모듈러 도로 시스템의 내진성능 분석

Seismic Performance Evaluation of Modular-Road System

노화성* · 황웅익** · 송재준*** · 박경훈****

Roh, Hwasung · Hwang, Woongik · Song, Jae-Jun · Park, Kyung-Hoon

Abstract

Concrete modular-road system has been proposed to accelerate construction speed and consists of columns, cross-beams, upper slabs, and anchor-bolt connections. In this study, the seismic performance of the single modular system is evaluated through a nonlinear time history analysis. The columns and cross-beams are modeled with inelastic frame elements while the upper slab and anchor-bolt connections are modeled with 3D solid element and three directional-nonlinear spring element, respectively. Also, the soil constraint effects around the embedded columns are considered using layered spring elements. The artificial input ground motions are generated for the operational and collapse prevention levels based on the Korean standard design spectrum classified with seismic level I. From the results, all structural components show an elastic behavior for the operational level and do not reaching their ultimate status for the collapse prevention level. It indicates that the modular-road system considered in this study satisfies the two seismic performance levels.

Key words : Modular-road system, Nonlinear time history analysis, Seismic performance, Hysteretic behavior

요 지

도로의 급속시공을 위해 제안된 콘크리트 모듈러 도로 시스템은 기둥과 크로스빔, 상부슬래브, 그리고 이를 연결하는 앵커-볼트로 구성된 프리캐스트 구조물이다. 본 연구에서는 비선형시간이력해석을 통해 단일 모듈러 도로 시스템의 내진성능을 평가하였다. 기둥과 크로스빔은 비선형 프레임요소로, 슬래브는 3차원 솔리드요소로 모델링하였다. 앵커-볼트 연결부는 3방향 비선형 스프링으로 모델링되었다. 또한 기둥 주위의 지반 구속조건을 고려하였다. 입력지반운동으로는 국내 내진설계기준에서 제시한 내진 1등급에 해당하는 표준설계응답스펙트럼을 사용하였으며, 이에 따른 인공지진파를 생성하였다. 지진하중크기는 기능수행수준과 붕괴방지수준 두 가지를 고려하였다. 해석결과, 본 논문에서 고려한 모듈러 도로 시스템은 이 두 내진성능수준에 만족함을 보였다.

핵심용어 : 모듈러 도로 시스템, 비선형시간이력해석, 내진성능, 이력거동

1. 서 론

모듈러 도로 시스템은 Fig. 1과 같이 기둥과 크로스빔, 상부슬래브, 앵커-볼트로 구성된 프리캐스트 세그먼트 구조물이다(Houben *et al.*, 2004). 이 시스템은 별도의 지반공사는 거치지 않고 프리캐스트 기둥을 지반 암반층까지 직접 향타하여 기초를 이루며, 그 위에 크로스빔을 설치한 프레임구조로 되어있다. 그리고 상부슬래브는 앵커-볼트를 이용하여 크로스빔과 연결되어진다.

또한 상부슬래브들은 서로 직접적으로 연결되어 있지 않고 일정 정도 간격을 두고 크로스빔과 연결되어 있으며, 상부슬래브 간격 사이에는 모르타르 등과 같은 고탄성 특수 재료를 채움으로써 방수역할을 하게 된다. 이러한 모듈러 시스템은 기존 도로 건설과정에서의 지반공사를 거치지 않는다는 장점뿐만 아니라 구조요소들을 공장 제품으로 제작하여 현장에서 설치하기 때문에 공사시간 단축과 품질관리 향상에도 도움이 되는 장점이 있다. 또한 보수가 필요할 경우 손상된 모듈 또는 세그먼트만을 분리하여 교체함으로써 보수시간을 단

*정회원, 전북대학교 토목공학과 조교수(E-mail: hwasung@jbnu.ac.kr)

Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Chonbuk National University

**한양대학교 건설환경공학과 박사과정

Ph.D Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

***한국건설기술연구원, 인프라구조연구실, 연구위원

Principle Researcher, Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

****교신저자. 정회원. 한국건설기술연구원, 인프라구조연구실, 수석연구원(Tel: +82-31-910-0565, Fax: +82-31-910-0121, E-mail: paul@kict.re.kr)

Corresponding Author: Member, Senior Researcher, Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

Fig. 1. Modular-Road System

Fig. 2. Modie-slab Constructed in Netherlands

측시될 수 있어서 도심지나 고속도로와 같은 교통량이 많은 지역에서 매우 유용한 시스템이라 할 수 있다. 이러한 모듈형태의 도로는 네덜란드에서 건설 및 사용되어지고 있으나(Fig. 2) 국내에서는 초보적인 연구단계에 있다. 이러한 연구의 일환으로 본 논문에서는 유한요소해석을 통해 제안된 모듈러 도로 시스템의 내진성능을 분석하였다.

