

복합거동연결체의 하중재하에 따른 변형 특성 및 취약부위 산정

Evaluation of Deformation Characteristics and Vulnerable Parts according to Loading on Compound Behavior Connector

김기성¹ · 김동욱² · 안준혁^{3*}Ki-Sung Kim¹, Dong-wook Kim², Jun-hyuk Ahn^{3*}¹President, Technology Research Team, UCI Tech Co. Ltd, Incheon, Republic of Korea²Member, Principal Researcher, Incheon Disaster Prevention Research Center, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea³Researcher, Technology Research Team, UCI Tech Co. Ltd, Incheon, Republic of Korea

*Corresponding author: Jun-Hyuk Ahn, engfine@daum.net

ABSTRACT

Purpose: In this paper, we construct a detailed three-dimensional interface element using a three-dimensional analysis program, and evaluate the composite behavior stability of the connector by applying physical properties such as the characteristics of general members and those of reinforced members. **Method:** The analytical model uses solid elements, including non-linear material behavior, to complete the modeling of beam structures, circular flanges, bolting systems, etc. to the same dimensions as the design drawing, with each member assembled into one composite behavior linkage. In order to more effectively control the uniformity and mesh generation of other element type contact surfaces, the partitioning was performed. Modeled with 50 carbon steel materials. **Results:** It shows the displacement, deformation, and stress state of each load stage by the contact adjoining part, load loading part, fixed end part, and vulnerable anticipated part by member, and after displacement, deformation, The effect of the stress distribution was verified and the validity of the design was verified. **Conclusion:** Therefore, if the design support of the micro pile is determined based on this result, it is possible to identify the Vulnerable Parts of the composite behavior connector and the degree of reinforcement.

Keywords: Foundation connection, Compound Behavior Connector, Weak spot calculation, Finite Element Analysis, ABAQUS

요약

연구목적: 본 논문에서는 3차원 해석프로그램을 활용하여 인터페이스 요소를 구성하고, 일반적인 부재의 특성치와 강도가 보강된 부재의 특성치 등의 실제 표현할 수 있는 물성조건을 적용하여 연결체의 복합거동 안정성을 평가하고자 하였다. **연구방법:** 해석 모델은 비선형적인 재료 거동을 포함한 솔리드 요소(Solid Element)를 사용하여 빔 구조 및 원형 플랜지, 볼팅 시스템 등의 부재를 설계도면과 동일한 치수로 모델링을 완성하였고 각 부재는 하나의 복합거동연결체로 조립되는 과정에서 다른 요소유형(Element Type) 접촉면의 통일성과 매쉬(Mesh) 생성을 보다 효율적으로 제어하여 분할작업(Partition)을 수행하였으며 부재들에 활용된 강재는 Gr. 50 탄소강 재질로 모델링 하였다. **연구결과:** 부재별 접촉인접부위, 하중재하부위, 고정단 부위, 취약예상부위 등으로 하여 하중단계별 변위 및 변형, 응력상태 등을 나타내고, 유한요소 해석 후 복합거동연결체의 각 하중단계에서의 변위, 변형, 응력 등의 분포도로 영향을 검증하고 설계의 타당성을 확인하였다. **결론:** 따라서 이 결과를 토대로 하여 마이크로 파일의 설계 지지력이 결정되면 복합거동 연결체의 취약 지점의 파악과 보강의 정도를 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어: 기초연결부, 복합거동연결체, 취약부위산정, 유한요소해석, 아바쿠스

