

지오셀 (GEOCELL)을 이용한 지반 안정 SOIL STABILIZATION USING GEOCELL

이 진용 : Lee, Jin Woong 이 종덕 : Lee, Jong Deok

- * 1 정희원, 한승전업 (주) 지오웹브 사업부 부장
- * 2 한승전업 (주) 지오웹브 사업부 차장

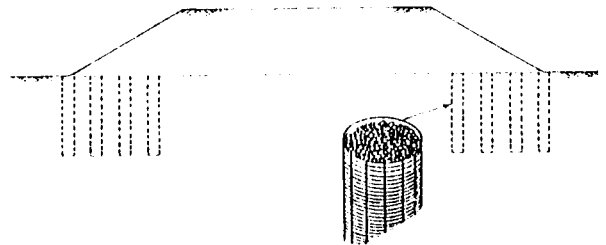
SYNOPSIS : Geocell is a three dimensional cellular confinement system that forms a geocomposite mattress with infill material to increase the bearing capacity dramatically rather than geotextiles of nonwoven and woven fabric type and geogrid. In terms of design, this geocell confinement is quite complex to assess and is different in its theoretical evaluation and its concept from other geosynthetic products. This study is aimed to help a basic understanding on Geoweb system, which is known to be the most effective and easiest in handling among the geocell systems ever developed, by introducing two methods of interpretation for the improvement of bearing capacity. Thus the writers are willingly to help the geotechnical engineers and the site engineers who might be encountered with the bearing capacity problems on site.

서론

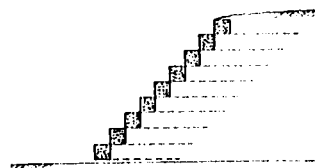
GEOCELL은 채움재를 수용할 수 있는 3차원적인 복합 구조체를 형성함으로써 지반의 지지력 향상에 있어서, 종래의 부직포, 직포형태의 GEOTEXTILE, GEOGRID와는 그 보강 효과에 대한 이론적 접근이나 개념을 달리하는 토양 억제 시스템이다. 본 논문을 통하여 최근에 구미에서 개발된 각종 GEOCELL중 가장 효과적인 SYSTEM으로 각광 받고 있는 GEOWEB SYSTEM에 대한 기본적인 이해와 지반 보강에 대한 두가지 해석 방법을 소개함으로써, 차후 현장 적용시의 이해를 돕고자 한다.

1. GEOCELL의 종류

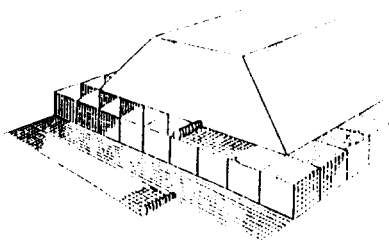
- ① GEOGRID CELL에 의한 MATTRESS - 보강성토 (그림 1)
- ② GEOGRID WEB 혹은 원통형 기초 (그림 2)
- ③ GABION에 의한 보강토 (그림 3)
- ④ 폐 TIRE를 이용한 성토보강 - 폐 TIRE와 GEOTEXTILE의 결합형태 (그림 4)
- ⑤ CONC BLOCK (그림 5)
- ⑥ GEOWEB - 그 자체로서 GEOCELL이라 부르기도 함 (그림 6)
- ⑦ 기타



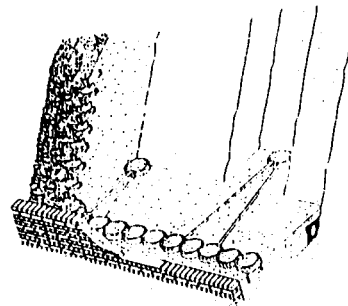
(그림 2)



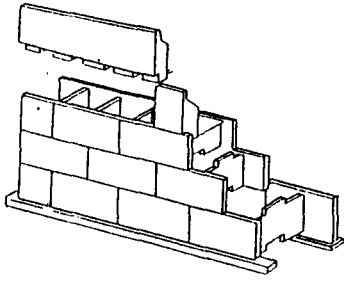
(그림 3)



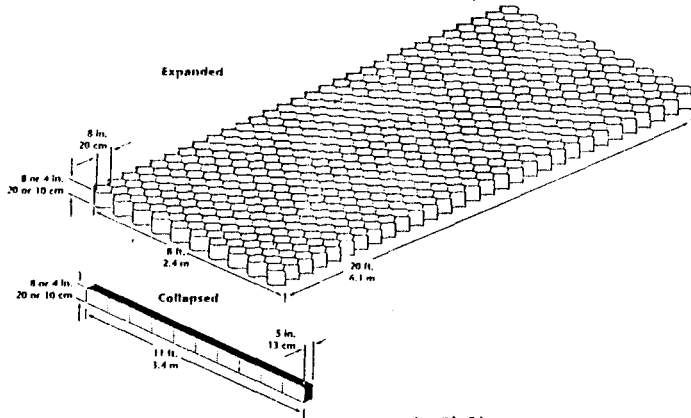
(그림 1)



(그림 4)



(그림 5)



(그림 6)

2. GEOWEB SYSTEM의 개념

GEOWEB SYSTEM은 폭 6.7 ~ 20 cm, 길이 335 cm, 두께 1.25 mm의 고밀도 폴리에틸렌을 33 cm 폭은 66 cm 마다 초음파 용접하여, 펼쳤을 때의 규격이 폭 2.44 x 길이 6.09 cm 폭은 12.18 m의 규격이 되도록 하여, 벌집 모양의 3차원적인 CELL 구조가 되도록 만든 모양 억제 시스템이다.

3. GEOWEB SYSTEM의 사용 범위

① 지반 안정

- 도로 기층 안정
- 철도 노반 강화, 도상 보강
- PIPE 기층 강화
- 옹벽

② 침식 억제

- 사면 보호
- 수로 라이닝 (하안, 호안)
- 방수로
- 교대 사면

③ 옹벽

- 자립식 옹벽 (Dam, 흙옹벽)

- 중력식 옹벽
- 보강로 옹벽

4. GEOWEB SYSTEM과 기존 연약 지반 개량 공법과의 비교

1) 가설도로 (Temporary Access Road)의 설계에 있어서 다음과 같은 공법들이 전통적으로 사용 되었다.

- ① 치환 공법 - 연약지반을 제거하고 선택층으로 치환하는 공법.
- ② 재하 공법 - 상재 하중 (SURCHARGE)을 재하시켜 압밀을 촉진시켜 연약 지반을 개량하는 공법. (경우에 따라 SAND DRAIN, PAPER DRAIN과 같은 WICK DRAIN 공법과 병행하기도 함)
- ③ 파일 공법 - CONC PILE, SAND PILE, 강관 PILE 을 향타 하여 견고한 지반에 하중을 지지시키는 공법.
- ④ 약액 주입 공법 - 약액을 지반에 주입 혹은 혼합하여 지반을 고결 또는 강화시켜 지반 강도를 증대시키거나 차수 효과를 증진 시키는 공법.