2. 유한요소 모델링

모듈러 도로 시스템은 여러 개의 모듈로 구성되어 있으나 서로 직접적으로 연결되어 있지 않고 일정 간격(10 mm)을 두고 크로스빔 위에 연결되어 있다. 본 연구에서는 대표되는 단일모듈(6개의 기둥, 3개의 크로스 빔, 1개의 상부슬래브로 구성)에 대해서 내진성능을 분석하기로 한다. 사용된 유한요소 해석프로그램은 SAP2000(CSI, 2011)이며, 모델링과 관련된 자세한 내용은 다음과 같다.

단일 모듈러 도로 시스템에서 상부슬래브는 종방향 길이가 8 m이고 두께가 0.3 m, 폭이 3.6 m로 설계되었다. 본 연구에서는 이 상부슬래브는 solid 요소로 모델링하였다. 모델링의 간결화를 위해 철근과 콘크리트의 탄성계수를 고려한 등가탄성계수 32.9 GPa를 적용하였다. 기둥과 크로스빔은 비선형 프레임요소를 사용하여 모델링 하였다. Fig. 3(a)에서와 같이 기둥은 300 mm×300 mm의 정사각형 단면으로 설계 되었고 이때 기둥의 주철근량은 1%의 철근비인 900 mm²로 고려하였다. 피복두께는 30 mm로 설계 되었으며, 콘크리트의 횡방향 구속철근은 D10 철근을 사용하여 120 mm 간격으로 배근 하였다. 또한 크로스빔은 길이가 3.6 m이고 가로와 세로가 Fig. 3(b)와 같이 각각 600 mm, 500 mm로 설계되었다. 주

Fig. 3. Cross-Sectional Shapes

(a) Unconfined Concrete

(b) Steel

Fig. 4. Material Properties

철근의 철근비는 기둥과 동일한 1%의 철근비인 3,000 mm²로 고려되었다. 피복두께는 기둥과 동일한 30 mm로 설계 되었고 횡방향 구속 철근은 D10 철근을 220 mm로 설계되었다.

본 연구에서 적용한 콘크리트와 철근의 구성관계는 Fig. 4와 같다. 콘크리트의 구성관계는 해석 시 기둥과 크로스빔의 재료의 비선형성을 고려하기 위해 Mander 모델(Mander *et al.*, 1988)을 적용하였다. 탄성계수는 30.677 GPa, 최대 압축강도는 42 MPa이며 최대 압축강도에서의 변형률은 0.002로 고려하였다. 또한 극한상태에서의 응력과 변형률은 각각 8.4 MPa와 0.0205이다. 철근의 경우 항복응력은 0.42 MPa, 탄성계수는 200 GPa이며 변형경화 시 변형률은 0.03으로 적용하였다. 이러한 변수들을 고려하여 기둥과 크로스빔의 양 단면에 대한 sectional fiber 해석을 실시하였으며, 이렇게 생성된 moment-curvature envelope를 해석에 사용하였다.

상부슬래브는 Fig. 5(a)에서 보여주는 형식의 앵커-볼트로 크로스빔과 연결되어 있으며 각 방향의 거동은 Fig. 5(b)와 같이 link 또는 spring 요소를 사용하여 모델링하였다.

