 7.07kN 이다. 또한 재하판의 직경이 30cm 이므로 등분포 하중 q 는 식 (18)과 같다.

$$q = \frac{F}{A} = \frac{7.07}{\frac{\pi \times 30^2}{4}} = 100\text{kN/m}^2 \quad (18)$$

식 (11)에 $q=100\text{kN/m}^2$, $a=0.15\text{m}$, $\nu=0.5$ 를 대입하면 식 (19)와 같다.

$$w = \frac{22.5}{E} \quad (19)$$

따라서 소형 FWD에 의해 측정된 평균 처짐(w)을 알면 탄성계수(E)를 식 (19)로부터 추정할 수 있다. 위의 전개로부터 탄성계수 E 는 계수 22.5를 평균 처짐으로 나눈 값이 된다.

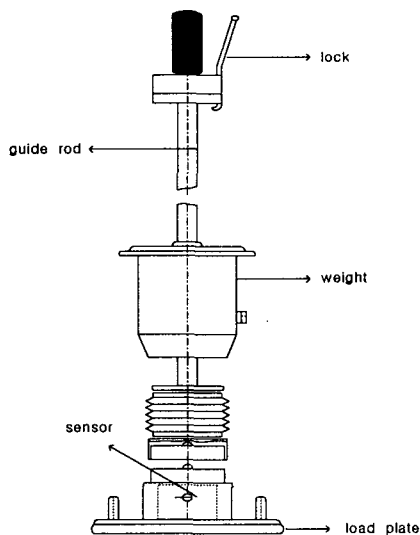


그림 1. 소형 FWD의 개략도

a : 원형 등분포하중의 반경

q : 등분포 하중

E : 탄성계수

ν : 포아송비

$-\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \tau_1, \tau_2$ 이 발생

stress function= $f(q, r/a, z/a)$

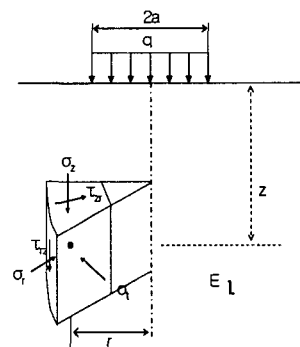


그림 2. 축대칭 하중을 받는 경우의 응력구성요소

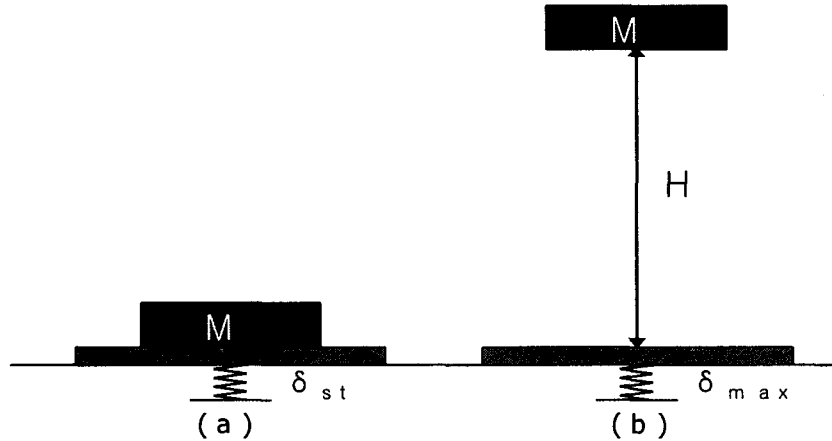


그림 3. 소형 FWD 시험기기의 충격하중 모형

3. 평판 재하시험과 소형 FWD시험 결과의 상관성

소형 FWD의 검증을 위해서 기존에 지반의 지지력을 판단하기 위해 널리 사용되고 있는 평판 재하시험을 소형 FWD시험과 같은 장소에서 실시하여 평판재하시험의 결과 값인 지지력계수(K)와 소형 FWD 시험의 결과 값인 동탄성계수(E)를 비교하고 그 상관성을 분석하였다.