2) 위의 전통적인 공법외에 1960년대 이후, GEOTEXTILE 혹은 GEOGRID의 사용이 폭발적으로 증가하고, 그 이론적 해석 방법이 체계적으로 연구되어, 다음과 같은 목적으로 GEOTEXTILE, GEOGRID가 사용되게 되었다.

- ① 연약 지반상의 보강 성토
- ② 분리
- ③ 보강
- ④ 지반 안정
- ⑤ 인장 보강

3) 가설도로의 검토 : GEOTEXTILE과 GEOWEB의 기능상의 비교검토

① 분리 기능 - 기층에의 관입 및 노상에의 침투 작용 (그림 7)

세립토가 간극으로 이동함에 따라 골재가 노상에 침투함.

결과 - 강도 저하 및 유효 단면 감소

② 분리 기능 - PUMPING 작용 (그림 7)

세립토가 급격한 재하로 인하여 이동하여 과도한 간극 압력 (PORE PRESSURES)을 분산 시키게 되고 포화된 지반으로 부터 세립토가 침투하게 된다.

결과 - 마찰 저항과 골재의 지지력을 잃게 된다.

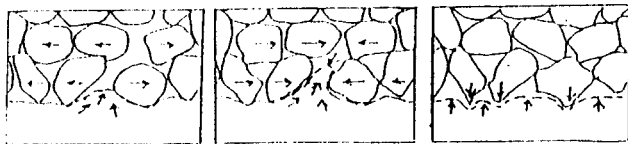
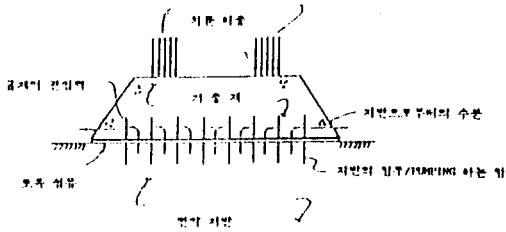
③ 수평 보강 기능 (그림 8, 그림 9)

구속되지 않은 기층재 혹은 표층재가 골재의 전단 강도 저하에 의해 극부 지지력 파괴 (SHOWING)를 일으키게 된다.

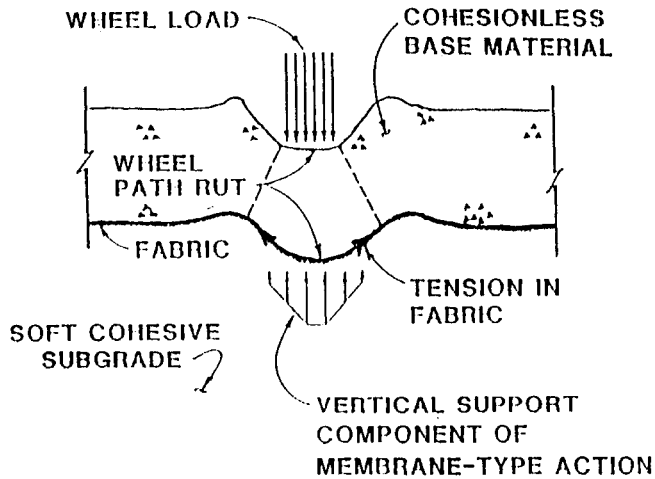
결과 - 표층의 파괴와 포장단면의 유효 두께를 감소 시킨다. 토목 섬유나 지오그리드의 효율적 적용을 위하여서는 그 설치 위치가 치명적인 요인이 된다.

④ 지반의 안정 (그림 8)

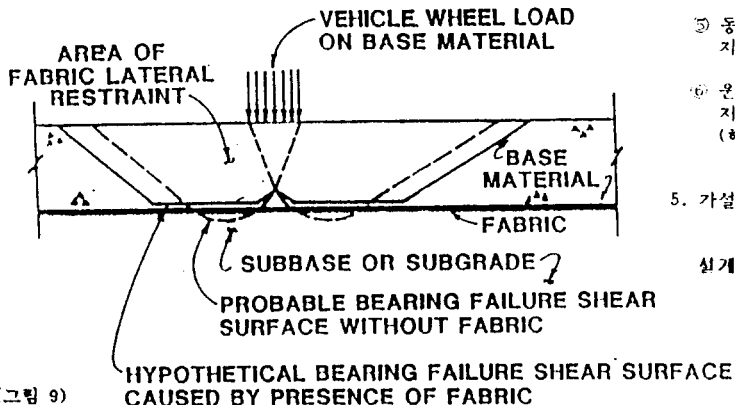
노상토의 과도한 응력으로 국부 전단 파괴를 일으키게 되는데, 모목 섬유는 국부 전단 파괴를 방지하기 위하여 수평, 수직 방향으로 억제 시킨다 - 전단 파괴는 지반의 안정성을 지배 한다.



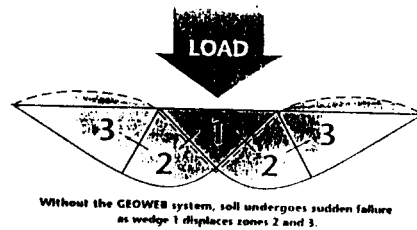
(그림 7) 지반 분리 기능에 있어서의 모목 섬유에 미치는 힘



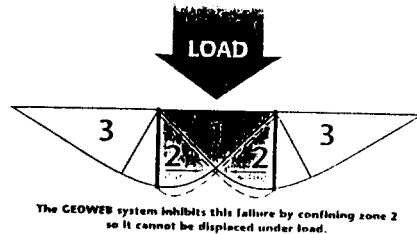
(그림 8) 차륜에 의한 Membrane 형태의 모목 섬유의 작용 - 설치후 차륜 통과 지점에서의 RUTTING 현상



(그림 9) 비포장 도로에서의 Geotextile에 의한 기층재의 횡적 구속에 대한 개념도 하중 지지의 개념



Without the GEOWEB system, soil undergoes sudden failure as wedge 1 displaces zones 2 and 3.



The GEOWEB system inhibits this failure by confining zone 2 so it cannot be displaced under load.

(그림 10)

지오웨브는 지반의 응력을 감소 시킨다.

지오웨브는 표층재의 전단 파괴를 방지 한다.

