

# 지오그리드로 보강된 철도노반의 한계속도에 관한 연구

## Critical Speed Analysis of Geogrid-Reinforced Rail Roadbed

신은철 \*

Shin, Eun-Chul

이규진 \*\*

Lee, Kyu-Jin

오영인 \*\*\*

Oh, Young-In

### ABSTRACT

This paper presents the critical speed analysis of geogrid-reinforced rail roadbeds on soft soil. A rail roadbed on soft ground must be designed to avoid intolerable stress in the underlying soil and to give sufficient support for the rail system. At high speeds, the deformation of rail systems will gain dynamic amplification, and reach excessive values as a certain speed, here termed critical speed is approached. The elastic Winkler foundation model was used to predict the critical speed of geogrid-reinforced rail roadbeds on soft soil and the model properties were determined by the in-situ cyclic plate load test. Based on the parametric study of elastic beam on Winkler foundation model, the critical speed increase with the increase of the flexural rigidity of subgrade EI and the stiffness coefficient of Winkler foundation k. From the in-situ cyclic load tests and analysis of elastic beam on Winkler foundation model, the critical speed increase with increase in number of reinforced layer and non-dimensional value for depth of first geogrid layers and the thickness of reinforced rail roadbed  $u/d$ .

### 1. 서 론

최근 철도, 도로, 공항 등의 국가 기반시설 및 산업단지의 건설을 위한 부지확보 방안으로, 비교적 부지확보가 용이한 연약지반을 통과하거나 해안을 매립하여 이용하는 경우가 증가하고 있다. 그러나, 이러한 연약지반 및 매립부지는 상당한 심도의 연약층의 존재하여, 시설물의 안전성 및 내구성 확보를 위하여 추가적인 지반처리 및 기초지반의 보강이 필요하다. 기초지반의 지지력 보강방안의 하나로 토목섬유(Geosynthetics)가 많이 이용되고 있으며, 특히 보강토옹벽과 연약지반보강재로 많이 사용되는 지오그리드(Geogrid)는 기존에 많이 사용되었던 지오텍스타일에 비하여 상대적으로 높은 인장강도와 시공의 편의성으로 기초지반의 지지력 확보를 위한 방안으로 많은 장점을 가지고 있다.

연약지반에 축조되는 철도노반은 상부의 철도차량 및 구조물의 하중에 대하여 과잉침하와 지지력 부족으로 인한 파괴를 발생하지 않도록 연약지반보강 및 기초지반처리를 수행하여 설계하여야 한다. 특히, 높은속도의 동적하중에 대해서는 동적증폭(Dynamic amplification)과 파동전파(Wave propagation)등으로 인하여, 철도구조에 치명적인 과잉침하를 유발시키는 한계속도에 대한 분석을 수행하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 지오그리드로 보강된 철도노반의 한계속도에 대한 분석을 위하여, 연성기초위에 설치된 탄성보 해석모델(Elastic beam on Winkler foundation model)을 적용한 Kenny(1952)의 이론을 적용하였다. 또한, 탄성보 모델해석에 필요한 탄성보의 연강성도(Flexural rigidity) 및 지반의 강성계수(Spring constant) 도출을 위하여 현장 반복평판재하시험을 실시하였다.

\* 인천대학교 공과대학 토목환경시스템 공학과 교수, 정회원

\*\* 인천국제공항공사 기술 개발팀 과장, 공학박사

\*\*\* 인천대학교 대학원 토목환경시스템 공학과 박사과정

## 2. 연성기초상의 탄성보 해석모델(Elastic beam on Winkler foundation model)

연약한 지반 위에 축조된 철도노반 및 성토제방은 연성기초지반위에 놓인 보(Beam) 또는 슬래브(Slab)처럼 거동하며, 특히, 지오그리드를 활용하여 기초지반을 보강하였을 경우, 그림 1에서 보는 바와 같이 상부층에서는 압축이 발생하며, 하부층에서는 인장이 발생하는 탄성보와 같이 거동하게 된다.

