

말뚝식과 블록식이 혼합된 시멘트혼합처리공법(DCM)의 구조체 해석 비교 연구

A Comparative Study of Structural Analysis on DCM Improved by Pile and Block Type

신 현 영¹ Shin, Hyun Young

김 병 일² Kim, Byung Il

김 경 오³ Kim, Kyoung O

한 상 재⁴ Han, Sang Jae

Abstract

In this study, the structural analysis is performed on the method of shallow block and deep cement mixing pile, and then their characteristics and associated behaviors were analyzed. In the case of continuous beam analysis, the predicted settlement was very small, and shear force and bending stress are somewhat overestimated. The frame method is similar to numerical analysis in the internal force shallow block and long pile, but because the settlement of pile is underestimated, the additional calculation using the reaction of the long pile is necessary. For soil arching method and piled raft foundation method, the excessive axial force of long pile was predicted because the load sharing of pile is very large compared to the other methods. In the behavior of the shallow block and deep pile method, the settlement of shallow block and contact pressure are much in the center than the edge. In the estimating method considering the interaction between improved material and ground, the load sharing of the soil-cement pile ranges from 20% to 45%, and the stress ratio is 2.0~5.0 less than piled DCM. The maximum member forces at the boundary conditions of pile head are similar, but in fixed head the axial force and vertical displacement are different in accordance with pile arrangement.

요 지

본 논문에서는 천층블록/심층말뚝 혼합식 시멘트혼합처리 공법을 구조체적 관점에서 해석하였고, 각 방법별 특징 및 관련 거동을 분석하였다. 연속보 해석법의 경우 침하량을 매우 작게 예측하였고, 천층블록의 전단력과 휨응력은 다소 크게 예측하였다. Frame 해석법의 경우 천층블록의 부재력과 장주의 부재력은 수치해석법과 가장 근접한 거동을 예측하였지만, 장주의 침하는 작게 예측하여, 장주 반력을 이용한 별도 침하계산을 실시해야하는 것으로 나타났다. 지반아칭법과 말뚝지지전면기초해석법의 경우 장주의 하중분담율이 타방법에 비해 매우 커서 장주의 축력이 과대 예측되었다. 천층블록/심층말뚝 혼합식 시멘트혼합처리공법을 적용하면, 천층블록의 침하 및 지반반력은 중앙에서 가장 크고, 외곽에서 가장 작았다. 또한, 개량체와 지반간의 상호작용을 고려할 수 있는 해석법에서 장주 개량체가

1 정희원, (주)대우건설 기술연구원 토목연구팀 책임연구원 (Member, Principal Researcher, DaeWoo E&C)

2 정희원, (주)지구환경전문가그룹 기술연구소 연구소장 (Member, Research Director, Expert Group for Earth and Environment, Tel: +82-31-478-4111, Fax: +82-31-478-4115, geokbi@korea.com, Corresponding author, 교신저자)

3 정희원, (주)대우건설 기술연구원 토목연구팀 선임연구원 (Member, Senior Researcher, DaeWoo E&C)

4 정희원, (주)지구환경전문가그룹 대표이사 (Member, President, Expert Group for Earth and Environment)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 10월 31일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

분담하는 하중은 약 20~45% 범위를 보였고, 응력분담비는 일반적인 말뚝식 DCM 공법보다 작은 약 2.0~5.0정도의 범위를 나타내었다. 장주 두부 경계조건에 따라 최대 부재력에서는 유사하지만, 두부 구속조건에서는 장주의 위치에 따라 축력 및 연직변위는 서로 다르게 나타났다.

Keywords : DCM, Block type, Pile, Structural analysis, Stress ratio

1. 서론

국내 천연 모래 수급량의 감소와 이에 따른 단가 상승으로 기존 연약지반 보강공법으로 적용되었던, SCP 공법이 DCM 공법으로 대체되고 있는 실정이다. DCM 공법은 말뚝의 배치형태에 따라 말뚝식, 블록식, 벽식, 격자식 및 혼합식으로 적용될 수 있지만, 주로 말뚝식, 벽식 및 블록/격자 혼합식 형태가 주를 이루고 있다. 그러나, 최근에는 경제적인 설계를 위해 말뚝(장주)과 천층블록(단주) 혼합형식을 적용하는데, 말뚝지지전면기초와 매우 유사한 형태로 천층블록에 하부 기초지반의 접지압(지반반력)이 말뚝 주변을 따라 크게 감소하기 때문에 블록에서 발생하는 응력이 감소하고, 말뚝과 말뚝사이 무처리 영역에서의 침하량이 크게 감소하여 적용성이 우수한 공법이다. 그러나, 국내에서는 관련 설계법과 연구가 많지 않아 천층블록과 하부 기초지반간의 상호작용 등을 고려하지 못하는 등 적용하는데 많은 어려움을 겪는 것이 현실이다.

말뚝식 시멘트혼합처리공법은 상부하중을 쏘일시멘트말뚝으로 하부 지지층에 전달하는 개념으로 개량율이 낮은 경우 상당한 간격을 가지고 설치되므로 균질화 기법을 이용한 공학적 특성을 평가하여 복합지반으로만 해석하는데는 많은 문제가 발생할 수 있다. 일본의 경우 말뚝식은 복합지반 설계법을 우선으로 하고 있지만, 최근 구조체 설계법도 함께 검토해야 함을 제시하였고(CDM 研究会, 2005), ALiCC공법(日本 土木研究所, 2007)의 경우 지반아칭을 고려한 설계법을 제시하기도 하였다.

본 논문에서는 천층블록/말뚝식 시멘트혼합처리 공법을 구조체 관점에서 해석할 수 있는 다양한 방법과 특징, 그리고 사례 단면에 대한 해석 결과를 분석하였고, 천층블록과 장주의 하중분담 특성, 침하량, 응력분담비, 두부경계조건 및 영향인자 등에 따른 거동을 고찰하였다.

2. 블록/말뚝 병행 개량지반의 해석법

2.1 연속보법

본 방법은 상부 천층개량 블록(Block)을 보(Beam)로 간주하고, 장주를 지점으로 간주한 해석법이다. 블록의 전단력, 휨모멘트, 처짐 등을 계산할 수 있지만, 장주를 지점으로 간주하였기 때문에 장주의 축강성, 휨강성은 무한대고, 장주 주변 지반저항은 고려할 수 없다(Fig. 1).

2.2 Frame 해석법

본 방법은 지반은 Spring, 블록은 Beam으로 간주하고, 장주와 블록은 회전강성과 축강성을 가지고 Frame으로 연결되어 있다고 가정한다(Macaulay, 1919). 또한, 장주와 블록의 연결은 회전강성에 의해 자유 또는 구속될 수 있다. 연속보법에 비해 장주 전단력과 휨응력 등을 계산할 수 있고, 블록 하부 지반의 저항을 고려할 수 있다(Fig. 2). 본 해석법과 유사한 접근법으로는 Poulos(1991)의 Strip on Spring Model, Kitiyodom et al.(2011)의 Hybrid Model이 있다.

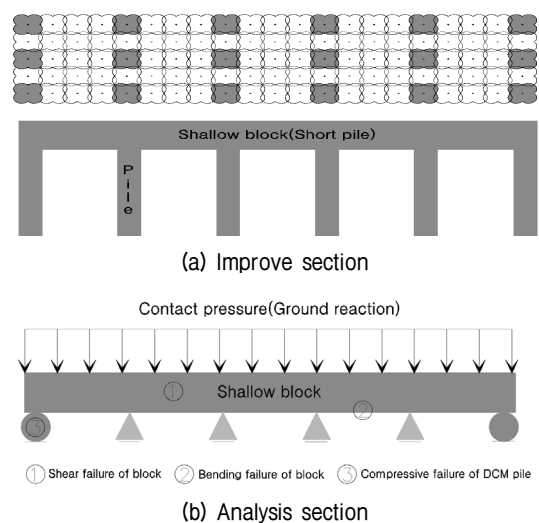


Fig. 1. Continuous beam method

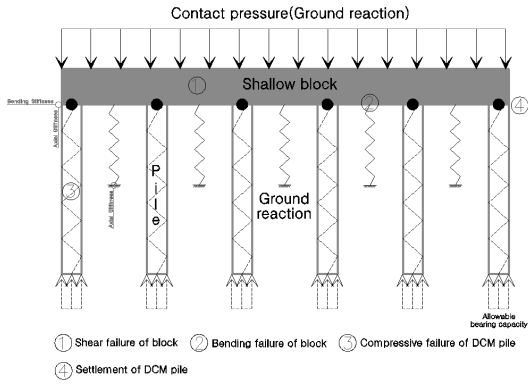


Fig. 2. Frame method

2.3 지반아칭해석법

본 방법은 일본 ALiCC공법(日本 土木研究所, 2007)의 설계시 채택된 방법으로, 3차원 지반아칭효과를 고려한 해석법이다. 본 방법은 원래 말뚝식 개량지반에 적용하던 것을 천층블록이 혼합된 지반에 확장 적용되었다. 연속보 해석법과 달리 복합지반 설계법에서의 응력 집중을 고려한 하중전이와 유사한 효과를 고려할 수 있다. 또한, 천층블록의 전단력 계산시 지반지지력과 비교하여 작용력이 지지력보다 작을 경우 전단력이 작용하지 않는다고 가정한다. 휨응력 계산시 탄성지반상의 단순보(Winkler Foundation) 모델로 간주하고 지반반력을 고려하여 계산한다. 식 (1)과 식 (2)에 전단응력과 휨응

력 계산식을 제시하였다.

$$\text{전단응력, } \tau_{sc} = \frac{(P_{soil} - q_a) \times (\lambda^2 - \pi d^2/4)}{\pi \times d \times H_{se}} \quad (1)$$

휨모멘트, 휨응력,

$$M_{\max} = \frac{P_{soil} \times \sin(\beta \cdot \lambda/2) \times \sinh(\beta \cdot \lambda/2)}{\beta^2 [\cosh(\beta \cdot \lambda) + \cos(\beta \cdot \lambda)]},$$

$$\sigma_{sc} = M_{\max} / Z_{sc} \quad (2)$$

여기서, P_{soil} =무처리부분에 작용하는 하중, q_a =무처리 지반의 허용지지력, λ =장주 간격, d =개량체 직경, H_{se} =천층블록의 두께, $\beta = 4 \sqrt{\frac{K_v}{4EI}}$, K_v =연직지반반력계수, Z_{sc} =블록의 단면계수

이상에서 제시된 방법에 대한 개념을 Fig. 3에 제시하였다.