⑤ 인장 보강 효과 (그림 8)

차륜의 주행 부위 아래의 노상토의 압밀은 지반의 영구적 변형을 일으킴으로써, 침하된 부분은 수분을 모으게 되고 강도를 잃게 되어 완전히 파괴될 때까지 RUTTING이 계속되게 된다. 상대적으로 고강도의 모목 섬유는 RUTTING 부분을 연결하여 수직 변위에 대한 인장 저항력을 확보하여 준다.

4) 지오웨브의 기능 - 효능과 이점 (그림 10)

- ① 후프 강도 (HOOP STRENGTH)와 인접 셀의 수동 반력에 의한 체움재의 하중 - 변형의 성능 개선.
- ② 향상된 하중 분산에 의한 최소 변형과 고강도의 강성 (HIGH FLEXURAL STIFFNESS)의 확보.
- ③ 셀벽의 전단 저항력에 의한 연약지반에서의 입상재의 지지력 개선.
- ④ 표층 가까이에서의 불량한 체움재의 사용을 가능케 한다.
- ⑤ 동하중(DYNAMIC LOADING)에서의 입상재의 횡방향의 변위를 방지한다.
- ⑥ 운반, 설치의 용이함 - 입상재의 취급이 불가능하거나 비싼 지역에서 특히 경제적이다. (해안 매립지, 산간 도서 등 벽지, 도심지 등)

5. 가설도로의 설계 (Temporary Access Road Design)

설계 조건 :

- 설계 축하중

여기서,

$$P = \text{차륜하중} = 53.4 \text{ kN (12,000 lb)} = 5.443 \text{ tf/m}^2$$

$$p = \text{접지압} = 690 \text{ kPa (100 psi)} = 7.03 \text{ kgf/cm}^2 = 70.3 \text{ tf/m}^2$$

z = 심도 (포장 두께)

$$\sigma_z = q_u = \text{심도 Z에서 연직응력}$$

R = (타이어의) 접지 반경

$$R = \sqrt{\frac{P}{p\pi}} = \sqrt{\frac{53.4}{689 \times 3.14}} = \sqrt{\frac{5.443}{70.3 \times 3.14}} = 0.157 \text{ m}$$

$$R = 0.157 \text{ m (6.2 in)}$$

Z에 대하여 방정식을 정리하면,

$$Z = \frac{R}{\sqrt{\frac{1}{\left(1 - \frac{q_u}{p}\right)^{0.67}} - 1}}} = \frac{0.157}{\sqrt{\frac{1}{\left(1 - \frac{10.25}{70.3}\right)^{0.67}} - 1}}} = 0.47$$

여기서, q_u = 심도 Z에서의 허용 응력

$$Z = 0.472 \text{ m (18.6 in)}$$

지오웹브에 의한 지지력

$$q_r = Nc_u = \text{Z심도에서의 허용 응력 (극한 지지력)}$$

여기서, N = 5.0 Geotextile (High Traffic - Low Rutting)

N = 6.0 Geotextile (Low Traffic - High Rutting)

N = 6.2 Polypropylene Geogrid

$$q_r = 5.0 \times 35.8 = 179 \text{ kPa (26 psi)} = 18.30 \text{ tf/m}^2$$

$$Z = \frac{R}{\sqrt{\frac{1}{\left(1 - \frac{q_r}{p}\right)^{0.67}} - 1}}} = \frac{0.157}{\sqrt{\frac{1}{\left(1 - \frac{18.3}{70.3}\right)^{0.67}} - 1}}} = 0.332$$

$$Z = 0.332 \text{ m (13.1 in)}$$

지오웹브에 의한 포장 단면의 감소

$$= 18.6 - 13.1 = 5.5 \text{ in}$$

$$0.470 - 0.332 = 0.138 \text{ m}$$

지오웹브 시스템

계산 순서

$$1. \text{ 주동로압계수 } K_a = \tan^2(45 - \phi/2)$$

$$\phi = \text{지오웹브 채움재의 내부 마찰각} = 40^\circ \text{ 로 가정}$$

$$K_a = \tan^2(45 - 40/2) = 0.217$$

$$2. \text{ 지오웹브상단의 수직 응력 } \sigma_{vt} = 690 \text{ kPa (100 psi)} = 70.3 \text{ tf/m}^2$$

$$3. \text{ 지오웹브 하단의 수직 응력 (심도 Z 가정} = 0.264 \text{ m)}$$

$$\sigma_v = P \left[\frac{1 - \left(\frac{1}{1 + (R/z)^2}\right)^{3/2}}{1 + (R/z)^2} \right] = 70.3$$

$$\sigma_v = P \left[\frac{1 - \left(\frac{1}{1 + \frac{0.15}{0.264}}\right)^{1.5}}{1 + \left(\frac{0.15}{0.264}\right)^2} \right] = 24.09$$

$$R = \sqrt{\frac{P}{p\pi}} = 0.150$$

$$R = 0.15 \text{ m (6.2 in)}$$

$$\sigma_{vb} = 398 \text{ kN/sq.m (57.7 psi)}$$

$$4. \text{ 지오웹브 상단의 수평 응력}$$

$$\sigma_{ht} = K_a \sigma_{vt} = 0.217 \times 690 = 150 \text{ kN/sq.m (21.7 psi)}$$

$$5. \text{ 지오웹브 하단의 수평 응력}$$

$$\sigma_{hb} = K_a \sigma_{vb} = 0.217 \times 398 = 86.4 \text{ kN/sq.m (12.5 psi)}$$

$$6. \text{ 지오웹브 벽의 평균 수평 응력}$$

$$\sigma_{avg} = (\sigma_{ht} + \sigma_{hb})/2 = (150 + 86.4)/2 = 118 \text{ kN/sq.m (17.1 psi)}$$

$$7. \text{ 채움재와 지오웹브 벽간의 전단 저항력}$$

$$\tau = \sigma_{avg} \tan \delta$$

$$8. \text{ 지오웹브를 통한 응력 감소}$$

$$\sigma_R = 2 \times \tau \times (H/D)$$

$$= 2 \times 59.6 \times (0.2/0.175) = 136 \text{ kN/sq.m (19.7 psi)}$$

$$9. \text{ 지오웹브의 허용 설계 응력}$$

$$q_G = Nc_u + \sigma_R = 100 + 136 = 236 \text{ kN/sq.m (34.2 psi)} = 24.08 \text{ tf/m}^2$$

10. 지오웹브를 포함한 포장 단면의 두께

$$Z = \frac{R}{\sqrt{\frac{1}{(1 - \frac{qG}{p})^{0.67}} - 1}} = \frac{0.15}{\sqrt{\frac{1}{(1 - \frac{24}{70.3})^{0.67}} - 1}} = 0.264$$

Z = 0.264 ■ (10.4 in)

비교

비보강시, Z = 0.472 ■ (18.6 in)

지오웹브 보강시, Z = 0.333 ■ (13.1 in)