Received | 19 August, 2019

Revised | 4 September, 2019

Accepted | 18 November, 2019

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

서론

캐나다의 오일샌드 매장량은 베네수엘라에 이어 세계 2위를 차지하고 있다. 따라서 국내의 석유관련 기업들은 오일샌드에서 석유를 채취하기 위한 노력을 기울이고 있으며 국내에도 오일샌드 개발을 하고 있으나 보유하고 있는 오일샌드 플랜트에 대한 원천기술이 매우 취약할 뿐만 아니라 캐나다 북부의 낮은 기온, 긴 운반거리 및 매우 높은 인건비 등으로 어려움을 겪고 있다(Alberta Energy, 2009). 이러한 비전통 자원인 오일샌드는 캐나다가 세계에서 매장량이 가장 크며 주로 앨버타(Alberta)주에 퍼져있고 일부 서스캐처원(Saskatchewan) 지역에도 일부 발견되고 있다. 캐나다 오일샌드 보유 추산치는 1조 7천억 배럴 또는 2조 5천억 배럴로 평가되며 애서베스카(Athabasca), 콜드레이크(Cold Lake), 그리고 피스리버(Peace River) 인근이 대표 오일샌드 생산지역이다. 이러한 캐나다 지역은 극한지대인 지반 특성을 갖고 있어 유기질함량이 높은 특수토가 널리 분포하는 것으로 알려져 있다. 이러한 환경에 존재하는 특수토에서는 미분해된 섬유질로 구성되어 있어 보수력 및 팽창성이 크며, 탈수 시에는 수축성이 큰 특징을 가지고 있어 겨울철 동결, 여름철 융해에 따른 대규모 변형이 발생하여 거동예측이 어려운 토양이다. 따라서 이러한 지반 위에 플랜트 구조물을 건설한다면 침하량이 과대해지고 지지력이 부족하여 구조물의 안전에 심각한 문제가 발생할 수도 있다. 또한, 극한지에 구조물기초를 시공할 경우 상부 지반이 동결과 융해가 반복되어 구조물을 상승시키거나 하강시켜 구조물의 사용성에 문제를 야기한다. 따라서 본 연구에서는 3차원 해석프로그램을 활용하여 세밀한 3차원 인터페이스 요소를 구성하고, 일반적인 부재의 특성치와 강도가 보강된 부재의 특성치 등의 실제 표현할 수 있는 물성조건을 적용하여 연결체의 복합거동 안정성을 평가하는 방향으로 진행하고자 한다(Hong, 2016).

복합거동연결체의 구성 및 유한요소해석

연결체의 구성

상부 플랜트와 기초를 연결하기 위한 복합거동연결체는 개별 말뚝체를 1개의 군으로 연결하여 복합 거동하도록 하기 위한 목적으로 사용한다. 플랜트의 하부기초로서 적용되는 말뚝은 소형 강관말뚝이나 마이크로파일 등과 같이 마찰말뚝개념으로 적용되는 기초를 대상으로 하며, 동결과 융해와 같은 지반변형에 의해 발생하는 침하 및 용기에 대하여 인접 기초간의 거동 차를 최소화 하도록 유도하기 위한 것이다. Fig. 1은 복합거동연결체의 모식도를 나타낸 것으로서 상부 플랜트 구조물이 지지되는 원형플랜지와 각각의 하부기초와 연결되는 연결부로 구성되어 있다. 원형플랜지는 플랜트와 하부기초를 연결하는 부위로서 집중하중에 의한 지지체의 변형을 최소화하고 유압램퍼가 설치되어 지반변형에 대응하여 높낮이를 조절이 가능하도록 한다. 각 연결부에는 나사형 강봉이 배치되고 볼트를 체결하기 위한 연결구(hole)가 존재한다. 각 연결체는 설계에 따라 3본을 1set으로 하고, 길이는 기초간의 유격거리를 고려하여 1,000mm내에서 조정할 수 있다(Kim, 2017).

유한요소 해석

실험적 방법을 통한 복합거동 연결체의 하중재하시 거동 분석을 위해서는 각 부재의 강도조건, 기초의 간격, 하중조건 등 가정해야할 여러 조건이 있기 때문에, 모든 실험의 조건을 고려하기 위해서는 경제적으로나 시간적으로 많은 제약이 존재한다. 따라서, 이 연구에서는 이를 해결하기 위해 3차원 유한요소해석(Finite Elements Method)을 통한 기본적인 개념상태에서의 하중에 따른 각 부재의 거동이나 전체 모형의 상호 상관 거동을 평가하여 나타난 결과를 통해 요소별 위험 부위를 산출

하고 재료 및 설계를 보강하여 복합거동 연결체의 제반사항을 도출하여 거동특성을 정량화 하였다. 앞서 선행된 복합거동 연결체의 설계를 바탕으로 3차원 정밀 유한요소 해석을 수행하여 선정된 매개 변수에 따른 거동특성을 정량화 하고자 한다. 또한 상용화 프로그램 중 복합거동 연결체의 모델링이 가능한 ABAQUS 프로그램을 선정하여 복합거동 연결체에 대한 수치해석을 수행하였다(ABAQUS, 2012).