2.4 말뚝지지 전면기초해석법

본 방법은 천층블록과 하부 기초 지반간의 상호작용을 고려한 해석법이다. 무리말뚝 해석법과 달리 천층블록의 거동을 포함하여 해석하는 방법으로 더 합리적이고 경제적이 될 수 있다(Kim, 2010). 천층블록이 지반과 접해있기 때문에 하중을 분담할 수 있으므로 장주로 전

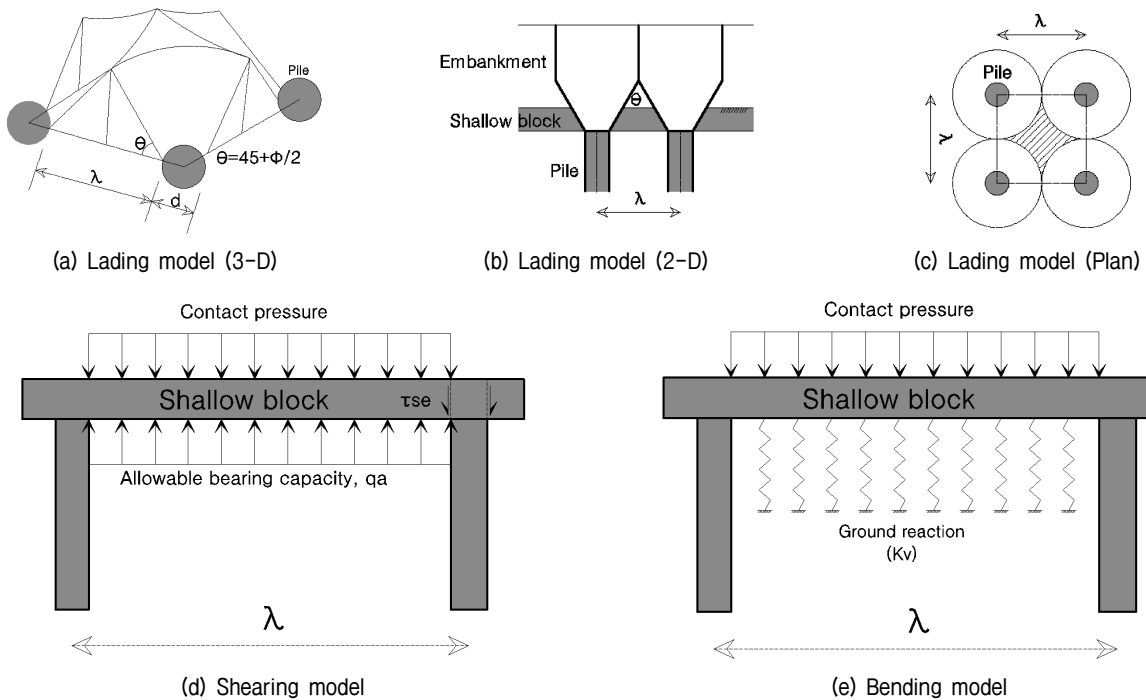


Fig. 3. Ground arching method (Alicc, 2007)

달되는 하중이 감소하고 침하량도 감소하는 효과를 고려한 것이다. 따라서 지반이 상당부분 하중을 분담할 수 있으므로 장주의 수량을 크게 감소시킬 수 있다. 다만, 원래의 말뚝지지 전면기초에서는 래프트(Raft) 기초지반이 연약한 경우 래프트의 하중분담효과가 작아 본 기초는 비효과적일 수 있다고 제시되어 있다(Katzenbach et al., 2000). 따라서 기존 말뚝지지전면기초에 비해 말뚝의 하중분담비가 클 것으로 예상된다.

해석 개념상으로 무리말뚝과 전면기초가 합쳐진 것이므로 본 방법은 무리말뚝의 거동과 유사하게 해석한다. 천층블록의 힘은 장주를 지점으로 하는 단순보로 간주하고, 전단은 지반아침법과 동일하게 장주면을 따라 발생(압발전단)한다고 가정하였다. 식 (3)과 식 (4)에 전단응력과 휨응력 계산식을 제시하였다.

$$\text{전단응력, } \tau_{se} = \frac{P_{raft} \times (\lambda^2 - \pi d^2/4)}{\pi \times d \times H_{sc}} \quad (3)$$

휨모멘트, 휨응력,

$$M_{max} = \frac{P_{raft} \times B \times L^2}{10}, \quad \sigma_{se} = M_{max} / Z_{sc} \quad (4)$$

여기서, P_{raft} =천층블록이 분담하는 하중, λ =장주 간격, d =개량체 직경, H_{sc} =천층블록의 두께, Z_{sc} =천층블록의 단면계수, B =장주 간격(지면에 수직인 방향), L =장주 간격

2.5 수치해석법

본 방법은 유한요소해석법으로 근래 적용 사례가 증

가하고 있는 말뚝지지전면기초와 동일한 해석법이다. 다만, 말뚝지지전면기초의 경우 지표에 확대기초가 설치되는 경우가 많지만, 말뚝/블록 혼합식 개량의 경우 지중에 블록이 형성되기 때문에 천층블록과 지반과의 상호작용을 고려할 필요가 있다. 따라서, 블록을 지반내에 설치하고, 장주를 Plate로 간주하였다. 시멘트혼합처리 공법의 경우 기성말뚝과 콘크리트 Raft와는 달리 지반과 시멘트의 혼합 교반에 의해 형성된 개량체이므로 경계가 명확하게 구분되지 않는다. 이에 본 연구에서는 Interface 요소를 적용하지 않았다. 추가적으로 본 방법은 천층블록 하부 지반 및 장주와 지반간의 상호작용 등을 모두 고려할 수 있는 특징을 가지고 있다.

3. 해석조건

본 논문에서 고려한 해석단면은 Fig. 4와 같이 교통하중, 15kN/m^2 , 성토높이 5.0m , 연약지반 두께 15.0m , 천층블록 두께 3.0m 를 기준으로 하였다. 관련 특성은 Table 1과 2와 같고, 3차원 설치간격을 편리하게 고려하기 위해 지면에 수직인 방향의 설치간격은 횡간격과 동일하게 적용하였고, 이를 고려한 관련 정수를 해석시 적용하였다.

해석에 사용된 정수중 흙의 탄성계수와 개량체의 탄성계수의 비를 강성비($K = E_p/E_s$)라 정의하는데, 일반적인 콘크리트와 지반간의 강성비가 연약지반에서 약 6,000임(Kim, 2010)을 고려하면 본 논문에서 적용한 시멘트혼합처리토와 지반간의 강성비는 50이다. 일반적으로 DCM에서 개량체의 탄성계수로 $50 \sim 100q_{uck}$ 를 적용하는 것을 고려하면 강성비는 작은 값에 해당하며, 기

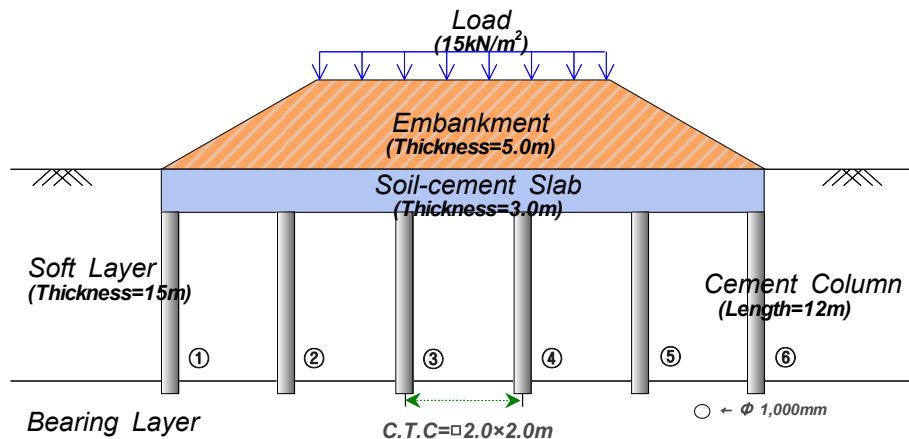


Fig. 4. Analysis section

Table 1. Design paramerters I (Ground)

Embankment			Ground			
Unit weight, γ (kN/m ³)	Height, H (m)	Interal friction angle, ϕ (deg)	Unit weight, γ (kN/m ³)	Strength, Su (kPa)	Compression index, Cc (-)	Elastic modulus, E (kPa)
18	5	30	17	25	0.92	2000