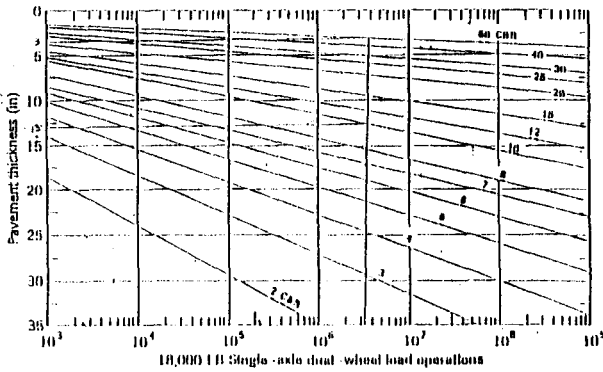


Figure 15.18. CBR design curves for 18,000 EAL. (From Corps of Engineers)

TABLE IV-4 LOAD EQUIVALENCY FACTORS*

Gross Axle Load		Load Equivalency Factors		Gross Axle Load		Load Equivalency Factors	
kN	lb	Single Axles	Tandem Axles	kN	lb	Single Axles	Tandem Axles
4.45	1,000	0.00002		182.5	41,000	23.27	2.29
8.9	2,000	0.00018		187.0	42,000	25.64	2.51
13.25	3,000	0.00072		191.3	43,000	28.22	2.75
17.8	4,000	0.00209		195.7	44,000	31.00	3.00
22.25	5,000	0.00500		200.0	45,000	34.00	3.27
26.7	6,000	0.01043		204.5	46,000	37.24	3.55
31.15	7,000	0.0196		209.0	47,000	40.74	3.85
35.6	8,000	0.0343		213.5	48,000	44.50	4.17
40.0	9,000	0.0532		218.0	49,000	48.54	4.51
44.5	10,000	0.0777	0.00688	222.4	50,000	52.98	4.87
48.9	11,000	0.1111	0.01008	226.8	51,000	57.70	5.23
53.4	12,000	0.159	0.0144	231.3	52,000	62.70	5.63
57.8	13,000	0.224	0.0199	235.7	53,000	67.90	6.04
62.3	14,000	0.300	0.0270	240.2	54,000	73.30	6.47
66.7	15,000	0.478	0.0360	244.6	55,000	78.90	6.93
71.2	16,000	0.622	0.0472	249.0	56,000	84.70	7.41
75.6	17,000	0.796	0.0608	253.5	57,000	90.70	7.91
80.0	18,000	1.000	0.0773	258.0	58,000	96.90	8.45
84.5	19,000	1.24	0.0971	262.5	59,000	103.30	9.01
89.0	20,000	1.51	0.1206	267.0	60,000	109.90	9.59
93.4	21,000	1.83	0.148	271.3	61,000	116.70	10.20
97.8	22,000	2.18	0.180	275.9	62,000	123.70	10.84
102.3	23,000	2.58	0.217	280.2	63,000	130.90	11.52
106.8	24,000	3.02	0.250	284.5	64,000	138.30	12.22
111.2	25,000	3.53	0.308	289.0	65,000	145.90	12.95
115.6	26,000	4.09	0.364	293.5	66,000	153.70	13.71
120.0	27,000	4.71	0.426	298.0	67,000	161.80	14.50
124.5	28,000	5.39	0.495	302.5	68,000	170.10	15.32
129.0	29,000	6.14	0.572	307.0	69,000	178.60	16.15
133.5	30,000	6.97	0.658	311.5	70,000	187.30	17.01
138.0	31,000	7.89	0.753	316.0	71,000	196.20	17.89
142.3	32,000	8.88	0.857	320.0	72,000	205.30	18.79
146.8	33,000	9.96	0.971	325.0	73,000	214.60	19.72
151.2	34,000	11.18	1.096	329.0	74,000	224.10	20.67
155.7	35,000	12.50	1.237	333.5	75,000	233.80	21.65
160.0	36,000	13.93	1.38	338.0	76,000	243.70	22.66
164.5	37,000	15.50	1.53	342.5	77,000	253.80	23.71
169.0	38,000	17.20	1.70	347.0	78,000	264.10	24.79
173.5	39,000	19.06	1.89	351.5	79,000	274.60	25.89
178.0	40,000	21.08	2.08	356.0	80,000	285.30	27.01

*From AASHTO Interim Guide for Design of Pavement Structures, 1972, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. 1974; Flexible Pavement.

Note: kN converted to lb are within 0.1 percent of lb shown.

(표 2)

6. 연성포장 (FLEXIBLE PAVEMENT)

① 정의 : 환산 축하중 (EQUIVALENT SINGLE AXLE LOADS : ESAL) 의 교통량에 의하여 설계하는 방법. AASHTO 도로 시험 결과로부터 포장을 하계 하는 작용은 차의 중량에 의해서 크게 영향 받는 것이 밝혀져서 아스팔트 포장의 두께 설계는 대형차의 교통량을 축하중 18,000 lb 로 환산한 차량의 1 방향당 전체 통과 횟수에 의하여 시행한다.

ESAL = 18,000 lb. AXLE (AASHTO)

국내 설계 기준 ESAL = 10 TON

② 전통적인 방법

- 설계 교통하중을 지지하기 위하여 포장 단면을 두껍게 한다.
- 연약 지반을 제거하고 선택층으로 치환한다.
- 지반을 SOIL CEMENT 혹은 석회를 이용하여 안정 시킨다
- SOIL CEMENT 나 아스팔트 안정처리 기층
- 아스팔트 콘크리트에 혼화제를 사용
- 압밀 침하가 완료될때 까지 표층을 계속 보수

③ 대안

- 기층에 지오그리드로 보강 - 기층 두께를 다소 절감할 수 있다.
- 강성 포장 (RIGID PAVEMENT)

④ 각 시스템별 연성 포장 설계

지오텍스타일의 사용

- 노상과 보조 기층을 분리 시킨다. (구조적 사용은 아님)
- 노상의 안정 (CBR (3) 일때)

지오그리드의 사용

- 노상의 안정
- 기층 혹은 보조 기층의 보강 (구조적 지지력에서 약간의 보강 효과)
- 골재를 다소 구속할 수 있다.

지오웹브의 이용

- 연약지반위에 기초 지지 매트리스를 형성한다.
- 기층 혹은 보조 기층을 전체적으로 구속한다.
- 구조적 지지력의 향상
- 저급한 재료의 지지력을 증가 시킨다.