Fig. 1. Concept of compound behavior connector

해석 모델 및 방법

복합거동 연결체의 해석 모델은 비선형적인 재료 거동을 포함한 솔리드 요소(Solid Element)를 사용하여 Figs. 2~4와 같이 빔 구조 및 원형 플랜지, 볼팅 시스템 등의 부재를 설계도면과 동일한 치수로 모델링을 완성하였다. 각 부재는 하나의 복합거동 연결체로 조립되는 과정에서 다른 요소유형(Element Type) 접촉면의 통일성과 매쉬(Mesh) 생성을 보다 효율적으로 제어하기 위하여 분할작업(Partition)을 수행하였으며 각 부재에 적용한 Table 1의 Gr. 50 탄소강의 물리적 성질은 항복강도 240Mpa , 푸와송비 0.3 마찰계수 0.5의 수치를 입력하여 재료영역에 적용하였다.



Fig. 2. Upper flange

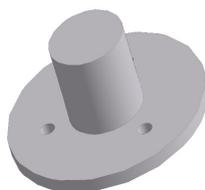


Fig. 3. Bottom flange



Fig. 4. Beam member

Table 1. GR. 50 Properties of material

Parameters	Input value
Modulus of elasticity (MPa)	240
Poisson's Ratio (μ)	0.3
Coefficient of Friction on Interactions	0.5

각 부재별 해석 연결체의 하중상태에서 거동을 평가하기 위한 측정위치는 Fig. 5와 같이 고정단 부위(A-1,A-2,A-3), 빔 부재 인접부위(B-1, B-2, B-3), 원형부재 인접부위(C-1, C-2, C-3), 원형부재 취약부위(D-1, D-2, D-3)로 나누어 선정 하였으며, 하중단계별 변위 및 변형, 응력상태 등을 나타내고, 유한요소 해석 후 복합거동연결체의 각 하중단계에서의 변위, 변형, 응력 등의 분포도로 영향을 검증하고 설계의 타당성을 입증하기 위하여 분석을 수행하였다.

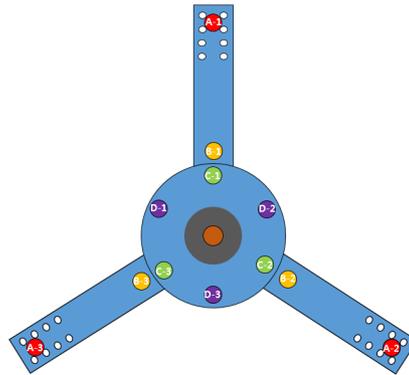


Fig. 5. Schematic of measuring point on numerical analysis

소성범위에서 정확한 해석을 수행하기 위하여 Fig. 6과 같이 재료적인 비선형을 고려하였다. 해석을 원활히 수행하기 위하여 요소 유형은 육면체인 8절점 선형 벽돌형(C3D8)을 선정하여 구조(Structural) 매쉬 분할 체계를 활용하여 요소를 생성하였다. 복합거동연결체 부재 부분의 응력 집중을 면밀히 관찰하기 위해서 Fig. 7과 같이 요소별 크기를 최대한 동일하게 Seed 분할하였다. Fig. 8에 적용된 경계조건은 대칭경계조건, 고정경계조건, 긴장경계조건 및 하중경계조건의 4가지를 적용하였다. 대칭경계조건은 해석모델을 간소화 하기 위해 모델의 대칭이 되는 중심 면에 Y방향으로 적용하였다. 고정경계조건은 구조물의 보에 설치된 경우를 가정하여 블랙킷과 바닥판을 따라서 변위를 고정시켰다. 긴장경계조건은 초기 긴장력 적용단계에서 초기 긴장력에 의한 댐퍼의 양방향 변위발생을 방지하기 위하여 댐퍼의 양 끝단을 긴장력 단계에서 고정시키고 반복하중 단계에서는 제거하였다. 하중경계조건은 하중으로 인한 거동을 구현하기 위하여 이력하중을 상부에 적용하였다