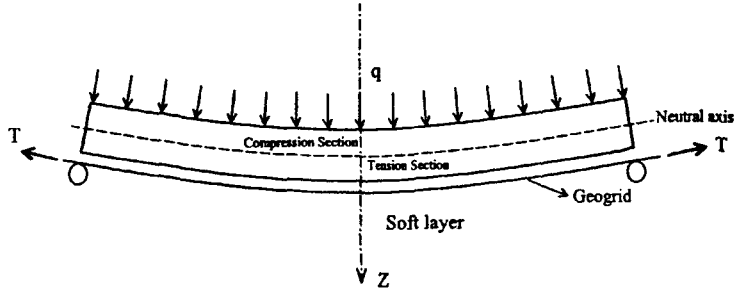


그림 1. 연성기초 위에 설치된 탄성보 거동

그림 1과 같은 연성기초에 지지된 탄성보의 변위와 응력해석은 연성기초지반을 무한히 많은 탄성 스프링으로 가정하는 Winkler기초로 고려하여 해석한다. 탄성보의 변위해석은 Euler 탄성보 해석이론으로부터 다음 식 1과 같은 미분방정식으로 나타낼 수 있다.

$$EI \frac{d^4 v(x, t)}{dx^4} + \mu \frac{d^2 v(x, t)}{dx^2} + k v = P \quad (1)$$

상기의 식에서  $EI$ 는 연성기초위에 설치된 탄성보의 연강성(Flexural rigidity),  $v$ 는 수직변위,  $x$ 는 거리,  $t$ 는 시간,  $\mu$ 는 탄성보의 단위 길이당 질량,  $k$ 는 연성기초의 강성계수(Spring constant)이며,  $P$ 은 속도에 따른 하중을 나타낸다. Kenny(1954)는 식 1의 미분방정식의 탄성해석을 통하여 한계속도를 분석·제한하였으며, 식 2와 같은 무차원 계수를 도출하여, 상기방정식의 해를 제시하였다. 식 2에서  $\lambda$ 는 연성기초지반의 무차원 강성계수로 다음 식 3과 같이 나타낼 수 있다.

$$a = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{\lambda} \left( \frac{\mu}{EI} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$\lambda = \left( \frac{k}{4EI} \right)^{1/4} \quad (3)$$

식 3을 식 2에 대입하여 정리하면, 연성기초위에 설치된 탄성보의 연강성 및 연성기초의 강성계수를 바탕으로 한 한계속도는 식 4와 같이 나타낼 수 있으며, 한계속도에 대한 차원해석은 식 5와 같다.

$$c_{cr} = 4 \sqrt{\frac{4kEI}{\mu^2}} \quad (4)$$

$$c_{cr} = 4 \sqrt{\frac{4kEI}{\mu^2}} = 4 \sqrt{\frac{\frac{M}{L^2} \cdot L^4 \cdot \frac{M}{L^2} \cdot \frac{L^2}{T^4}}{\frac{M^2}{L^2}}} = \frac{L}{T} (m/s) \quad (5)$$

### 3. 현장 반복평판재하시험

현장에서 실시한 반복평판재하시험은 지오그리드로 보강된 철도노반의 동적 지반정수를 도출하기 위하여 실시하였다. 시험위치는 인천국제공항 건설현장에서 실시하였다. 실험부지는 연성기초지반은 해성퇴적층의 약 5m로 분포되어 있으며, 연약지반위에 약 1m 두께로 세립의 준설토가 매립된 상태이다. 표 1은 현장 지반을 구성하는 해성점토층 및 준설토층 흙의 물성치에 대한 실험 결과를 나타낸 것이다.

표 1. 시험지반의 공학적 특성

| 항목                                 | 준설토      | 해성점토 |
|------------------------------------|----------|------|
| 두께(m)                              | 0.7~1.5m | 5~10 |
| $G_s$                              | 2.64     | 2.68 |
| USCS                               | SM       | ML   |
| 200번체 통과량(%)                       | 91       | 98   |
| $e_o$                              | 0.62     | 0.90 |
| $\gamma_{sat}$ (t/m <sup>3</sup> ) | 2.01     | 1.88 |
| $\omega_n$ (%)                     | 23.5     | 33.5 |
| LL(%)                              | N.P      | 33   |
| PI(%)                              | N.P      | 6.8  |

#### 3.1 현장 재하 실험 단면의 구성

현장 반복재하 실험을 위한 단면은 그림 2와 표 2에 나타낸 바와 같이 성토재료, 보강층수  $N$ , 단면두께  $u$ , 보강재 포설 깊이  $u/d$ 를 변화시키며 조성하였다. 실험 조건의 Test series I 과 III은 확장풍화토로 단면을 조성하였으며, Test series II와 IV는 쇄석 기층재를 각각 성토재로 사용하였다. 성토단면조성시 반복하중에 의한 연약지반으로 부터 펌핑 현상 방지를 위하여 지오텍스타일을 원지반 바닥에 먼저 포설하여 토층 분리 및 펌핑 현상을 방지하였다.