Table 2. Design paramerters II (Improved materials)

Shallow block (Short pile)				Cement cloumn (DCM pile)			
Thickness, T (m)	Design strength, q_{uck} (kPa)	Elastic modulus, E (kPa)	Plastic angle, θ (deg.)	Diameter, D (m)	Spacing, S (m)	Design strength, q_{uck} (kPa)	Elastic modulus, E (kPa)
3.0	2000	100000	65	1.0	2.0	2000	100000

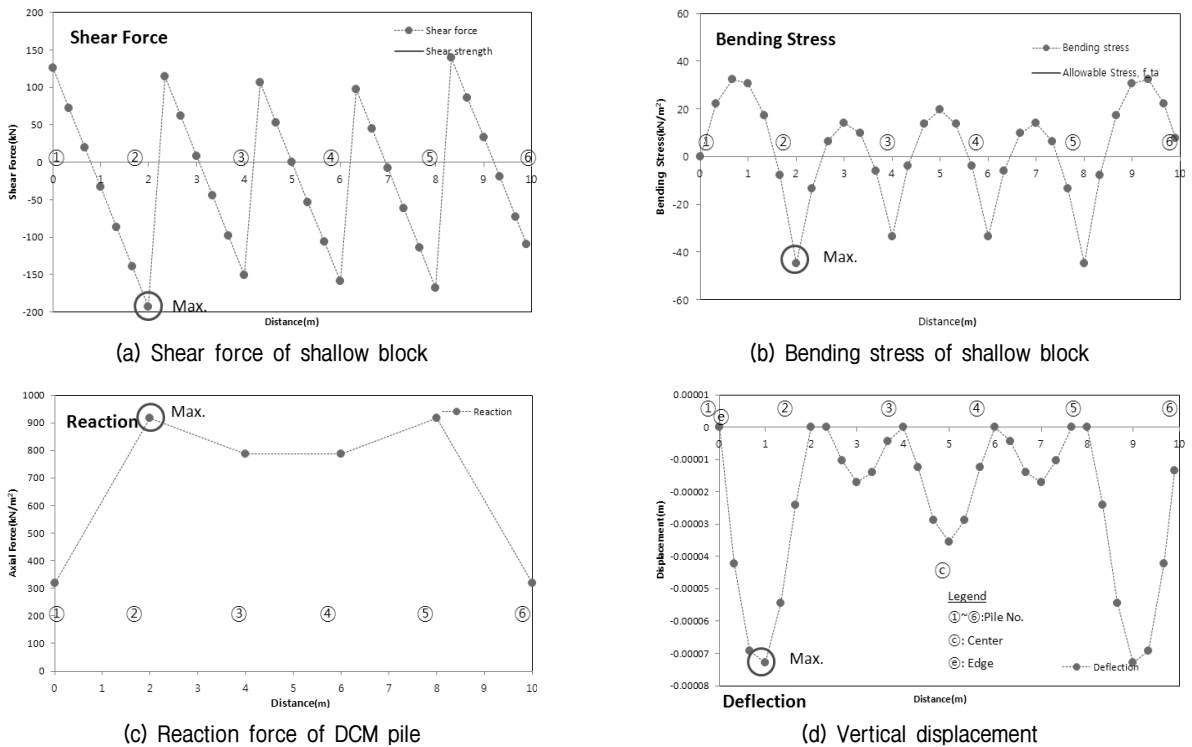


Fig. 5. Stress, strain characteristics of improved body (continuous beam method)

존 무리말뚝이나 말뚝지지전면기초와는 다른 거동을 보일 수 있다는 것을 예상할 수 있다.

4. 해석 결과

4.1 연속보법

본 방법에 대한 해석결과를 Fig. 5에 제시하였다. 전 단력은 각 지점(장주)에서 변화하였고, 최외곽 장주의 휨응력은 Zero이고, 각 장주 지점에서 최대값을 나타내었다. 이는 천층블록 하부 기초지반의 저항을 고려하지 않았기 때문에 장주에서만 반력이 발생한 것이다. 장주

반력은 최외곽부가 내부보다 작게 받는 것으로 예측되었다. 또한, 각 지점(장주)에서 침하가 발생되지 않기 때문에 무처리 영역에서의 침하가 매우 작게 예측되었다. 따라서 의미가 없는 값으로 판단된다. 이하 본 논문에서의 연직변위는 천층블록의 자체 침하는 미소하여 이를 제외한 값을 밝혀둔다. ①~⑥ 장주중 내측 ②, ⑤가 가장 큰 부재력을 보여 설계 지배 요소인 것으로 나타났다.

4.2 Frame법

본 방법에서는 두부 자유조건과 구속조건에 대하여

모두 계산하였다. 일반적인 말뚝지지전면기초의 경우 강성이 큰 콘크리트 또는 강말뚝을 래프트(Raft)에 강결하는 형태를 취하지만, 시멘트혼합처리공법의 경우 주변 지반에 비해서 강성은 크지만 장주와 천층블록을 접원 또는 중첩하여 시공하기 때문에 일반 말뚝에 비해 완전 강결이 어려울 것으로 예상된다. 따라서 현 시점에서는 두부 자유 조건과 구속 조건에 대하여 모두 검토하는 것이 바람직할 것이다.

본 논문에서는 두부 자유의 경우 장주 개량체의 강성(EI)을 이용하여 계산한 회전강성을 적용하여 구현하였고, 구속조건을 구현하기 위해 회전강성을 계산값에 비해 100배 증가시켜 적용하였다. Fig. 6에 제시된 바와 같이 말뚝 두부구속과 자유조건에서 전단력, 변위, 축력 및 휨응력에서는 차이를 보이고 있다. 두부 자유 조건에서 최외곽부 휨응력은 거의 Zero, 두부구속조건에서는 약 50kPa이 작용하였다. 장주 설치 지점이 ①~⑥임을 고려하면 최외곽부에서 가장 큰 차이를 보이고 있다. 그러나, 장주 개량체의 내적안정성 검토시 이용되는 최대

휨응력은 유사한 값을 나타내었다.

또한, 천층블록 하부 기초지반의 지반반력을 고려하였기 때문에 (c)와 같이 지점사이 무처리 영역에서도 반력이 발생하였다. 즉, 천층블록 하부 기초지반에 일정 하중을 분담시켰다는 것을 알 수 있다. 또한, 최대값이 연속보법보다 작은 것으로부터도 재차 확인된다. 대체로 장주에서의 반력이 큰 것으로 볼 때 무처리 영역에서 장주로의 응력전이가 발생했음을 알 수 있다. 반력과 침하형태는 중앙에서 가장 크고, 외곽에서 가장 작게 나타났다.

일반적으로 등분포하중이 연성 기초판에 작용하면 지중으로 전달되는 응력은 기초의 중간에서 가장 크고 외곽으로 갈수록 감소한다. 따라서 기초 중심에서 침하량도 더 크게 발생하고, 외곽부로 갈수록 감소한 것이다.

4.3 지반아칭법

본 방법에 대한 해석결과는 Table 3과 같다. 전단응력

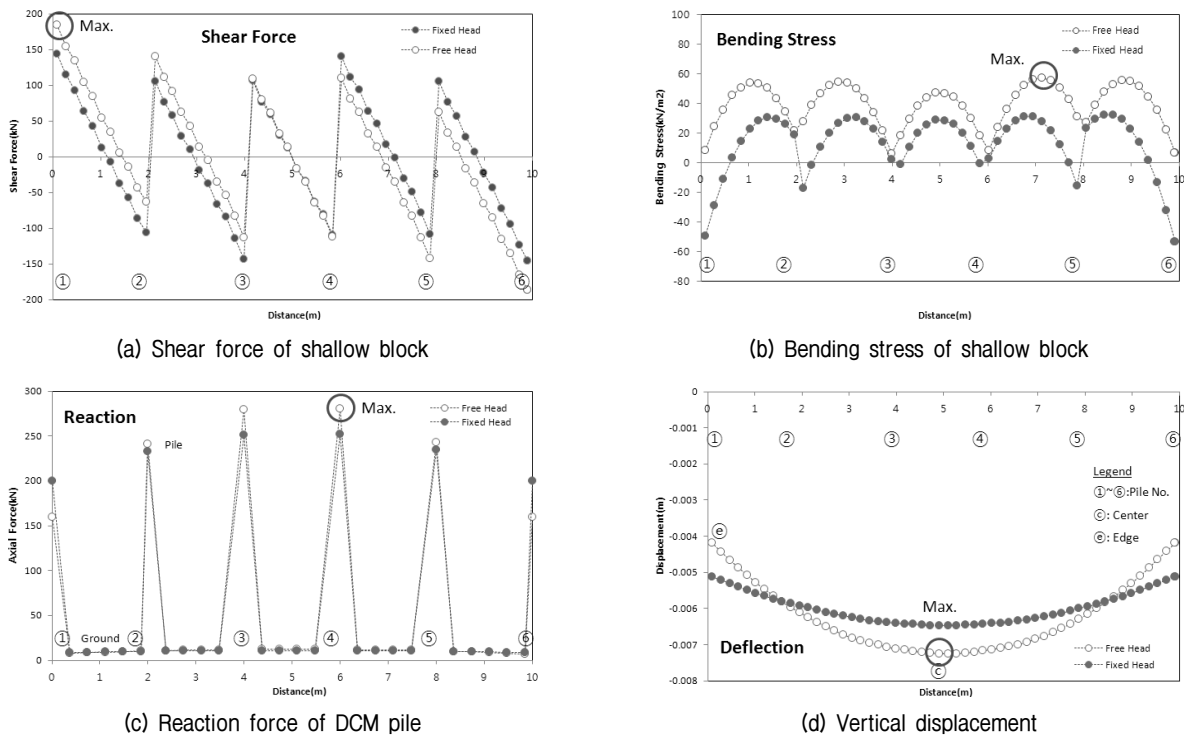


Fig. 6. Stress, strain characteristics of improved body (frame method)

Table 3. Calculation results of ground arching method

Shallow block			Cement column	
Shear force (kN)	Bending stress (kPa)	Vertical displacement (cm) (mean)	Axial force (kN)	Vertical displacement (cm)
0.0	9.25	8.0	534.2	2.60

이 작용하지 않은 이유는 장주로의 응력전이로 무처리 지반에 작용하는 하중이 허용지지력보다 작았기 때문이다.