- 타이어의 접지압 (CONTACT PRESSURES)
- 지반 강도 (CBR, Cu 등)
- 교통량
- 허용 침하량

가정과 제한 :

- 자갈 포장
- 교통량 < 10,000
- 세립토의 노상 CBR이 3.0 이내 일때

실계 방법 :

반 이론적임 - 경험적 방법

지반의 최대 허용 응력 = 극한 지지력 즉 TERZAGHI의 지지력 공식에 의한 극부 전단 파괴. (비보강시)

$$q_u = N C_u \quad (\text{비보강시})$$

$$N = 3.0 \quad (\text{극부 전단})$$

$$N = 2.8 \quad (> 1,000 \text{ ESAL}, \quad RUT < 50 \text{ mm})$$

$$N = 3.3 \quad (< 1,000 \text{ ESAL}, \quad RUT > 100 \text{ mm})$$

$$C_u = \text{지반의 전단 강도 (관련 도표 참조)}$$

Boussinesq의 방정식을 이용하여 심도 Z에서의 수직 응력을 결정.

$$\sigma_z = P \left[\frac{1 - \left(\frac{1}{1 + (R/z)^2} \right)^{3/2}}{1 + (R/z)^2} \right]$$

여기서,

$$P = \text{차륜하중 (복분)}$$

$$p = \text{접지압}$$

$$Z = \text{심도 (표층의 두께)}$$

$$\sigma_z = q_u = \text{깊이 Z에서의 수직 응력}$$

$$R = \text{재하 면적의 반경 (타이어)}$$

$$R = \sqrt{\frac{P}{p\pi}}$$

Z 에 대하여 방정식을 정리

$$Z = \frac{R}{\sqrt{\frac{1}{\left(1 - \frac{q_u}{p}\right)^{0.67}} - 1}}}$$

토목 섬유토 보강했을 때의 허용 응력

$$q_r = N_r C_u$$

$$N_r = 5.0, \quad \text{Geotextile 보강시 } (> 1,000 \text{ ESAL} - RUT < 50 \text{ mm})$$

$$N_r = 6.0, \quad \text{Geotextile 보강시 } (< 1,000 \text{ ESAL} - RUT > 100 \text{ mm})$$

$$N_r = 6.2, \quad \text{Polypropylene Geogrid 보강시}$$

지반 강도의 범위에 대한 해 - (표 1 참조)

$$Z = \frac{R}{\sqrt{\frac{1}{\left(1 - \frac{q_r}{p}\right)^{0.67}} - 1}}}$$

지오웨브로 보강한 지반의 허용 지지력

$$q_g = N C_u + \sigma_R$$

여기서,

$$\sigma_R = \text{지오웨브를 통한 응력 감소}$$

$$= \text{지오웨브에 의한 지지력 (tf/m}^2\text{)}$$

$$H = \text{지오웨브의 높이 (m)}$$

$$D = \text{지오웨브의 지름 (m)}$$

$$\tau = \text{지오웨브와 흙사이의 전단 저항력 (tf/m}^2\text{)}$$

$$= \sigma_{avg} \tan \delta$$

$$\sigma_{avg} = \text{지오웨브에 작용하는 평균 수평 응력}$$

$$= (\sigma_{ht} + \sigma_{hb})/2$$

σ_{ht} 와 σ_{hb} 는 지오웨브 상단과 하단에 각각 작용하는 수평응력이다.

$$\sigma_{ht} = K_a \sigma_{vt}, \quad \sigma_{hb} = K_a \sigma_{vb}$$

$$\sigma_v = p \left[\frac{1 - \left(\frac{1}{1 + (R/z)^2} \right)^{3/2}}{1 + (R/z)^2} \right]$$

$$\sigma_{vt} = p = \text{접지압 (즉 타이어 접지압)}$$

$$K_a = \text{주동토압계수}$$

$$= \tan^2 (45 - \phi / 2)$$

$$\phi = \text{채움재의 내부마찰각 } (^{\circ}) \text{ (NAVFAC, 표 1 참조)}$$

$$\delta = \text{지오웨브와 흙사이의 전단저항각 } (^{\circ})$$

$$= 0.67 \phi \text{ (Smooth Geoweb)} \text{ 와 } 0.85 \phi \text{ (Diamond Geoweb)}$$

위 비율은 조골재의 제한적 시험에서 근거한 것이며 다른 흙에 대하여는 적용되지 않을 수도 있다.

계산 순서

1. 주동 토압 계수 $K_a = \tan^2(45 - \phi/2)$
2. 지오웹브 상하단의 연직 응력

$$\sigma_v = p \left[1 - \frac{1}{1 + (R/z)^2} \right]^{3/2}$$

$$R = \sqrt{\frac{P}{p\pi}}$$

$\sigma_{vt} = p$ (지오웹브가 표층에 있을 경우)

3. 지오웹브 상단의 수평 응력 $\sigma_{ht} = K_a \sigma_{vt}$

4. 지오웹브 하단의 수평 응력 $\sigma_{hb} = K_a \sigma_{vb}$

5. 지오웹브 벽에 작용하는 평균 수평 응력 $\sigma_{avg} = (\sigma_{ht} + \sigma_{hb})/2$

6. 체움재와 지오웹브 벽사이의 전단 저항력 $\tau = \sigma_{avg} \tan \delta$

7. 지오웹브에 의한 응력 감소 (지지력) $\sigma_R = 2 \times \tau \times (H/D)$

8. 지오웹브 설계를 위한 허용 설계 응력 $q_0 = N C_u + \sigma_R$

9. 지오웹브를 포함한 포장 두께

$$Z = \frac{R}{\sqrt{\frac{1}{1 - \frac{q_0}{p}} - 1}} \times 0.67$$

가설도로의 설계의 예

문제

중장비 통행을 위한 공사용 비포장 가설도로를 설계 하라
정기적인 정기 작업을 가정하여 설계한다.

설계조건 :

1. 지반 강도
캘리포니아 지지력비 CBR = 1.2
2. 차륜 하중
1축 복륜 하중
 $P = 53.4 \text{ kN (12000 lb.)} = 5.44 \text{ tf}$
타이어 접지압, $q = 690 \text{ kPa (100 psi)}$
 $= 7.03 \text{ kgf/cm}^2$
3. 설계수명 기간중의 교통량 - 10,000 ESAL

설계방법 :

1. Terzaghi의 지지력 공식으로 지반의 지지력을 결정한다
지반의 최대 허용 응력은 지지력과 같거나 적어야 한다
2. Boussinesq이론 (혹은 탄성포장이론)에 의하여 지반에 과도한 응력이 발생하지 않도록 포장 단면 (입상재)의 최소 두께를 결정 한다.