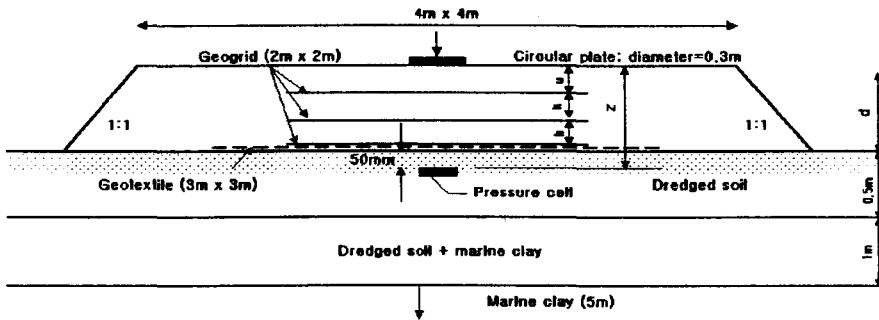


그림 2. 현장 반복평판재하시험 단면도

표 2. 현장 반복평판재하시험 방법

| Test series | 시험번호 | 노반재료  | 보강층수 | 노반두께 | $u/d$ |
|-------------|------|-------|------|------|-------|
| I           | 1    | 확장풍화토 | -    | 45cm | -     |
|             | 2    |       | 1    | 45cm | 1.00  |
|             | 3    |       | 2    | 45cm | 0.67  |
|             | 4    |       | 3    | 45cm | 0.33  |
| II          | 5    | 쇄석골재  | -    | 45cm | -     |
|             | 6    |       | 1    | 45cm | 1.00  |
|             | 7    |       | 2    | 45cm | 0.67  |
|             | 8    |       | 3    | 45cm | 0.33  |
| III         | 9    | 확장풍화토 | 1    | 60cm | 1.00  |
|             | 10   |       | 1    | 60cm | 0.75  |
|             | 11   |       | 1    | 60cm | 0.50  |
|             | 12   |       | 1    | 60cm | 0.25  |
| IV          | 13   | 쇄석골재  | 1    | 60cm | 1.00  |
|             | 14   |       | 1    | 60cm | 0.75  |
|             | 15   |       | 1    | 60cm | 0.50  |
|             | 16   |       | 1    | 60cm | 0.25  |

### 3.2 실험 단면 구성 재료 및 지오그리드 특성

실험단면 구성재료는 재료의 특성에 따른 지지력 보강 특성을 조사하기 위하여, Test series I, III은 화강풍화토를, Test series II, IV는 쇄석골재를 사용하여 실험을 실시하였다. 표 3은 각 실험단면의 노반재료에 대한 공학적 특성을 나타낸 것이며, 그림 3은 각각의 노반재료에 대한 입도분포를 나타낸 것이다. 다짐특성은 골재의 최대 치수에 비추어 KS F 규격에 의하여 실시한 결과이다.

표 3. 노반재료의 공학적 특성

| 항목                                   | 노반재료 |       | 준설토  |
|--------------------------------------|------|-------|------|
|                                      | 쇄석골재 | 화강풍화토 |      |
| $G_s$                                | —    | 2.65  | 2.64 |
| $C_u$                                | 6.5  | 5.0   | 2.0  |
| $C_c$                                | 1.35 | 1.35  | 0.84 |
| USCS                                 | GW   | SP    | SP   |
| 200번 체 통과량(%)                        | 0.9  | 4.81  | 9.0  |
| $\gamma_d$ (mm) (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.16 | 2.06  | 1.58 |
| $W_{opt}$ (%)                        | 9.14 | 10.6  | 8.6  |

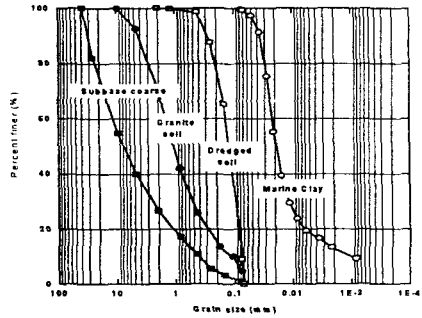


그림 3. 노반재료의 입도분포곡선

그림 4는 실험에 사용한 지오그리드의 형상으로서, 일반적으로 지반보강용으로 사용하는 양축방향 지오그리드(Bi-axial)를 사용하였으며, 표 4는 지오그리드의 물리적 특성을 나타낸다.