3.1. 평판재하시험

고속도로 현장의 노상 및 노반에 대해 도로용 평판재하시험[KS F 2310-80(95), ASTM D 1196-93(97), AASHTO T 235]을 실시하였으며, 평판 재하시험은 시험 위치에 30cm의 평판을 놓고 중차량(덤프트럭, 백호우 등)으로 하중을 재하한 후 유압 잭기로 하중을 조절 하면서 평판에 설치된 침하측정용 게이지로부터 하중에 대한 지반의 침하량을 측정하여 지지력-침하량 곡선을 그리고, 그 곡선의 침하량 1.25mm에 대응되는 지지력에 대한 기울기를 지반반력 계수(K)라 하고, 재하판의 직경을 고려하여 K_{30} 이라고 표시한다.

3.2. 소형 FWD 시험

소형 FWD 시험기기를 평판 재하시험 위치 부근에 설치하고, 10kg의 추를 72cm에서 낙하시켜 재하판 중심에 장치된 센서에 의해 처짐을 획득한다. 수집된 처짐으로부터 전용으로 사용되는 소형 컴퓨터에 의해 동탄성계수를 획득한다. 실험시 초기에는 토체가 약간 팽창해 있기 때문에 초기값은 무시하고, 수차례 반복하여 일정한 값에 접근해 갈 때의 값 3개를 평균하여 전용 컴퓨터를 사용하지 않고, 수 계산으로 동탄성계수를 획득하였다.

시험에 사용되는 재하판의 크기는 직경 30cm(12in)를 사용한다. 재하판에는 처짐을 측정하기 위한 장비로서 속도계가 장착되어 있어서 매 충격시 표면에서의 최대 수직 처짐을 측정하여 전용 프로그램에 전송한다.

FWD의 측정절차는 다음과 같다.

- ① 재하판을 측정하려는 포장면 상에 위치시킨다. 이때 FWD 조작자는 시험전에 포장면 상에 페인트로 측정할 위치를 표시하고 시험을 실시하여야 한다.
- ② 정확한 위치가 포착되면 침하판에 있는 센서소켓뚜껑을 열고 LCD가 부착되어 있는 전자침하측정장

비의 센서케이블을 연결시킨다.

③ 준비가 완료되면 조작안전장치를 풀어서 하중을 작용시킨다. 주로 사용되는 하중은 10kg이다. 작용된 하중에 의한 침하는 LCD에 나타나고 전자침하측정장비에 저장이 된다.

④ 하중추를 다시 낙하장치에 장착후 위 ③번과 같은 절차를 2회 반복한다. 3회 하중재하시험이 완료되면 전자침하측정장비에 평균침하와 동탄성계수가 보여진다.

⑤ 시험이 완료되면 전자침하측정장비에 저장되어 있는 평균침하 및 동탄성계수값을 전용프린터에서 출력하여 포장구조해석자에게 전달한다.

그림 4는 노상에서의 소형 FWD 시험을 순서대로 찍은 사진이다.