(표 1) 입상재의 지반 강도 계수의 관계

캘리포니아 CBR (%)	전단 강도 C_u (psi)	표준관입시험 SPT (blows/ft)	현장에서의 구분
< 0.4	< 1.7	< 0.24	매우 연약 (흔들면 으스러져 버져 나뉜다)
0.4 - 0.8	1.7 - 3.5	2 - 4	연약 (흔들면 으스러져 버져 나뉜다)
0.8 - 1.6	3.5 - 6.9	4 - 8	중간 (흔들면 으스러져 버져 나뉜다)
1.6 - 3.2	6.9 - 13.9	8 - 15	견고 (흔들면 으스러져 버져 나뉜다)
3.2 - 6.4	13.9 - 27.7	15 - 30	매우 견고 (흔들면 으스러져 버져 나뉜다)
> 6.4	> 27.7	> 30	강화 (흔들면 으스러져 버져 나뉜다)

지반의 극한 지지력 (극부전단파괴시 지지력)

$q_u = N C_u$

- 여기서, $N = 3.0$ (TERZAGHI)
 $N = 2.8$ (High Traffic - Low Rutting - USFS)
 $N = 3.3$ (Low Traffic - High Rutting - USFS)

관련 도표에서

$C_u = 35.8 \text{ kPa (5.2 psi)} = 3.66 \text{ tf/m}^2$
 $q_u = 2.8 \times 35.8 = 100 \text{ kPa (14.6 psi)} = 10.25 \text{ tf/m}^2$

Boussinesq 공식에 의해 심도 Z에서의 연직 응력을 결정한다.

$$\sigma_z = p \left[1 - \frac{1}{1 + (R/z)^2} \right]^{3/2}$$

7) 모래 지반에서의 GEOWEB를 이용한 지지력 비교

Robert M. Koerner 박사는 그의 저서 'Designing with Geosynthetics' 에서 모래 지반에서의 Terzaghi 의 지지력 공식을 응용하여 GEOWEB 를 사용한 경우와 사용 하지 않은 경우에 대한 극한 지지력을 비교하는 식을 제안하였다.

최근 Canada의 왕립 사관 학교 (Royal Military College)에서의 일련의 시험을 통하여 Koerner 박사의 이론보다도 엄격한 방법으로 모래 지반에서의 지지력 비교에 관한 일반식을 제안하였는데, 식의 해법 과정은 좀 복잡하나, Koerner 박사의 견해와는 거의 일치된 결과를 보이고 있다.

여기서는 최근 INTERSOL ENGINEERING사에서 시행한 국내 학암포 국립공원의 주차장 설계에 대한 포장 단면 구조 계산의 예를 소개 하고자 한다.

공사명 : 태안 해안 국립공원 학암포 주차장 조성 공사

과업명 : 지오웹브 시스템이 있는 경우와 없는 경우의 입상재 포장의 지지력 계산.

가 정 :

1. 설계차륜하중 $P = 1500\text{lb}$ (6.7 KN)
타이어 압력 $P = 35\text{ psi} = 5040\text{ psf}$ (240 KPa)
2. 표층재 - 내부마찰각, $\phi_{\text{surf}} = 42^\circ$
단위 중량, $\gamma_{\text{surf}} = 140\text{lb/cu. ft}$ (22.0 KN/M³)
3. 지오웹브채움재 - 내부마찰각, $\phi_I = 38^\circ$
단위 중량, $\gamma_I = 135\text{lb/cu. ft}$ (21.2 KN/M³)
4. 보조 기층재 - 내부마찰각, $\phi_{\text{sub}} = 38^\circ$
단위 중량, $\gamma_{\text{sub}} = 135\text{lb/cu. ft}$ (21.2 KN/M³)
5. 지반 - 내부마찰각, $\phi_{\text{subg}} = 0$
점착력, $C_u = 1500\text{ psf}$ (72 KPa)
단위 중량, $\gamma_{\text{subg}} = 120\text{lb/cu. ft}$ (18.9 KN/M³)

단면 가정 :

1. 표층 두께 (지오웹브 위), $t_{\text{surf}} = 2\text{ in.}$
2. 지오웹브 두께, $t_G = 4\text{ in.}$
3. 지반 두께, $t_{\text{sub}} = 0\text{ in.}$

계산 :

1. 유효 접촉 반경

$$R = \sqrt{\frac{P}{p\pi}} = \sqrt{\frac{9000}{100\pi}}$$

$$R = 3.7\text{ in. (0.31 ft)}$$

$$\text{직경, } B = 2R = 2 \times 3.7 = 7.4\text{ in. (0.62 ft)}$$

2. 보강하지 않은 입상재의 지지력

$$\text{원형기초 } = qu = 0.3\gamma B N_r + 1.2c N_c + \gamma D N_q \text{ (Terzaghi)}$$

여기서 B = 기초 직경

$$\text{Meyerhoff 지지력 계수: } N_q = e^{\pi \tan^2 \phi} \tan^2 (45 + \phi/2)$$

$$N_r = (N_q - 1) \tan (1.4 \phi)$$

$$N_c = (N_q - 1) / \tan \phi, N_c > 75 \text{ 일}$$

$$\text{경우 } N_c = 75$$

c = 점착력

D = 기초 길이 = 0

γ = 흙의 단위 중량

3. 가정한 지오웹브 규격의 유효 점착력의 결정.

3축 압축 시험 결과에 의해, 입상재의 최대 내부 마찰각은 같고, 겹보기 점착력이 약 3,000 psf (150 KPa) 정도 흙에 부담된다. 포장재의 각기 다른 재료의 지오웹브 간의 겹보기 점착력을 계산 하기 위하여, 각 ZONE 별로 파괴 곡선의 비율을 결정한다.

$$t_G = 4\text{ in 이므로, } C_G = (4/8) \times 3000 = 1500\text{ psf}$$

4. 지오웹브에 구속된 입상재의 지지력 계산

가. 피괴면의 호의 총길이, L_T

$$L_T = B\pi = 7.4 \times 3.14 = 23.3\text{ in. (1.95 ft)}$$

나. 지오웹브 상단의 호의 길이, L_{surf}

만약 $t_{\text{surf}} > B$, $\theta_{\text{surf}} = \pi$ (radians)

$$\theta_{\text{surf}} = 2\arcsin(t_{\text{surf}}/B) = 2\arcsin(2/7.4) = 0.55\text{ radians}$$

$$B = 7.4\text{ in.}$$

$$\text{호의 총길이 } L_{\text{surf}} = \theta_{\text{surf}} B = 0.55 \times 7.4 = 4.1\text{ in. (0.34 ft)}$$