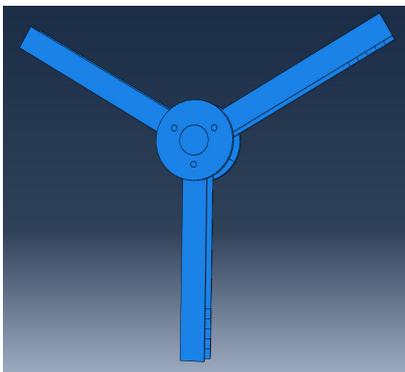


Fig. 6. Shape of Finite Element Model

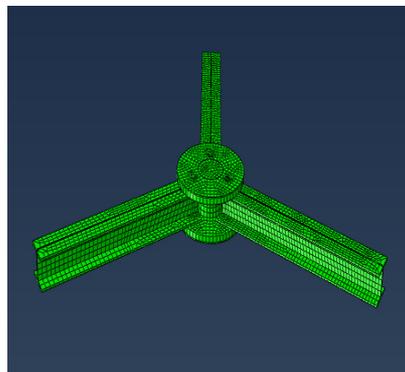


Fig. 7. Mesh segmentation of finite element model

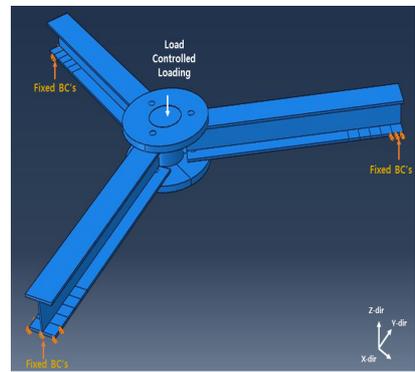


Fig. 8. Load and boundary condition model

해석 및 분석결과

해석 결과

연결체의 파괴를 거동을 분석하기 위하여 취약부위를 예측하였고 하중재하에 따른 변형률을 측정하였다. 측정 위치별 변형률은 하중에 따른 경향으로 Figs. 9~12와 같이 나타내었다. 하중재하시 모든 취약부위에서 전단면적이 가장 작은 원형부재 취약부위(D-1, D-2, D-3) 부분의 변형률이 가장 크게 나타났고, 빔 부재 인접부위(B-1, B-2, B-3), 원형부재 인접부위(C-1, C-2, C-3)는 접합 부위로서 처짐에 대한 각 부재별 상호보강 구조를 이루고 있기 때문에 변형률이 원형부재 취약부위(D-1, D-2, D-3) 부분 보다 적게 나타났다. 또한 고정단 부위(A-1,A-2,A-3)부분의 경우 기초의 두부가 설치되는 위치로써 이 연구에서는 고정 없이 자유단으로 설치되어 부재의 압축이나 인장에 의해 발생하는 변형은 상대적으로 작은 것으로 판단된다. 이러한 결과를 토대로 30MPa의 압력에 의한 변형률과 최대 변형이 발생하는 원형부재 취약부위(D-1, D-2, D-3) 지점을 비교하여 상대변형 비율을 Table 2에 나타내었다. 상부에 하중 재하시 보강이 없는 원형부재 취약부위D, 빔 부재와 원형 부재의 인접 부위에 상대적으로 많은 변형이 발생하는 것으로 나타났다. 상대적으로 하중 작용지점으로부터 거리가 멀고 고정이 되지 않은 고정단 부위 A지점과 부재간의 간섭으로 보강이 되어있는 원형부재 인접부위 C지점의 경우, 변위의 발생은 의심되나 부재의 파괴를 나타내는 압축 및 인장의 경향은 상대적으로 미소함을 알 수 있다.