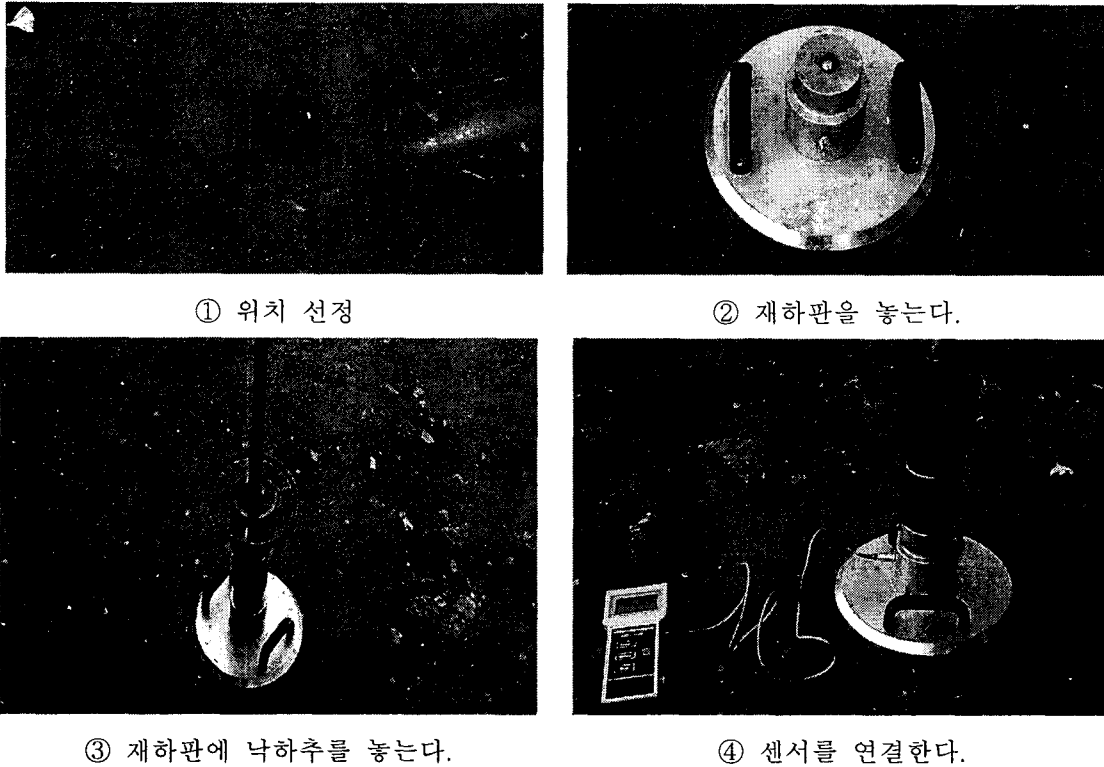


그림 7. 노상에서 소형 FWD 시험 방법

3.3. 평판 재하시험과 소형 FWD시험의 결과

평판 재하시험에 의한 지지력 계수 K_{30} 과 소형 FWD시험에 의한 표면 처짐과 그에 대한 탄성계수를 구하여 표 1에 나타내었고, 표 1을 그림 5에 도시하여 지지력 계수와 탄성계수값의 상관관계를 살펴보고자 한다. 그림 5의 ①은 원데이터의 상관관계선이고, ②는 지지력 계수가 0일 경우 탄성계수도 0이어야 하므로 원점을 통과하는 상관관계선을 도시한 것이다. 관계선 ①은 다음과 같은 상관 관계식으로 표현 가능하다.

$$K_{30} = 0.0284 * E + 10 \quad (20)$$

식 (20)에서 K_{30} 의 범위는 $8 \sim 40 \text{ kg/cm}^3$ 이고, 관계선 ②는 식 (21)과 같이 표현할 수 있다.

$$K_{30} = 0.5E \quad (21)$$

식 (21)은 데이터의 수가 증가하면 계속해서 변화 될 것이며, 이 식을 다시 표현하면 식 (22)와 같다.

$$E = 2 * K_{30}$$

(22)

또한, 고속도로 구간 중 일부 지역에서는 지하수로 인한 토사 유출로 지반이 침하되어 쇄석층으로 치환되어 있는 상태였다. 이 지역에서 평판재하시험에 의한 지지력계수 값은 작게 나오는 반면, 소형 FWD 시험에 의한 동 탄성계수는 비교적 큰 값을 보이는데, 이러한 특이 구간에서의 소형 FWD의 사용은 주의를 기울여야 할 것이다.

표 1. 평판 재하시험과 소형 FWD 시험의 결과

위치	처짐 (cm ⁻²)	탄성계수 (Mpa)	k(30) (kg/cm ³)	위치	처짐 (cm ⁻³)	탄성계수 (Mpa)	k(30) (kg/cm ⁴)
STA 1	0.59	38.14	31.20	STA 14	0.66	33.58	20.56
STA 2	0.43	52.73	30.40	STA 15	0.80	27.78	18.40
STA 3	0.77	29.35	15.60	STA 16	0.61	36.10	25.60
STA 4	0.26	87.66	29.60	STA 17	0.79	28.85	22.00
STA 5	0.81	27.78	16.00	STA 18	0.78	28.36	24.40
STA 6	0.50	44.70	14.00	STA 19	0.54	41.16	23.60
STA 7	0.91	24.64	8.80	STA 20	0.72	30.41	24.96
STA 8	1.13	19.91	12.00	STA 21	0.88	25.57	23.20
STA 9	0.80	28.13	14.00	STA 22	0.26	79.41	40.00
STA 10	0.61	36.68	21.20	STA 23	0.29	73.37	38.40
STA 11	0.34	66.83	19.60	STA 24	0.65	34.44	21.60
STA 12	0.41	54.88	17.60	STA 25	2.03	11.08	11.20
STA 13	0.83	27.11	17.20	STA 26	1.30	17.31	15.20

