

유압식 햄마다짐의 수치해석적 연구

A Numerical Analysis of Hydraulic Hammer Compaction

박인준¹⁾, In-Jun Park, 박양수²⁾, Yang-Soo Park, 김수일³⁾, Soo-Il Kim

¹⁾ 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사후 연구과정

²⁾ 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

³⁾ 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

개요(SYNOPSIS) : Effective range of Hydraulic Hammer Compaction was studied by numerical analysis instead of empirical method. Numerical analyses were carried out with commercial FEM code, ABAQUS, and verified by comparing the numerical results with field tests of Hydraulic Hammer Compaction. Most of material properties were evaluated by data from laboratory and in-situ tests. Vertical effective range was estimated by distribution curve of plastic strain energy dissipated through soil layers under dynamic load and these results were in good agreement with field tests. Based on verification, the effects of governing properties of Hydraulic Hammer Compaction such as number of hit can be determined by numerical analyses. In addition, vertical effective range can also be determined by Menard's empirical equation using the external work at converging time of plastic strain energy in numerical analysis. This implies that the minimum energy of Hydraulic Hammer Compaction for improvement can be determined by Menard's equation.

Keywords : Hydraulic Hammer Compaction, Dynamic load, Plastic strain energy dissipated, Vertical effective range, Menard's equation

1. 서론

최근 지속적인 경제발전을 위해서 공항, 공업단지, 도로 등 사회기반 시설과 그와 관련된 대규모 부지를 필요로 하고 있을 뿐만 아니라 생산과 거주를 위한 공간적 수요는 비약적으로 증대되고 있으며 이를 위한 토지의 공급 부족으로 많은 문제가 제기되고 있다. 따라서 국토 확장의 필요성이 크게 부각되고 있으며 국토의 효율적 이용이 강조되고 있다. 특히 국내의 경우 국토면적이 좁고 얕은 해안을 가지고 있어 세계 어느 나라보다 준설매립의 필요성을 절실히 느끼고 있으며 연안의 연약지반을 매립하여 대규모 건설부지를 확보하고 있는 실정이다. 과거에는 기초처리 비용이 많이 소요되고 경제성 검토에서 제외되었던 연약지반들이 현재에는 부득이하게 이용될 수밖에 없는 여건으로 바뀌어가고 있다.

유압식 햄마다짐 공법은 영국에서 개발된 것으로 알려져 있으며, 폭격 맞은 활주로 부위의 메움재에 대한 신속하고 효과적인 다짐 및 폭격에 의하여 교란된 하부지반까지 개량하는 것을 주목적으로 하여 개발되었다. 시공사례로는 군산의 군장 공업단지 준설매립토 다짐작업, 영국의 Waterbeach 현장, 홍콩의 C.L.K. 신국제공항 다짐작업 등 여러 현장에서 적용되었다. 본 공법은 중추낙하공법과 같이 고공에서 추를 낙하시키지 않고 비교적 짧은 거리(약 1m 정도)에서 중량의 추를 낙하시켜 지면에 밀착된 foot를 타격하여 그 충격력으로 지반을 개량한다. 따라서 신속하고 반복타격이 가능하며 비교적 얕은 심도에 효과적인 것으로 알려져 있다. 일반적으로 유압식 햄마다짐의 효과를 지배하는 요인은 추의 무게, 낙하고, 타격횟수 등이다. 그러나 그 영향심도는 이론적으로 도출되기보다는 경험적인 방법이 사용되고 있는 실정이다.

이와 같은 배경에서 본 연구에서는 국내외 연약지반 개량공사에 적용한 유압식 햄마다짐 공법의 시공사

례를 수집 및 비교분석 후 지반 개량시 유압식 햄마다짐 공법의 영향심도의 수치해석적 산정기법을 마련하고자 한다.