장주개량체에 작용하는 축력은 앞의 두 방법에 비해 매우 크게 나타났다. 이는 본 방법에서 고려한 아칭효과로 인해 장주개량체로 응력이 집중되었기 때문이다. 탄성범위로 계산한 개량체 자체의 연직변위는 2.60cm로 나타났다지만, 지반아칭법에서 제시한 복합지반으로 간주할 경우 8.0cm의 침하가 계산되었다. 본 방법에서 변위는 주상개량체와 미개량 영역을 하나의 등가 지반으로 간주한 복합지반 설계법으로 결정한 값으로 타 방법에 비해 큰 변위를 예측하였다.

4.4 말뚝지전면기초법

본 방법에 대한 해석결과는 Table 4와 같다. 이때 해석은 Randolph(1994)의 방법으로 하중분담율과 침하를 계산하였다. 천층블록의 하중분담을 고려했기 때문에 전단응력이 발생하였고, 지반아칭법과 유사하게 변위와 축력이 크게 예측되었다. 이는 천층블록 하부 기초지반이 연약지반으로 하중 분담이 작았기 때문이다. 등가피어법으로 계산한 침하는 12.5cm이고, 장주 개량체의 하중을 고려한 침하는 8.10cm로 나타났다.

단순하게 말뚝 본수와 총하중을 고려한 본당 하중은 636kN이므로 하중전이에 의해 감소하였지만, 천층블록과 지반간의 상대강성의 비가 작아 천층블록의 분담이 크지는 않은 것으로 판단된다.

4.5 수치해석법

본 절에서는 유한요소해석 프로그램인 Plaxis 8.2를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 이때, 장주 개량체는 Plate로 모델링 하였으며, 지지층은 일반 풍화토로 모델링하여 장주의 침하가 가능하도록 하였다. 또한, 천층블록 하부에 Plate를 삽입하여 전단력, 휨모멘트 등을 쉽게 예측할 수 있도록 하였고, 하중은 상부 성토하중과 교통하중을 합한 값을 등분포하중으로 비배수 또는 배수 상태에서 재하하였다. 천층블록과 하부 기초지반의 상호작용에 따른 하중분담이 발생하는 경우 초기에는 천층블록의 분담율이 크고, 이후 장기적으로는 장주로의 전이로 말뚝의 하중분담이 증가한다. 따라서 단기 비배수와 장기 비배수 조건을 모두 해석하여 설계에 적용해야 한다.

본 연구에서의 수치해석은 Fig. 7과 같이 천층블록과 심층말뚝의 결합조건을 반영한 두부 자유와 회전구속으로 구분하여 적용하였다. 자유조건은 천층블록의 Plate 요소와 심층말뚝의 Plate 요소를 결합시키지 않은 조건으로 모델링하였고, 고정조건은 프로그램에서 제공하는 Plate간 구속경계 조건을 사용하여 결합시켜 모델링하였다.

Fig. 8에는 비배수 재하에 따른 해석 결과를 제시하였다. 타 당법에 비해 장주 압축력(반력)이 작게 나타났는데, 그 이유는 수치해석방법의 경우 지반과 장주개량체간의 상호작용을 고려할 수 있어, 상부 하중이 장주 두부로 전달되어 하부 선단부로 갈수록 주변지반에도 전달되기 때문이다. 연속보법, Frame 해석법, 지반아칭법

Table 4. Calculation results of piled-raft foundation method

Shallow block			Cement column	
Shear force (kN)	Bending stress (kPa)	Vertical displacement (cm) (mean)	Axial force (kN)	Vertical displacement (cm)
105.5	17.5	12.58	530.5	8.10

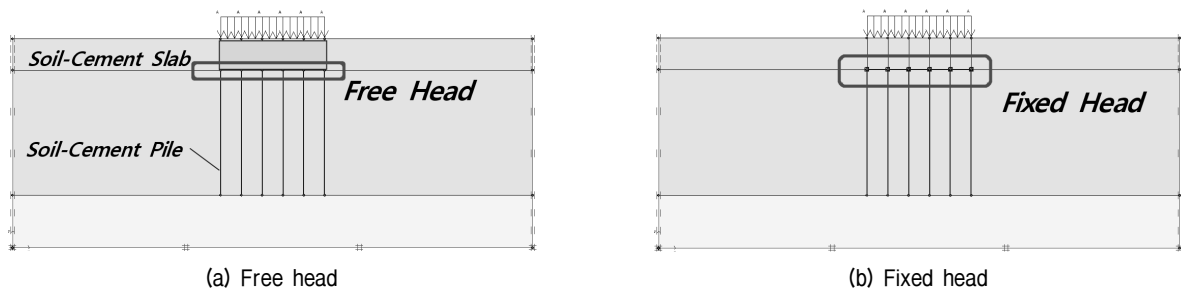
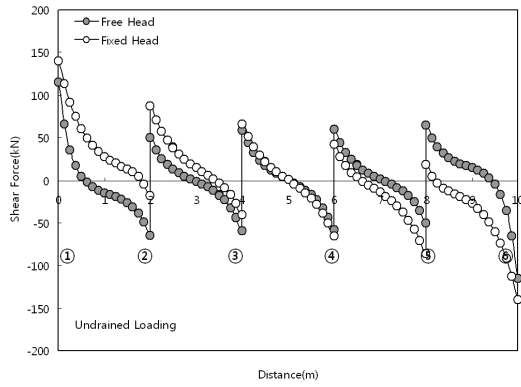
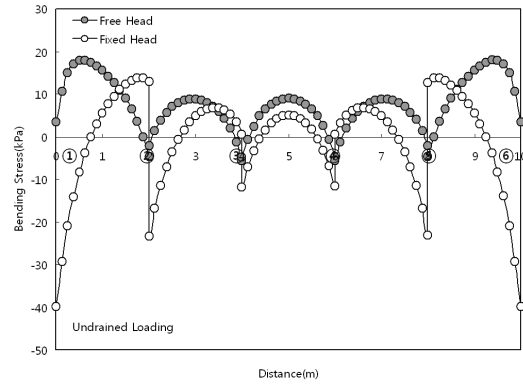


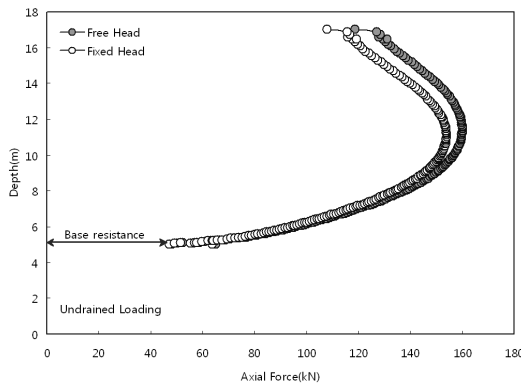
Fig. 7. Sections of numerical analysis



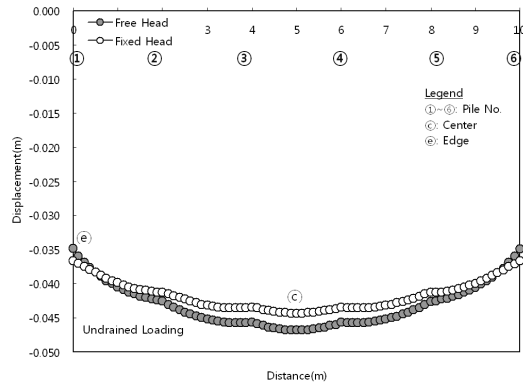
(a) Shear force of shallow block



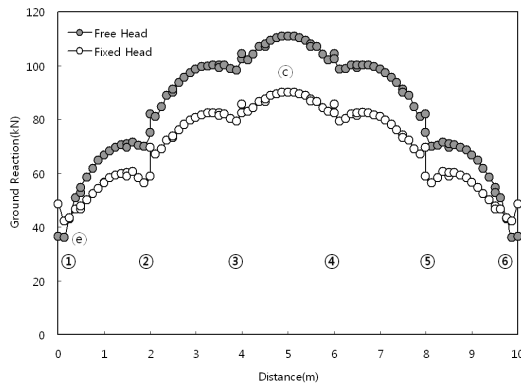
(b) Bending stress of shallow block



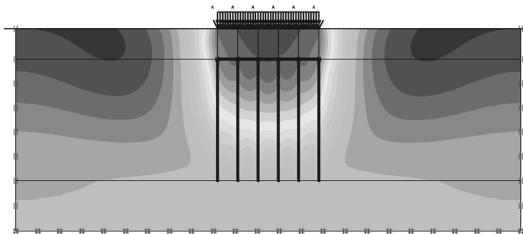
(c) Axial force of DCM pile



(d) Vertical displacement



(e) Groun reaction of shallow block



(f) Contour of vertical displacement

Fig. 8. Stress, strain characteristics of improved body (undrained, short time)

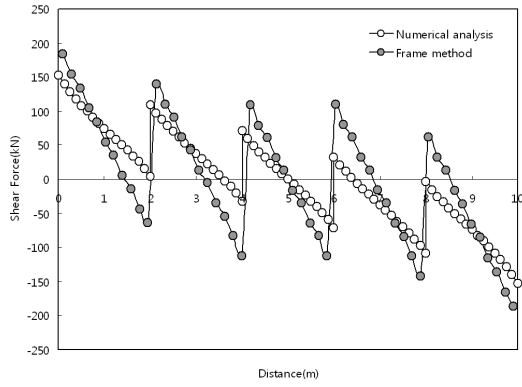
및 말뚝지지전면기초법은 본 효과를 고려할 수 없기 때문에 본 방법에 비해 축력이 크게 예측된 것이다.