다. 지오웹브 하부의 호의 길이, L_{G0}

지오웹브 상단의 호의 길이

$$z_{G0} = t_{\text{surf}} + t_G = 2 + 4 = 6\text{ in.}$$

만약 $z_{G0} \leq B$, $L_{G0} = 0$

지오웹브 아래의 호의 총 길이

$$\theta_{G0} = 2\arccos(z_{G0}/B) = 2\arccos(6/7.4) = 1.25\text{ radians}$$

$$L_{G0} = \theta_{G0} B = 1.25 \times 7.4 = 9.25\text{ in. (0.77 ft)}$$

라. 지반을 통과하는 호의 길이

지반 상부의 호의 길이

$$z_{\text{subg}} = t_{\text{surf}} + t_G + t_{\text{sub}} = 2 + 4 + 0 = 6\text{ in.}$$

만약, $z_{\text{subg}} < 0$, $L_{\text{subg}} = 0$

지반 상단 아래의 호의 길이

$$\theta_{\text{subg}} = 2\arccos(z_{\text{subg}}/B) = 2\arccos(6/7.4) = 1.25\text{ radians}$$

지오웹브 아래의 호의 총길이

$$L_{\text{subg}} = \theta_{\text{subg}} B = 1.25 \times 7.4 = 9.25\text{ in. (0.77 ft)}$$

마. 지반 내의 호의 총길이

$$L_{sub} = L_{sur} - L_{sub} = 9.25 - 9.25 = 0$$

바. 지오웹브 내의 호의 총길이

$$L_a = L_1 - L_{sur} - L_{sub} - L_{sub} = 23.3 - 4.1 - 0 - 9.25 = 9.95 \text{ ft. (0.03 ft)}$$

사. 표층을 통과하는 피괴면 호의 비율

$$R_{surf} = L_{sur}/L_1 = 4.1/23.3 = 0.17$$

아. 지오웹브를 통과하는 피괴면의 비율

$$R_a = L_a/L_1 = 9.95/23.3 = 0.43$$

자. 지반을 통과하는 피괴면의 비율

$$R_{sub} = L_{sub}/L_1 = 0/23.3 = 0$$

차. 지반을 통과하는 피괴면의 비율

$$R_{subg} = L_{subg}/L_1 = 9.25/23.3 = 0.40$$

지오웹브 포장의 지지력

$$Q_{web} = \frac{P_{surf}(0.3\gamma_{surf}BN_{ysurf} + P_G(0.3\gamma_{sub}BN_{y1} + P_{sub}(0.3\gamma_{sub}BN_{ysub} + \frac{P_{subg}}{1.2cN_{csubg}} + P_{s1}1.2cN_{cs})}{R_{surf}1.2cN_{csurf} + R_a1.2cN_{ca}}$$

지지력 계수

표층재 $N_{psurf} = 85.4$
 $N_{ysurf} = 139.3$
 $N_{csurf} = 75.0$

지오웹브 채움재 $N_{af} = 40.9$

$N_{y1} = 64.1$
 $N_{af} = 61.4$

보조 기층재

$N_{sub} = 48.9$
 $N_{ysub} = 64.1$
 $N_{csub} = 61.4$

지반

$N_{psubg} = 1.0$
 $N_{ysubg} = 0.0$
 $N_{csubg} = 5.1$

$$Q_{web} = 0.17(0.3)(140)(0.62)(139.3) + 0.43(0.3)(135)(0.62)(64.1) + 0(0.3)(135)(0.62)(64.1) + 0.4(1.2)(1500)(5.1) + 0.43(1.2)(1500)(61.4)$$

$$Q_{web} = 52,500 \text{ psf}$$

지지력의 안전율 (지오웹브를 찢을 때)

$$F.S._a = Q_{web}/P = 52500/(35 \times 144) = 10.4$$

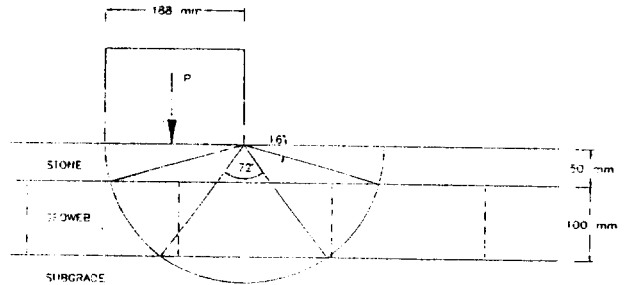
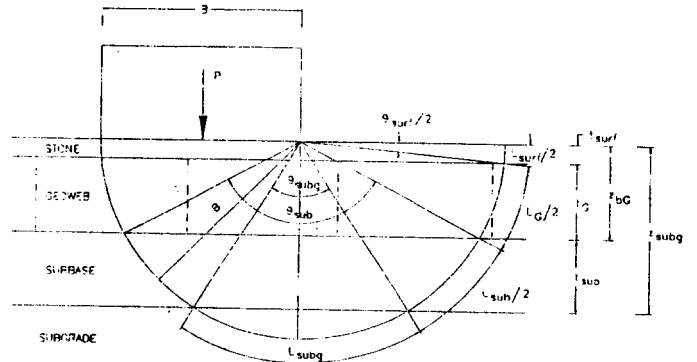
지오웹브 없이 동일한 포장단면의 지지력

$$Q_b = 0.17(0.3)(140)(0.62)(139.3) + 0.43(0.3)(135)(0.62)(64.1) + 0(0.3)(135)(0.62)(64.1) + 0.4(1.2)(1500)(5.1)$$

$$Q_b = 4980 \text{ psf}$$

$$F.S._w = Q_b/P = 4980/(35 \times 144) = 0.99$$

결론 : 입상재의 포장 단면의 전방 지지력 파괴에 대한 안전율은 지오웹브로 보강하지 않았을 때의 안전율 0.99 에서 지오웹브를 보강하였을 때에는, 10.40으로 증가 하여, 표층재만의 안전율은 1.15 이다. (별첨 계산서 참조)



Bearing Capacity of Unbound Granular Soils - InterSol Engineering Inc.