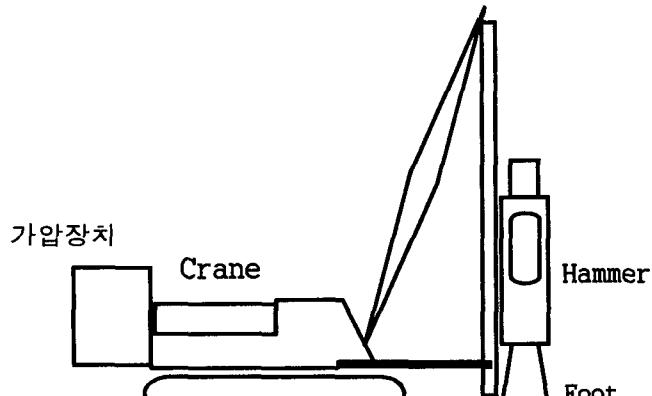


그림 1. 유압식 햄마다짐의 개요도

2. 유압식 햄마다짐의 수치해석

기존 유압식 햄마다짐에 대한 연구는 주로 시험시공을 실시하고 시공전후의 지반조사를 통해 영향심도를 조사하는 경험적인 해석을 하여왔으며 일반적으로 1.5 ~ 5 m 심도까지 개량이 가능하고 신속하고 효과적인 특징을 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 국내외 자료를 통하여 연약지반의 개량정도에 대한 일반적인 경향을 체계적으로 규명하지는 못하고 있다. 이는 유압식 햄마다짐공법이 지역의 특수한 지반조건, 시공목적, 수행능력과 같은 서로 다른 설계기준에 따라 시행되어 개량효과의 유무가 판별되어 왔기 때문이다. 다짐대상인 연약 사질지반은 외력을 받는 초기에 비선형 거동을 하며 외적인 동하중에 의해 흙의 거동은 상당히 복잡해진다. 이런 모든 경우를 고려한 수치해석 프로그램은 우선 동하중의 효과를 모사(simulation)할 수 있어야 하며 흙의 경화(hardening) 효과를 고려할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 다짐의 영향깊이 산정에 소성변형에 의해 소산된 에너지를 깊이별로 구하여 이를 다짐의 영향심도 판정에 이용하고자 한다. 그림 2.는 수직응력의 재하와 제하를 반복하였을 경우 전형적인 응력-변형을 관계이다. 이때 소성변형에 의해 소산된 에너지는 식(1)과 같다.

$$W_p = \int \sigma \, d\epsilon^p \quad (1)$$

식 (1)에 의해 소성변형으로 소산된 에너지는 그림 2.의 채색된 면적과 같다. 동적 다짐공법의 경우 다짐횟수에 따라 증가하는 소성변형에 의해 소산된 에너지를 합하면 깊이별 소성변형의 추이를 알 수 있을 것이다. 즉, 더 이상 소성변형이 일어나지 않는 시점과 깊이를 알 수 있어 영향깊이 추정과 유효다짐 횟수 판정에 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 다양한 실내시험을 통하여 수치해석에 필요한 변수들을 산정한 후 비선형 동역학적 유한요소 프로그램을 이용하여 각 영향 인자들이 유압식 햄마다짐 공법의 영향심도에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

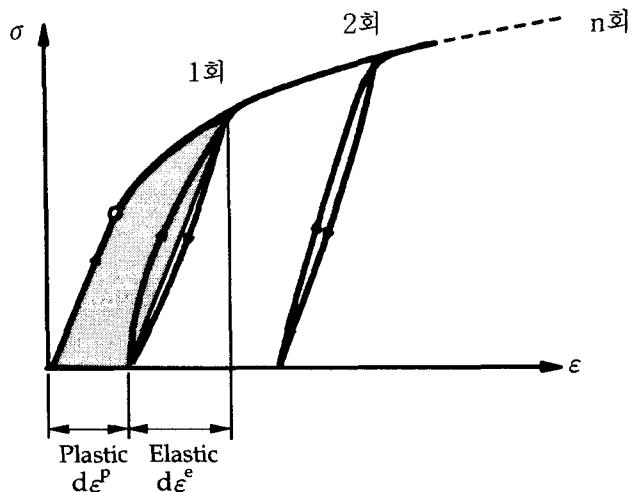


그림 2. 다짐횟수에 따른 소성변형 에너지

3. 시험시공

3.1 현장시험

영종도 시험시공현장에서 시공전후에 표준관입시험을 실시한 결과 그림 3과 같은 결과를 얻었다. 그림 3의 결과는 시공전 현장 매립층의 표준관입시험치가 20 정도인 것을 보여주고 있다. 또한 시공 후 표준관입시험치의 변화로부터 영향깊이가 약 4.5m인 것으로 나타났다. 수치해석시 현장의 상태를 모사하기 위해 Dunham이 제안한 식(2a) ~ 식(2d)를 이용하여 표준관입 시험치로부터 사질토의 내부마찰각을 구할 수 있다.