천층블록의 전단력 및 휨응력 분포는 Frame 해석법과 유사함을 보였다. 값의 차이는 장주 선단부의 침하 허용 여부 때문이다. 즉, Frame 해석법은 장주 선단부의 침하를 허용하지 않지만, 수치해석법에서는 침하를 허용하기 때문이다. 이를 확인하고자 장주 선단부 침하를 허용하지 않는 경우에 대한 해석을 수행하여 그 결과를 Fig. 9에 제시하였다. 그림에 제시된 바와 같이 침하를 허용하지 않는 경우 천층블록의 전단력과 휨응력은 Frame

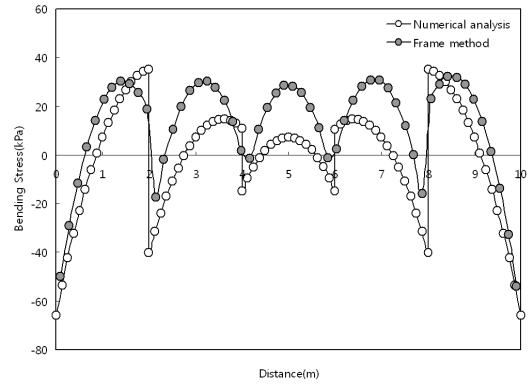
해석법과 유사함을 확인할 수 있었다. 기타 장주 압축력 및 침하비 등은 분석에 비교하여 제시하였다.

천층블록의 지반반력은 천층블록의 휨강성과 장주의 설치간격에 따라 달라지는데, 본 사례의 경우 중심부에서 가장 크고, 최외곽에서 가장 작게 나타났다. 두부구속 조건에 따른 결과에서 구속조건이 자유조건에 비해 천층블록의 접지압이 작기 때문에 천층블록의 두께가 더 작아질 수 있다는 것을 유추할 수 있다.

Fig. 10에는 배수 조건에서의 재하에 대한 해석결과이다. 비배수와는 차이가 축력과 연직변위 분포다. 축력

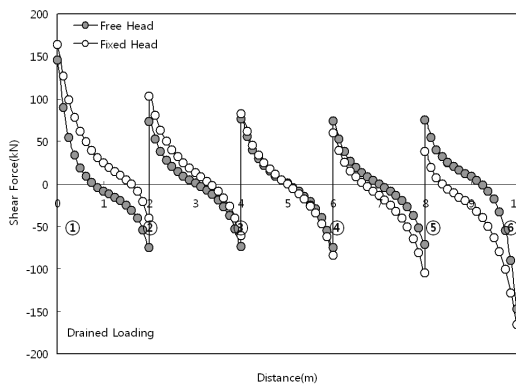


(a) Shear force of shallow block

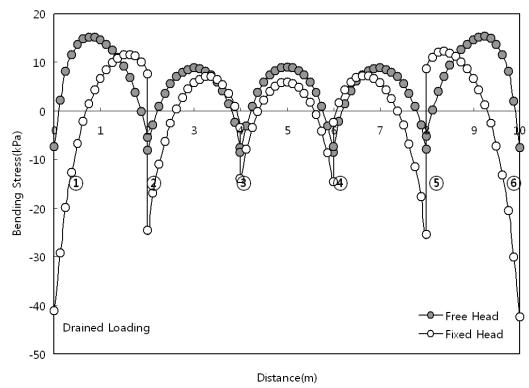


(b) Bending stress of shallow block

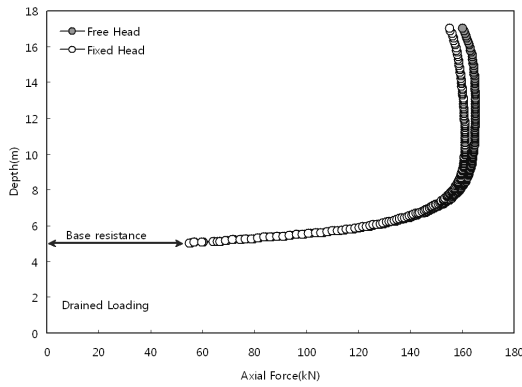
Fig. 9. Comparative results of numerical analysis and frame method



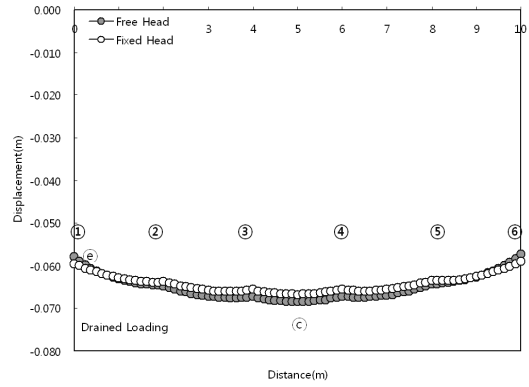
(a) Shear force of shallow block



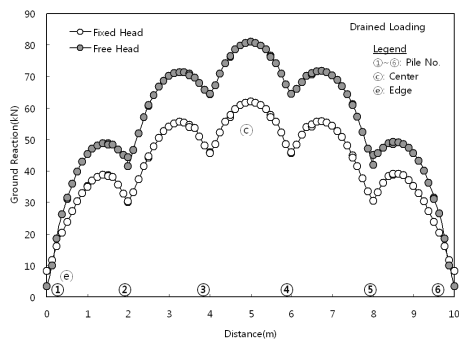
(b) Bending stress of shallow block



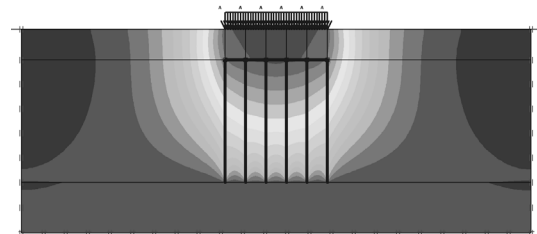
(c) Axial force of DCM pile



(d) Vertical displacement



(e) Groun reaction of shallow block



(f) Contour of vertical displacement

Fig. 10. Stress, strain characteristics of improved body (drained, long time)

의 경우 비배수 재하에서는 배수재하에 비해 선단저항이 작게 나타났고, 장주 개량체 중앙에서 최대값을 보였지만, 배수 재하에서는 선단부를 제외하고는 거의 일정한 축력을 예측하였다. 이는 비배수 재하시 연약지반의 반력이 상당부분 발휘하다가 배수조건에서 침하가 증가함에 따라 선단부로 전이되었기 때문이다(Fig. 10(c) 참조). 즉, 비배수상태에서는 전체하중은 천층블록 하부 지반저항과 장주 주변 지반저항에 의해 분담되지만, 배수상태에서는 주변저항을 초과하는 변위와 과잉간극수압이 소산되면서 선단으로의 전이가 발생되었기 때문이다. 이는 배수상태에서 연직변위 분포도에서 장주 선단부의 변위가 집중되고 있는 것으로부터 확인된다.

장주 개량체 압축력에서 장주의 중앙 상부에서 축력이 작게 나타나는 것은 장주와 지반간의 상대적인 변위차 때문이다. 수치해석 결과를 살펴본 결과 이 영역에서는 장주의 연직변위보다 인접지반의 변위가 큰 것으로 확인되었다. 이와 동일한 부마찰력 효과가 말뚝지지전면기초에서도 제시되었다(Kuwabara, 1989). 그러나, 배수조건에서는 장주와 지반의 변위가 동일하여 이와 같은 현상이 나타나지 않았다. 또한, 시멘트혼합처리공법과 같이 쓰일 시멘트체와 지반간의 상대변위와 이에 따른 부마찰력이 실제 발생한다는 것도 아직 명확하게 밝혀지지 않았다. 따라서 이에 대한 추후 연구가 필요할 것이다.

두부 경계조건에서 자유인 경우 고정에 비해 장주개량체 압축력, 천층블록 침하 및 지반반력이 더 큰 것으로 나타났다.

Fig. 10(b)에서 장주 지점에서 휨응력의 변화가 발생하는 것은 말뚝에 의한 효과로 기초판에 작용하는 휨모멘트가 감소했기 때문이다.

Fig. 10(d)를 살펴보면, 비배수조건에 비해 충분한 변위 발생으로 장주 대부분이 극한주면저항에 도달하여 상당부분 하부 선단부로 전이되었고, 천층블록의 하중도 장주로 전달되어 접지압이 작게 나타난 것이다.