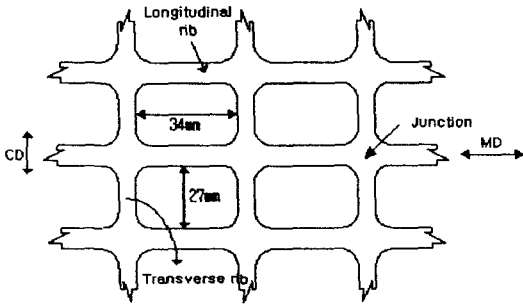


그림 4. 지오그리드의 형상

표 4. 지오그리드의 특성

| 특성                     | 지오그리드                |
|------------------------|----------------------|
| 재질                     | Polypropylene        |
| 제조방법                   | Bi-axial             |
| 제품크기                   | 4m × 50m             |
| 무게(gf/m <sup>2</sup> ) | 650                  |
| 두께(mm)                 | 6.5 (Junction)       |
| 최대인장강도(kN/m)           | MD : 37.5, CD : 40.8 |
| 항복신율(%)                | MD : 10.1, CD : 12.4 |
| 2%신율 인장강도(kN/m)        | MD : 20.2, CD : 14.1 |
| 5%신율 인장강도(kN/m)        | MD : 32.3, CD : 27.5 |
| 입경(mm)                 | 34(MD) × 27(CD)      |
| 카본블랙함량(%)              | 2                    |

### 4. 현장 반복평판재하시험결과 및 분석

하중 재하 및 하중 제거(Loading-unloading) 방식에 의한 반복 재하시험을 실시하므로써, 각각의 보강조건에 따라 하중 단계별 하중-침하 관계와 지지력변화, 등을 측정하였다. 그림 5는 반복 재하시험 결과의 하나의 예를 나타낸 것으로서 하중의 크기에 상관없이 탄성침하 - 탄성회복량의 비율이 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 반복재하 실험에서 각각의 단계별 하중의 재하 및 하중 제거 과정을 생략하여 그래프로 하중-침하 곡선을 얻을 수 있

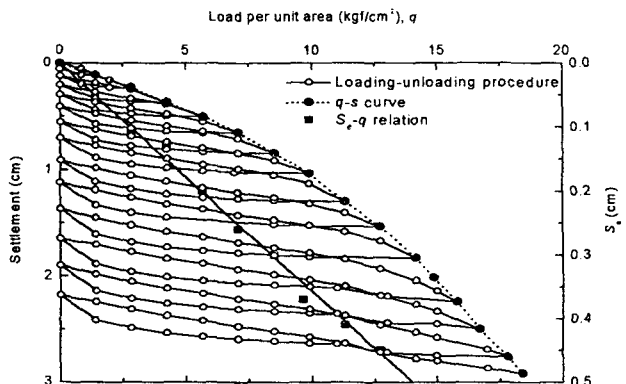


그림 5. 현장반복재하시험 결과

다. 그림 6과 그림 7은 화강 풍화토 및 보조기층용 쇄석골재 지반에서 지오그리드의 보강조건을 변화시키면서 실시한 Test series I, II의 지지력 실험 결과로부터 지지력-침하 관계를 나타낸 것이다. 화강풍화토로 성토한 Test series I의 경우, 동일 두께의 성토 단면에서 지오그리드 보강 층수가 증가함에 따라 하중에 대한 침하량이 감소함을 알 수 있다. Test series I에서 지오그리드를 3층으로 보강한 조건인  $T_4$ 의 경우는, 1층 및 2층 보강한  $T_2$ ,  $T_3$ 에 비하여 지지력 증가 효과가 작게 나타났다. 이것은 상부 지오그리드와 성토 표면까지의 성토 두께  $u$ 가 작아, 반복하중에 따라 지오그리드가 인장 및 압축을 받아 지반이 교란되었기 때문인 것으로 판단된다.