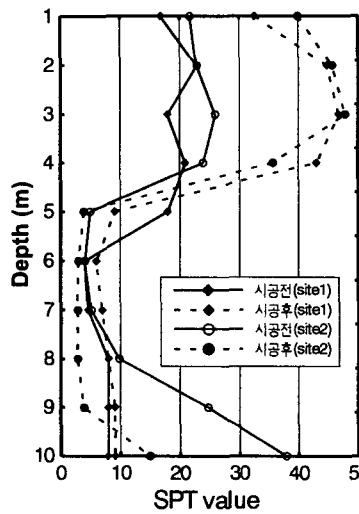


그림 3. 다짐 전과 다짐 후의 표준관입시험치의 변화

$$\Phi = \sqrt{12N} + 15 \quad : \text{입자가 둥글고 입도분포가 균일한 모래} \quad (2a)$$

$$\Phi = \sqrt{12N} + 20 \quad : \text{입자가 둥글고 입도분포가 좋은 모래} \quad (2b)$$

$$\Phi = \sqrt{12N} + 20 \quad : \text{입자가 모나고 입도분포가 균일한 모래} \quad (2c)$$

$$\Phi = \sqrt{12N} + 25 \quad : \text{입자가 모나고 입도분포가 좋은 모래} \quad (2d)$$

위의 식으로부터 구한 내부마찰각의 범위는 $30^\circ \sim 40^\circ$ 이다.

3.2 실내시험

3.2.1 입도분포시험

영종도시료를 체분석한 결과 그림 4와 같은 분포를 얻을 수 있었다.

그림 4의 결과로부터 균등계수(C_u)를 구하면 다음과 같은 결과를 얻게된다.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 3.4 \quad (3)$$

여기서, C_u 는 균등계수, D_{60} 은 통과증량백분률 60%일 때의 입경, D_{10} 은 통과증량백분률 10%일 때의 입경을 의미한다. 위의 결과로부터 균등계수가 3.4로 지반이 빙입도상태임을 알 수 있다. 따라서 Dunham 공식으로부터 구할 수 있는 내부마찰각의 범위는 $30^\circ \sim 35^\circ$ 이다.

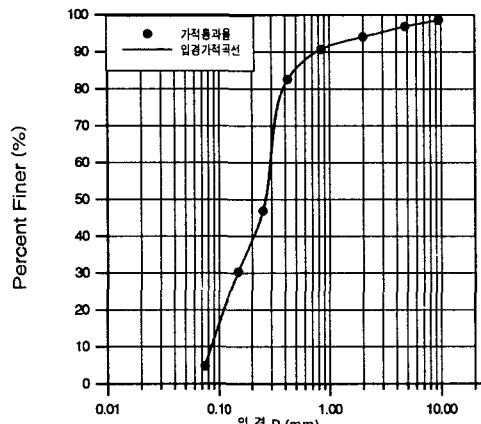


그림 4. 입도분포 시험결과

3.2.2 최소건조단위중량 및 최대건조단위중량 시험

본 해석에 사용되는 영종도 매립토의 최대건조단위중량(γ_{dmax})과 최소건조단위중량(γ_{dmin})을 구하기 위해 ASTM D 4254-91, D 4253-93 규정에 따른 실내시험을 실시하였다. 이 시험은 3회 실시하였으며 각 시험 결과치를 산술 평균하여 구하였다. 시험을 통해 구한 값은 $\gamma_{dmax}=1.621 \text{ gf/cm}^3$, $\gamma_{dmin}=1.358 \text{ gf/cm}^3$ 로 수치해석에는 성토시 일반적인 상대밀도인 50%를 적용하였다.