5. 분석 및 고찰

5.1 분석

본 절에서는 지금까지 계산되었던 각 방법별 부재력과 변위 등을 함께 도시하여 분석하였다(Fig. 11). 타방법은 모두 배수조건을 전제로 하기 때문에 수치해석과

비교시 배수조건을 주로 비교하였다.

천층블록에서 전단력의 경우 지반아칭법에서는 지지력보다 작아 작용하지 않는 것으로 예측되었고, 말뚝지지전면기초법은 수치해석법보다 작게 예측되었다. Frame 해석법의 두부 구속조건에서는 수치해석보다 다소 크게 예측되었으나 자유조건은 유사했다. 또한, 수치해석법에서는 타방법에 비해 두부 경계조건에 따라 차이를 보였고, 전면기초법과 아칭법을 제외한 계산법이 수치해석보다 더 큰 휨응력을 예측하였다.

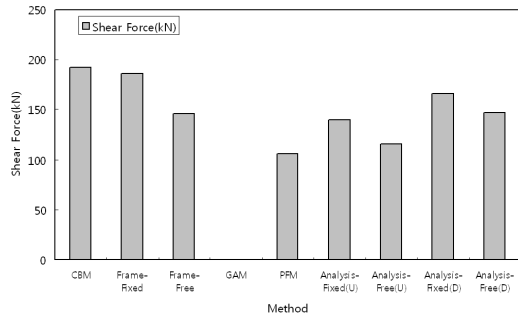
장주 개량체의 축력은 지반아칭법과 말뚝지지전면기초법이 가장 크게 예측하였다. 수치해석법이 지반상호작용을 고려하고, 장주 선단에서의 침하를 고려할 수 있기 때문에 가장 작게 나타났다. Frame 해석법이 수치해석과 가장 근접한 결과를 제시하였다. 장주 개량체의 연직변위는 장주 두부를 고정조건으로 하는 연속보, 선단을 고정조건으로 하는 Frame보다 수치해석법이 크게 나타났고, 장주만의 변위는 지반아칭법과 말뚝지지전면기초법이 수치해석과 유사하나 평균 침하량은 매우 크게 예측하였다.

장주개량체에 작용하는 축력과 그에 대한 하중분담율(=장주 축력/총 하중)을 살펴보면 지반아칭법과 말뚝지지전면기초법에서만 분담율이 크게 예측된다. 이는 천층블록과 하부기초 지반간의 강성비인 상대 강성이 작아 지반아칭으로 무처리 영역의 하중이 장주로 전이되었기 때문이다. 그러나, 수치해석 등 타 방법에서는 하중분담율이 작게 나타난다. 천층블록과 지반간의 상호작용과 장주와 지반간의 상호작용을 모두 고려한 수치해석법이 가장 작은 하중분담율 약 24%를 보였고, 천층블록과 지반간의 상호작용을 고려한 Frame 해석법은 약 44%의 분담율을 보였다. 장주의 하중분담율이 작다는 것은 하중이 천층블록과 장주 및 지반간의 상호작용에 의해 분배되었다는 것을 의미한다.

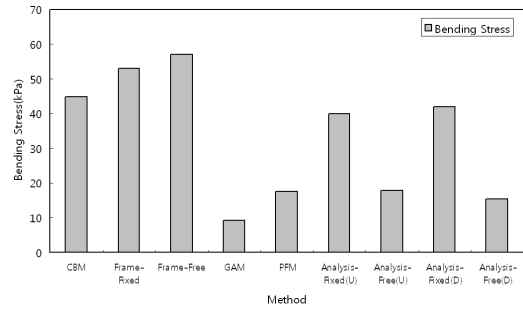
중앙에서의 침하량과 최외곽에서의 침하비는 수치해석과 Frame 해석법이 유사하고, 말뚝 두부가 구속인 경우가 자유인 경우보다 큰 것으로 나타났다. 특히, 지반아칭법과 말뚝지지전면기초법에서는 “1”에 근접한 값을 나타낸다. 이는 복합지반 계산이라는 근본적인 개념 때문이다.

5.2 침하량에 대한 고찰

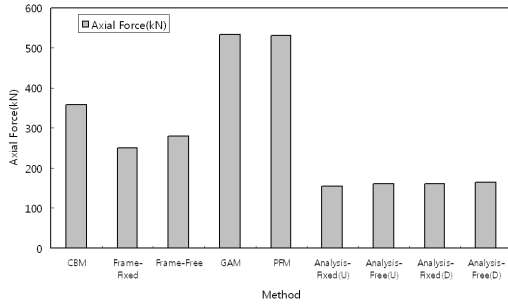
구조적 설계법에서 연속보법의 경우 장주를 침하가



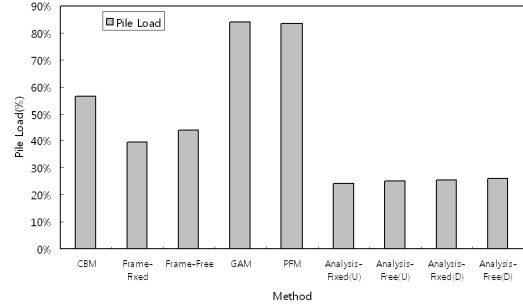
(a) Maximum shear force of shallow block



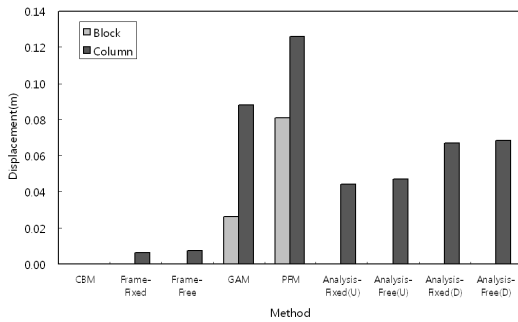
(b) Maximum bending stress of shallow block



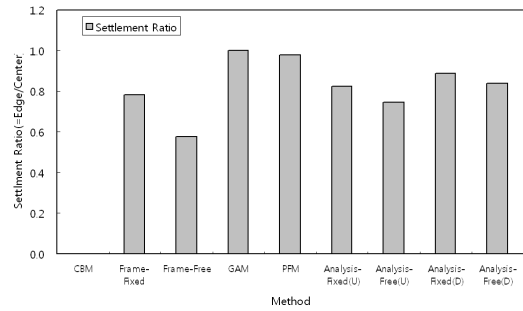
(c) Maximum axial force of DCM pile



(d) Loading ratio of DCM pile

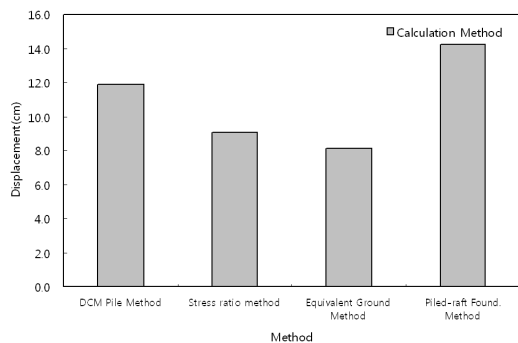


(e) Maximum vertical displacement

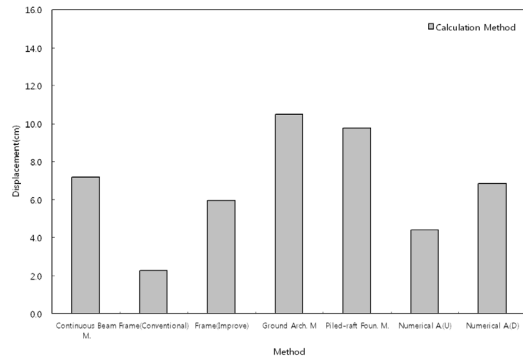


(f) Maximum settlement ratio

Fig. 11. Stress, strain characteristics of improved body (Continuous Beam Method, CBM; Ground Arching Method, GAM; Piled-raft Foundation Method, PFM)



(a) Structural design method



(b) Conventional design method

Fig. 12. Calculation method of settlement

없는 지점으로 간주하므로 계산된 침하량이 매우 작아 의미가 없다. Frame 해석법의 경우 장주의 축강성과 휨 강성을 고려하지만, 장주 선단부를 침하가 없는 지점으

로 간주하므로 일반적인 말뚝과 같이 암반 등에 지지되는 경우는 그 값이 의미가 있다. 그러나, 본 논문에서 고려한 시멘트혼합처리공법의 경우 대체로 N=10~20

인 지층에 지지한다. 따라서 하부지반도 침하 되므로 Frame 해석법도 본 조건에서는 침하를 작게 예측할 수 밖에 없다. 지반아칭법과 말뚝지지전면기초법의 경우 전체를 복합지반으로 계산하는 방법으로 과대 예측을 한다. 그 이유는 천층블록의 휨강성과 하부기초 지반간의 상호작용으로 인한 침하 억제효과가 고려되지 못하기 때문이다. 따라서 실제 침하량 계산을 위해서는 장주에 작용하는 축력을 이용하여 일반적인 말뚝에서 사용하는 침하계산법을 적용해야 할 것으로 판단된다(이하 변형법). 다만, 주면으로 전달되는 하중으로 인한 침하는 고려할 수 없는 단점이 있다. Fig. 12(a)에는 말뚝의 침하를 계산한 결과를 제시하였다. Fig. 12(b)에는 기존 말뚝식 개량에 대하여 적용되어 오던 침하계산법의 결과도 제시하였다. 이때, 침하량은 장주 선단의 미개량부의 침하를 포함한 값으로 장주 선단하부 지반의 침하량은 변형율 영향계수법(Schmertmann 등, 1978)을 이용하여 산정한 계산치는 1.67cm, 수치해석에서의 예측치는 0.90(Undrained)~2.55cm(Drained)였다. 말뚝지지전면기초는 무리말뚝의 거동을 기본 전제로 한다. 일반적으로 무리말뚝의 침하가 단말뚝의 침하보다 큰 것으로 제시되어 있다. 따라서 본 방법은 이를 반영하여 다소 큰 침하가 예측되도록 제안된 방법이기 때문에 타 방법에 비해 큰 침하를 예측한 것으로 판단된다. 이와 동일한 결과는 Poulos 등(1997)에 의해서도 제시된 바 있다. 모든 방법에 의해서 계산된 침하량중 수치해석과 가장 유사한 침하는 본 연구에서 제안한 변형된 Frame 해석법이다.