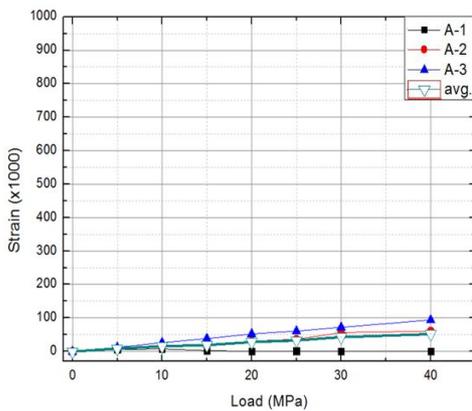


Fig. 9. Average value of strain at A point (A-1, A-2, A-3)

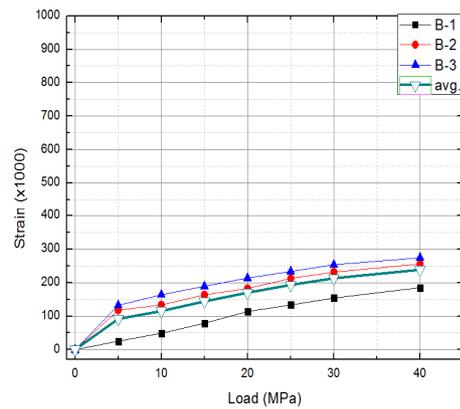


Fig. 10. Average value of strain at B point (B-1, B-2, B-3)

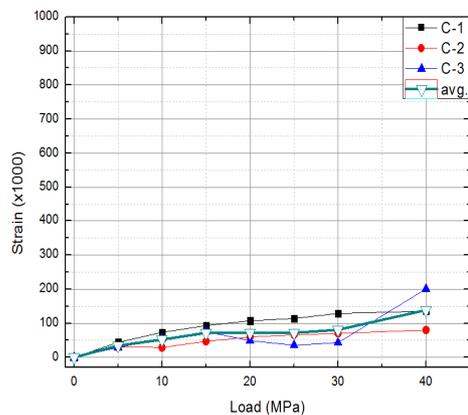


Fig. 11. Average value of strain at C point (C-1, C-2, C-3)

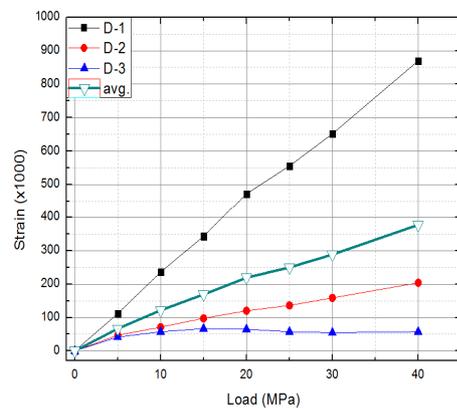


Fig. 12. Average value of strain at D point (D-1, D-2, D-3)

Table 2. Strain and strain ratio according to maximum load

Point of measurement	Maximum loading (MPa)	Strain (ϵ)	Strain ratio (%)
A	30	42.8901	14.9
B		212.8483	73.8
C		80.7513	28.0
D		288.2627	100

복합거동연결체의 분석결과

분석결과 D지점에서 가장 큰 변형이 있었으며 하중이 30MPa일 때 급격한 변화를 보였다. Fig. 13은 측정 부위별 변형률과 D지점을 기준으로 한 위험도 분석이다. Fig. 14는 변형률을 측정한 부위에 대한 변형률의 평균을 나타낸 것이다. 전체적으로 하중이 5MPa를 초과할 경우 원형 플랜지 부분인 D지점에서 가장 큰 값이 나타난다. Fig. 14는 변형률 결과를 토대로 하여 각 하중에서 가장 큰 변형률이 나타난 부위에 대한 변형률의 크기를 나타낸 것이다. 전체적으로 D지점이 가장 크게 나타나지만, 초기 하중의 경우 빔 부재의 인접부인 B지점이 가장 크게 나타난다. 이는 하중재하 전 이력이 존재하고 초기하중 재하시 충격에 의해 나타난 것으로 판단된다. B지점의 경우 초기의 위험도는 높으나 하중이 증가할수록 적어지는 경향이 나타난다. 이 결과를 토대로 하여 설계 지지력이 결정되면 복합거동 연결체의 취약 지점의 파악과 보강의 정도를 파악할 수 있을 것으로 판단된다 (Soong et al., 1997).