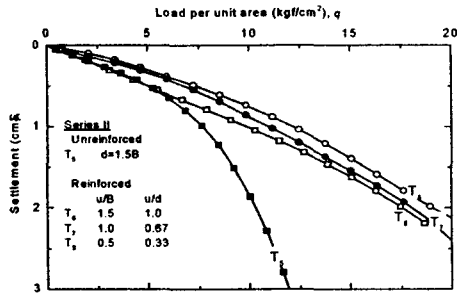
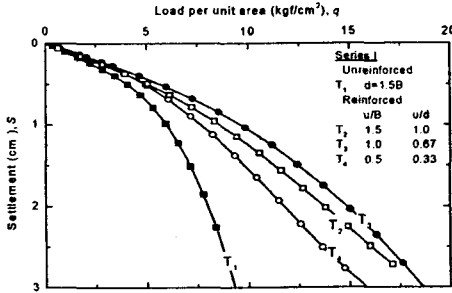


그림 6. 지지력-침하곡선(Test series I)      그림 7. 지지력-침하곡선(Test series II)

현장 반복평판재하시험 결과에 따른 지오그리드 보강된 철도노반의 연강성도(Flexural rigidity) 및 강성계수(Spring constant)분석결과는 그림 8~그림 11에 나타낸 바와 같다.

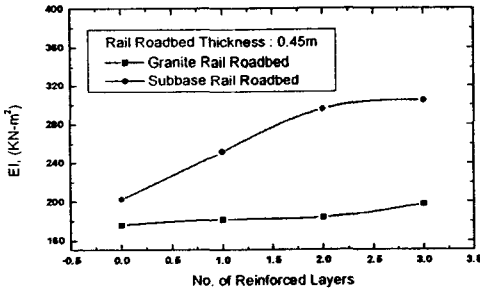


그림 8. 보강층수에 따른 연강성도변화

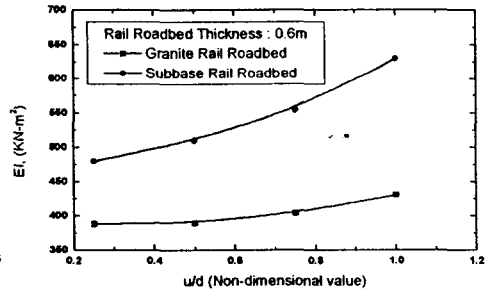


그림 9.  $u/d$ 에 따른 연강성도변화

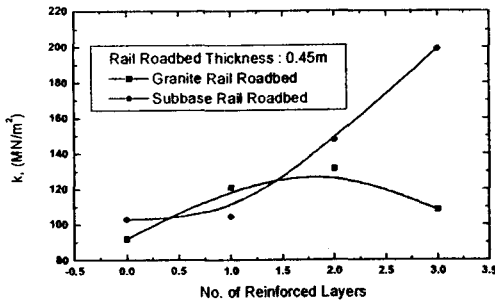


그림 10. 보강층수에 따른 강성계수변화

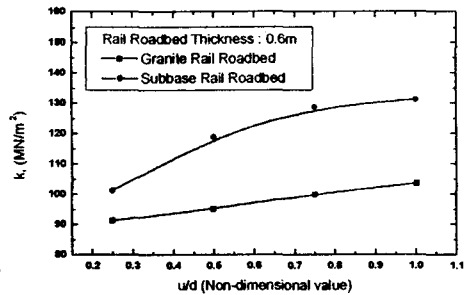


그림 11.  $u/d$ 에 따른 강성계수변화

지오그리드로 보강된 철도노반의 연강성도와 강성계수는 보강층수 및 첫 번째 보강재의 보강심도가 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 지반자체의 강성이 작은 화강풍화토 노반의 경우, 지오그리드로 보강을 실시하여도 강성이 크게 증가하지 않는 것으로 나타났으나, 자체강성이 큰 쇄석골재의 경우, 노반두께와 지오그리드 보강에 따라 강성이 급격히 증가하는 경향을 보였다.