이때 연결부에서 앵커의 소성거동을 고려하기 위해 종방향(y), 횡방향(x), 연직방향은 multi linear plastic link를 사용하여 모델링하였으며, 각 방향 link는 3개의 rigid link로 슬

(a) Details

(b) FE Modeling

Fig. 5. Anchor-Bolt Connections

래브와 연결 하였다. 이때 초기 스프링 강성은 식 (a)와 (b)로 계산되어진다.

$$k_l = k_t = \frac{3EI}{L_{eff}^3} \quad (a)$$

$$k_v = \frac{EA}{L} \quad (b)$$

여기서 k_t 과 k_r 는 종방향(차량진행방향)과 횡방향 연결부의 스프링 강성을 의미하고, k_n 는 수직방향 또는 앵커의 축방향 강성을 나타낸다. E 와 A 는 각각 앵커의 휨강성과 축강성을 의미하며, L 과 L_{eff} 는 앵커볼트의 총길이와 유효길이(크로스빔에 근입된 부분을 제외한 앵커볼트의 길이)를 나타낸다. 또한 항복응력이 발생할 때의 전단력($V_{y,t}$, $V_{y,l}$)과 축력($V_{y,v}$)은 아래 식으로 계산된다.

$$V_{y,t} = V_{y,l} = \frac{M_y}{L_{eff}} \quad (c)$$

$$V_{y,v} = EA\varepsilon_{s,y} \quad (d)$$

여기서 M_y 는 앵커의 항복모멘트로서 단면의 항복응력분포와 면적 등을 고려하여 계산되며 $\varepsilon_{s,y}$ 는 앵커의 축방향 항복변형을 나타낸다. 또한 앵커의 소성거동 시 강성, 즉 항복후 강성비(post-yielding stiffness ratio)는 강재(steel)의 해석의 안정성을 감안하여 초기강성의 2%를 적용하였으며, 연성비(ductility ratio)는 강재의 변형경화 전까지의 응력-변형률 관계를 감안하여 15를 적용하였다. 본 연구에서 고려된 앵커의 총길이와 직경은 각각 20 cm(유효길이는 10 cm)와 20 mm이며, 항복강도는 1,690 MPa(Grade 270)이다. 산정된 수평과 수직 방향의 힘-변위 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 한편 본 연구에서는 재료의 이력거동은 콘크리트의 경우 Takeda 모델을 적용하였으며, 철근 또는 강재의 경우는 yielding-oriented (kinematic) 이력모델을 적용하였다. 즉, 기둥과 크로스빔은

(a) Lateral Directions

(b) Vertical Directions

Fig. 6. Capacity Envelope Curves of Connectors

Takeda 모델을, 앵커-볼트 연결부의 경우 kinematic 이력모델을 적용하였다. 상부슬래브의 경우 일반적으로 탄성거동을 하기 때문에 별도의 이력모델을 적용하지 않았다.

본 연구에서 고려하고 있는 기둥의 지반 근입 깊이는 Fig. 7와 같이 8.5 m로 깊기 때문에 이에 따른 지반의 구속효과를 고려하기 위해 지반을 스프링요소로 모델링 하였다. 이때 적용된 지반스프링 강성은 Terzaghi (1955)와 Reese *et al.* (1974)에 의해 제안된 식 (e)를 이용하여 산정하였다.

$$k_n = n_h \times z_n \times h_n \times \frac{d}{\text{unit width}} \quad (e)$$

여기서 n_h 는 수평방향 지반 반력계수이다. 지반조건은 모듈러 도로의 시공 특성상 기둥 주변의 지반을 따로 다지지 않기 때문에 느슨한 점토 또는 사질토로 가정하였으며 이에 해당하는 지반 반력계수인 24.4 MN/m³를 적용하였다. 또한 식(e)에서 z_n 는 지면으로부터 지반 스프링의 위치까지의 깊이이며, h_n 는 각 지층의 두께이다. Fig. 7(a)는 이를 도식화하여 나타낸 것이다. 본 연구에서는 각 지층의 두께를 100 cm, 즉 지층의 개수를 9층으로 분할하여 종방향(y)과 횡방향(x)에 해당하는 스프링강성을 계산하였으며, Fig 7(b)는 본 연구에서 구현한 지반스프링에 관한 유한요소모델을 나타낸 것이다.