Input

Design Wheel Load (lb) 1600
 Tire Pressure (psf) 35
 Friction Angle (Surface Material) 42
 Unit Weight (lb/cu.ft) 140
 Friction Angle (Geoweb Infill) 30
 Unit Weight (lb/cu.ft) 135
 Friction Angle (Subbase) 36
 Unit Weight (lb/cu.ft) 135
 Friction Angle (Subgrade) 0
 Shear Strength (Subgrade) (psf) 1500
 Unit Weight (Subgrade) 120

Calculations

Radius of Loaded Area (ft.) 3.7
 Footing Diameter (ft.) 7.39

Meyerhoff Formulas

	Surface	Infill	Subbase	Subgrade
N_q	85.4	40.9	48.9	1.0
N_{gamma}	139.3	64.1	64.1	0.0
N_c	75.0	61.4	61.4	5.1

Surface Thickness (ft.) 2	Apparent Cohesion (lb/sq.ft) 1500
Geoweb Thickness (ft.) 4	
Subbase Thickness (ft.) 0	
Calculations	
Total Arc Length (ft) 1.93	Total Arc Angle Above Geoweb (Two Sides) 0.55
Arc Depth Above Bottom of Geoweb (ft.) 6.00	Arc Angle Below Base of Geoweb (radians) 1.25
Arc Depth Below Geoweb (ft.) 1.39	Arc Angle Below Subgrade (radians) 1.25
Arc Depth Above Subgrade 6.00	
Arc Length Above Geoweb (ft) 0.34	Ratio of Failure Plane Above Geoweb 0.17
Arc Length Below Geoweb (ft) 0.77	Ratio of Failure Plane Through Subgrade 0.40
Arc Length Through Subgrade (ft) 0.77	Ratio of Failure Plane Through Subbase 0.00
Total Arc Length Through Subbase (ft) 0.00	Ratio of Failure Plane Through Geoweb 0.43
Total Arc Length Through Geoweb (ft) 0.83	
Total Calculated Arc Length 1.93	Sum of Ratios 1.0

Geoweb System	Equivalent Section (No Geoweb)
Bearing Capacity of Geoweb System (psf) 52328	Bearing Capacity of Geoweb System (psf) 4954
Factor of Safety (Geoweb System) 10.30	Factor of Safety (Geoweb System) 0.98

Surface Material Only
Bearing Capacity (Unconfined) 5814
Factor of Safety (Unconfined) 1.15

Bearing Capacity of Unbound Granular Soils - InterSol Engineering Inc.

Input	Calculations
Design Wheel Load (lb) 9000	Radius of Loaded Area (ft.) 5.4
Tire Pressure (psf) 100	Footing Diameter (ft.) 10.70
Friction Angle (Surface Material) 42	Meyerhoff Formulae
Unit Weight (lb/cu.ft) 140	Surface Infill Subbase Subgrade
Friction Angle (Geoweb Infill) 38	Nq Nq Nq Nq
Unit Weight (lb/cu.ft) 135	85.4 411.9 48.9 1.0
Friction Angle (Subbase) 38	N _{gm} N _{gm} N _{gm} N _{gm}
Unit Weight (lb/cu.ft) 135	139.3 64.1 64.1 0.0
Friction Angle (Subgrade) 0	No No No No
Blair Strength (Subgrade) (psf) 1500	78.0 81.4 81.4 6.1
Unit Weight (Subgrade) 120	
Surface Thickness (ft.) 2	
Geoweb Thickness (ft.) 4	Apparent Cohesion (lb/sq.ft) 1500
Subbase Thickness (ft.) 0	
Calculations	
Total Arc Length (ft) 2.80	Total Arc Angle Above Geoweb (Two Sides) 0.30
Arc Depth Above Bottom of Geoweb (ft.) 6.00	Arc Angle Below Base of Geoweb (radians) 1.95
Arc Depth Below Geoweb (ft.) 4.70	Arc Angle Below Subgrade (radians) 1.95
Arc Depth Above Subgrade 6.00	

Arc Length Above Geoweb (ft) 0.34	Ratio of Failure Plane Above Geoweb 0.12
Arc Length Below Geoweb (ft) 1.74	Ratio of Failure Plane Through Subgrade 0.62
Arc Length Through Subgrade (ft) 1.74	Ratio of Failure Plane Through Subbase 0.00
Total Arc Length Through Subbase (ft) 0.00	Ratio of Failure Plane Through Geoweb 0.26
Total Arc Length Through Geoweb (ft) 0.73	
Total Calculated Arc Length 2.80	Sum of Ratios 1.0
Geoweb System	Equivalent Section (No Geoweb)
Bearing Capacity of Geoweb System (psf) 39544	Bearing Capacity of Geoweb System (psf) 6927
Factor of Safety (Geoweb System) 2.47	Factor of Safety (Geoweb System) 0.48
Surface Material Only	
Bearing Capacity (Unconfined) 7800	
Factor of Safety (Unconfined) 0.53	

결론

본문에서 GEOWEB SYSTEM의 2가지 이론적 접근 방법 즉, 점질토 지반에서와 사질토 지반에서의 지지력 강화에 대한 설계 방법을 소개 하였다. 점질토 지반 즉 연약 지반에서의 해법에서 아쉬운 것은 연약 지반 심도와 같은 기초의 지지력 보강재로 GEOWEB를 사용하였을 때의 상관 관계가 간과 되었고, 국내의 기후, 기상 조건, 토질 조건 등 제반 변수와의 관계는 추후 보다 포괄적인 연구가 병행되어야 어느 정도 정리된 결과를 얻을 수 있리라 생각되며, 특히 함수비가 높은 연약 지반에서의 동상 처리성과 구조 계산식에서 얻은 값은 포장층과는 어떻게 결합되어야 하는가에 관하여서도 해외에서의 시공사례, 국내에서의 시험 연구 및 현장 시험 등을 통하여 확인하여야 할 중요한 과제이다. 또한 사질토 지반에서의 적용에 있어서도 암거 배수 시설을 잘 확보해야 될 것으로 생각된다. 이러한 여러가지 과제들은 발주처와 생산업체, 연구소, 설계 용역사와 등 관련 기관에서의 유기적인 협조와 연구를 통하여 좋은 결과를 얻을 있다고 확신하며 GEOWEB를 포함한 여러가지 신공법, 신자재가 이 땅의 현실과 접목되어 국토 개발의 일익을 담당 할 수 있는 여건이 성숙될 수 있도록 지반 공학회 회원 제위의 변함없는 격려와 채택이 계속 되었으면 하는 바램이다.

참고 문헌

1. 김 상규, '토질 역학', 청문각 (1992. 1), pp 274 - 287.
2. Robert M. Koerner, Construction and Geotechnical Methods in Foundation Engineering, (1984), pp 24 - 29.
3. Robert M. Koerner, Designing with Geosynthetics, (1986) pp 319 - 323 , pp 233.
4. Colin J.F.P Jones (도덕현 편저), '보강토 구조물', 탐구문화사, (1992. 5) pp 13 - 17.
5. Bathurst, R.J. and Jarrett, P.M., Large-Scale Model Tests of Geocomposite Mattresses Over Peat Subgrades, Transportation Research Record (1188), pp 28 - 36 1989.
6. Bathurst, R.J and Karpurapu, R. "Users Manual for the Finite Element Program GEOWEB", Department of Civil Engineering, Royal Military College of Canada, Kingston, Ontario, (1990)
7. David Croney and Paul Croney, The Design and Performance of Road Pavement, 2nd Edition (1991), pp 404 - 420, pp 480 - 486, pp 159 - 177