5.3 응력분담비에 대한 고찰

말뚝과 지반간의 상호작용은 응력분담비(=말뚝 분담응력/지반 분담응력)로 살펴볼 수 있다. Fig. 13(a)에 제

시된 바와 같이 지반아칭법에서는 지반 대비 약 21.5배, 말뚝지지 전면기초는 약 20.6배의 응력을 장주가 분담하지만, 타 방법에서는 1.3~5.3배의 응력을 분담한다. Poulos 등(1997)에 의해 지적된 바와 같이 말뚝지지전면기초 해석법들은 장주 하중분담율과 침하량을 크게 예측하고 있음을 확인할 수 있었다.

일반적인 SCP 공법의 경우 2~5의 응력분담비가 제시되어 있고, 말뚝식 DCM 공법의 경우 10~20의 응력분담비가 제안되어 있다. 본 연구에서 고려한 말뚝/블록 혼합식 DCM공법의 경우 SCP와 유사한 응력분담비 범위를 보였다. 또한, 응력집중계수(말뚝 분담응력/총 응력)에서도 이를 확인할 수 있다. 일반 말뚝식 DCM 공법에 비해서 작은 응력집중이 발생하는 것은 천층블록체의 강성 및 하부기초 지반간의 상호작용 때문이다.

이상과 같은 결과를 참조할 때, 복합지반 설계법을 이용하는 경우 일반적인 DCM 응력분담비보다는 SCP 응력분담비를 적용해야함을 예상할 수 있다. 그러나, 응력분담비는 천층블록의 강성, 장주의 설치간격, 하중에 따른 침하정도 등에 영향을 받기 때문에 여러 조건에서의 추가 연구가 진행되어야 한다.

5.4 말뚝 두부 경계조건에 대한 고찰

장주와 천층블록의 결합부 연결상태에 해당하는 장주 두부 경계조건에 따른 장주의 축력과 연직변위를 Fig. 14에 제시하였다. 두부 자유인 경우 중심부, 외곽부 장주의 축력 거동은 유사하지만, 구속조건에서는 장주의 위치에 따라 축력이 차이를 보이고 있다. 이와 같은 이유는 천층블록, 장주, 지반이 블록으로 일체거동을 하여 선단지력은 안쪽과 바깥쪽에 설치된 말뚝간의 차이가 크지 않으나, 주면마찰력은 지반과 말뚝 사이의 상대적인 변위가 최외곽에 설치된 말뚝보다 안쪽에 설치

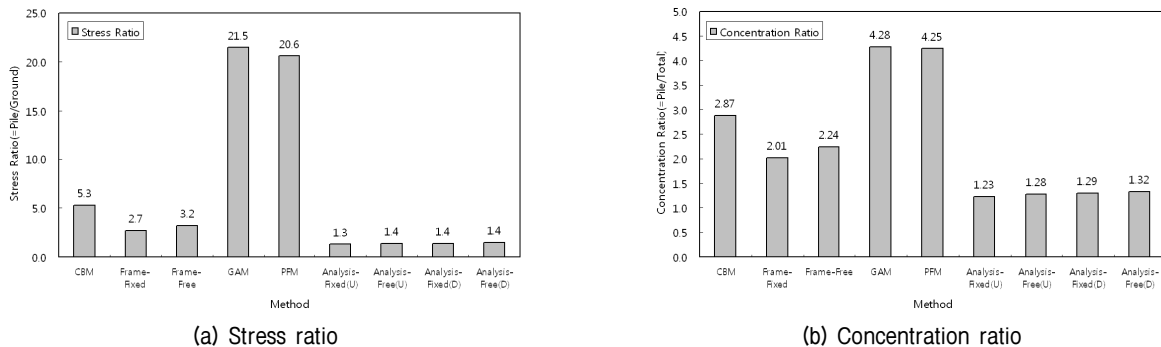
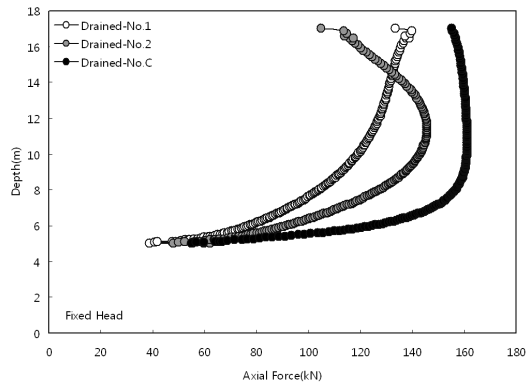
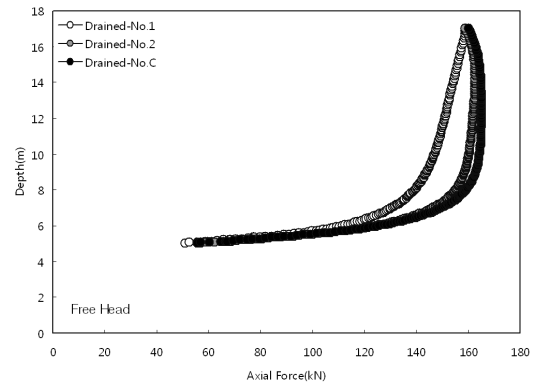


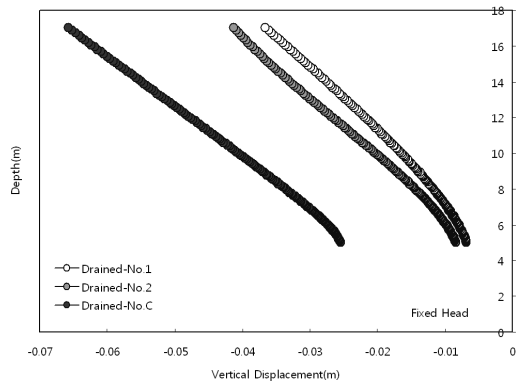
Fig. 13. Stress ratio and concentration ratio of DCM pile



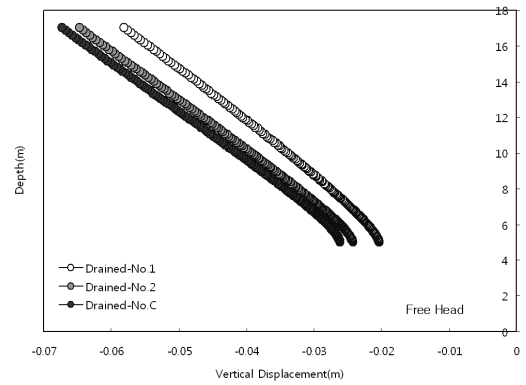
(a) Axial force: Fixed head



(b) Axial force: Free head



(c) Displacement of DCM pile: Fixed head



(b) Displacement of DCM pile: Free head

Fig. 14. Behavior of DCM pile with head conditions (drained)

Table 5. Influencing factors of DCM improved by pile and block type

Parameter	Thickness of block, T (m)					Strength of DCM pile, q_{quick} (kPa)				
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	1000	1500	2000	2500	3000
Fixed	Strength = 2000 kPa, Fixed head					Block thickness = 3.0 m, Fixed head				

된 말뚝이 상대적으로 크기 때문이다. 또한, 외곽부의 장주에서는 두 조건 모두 장주 두부에서부터 축하중이 감소하는 경향을 나타내는 반면에 내측 말뚝의 경우 두부에서 어느 정도 깊이까지는 증가하는 축하중을 나타내다가 감소하는 경향을 나타냈다.

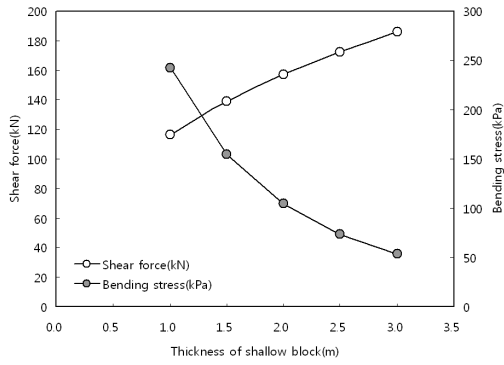
두부자유인 경우 장주의 연직변위는 유사한 반면, 고정조건에서는 중앙 장주가 가장 크고 최외곽 장주의 변위가 가장 작게 나타났다. 이상의 결과로부터 장주와 천층블록의 결합은 점원식보다는 중첩식 배치를 통해 장주의 구속도를 높여주는 것이 축력과 변위 측면에서 유리함을 예상할 수 있다.