질량분포에 관한 고려는 기둥의 경우 크로스빔과 만나는 연결부와 지반스프링위치에 질량의 기하학적 분포를 고려하여 Fig. 8과 같이 총 10개 위치에 집중질량(lumped-mass)으로 모델링하였으며, 크로스빔의 경우 기둥과의 연결부에만 집중질량으로 모델링하였다. 지반의 경우 각 층에서 기둥과 접하는 면적을 고려하여 기둥의 질량과 동일한 위치에 집중질량으로 분포시켰다. 상부슬래브의 경우 총 203.35 kN을 연속

(a) Schematic Model of Soil (b) FE Model

Fig. 7. Soil Spring Modeling (x: Transverse Direction, y: Longitudinal Direction)

Fig. 8. Mass and Gravity Load Considerations

Fig. 9. Final FE Model

질량(continuous-mass)으로 모델링하였다. 또한 단일 모듈러 시스템 주변의 슬래브들의 자중은 기둥의 P-Delta effect와 모멘트-곡률 이력거동에 영향을 미치기 때문에 이를 고려하기 위해 Fig. 8과 같이 기둥 상부에 수직하중으로 재하 하였다. Fig. 9는 완성된 최종 유한요소모델을 나타낸 것이다.

3. 고유치해석

Table 1은 모듈러도로 시스템의 지배적인 주파수 또는 고유주기를 파악하기 위해 고유치 해석을 수행한 결과를 나타

Table 1. Eigenvalue Analysis Results

	Eigenvalue (rad/sec)	Natural frequency (Hz)	Mode direction
1st mode	8.9921	1.4311	longitudinal
2nd mode	16.408	2.6114	transverse
3rd mode	22.135	3.5229	torsion
4th mode	122.29	19.462	vertical

(a) 1st Mode (b) 2nd Mode

(c) 3rd Mode (d) 4th Mode

Fig. 10. Mode Shapes (1st to 4th mode)

낸 것이다. 해석결과 종방향 거동에 해당되는 1차 모드가 지배적이며, 이후 횡방향 거동이 지배적임을 알 수 있다. 기둥의 강성은 횡방향과 종방향이 동일함에도 불구하고 횡방향 모드에 비해 종방향 모드가 지배적인 이유는 크로스빔의 강성이 횡방향 모드에 기여하여 전체적으로 횡방향 강성이 종방향 강성보다 더 크게 되기 때문이다. Fig. 10은 각 방향별 모드형상을 나타낸 것이다.

4. 인공지진파 생성

국내 도로교설계기준(KRTA, 2010)에 명시한 내진설계는 인명피해는 최소화하고 부재의 부분적 피해는 허용하나 전체적인 붕괴는 방지하도록 설계하는 것, 즉 붕괴방지수준 만족에 그 목표를 두고 있다. 하지만 본 연구에서는 보다 자세한 내진성능을 분석하기 위해 붕괴방지수준뿐만 아니라 기능수행수준까지 고려하기로 한다. 관련된 입력지반운동은 내진설계기준연구(EESK, 1997)에 제시되어 있는 내진 1등급의 기능수행수준과 붕괴방지수준에 해당하는 설계응답스펙트럼을 적용하였다. 이에 해당하는 지진하중의 크기는 기능수행수준의 경우 재현주기 100년(10년내 초과확률 10%)이며, 붕괴방지수준의 경우는 재현주기 1,000년(100년내 초과확률 10%)에 해당된다. 지반조건은 보통암지반(S_B)으로 고려하였다. 인

Fig. 11. Design Response Spectrum

(a) Operational Level

(b) Collapse Prevention Level

Fig. 12. Generated Artificial Ground Motions

공지진파는 프로그램 SIMQKE (Gasparini and Vanmarcke, 1976)를 사용하여 생성 하였으며, 감쇠비는 2%로, 지속시간은 25초로 가정하였다. Fig. 11과 Fig. 12는 기능수행 수준과 붕괴방지 수준의 설계응답스펙트럼과 생성된 인공지진파를 나타낸 것이며, 최대가속도는 기능수행수준의 경우 0.06 g, 붕괴방지수준의 경우 0.16 g로 붕괴방지수준이 약 2.7배정도 큰 값을 나타낸다.