## 5. 한계속도 분석

현장 반복평판재하시험을 통하여 도출된 지오그리드로 보강된 철도노반의 한계속도는 실제 철도노반 두께를 고려할 경우, 약 223km/hr~306km/hr로 나타났다. 그러나, 본 연구에서 도출한 한계속도는 현장시험 시 조성한 모형노반에 대한 분석결과를 바탕으로 하여, 실제 철도의 한계속도와 절대적인 비교분석을 할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 다음 식 6에 나타낸 바와 같이, 지오그리드 보강에 따른 한계속도 증가비(Critical Speed Ratio)을 이용하여 지오그리드 보강에 따른 한계속도를 분석하였다.

$$CSR = \frac{C_{cr}(r)}{C_{cr}(u)} \quad (6)$$

상기 식에서  $C_{cr}(r)$ 은 지오그리드 보강시의 한계속도이며,  $C_{cr}(u)$ 는 무보강 시의 한계속도를 나타낸다. 즉, 한계속도비는 무보강지반의 한계속도에 대한 보강지반의 한계속도비를 나타낸다. 그림 12와 그림 13은 보강층수와 첫 번째 보강재 심도에 따른 한계속도비를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 지오그리드 보강에 따른 한계속도비는 화강풍화토 철도노반의 두께가 0.45m일 때를 제외하고는 수렴하지 않고 계속 증가하는 경향을 보였다. 또한, 연강성도 및 강성계수의 분석결과와 동일하게 자체강성이 큰 쇠석골재의 한계속도비가 크게 증가하였다.

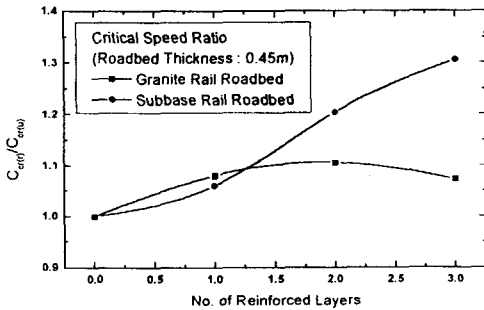


그림 12. 보강층수에 따른 한계속도 증가비변화

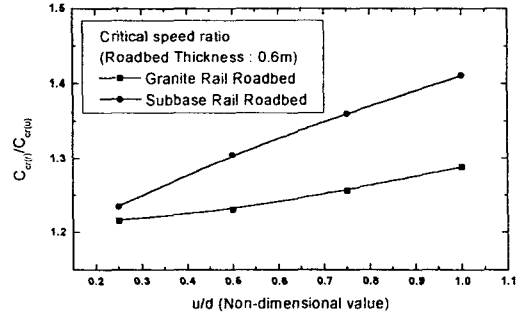


그림 13. u/d에 따른 한계속도 증가비변화

## 6. 결론

본 연구에서는 지오그리드로 보강된 철도노반에 대한 현장 반복평판재하시험을 실시하여, 보강지반의 연강성도 및 강성계수를 도출하였으며, 도출된 결과를 바탕으로 연성기초 위에 설치된 탄성보모델(Elastic beam on Winkler foundation model)을 적용하여 지오그리드 보강지반의 한계속도를 분석하였다. 본 연구결과의 주요내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 지오그리드로 보강된 철도노반의 한계속도와 연강성도(Flexural rigidity) 및 강성계수(Spring constant)는 지오그리드 보강층수가 증가하고 u/d가 커질수록 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) 지오그리드로 보강된 철도노반의 한계속도와 연강성도(Flexural rigidity) 및 강성계수(Spring constant)는 철도노반의 두께와 재료의 자체 강성도에 따라 크게 변화하며 경향을 보였다.

## 참고 문헌

- (1) 이규진(2001), “반복하중하에서 지오그리드로 보강된 연약지반상 얇은기초의 거동, 충북대학교 박사학위 논문.
- (2) Chistin, M.(2001), “Modeling, monitoring and controlling the behavior of embankments under high speed train load”, Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Earth Structures, OUTCOME of ETC11 of ISSMFE, pp. 225~238.
- (3) Göbel, C.H., Weisemann, U.C. and Kirschner, R.A.(1994), “Effectiveness of Reinforcing Geogrid in a Railway Subbase under Dynamic Loads”, Geotextiles and Geomembranes 13, pp.91-99.
- (4) Heelis M.E., Collop, A.C.(1999), Predicting and measuring vertical track displacements on soft subgrades”, Railway Engineering-99.