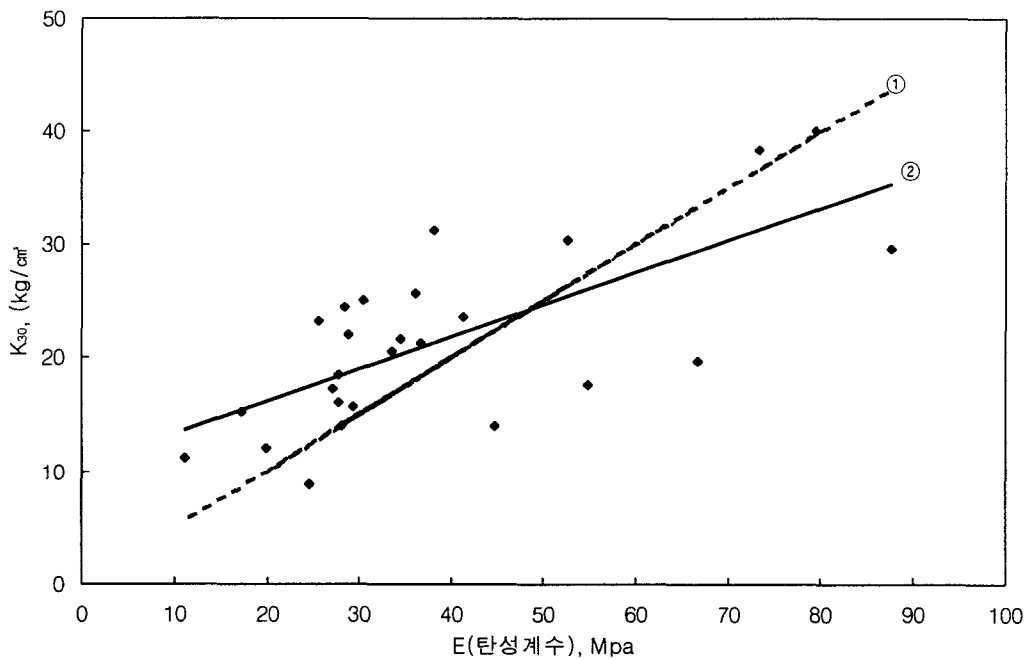


그림 5. 지지력 계수 와 탄성계수의 상관관계

4. 결 론

소형 FWD 시험에 의한 결과 값인 동탄성계수와 평판 재하시험의 결과 값인 지지력계수와 상관계 분석을 위해 고속도로 현장의 노상 및 노반층에 대해 같은 위치에서 소형 FWD 시험과 평판재하시험을 실시하였다. 실험결과 소형 FWD 시험의 결과 값인 동탄성계수(E)는 평판재하 시험의 결과 값인 지지력 계수(K_{30})의 $8 \sim 40 \text{ kg/cm}^3$ 인 범위 내에서 $E = 2 * K_{30}$ 라는 상관관계가 있는 것으로 나타났다.

5. 참고문헌

- (2) Westergaard, H. M., 1926 "Analysis of Stresses in Concrete Pavement Due to Variations of Temperature"
- (3) Boussinesq, j., 1885. Application des Potentiels a l'etude de l'equilibre et de mouvement des Solids Elastiques, Gauthier-Villars, Paris.
- (6) Huang, Y.H.
1967. Stresses and Displacements in Viscoelastic Layered Systems Under Circular Loaded Areas," Proceedings,
1968a. "Stresses and Displacements in Nonlinear Soil Media,"
1968b. "Chart for Determining Equivalent single-Wheel Loads,"
1969c. "Computation of Equivalent Single-Wheel loads using Layered Theory,"
- (7) Hardin, B.O.
"The Nature of Stress-Strain Behavior for Soils," Proceedings in the Specialty California on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, ASCE, Pasadena, California, 1978.
"Plane Strain Constitutive Equations for Soils," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 109, No.3, 1983