5. 성능수준에 따른 내진거동

본 연구에서는 먼저 종방향 단일축으로 지진을 입력하여 구조물의 거동을 분석하였다. 또한 고유치해석에서 나타난 바와 같이 횡방향 거동(2차 모드)을 무시할 수 없으므로 종방향과 횡방향에 동시에 지진을 입력한 결과를 분석하였다. 적용된 감쇠비(damping ratio)는 2%이며 또한 P-Delta effect를 고려하였다. 시간이력해석은 nonlinear direct-integration tool을 적용하여 수행하였다. 한편 본 연구에서는 기능수행수준의 만족 판단은 구조요소 전체가 탄성거동을 하는지 여부와, 붕괴방지수준의 만족 판단은 구조요소의 최대응답이 극한(ultimate) 값 이내에 머무는지 여부로 결정하였다.

5.1 일축방향(종방향) 입력에 따른 내진성능

Fig. 13은 기능수행수준의 인공지진파 입력 시 모듈러 도로 시스템 연결부에서의 종방향 변위응답을 나타낸 것이다. 최대 변위는 4.28초에서 0.87 mm로 매우 작게 나타남을 확인할 수 있다. Fig. 14는 기둥과 앵커-볼트 연결부의 이력거동을 나타낸 것이며, 최대응답을 Table 2에 정리하였다. 요소 전체에 걸쳐 탄성 영역에서 거동하고 있으며, 이는 기능수행수준에 만족함을 의미한다. 한편 기둥에 전달되는 최대 전달 모멘트는 약 15,600 kN·mm이며, 연결부에서 발생한 최대 전단력은 약 4.1 kN이다. Fig. 15는 붕괴방지수준의 인공지진파를 입력하였을 경우 연결부의 종방향 변위응답을 나타낸 것이다. 최대변위는 2.12 mm이며, 4.29초에 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 기능수행수준에 비해 2.4배정도 큰 값이다. Fig. 16은 기둥과 연결부의 이력거동을 나타낸 것으로 기둥과 빔

Fig. 13. Seismic Response of Connector for Longitudinal Direction

(a) Columns

(b) Connector

Fig. 14. Hysteretic Responses

Table 2. Maximum Seismic Response for Operational Level

Columns		Connectors			
		Longitudinal		Transverse	
Sectional moment	Status	Displacement	Status	Displacement	Status
15,600 kN·mm	Elastic	0.87 mm	Elastic	0.001 mm	Elastic

Table 3. Maximum Seismic Response for Collapse Prevention Level

Columns		Connectors			
		Longitudinal		Transverse	
Sectional moment	Status	Displacement	Ratio to ultimate	Displacement	Ratio to ultimate
38,800 kN·mm	26%	2.12 mm	36%	0.0015 mm	0.5%

Fig. 15. Seismic Response of Connector for Longitudinal Direction

(a) Columns

(b) Connector

Fig. 16. Hysteretic Responses for Collapse Prevention Seismic Level

요소에서는 탄성영역거동을 보였으나 연결부의 종방향에서는 소성거동을 나타냈다. 하지만 연결부 최대변위가 극한(ultimate) 값에 비해 매우 작으므로 붕괴방지수준에도 만족함을 알 수 있다. 최대응답 결과는 Table 3에 정리하였으며,

기둥의 최대 전달 모멘트는 38,800 kN·mm이고 연결부에 발생하는 최대 전단력은 약 5.7 kN으로 나타났다.

5.2 이축방향(종방향과 횡방향) 입력에 따른 내진성능

Table 4는 이축방향 지진운동에 따른 거동을 분석하기 위해 도로교설계기준(KRTA, 2010)을 바탕으로 방향별 하중조합의 경우들을 나타낸 것이다. 여기에서 30%는 생성한 인공 지진의 최대가속도를 0.3배 만큼 축소(scaling)하는 것을 의미하며 100%는 인공지진파를 실제 생성된 크기만큼 입력하는 것을 의미한다. Op는 기능수행수준(Operational level)의 지진을, Co는 붕괴방지수준(Collapse prevention level)의 지진하중을 나타낸다.