5.5 영향인자에 대한 고찰

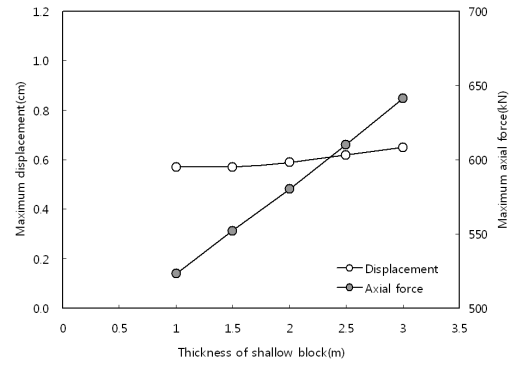
본 논문에서는 수치해석과 가장 유사한 결과를 도출

할 수 있는 Frame 해석법을 이용하여 본 공법의 영향인자를 평가하고, 개량지반의 거동을 예측하는 매개변수 연구(Parameter study)를 수행하였다. 매개변수로 천층블록의 두께를 변화시켜 단면2차모멘트 변화에 따른 휨강성의 영향을 평가하였고, 개량체의 설계기준 강도를 변화시켜 말뚝의 탄성계수 변화에 따른 축강성의 영향을 평가하였다(Table 5). 이때, 매개변수중 천층블록의 두께는 연약지반 보강시 일반적으로 적용되는 단주블록의 두께인 1.0~3.0m 범위를 적용하였고, 개량체의 강도는 심층혼합처리토의 설계기준 강도값의 일반적인 범위를 적용하였다.

매개변수 연구 결과를 Fig. 15와 16에 제시하였다. 천층블록의 두께가 증가함에 따른 휨강성의 증가로 블록의 휨응력은 감소하지만, 전단력과 장주 압축력은 증가하였다. 이때 연직변위의 경우 휨강성에 큰 영향을 받지

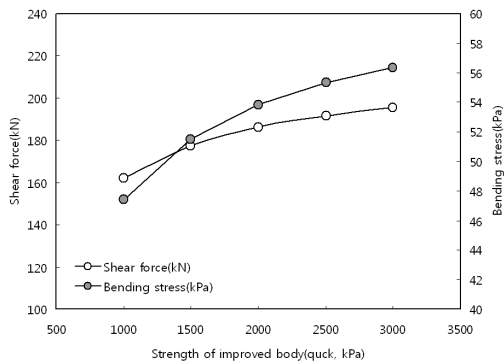


(a) Maximum shear force and bending stress of shallow block

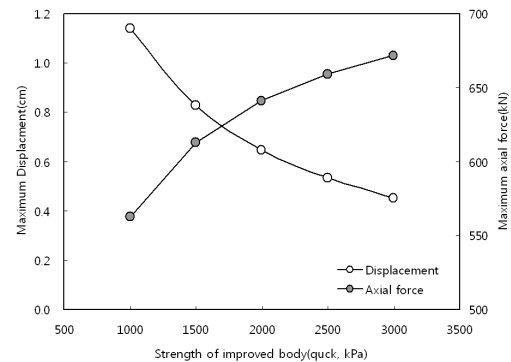


(b) Displacement of block, axial force of DCM pile

Fig. 15. Behavior on thickness of shallow block



(a) Maximum shear force and bending stress of shallow block



(b) Displacement of block, axial force of DCM pile

Fig. 16. Behavior on strength of improved block

않는 것으로 나타났다. 또한, 개량체의 강도가 증가함에 따른 축강성의 증가로 천층블록의 전단력과 휨응력, 그리고 장주의 압축력은 증가하였다. 그러나, 천층블록의 변위는 감소함을 보였다.

이상과 같은 결과로부터 천층블록과 심층말뚝을 병행하는 경우 개량체 허용 강도 이내에서 천층블록의 휨응력이 설계인자인 경우 블록의 두께를 증가시키고, 변위가 지배인자인 경우 개량체 강도를 증가시켜야 함을 알 수 있었다.

추가적으로 본 논문에서 제시한 영향 인자와 더불어 각 장주의 지지력과 블록체로써의 지지력, 최외곽에서 돌출이 있는 천층블록의 경우 끝단 인장응력 등도 검토해야 한다. 또한, 본 연구의 결과는 장주를 PHC로 대체한 PHC 말뚝/천층개량공법에서도 적용 가능할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 천층블록/심층말뚝 혼합식 시멘트혼

합처리 공법을 구조체 관점으로 해석하였고, 각 방법별 특징 및 관련 거동을 제시하였다. 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 연속보 해석법의 경우 천층블록과 하부기초 지반간의 상호작용을 고려하지 못하고, 장주를 무한 강성을 가진 지점으로 간주하기 때문에 장주 반력은 크게 예측하고, 침하량은 매우 작게 예측하였다. 그러나, 천층블록의 전단력과 휨응력은 다소 큰 값을 예측하였다.
- (2) Frame 해석법의 경우 천층블록과 하부기초 지반간의 상호작용을 고려하여 천층블록의 부재력과 장주의 부재력은 수치해석법과 가장 근접한 거동을 예측하였다. 그러나, 장주 선단부의 침하를 허용해야 하는 조건에서는 다소 작은 침하량을 예측하여, 장주 반력을 이용한 별도 침하계산을 실시해야 하는 것으로 나타났다. 본 방법은 수치해석법에 비해 간편하고, 예측결과는 유사하므로 향후 천층블록/심층말뚝 시멘트혼합처리 공법의 해석에 적용 가능성

이 높은 것으로 판단된다.

- (3) 지반아칭법과 말뚝지지전면기초해석법의 경우 장주의 하중분담율이 타방법에 비해 매우 커서 장주의 축력이 과대 예측되었다. 장주의 하중분담율은 약 85%, 응력분담비는 약 20~22정도를 예측하여 수치해석과 큰 차이를 보였다.
- (4) 천층블록/말뚝 혼합식 시멘트혼합처리공법을 적용하면, 천층블록의 침하 및 지반반력은 중앙에서 가장 크고, 외곽에서 가장 작았다. 또한, 개량체와 지반간의 상호작용을 고려할 수 있는 해석법에서 장주개량체 축력은 감소하는 것으로 나타났다. 장주개량체가 분담하는 하중은 약 20~45% 범위를 보였고, 응력분담비는 일반적인 말뚝식 DCM 공법보다 작은 약 2~5정도의 범위를 나타내었다.
- (5) 장주와 천층블록체간의 연결상태를 반영하는 장주두부 경계조건에 따라 회전 구속조건에서는 장주위치별로 축력 및 연직변위는 서로 다르게 나타나며, 자유조건에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나, 내적 안정성 검토에 이용되는 최대값에서는 서로 유사한 값을 예측하였다.
- (6) 천층블록/심층말뚝식 혼합처리 지반에 대하여 연속보법, Frame 해석법, 지반아칭법, 말뚝지지전면기초법, 수치해석 등을 통해 개량체에서 발생하는 응력과 변형 거동을 비교한 결과 Frame 해석법이 수치해석과 가장 유사한 결과를 예측하는 것으로 나타났다.
- (7) 천층블록과 심층말뚝을 병행하는 경우 개량체 허용강도 이내에서 천층블록의 휨응력이 설계인자인 경우 블록의 두께를 증가시키고, 변위가 지배인자인 경우 개량체 강도를 증가시켜야 함을 알 수 있었다.

본 논문은 시멘트혼합처리 공법의 거동을 해석적 방

법으로 접근하였으므로 향후 모형실험 결과나 현장 계측 자료와의 비교 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌 (References)

1. CDM Research Institute (2005), "Cement deep mixing method CDM Q & A Collection".
2. Franke, E. (1991), "Measurements beneath piled rafts", ENPC Conf. On De Found., 1(4), Paris, pp.599-625.
3. Japan Civil Engineering Research Institute (2007), "ALiCC method manual for ground improvement", Kashima publication.
4. Katzenbach, R., Arslan U., and Moormann, C. (2000), "Piled raft foundation project in Germany", Design application of raft foundation, Tomas Telford, Inc.
5. Kim, S. K. (2010), "Engineering Behavior of Soft Clays", Cheong Mook Gak.
6. Kitiyodom, P., Matsumoto, T., and Sonoda, R. (2011), "Approximate numerical analysis of a large piled raft foundation", Soils and Foundations, Vol.51, No.1, pp.1-10
7. Kuwabara (1989), "An elastic analysis for piled raft foundations in a homogeneous soil", Soils and Foundations, 22(1), pp.82-92.
8. Macaulay, W. H. (1919), "A note on the deflection of beams", Messenger of Mathematics, Vol.48, p.129.
9. Poulos, H. G. (1991), "Analysis of piled strip foundations", Comp. Methods & Advances in Geomechs., ed. Beer et al., Balkema.
10. Poulos, H. G. (2000), "Practical design procedures for piled raft foundation", Design applications of raft foundations, Hemsley, J. A. Ed., Thomas Telford, pp.425-467.
11. Poulos, H. G., Small, J. c., Ta, L. D., Sinha, J., and Chen, L. (1997), "Comparison of some methods for analysis of piled rafts", Proc. 14th Int. Conf. Soil Mech. Foundn. Eng. Hamburg, Vol.2, pp. 1119-1124.
12. Randolph, M.F. (1994), "Design methods for pile groups and piled rafts". State of the Art Report, 13 ICSMFE, New Delhi, 5: 61-82.
13. Schmertmann, J.H., Hartmann, J.P., and Brown, P.R. (1978), "Improved strain influence factor diagrams", ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, 104 (GT8), 1131-1135.

Received : August 22nd, 2013

Revised : November 26th, 2013

Accepted : March 19th, 2014