3.2.3 삼축압축시험

수치해석에 필요한 강도정수를 구하기 위해 정적 삼축압축시험을 실시하였다. 구속응력을 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa로 서로 다르게 하여 얻은 p-q diagram으로부터 K_f 선을 통해 강도정수를 구하였다. 시험을 통해 구한 값은 내부마찰각(ϕ)= 32° , 점착력(c)=7kPa이다. 삼축시험에서 구한 내부마찰각은 현장시험으로부터 구한 값인 $30^\circ \sim 35^\circ$ 사이 값으로 이 범위가 타당함을 알 수 있다.

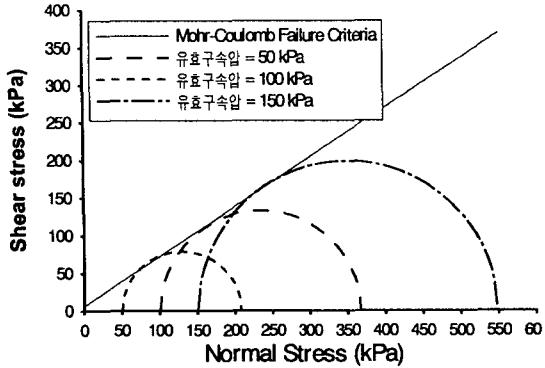


그림 5. Mohr-Coulomb의 파괴 규준

4. 프로그램의 적용성 검증

본 연구에서는 동적다짐공법의 현장결과를 이용하여 지반의 영향을 파악하기 위한 수치해석 기법을 마련하고자 유한요소해석을 수행하였다. 해석은 영중도에서 시공한 유압식 햄마다짐을 모사하였으며 시간영역에서 수행한 수치해석을 현장결과와 비교하였다. 수치해석은 동적 유한요소해석중 직접적분법을 이용하였으며 해석에 사용한 프로그램은 미국의 Hibbit, Karlsoon & Sorensen사에서 개발한 범용 유한요소 해석 프로그램이 ABAQUS를 이용하였다.

본 연구에 사용된 유한요소는 동적해석의 정확도를 높이기 위하여 등매개변수 8절점 사각형요소를 사용하였다. 8절점 요소의 해석시간을 줄이기 위하여 요소의 강성행렬 계산시 적분차수보다 낮은 차수를 사용하는 감차적분을 행하는 요소를 사용하였다. 또한 유한요소 경계면에 무한요소를 사용하여 경계면에서 파의 반사가 없는, 즉 파의 원거리영역까지의 전파를 모사하였다. 수치해석에 사용한 모델을 탄소성 모델인 Mohr-Coulomb모델을 사용하였다. 그림 6은 수치해석에 적용한 2차원 축대칭 유한-무한요소망이다. 요소망 구축시에는 해석관심영역인 표층중심부를 보다 조밀하게 하고 요소가 이루는 내부각도가 가능한 30° 를 넘지 않도록 하였다. 요소대칭축에서의 경계조건은 축의 직각방향으로의 자유도를 구속시켰으며 나머지 경계에는 경계에서 에너지가 반사되어 들어오는 현상을 감소시키기 위해 무한요소를 가진원에서 방사방향으로 적용시켰다. 구성된 요소망 중 유한요소부분은 $10m \times 10m$, 무한요소부분은 유한요소영역 선분의 2배가 되도록 하였다.

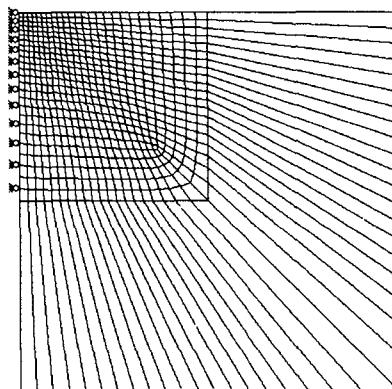


그림 6. 해석에 사용된 축대칭 유한-무한요소망

4.1 입력물성 결정

수치해석시 지반은 영중도 시공현장과 같은 실트질 모래지반으로 가정하였고 하중과 지반물성을 달리

하여 20회 다짐을 해석하였다. 해석시의 지반물성은 삼축시험으로부터 구한 값과 일반적인 사질토 물성치를 적용하였다. 유압식 햄머다짐에 사용된 실트질 사질토의 물성은 표 1과 같다. 탄성계수는 느슨한 사질토의 정적탄성계수를 사용하였다.