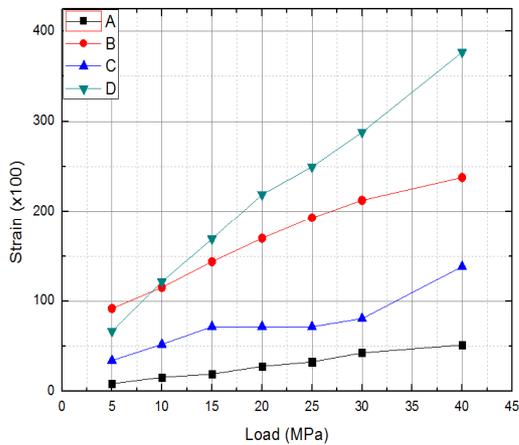


Fig. 13. Strain of the measuring point by load

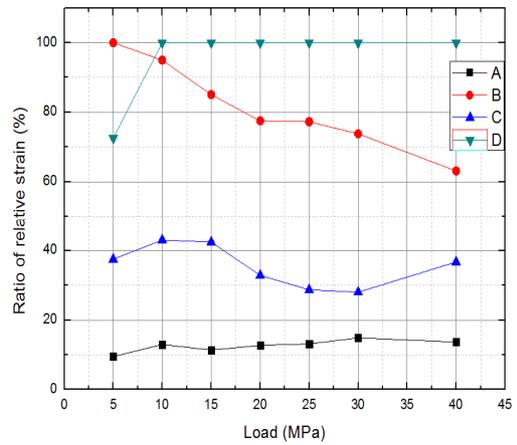


Fig. 14. Risk analysis by load

결론

복합거동 연결체를 실험적으로 실증 및 검증 평가하기 위해서는 각 부재의 강도조건, 신형식 기초의 간격, 하중조건 등의 여러 가지 가정 사항이 필요하며 제작되어야 하는 부재의 개수 및 실험의 횟수가 방대해지는 문제가 있다. 따라서, 이 논문에서는 3차원 FEM 해석을 수행하여 기본적인 상태에서의 하중에 따른 각 부재의 거동, 전체 모형의 상호 거동 등을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 복합거동 연결체의 해석모델은 3차원 솔리드 요소로 각각의 부재의 설계에 따라 모델링을 완성하였다. 실제 복합거동 연결체와 동일한 거동을 구현하기 위해 강재의 비선형 특성을 구현한 재료모델, 경계조건, 입력하중, 초기 긴장력, 추가적인 마찰력 및 부재간의 상호작용 등을 고려해야 한다.
- 2) 해석결과 하중이 증가함에 따라서 접합부의 인장축고장력 볼트와 단부판이 접촉하는 부분에 응력집중 현상이 심화되었고 최종적으로 단부판 접합부는 휨 항복 후 소성변형이 발생하였다.
- 3) 상대적으로 하중에서 거리가 멀어질수록, 고정이 안 된 빔 부재의 말단부위와 부재간의 간섭으로 보강되어 있는 원형부재 인접부위에서 변위가 다소 발생하였다.
- 4) 원형부재 취약부위(D) 지점에서 가장 큰 변형이 있었으며 하중이 30MPa일 때 급격한 변화를 보였다.
- 5) 따라서 이 결과를 토대로 하여 마이크로 파일의 설계 지지력이 결정되면 복합거동 연결체의 취약 지점의 파악과 보강의 정도를 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgment

본 논문은 국토교통과학기술진흥원의 플랜트 연구사업(19IFIP-B089065-06) 성과의 일부이며 지원에 감사드립니다.

References

- [1] Alberta Energy (2009). Facts about Alberta's oil sands and its industry, <http://history.alberta.ca/oilsands>
- [2] ABAQUS (2012). 6.12 User's Manuals. Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- [3] Hong, S.S. (2016). "Geotechnical Properties of Muskeg Soil for Construction Machinery Distributed in Oil-sand Areas." The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol.19, No.3, pp.29-32.
- [4] Kim, K.S. (2017). Pile Foundation Connection, Korea. Patent No. 10-1869833
- [5] Soong, T., Dargush, F. (1997). Passive energy dissipation systems in structural engineering. Wiley, New York