Table 5는 각 경우별 최대응답 결과를 정리한 것이다. Case 1-Op(종방향-100%, 횡방향-30%)는 앞서 보여준 일축방향(종방향)에만 지진을 입력한 경우와 거의 유사한 크기의 최대응답 값을 보였으며, Case 2-Op(종방향-30%, 횡방향-100%)에서는 횡방향 변위는 다소 증가하였으나 종방향과 횡방향 변위 모두 0.5 mm이내의 매우 작은 값을 보였다. Case 2-Op가 이렇게 작은 변위를 나타낸 이유는 크로스빔이 횡방향 거동으로 큰 저항력을 발휘하고 있기 때문이다. 지진하중의 방향별 조합에 따른 붕괴방지수준의 지진응답을 보면, Case 1-Co(종방향-100%, 횡방향-30%)의 경우 종방향 거동은 소성상태의 거동을 보이고 있으나 Case 2-Co(종방향-30%, 횡방향-100%)는 모두 1 mm 이내의 탄성거동을 보였다. 한편 기둥과 크로스빔은 모든 경우들에 대해 탄성거동을 보였다. 이를 바탕으로 본 논문에서 고려하고 있는 모듈러 도로 시스템

Table 4. Directional Combinations of Seismic Loading

Performance level	Case	Earthquake direction	
		Longitudinal	Transverse
Operational	Case1-Op	100%	30%
	Case2-Op	30%	100%
Collapse prevention	Case1-Co	100%	30%
	Case2-Co	30%	100%

Table 5. Maximum Seismic Response for Directional Combinations

Case	Columns		Connectors			
	Sectional moment (kN·mm)	Status or ratio to ultimate	Longitudinal		Transverse	
			Displacement	Status or ratio to ultimate	Displacement	Status or ratio to ultimate
Case 1-Op	15,790	Elastic	0.88 mm	Elastic	0.001 mm	Elastic
Case 2-Op	4,770	Elastic	0.26 mm	Elastic	0.002 mm	Elastic
Case 1-Co	38,260	25%	2.12 mm	36%	0.0017 mm	0.5%
Case 2-Co	11,780	8%	0.65 mm	11%	0.005 mm	1%

템은 기능수행수준과 붕괴방지수준 모두 만족함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 국내 내진설계기준 내진 1등급에 해당하는 기능수행수준과 붕괴방지수준의 지진하중 입력으로 모듈러 도로 구조물의 내진성능을 분석하였다. 그 결과 기능수행수준에서는 모든 구조요소가 탄성거동을 보임으로 내진성능을 만족하였다. 붕괴방지수준에서는 기둥과 크로스빔 모두 탄성거동을 보였으나 연결부의 중방향으로는 변위가 약 2 mm로 소성상태를 보였다. 하지만 이는 극한값의 약 36% 정도에 머물기 때문에 내진성능에 만족함을 나타냈다. 이러한 결과는 일축방향 지진입력뿐만 아니라 이축방향 하중조합에서도 같은 경향을 보였다. 향후 보다 정밀한 내진성능검토를 위해서는 연결부의 체결형식이나 구속조건들에 대한 보다 자세한 분석과 이를 반영하는 상세 모델링이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 한국건설기술연구원 주요사업(혁신적 스마트 조인트 모듈러 도로 시스템 개발) 지원으로 수행되었습니다.

References

- Computer and Structures, Inc. (CSI) (2011) SAP 2000 Version 15.0.
- Earthquake Engineering Society of Korea (EESK) (1997) Study on Seismic Design Guidelines (II).
- Gasparini and Vanmarcke (1976) SIMQKE, A program for artificial motion generation user's manual and documentation, Department of Civil Engineering Massachusetts Institute of Technology.
- Houben, L.J.M., Huurman, M. van der Kooij, J., and Poot, S. (2004) APT Testing and 3D Finite Element Analysis of Modieslab Modular Pavement Structures, *2nd International Conference on Accelerated Pavement Testing*, Minneapolis, USA, September 25-29, 2004.
- Korea Road & Transportation Association (KRTA) (2010) Korean Bridge Design Specifications.
- Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R. (1988) Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-182.
- Reese, L.C., Cox, W.R., and Koop, F.D. (1974) Analysis of laterally loaded piles in sand, *Proceedings of the VI Annual Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, Vol. 2, pp. 473-685.
- Terzaghi, K.V. (1955) Evaluation of Coefficient of Subgrade Reaction, *Geotechnique*, Vol. 5, No. 4, pp. 297-326.

© Received October 22, 2013

© Revised October 30, 2013

© Accepted December 9, 2013