표 1. 수치해석에 사용한 물성치

물성	값	물성	값
단위중량	1.478 ton/m ³	포아송비	0.3
탄성계수	15 MPa	강도정수	32°, 7kPa

4.2 대형 진동햄머의 입력하중 결정

충격하중하에서의 지반의 거동을 해석적으로 접근하기 위해서는 동적하중의 재하시에 동적응력에 관한 이해가 필요하다. 지표면에서 발생하는 순간적인 충격시의 응력을 계산하기 위해 몇몇 연구자들이 이론적인 모델을 제안하였는데, 그 중 Mayne과 Jones(1983)는 운동량 보존의 법칙을 이용하여 충격시의 응력을 계산하였다. 운동량 보존의 법칙에 의해 하중-시간 곡선하의 면적은 운동량의 변화량과 같으므로 다음의 식(4)와 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{1}{2} F_{\max} \Delta t = m \Delta v \quad (4)$$

여기서, F_{\max} 는 동적하중의 최대값, Δt 는 가속도변화시간, m 은 추의 질량, Δv 는 속도의 변화량이다. 자유낙하의 경우 충격시의 속도가 0이므로 속도의 변화량은 식(5)와 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$mgh = \frac{1}{2} mv^2 \quad (5)$$

$$\Delta v = \sqrt{2gh} - 0 \quad (6)$$

따라서, 동적하중의 최대값은 식(7)과 같다.

$$F_{\max} = \frac{2W\sqrt{2gh}}{g\Delta t} \quad (7)$$

식(7)에 의해 영종도에서 시험시공한 유압식 햄머다짐의 사양인 추의 무게 7ton과 낙하고 1.2m를 모사하면 약 200ton/m²의 최대응력값을 얻을 수 있다.

4.3 대형 진동햄머다짐의 수치해석 및 결과

그림 7은 소성변형에 의해 소산된 에너지량의 깊이별 분포변화이다. 그림 7에서 유압식 햄머다짐시에 깊이에 따른 소성변형율 에너지의 소산량을 보면 깊이 약 4.5m 까지 영향을 주는 것을 볼 수 있다. 이것은 3.1절의 현장시험후 표준관입시험치로부터 구한 영향깊이와 유사하다. 또한 그림 7의 결과로부터 깊이 3m 이상에서 타격수 약 10회 이상부터는 더 이상의 에너지소산이 이루어지지 않아 10회 이후부터는 3m 이내의 표층부분에만 영향을 줄 것으로 보인다. 즉 다짐시에 에너지의 한계가 존재한다는 것을 의미한다.

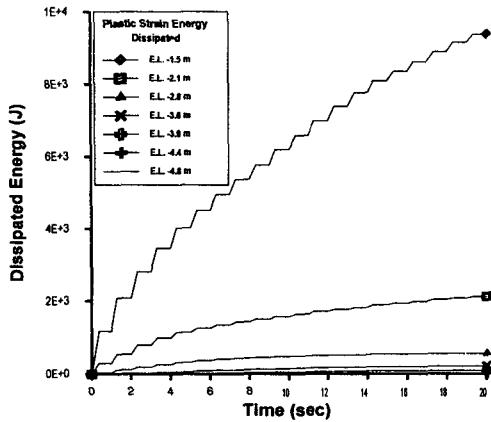


그림 7. 타격횟수 증가에 따른 소성변형을 에너지 소산

6. 수치해석결과 및 분석

일반적으로 중추낙하 다짐시에 영향깊이를 산정할 때 Menard(1973)가 제안한 다음의 식(8)을 사용한다. 이 식은 많은 자료로부터 산정된 경험식으로서 여러 현장에서 비교적 안전측으로 적용되는 것으로 알려져 있다.

$$D = a (W \cdot h)^{0.5} \quad (8)$$

여기서, D는 영향심도, a 는 지반특성계수, W는 다짐추의 무게, h는 추의 낙하고를 의미한다. 지반특성계수의 경우 사질토에 일반적으로 적용하는 0.5를 사용하였다.

위의 식을 사용하여 본 해석에 사용한 유압식 햄머다짐의 영향심도를 평가할 경우, 추무게 7ton과 낙하고 1.2m일 때의 영향심도는 1.5m로 수치해석이나 현장 시공자료를 통해서 본 영향심도인 4.5m보다 현저히 적게 나타난다. 이러한 이유는 유압식 햄머다짐공법의 개량방식이 중추낙하공법과는 다르기 때문이다. 유압식 햄머다짐의 경우 적은 낙하에너지를 반복적으로 가하여 지반을 다지는 공법으로 식 (8)에 적용하기 위해서는 이러한 반복적인 에너지의 누적치를 적용해야 할 것으로 보여진다. 따라서 영향깊이의 증가가 거의 없었던 10회 다짐까지의 낙하에너지를 합하면 다음과 같은 영향심도를 얻을 수 있다.

$$D = a (W \cdot h \cdot N)^{0.5} = 0.5 \times (7 \times 1.2 \times 10)^{0.5} = 4.6m \quad (9)$$

여기서 N은 소산된 소성에너지가 수렴할 때의 타격횟수를 의미한다. 위의 결과는 수치해석이나 시공자료에서 얻은 영향깊이인 4.5m와 비교적 일치하는 값을 갖는다. 이와 같은 결과로부터 영향심도 약 4.6m 정도를 유압식 햄머다짐공법으로 얻기 위해서는 최소한 84tonf-m 이상의 에너지가 필요한 것으로 보여지며, 따라서 Menard 식을 이용할 경우 유압식 햄머다짐공법의 영향깊이를 다짐하는데 필요한 최소한의 에너지를 구할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 연약지반 개량공사에 적용한 유압식 햄머다짐 공법의 영향깊이를 수치해석적으로 구하였다. 개량정도를 평가하기 위하여 동역학적 유한요소 프로그램을 이용하여 수치해석을 실시하였으며, 현장자료와의 비교를 통해 적용성을 검증하였다. 수치해석에 사용한 프로그램은 동역학적 유한요소해석이

가능한 ABAQUS를 사용하였다. 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 수치해석을 통한 소성에너지 소산량의 타격횟수에 따른 변화로부터 다짐의 영향깊이를 추정할 수 있었다. 특히 깊이 약 3m 이후부터는 소성에너지의 소산이 타격횟수 10회 정도에서 수렴하여 다짐시 다짐에너지의 한계가 존재함을 알 수 있었다.
2. 유압식 햄마다짐을 20회 실시했을 경우를 수치해석적으로 모사한 결과 영향심도는 약 4.5m 정도로 나타났으며 다짐횟수 10회 이 후 깊이 3m 이내의 표층에서만 다짐이 발생하는 것으로 나타났다.
3. 소성에너지 수렴시의 누적에너지를 Menard 경험식에 적용할 경우 영향깊이를 판정할 수 있음을 알았다. 따라서 수치해석을 통해 소성에너지가 수렴하는 시간의 외부에너지를 알 경우 Menard 식으로부터 필요깊이를 다짐하는데 요구되는 최소한의 에너지를 구할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구의 재정적 지원 및 연구에 필요한 자료를 지원해 주신 (주)대우엔지니어링에 깊은 감사를 드립니다. 또한 (주)대우엔지니어링의 한영철 상무의 유익한 학문적 조언에도 본 지면을 통해 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 신공항건설공단, 수도권 신공항 다짐시험시공 용역 종합보고서, 1996.
2. Bowles, J. E., *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill, New York, 1988.
3. Hibbitt, H. D., Karlsson, B. I., and Sorensen, *ABAQUS Theory Manual*, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1997.
4. Mayne, P. W. and Jones, J. S., "Impact Stress during Dynamic Compaction", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 10, Oct., 1983, pp. 1342-1347.
5. Menard, L. and Broise, Y., "Theoretical and Practical Aspects of Dynamic Consolidation", *Geotechnique*, Vol. 25, No. 1, March, 1975, pp. 3-17.