건물의 기초 형식 선정을 위한 규칙 기반 시스템

Rule Based System for Selection of Foundation Types of Building Structures

김 한 수*
Kim, Han-Soo
최 창 근**
Choi, Chang-Koon

요 약

본 논문에서는 건물 기초 설계의 자동화를 위한 규칙 기반 시스템을 개발하였다. 상부 구조의 설계 결과와 지반 조사 보고서로부터의 지반에 관한 자료를 읽어 들여 허용지내력을 추정하고 주어진 상황에 적절한 기초 형식을 추론하는 방법을 제안하였다. 허용지내력은 표준관입시험치로 부터 추정하였고, 이를 바탕으로 각 기중과 벽체의 기초형식은 우선 독립기초와 벽체기초라고 가정하여 그 크기를 계산하고 각 기초의 중첩 여부를 조사하여 중첩되는 기초들은 본 논문에서 개발한 기초 합병의 방법을 이용하여 새로운 기초형식으로 변경되도록 하였다. 개발된 시스템은 주어진 상부구조 설계 결과와 지반 조건에 대하여 적절한 기초형식을 선정하여 그에 따른 배근 설계를 쉽게 할 수 있도록 해준다.

Abstract

A rule based system for foundation design of building structures is developed with CLIPS in this study. The types of foundation and the allowable bearing capacity of supporting soil inferred by the rule based system for selection of foundation type, called SOFTEX, are transferred to a sturctural design program for building foundation. The allowable bearing capacity is calculated with N values of Standard Penetration Test. The foundation types such as independent spread footing, wall footing, combined footing and mat foundation can be inferred by the foundation merge procedure develped in this study. This procedure is based on the analysis data from the super structure and the estimated bearing capacity. By using this integrated system, structural engineers with less experience in foundation design can design the foundation system for the given superstructure and the site condition with relative ease.

* 현대건설 기술연구소 선임연구원
** 한국과학기술원 토목공학과 교수

이 논문에 대한 토론을 1996년 9월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1997년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

건물을 안전하게 지지해 주는 경제적인 기초 시스템을 결정하는 일은 이론적인 지식뿐만 아니라 고도의 공학적인 판단을 요구하는 작업이다. 특히, 지반의 성질은 다른 구조적인 재료에 비하여 불확실성이 높은 재료이므로 기초 설계에 있어서 설계자의 경험과 직관이 필수적이라 할 수 있다. 1960년대 이후 컴퓨터 기술의 발달은 구조 해석 분야에도 지대한 영향을 주었으며 특히 해석 분야에서의 컴퓨터의 이용은 오늘날 필요 불가결한 요소가 되었다. 그러나 최근까지의 구조 분야에서의 컴퓨터의 적용은 수치적인 계산에만 집중되어 있어 컴퓨터를 이용한 전체 설계 작업의 자동화에는 많은 어려움이 있다. 이것은 설계자의 경험과 판단에 주로 의존하는 설계 결정 과정을 컴퓨터가 행할 수가 없었기 때문이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 비교적 오랜 기간 동안 전산학에서 인공지능 분야를 연구해 오고 있는데 그 중에서도 전문가 시스템 분야는 가장 실용화되어 있는 분야 중의 하나이다.[1,2]

본 연구에서는 건물의 기초 설계가 그 특성상 수치 계산과 더불어 많은 경험과 지식을 필요로 하므로 이의 자동화를 위하여 전문가 시스템의 기술과 기존의 절차적 프로그래밍 기술의 결합을 통하여 건물 기초 설계의 자동화를 구현하고자 한다.

전문가 시스템(expert system)은 어떤 한 대상 분야에 관한 전문가의 전문적인 지식을 규칙화화여 문제를 해결하는 인공지능의 한 분야이다.[1] 여기서 전문적인 지식은 사실에 관한 지식과 전문가의 경험으로부터 얻은 지식을 가리킨다. 전문가 시스템의 기본적 구성은 크게 지식을 저장하고 있는 지식베이스(knowledge base)와 이를 처리하는 추론 기관(inference engine)으로 나눌 수 있으며 이들 기본적 구성에 설명 기능, 지식 획득 기능, 사용자 인터페이스 등의 기능이 추가되어야 한다. 본 연구에서 개발한 시스템은 전문가 시스템중 지식을 규칙의 형태로 표현한 규칙기반 시스템(rule-based system)이며 설명 기능 등의 추가 기능은 포함되어 있지 않다.

2. 전문가 시스템 구축 도구 CLIPS

기초 설계를 위한 규칙 기반 시스템인 SOFTEX는 전문가 시스템 구축 도구인 CLIPS(C Language Interated Production System) 버젼 4.2를 이용하여 구축되었다.[3] CLOPS는 기존의 전문가 시스템 개발 도구들이 주로 LIPS를 이용하여 개발되었던 것에 반하여 C언어를 이용하여 개발되어 타 기종의 컴퓨터로의 이식성, 외부 프로그램과의 접속의 용이성 등이 뛰어난 도구이다. 한편, CLIP 버젼 5.0부터는 프로그래밍 방법면에 있어서 규칙 기반(rule-based) 방법 뿐만 아니라 객체 지향(object-oriented)과 절차식(procedural) 방법 또한 제공하고 있다.

CLIPS는 크게 3개의 부분으로 구성되는데 사실리스트(fact-list), 지식베이스(knowledge based), 추론 기관(inference engine)이 그것이다. CLIPS의 지식은 규칙과 사실로써 표현된다. 어떤 문제를 해결하기 위해 전문가 시스템의 개발자는 여러 가지 규칙들을 정의하게 되는데 이들 규칙들의 집합을 지식베이스라고 한다. 규칙은 CLIPS에서 지식을 표현하는 주된 방법이며 다음과 같은 형태로 정의된다.

```
(defrule <name> ["<comment>"]
  ((((first pattern))))
  [  .
     .                                  ; Left-Hand Side
     .
  ((<nth pattern>))]
⇒
  ((<first action>))
  [  .
     .                                  ; Right-Hand Side
     .
  ((<mth action>))
```

여기서 defrule은 규칙을 정의하는 명령이고 <name>은 규칙의 이름을 나타내고 "<comment>"는 규칙의 내용을 설명하는 부분이다. 규칙은 LHS라 불리는 조건들과 조건들이 만족되면 수행되는 RHS라 불리는 행동으로 구성되는데 ⇒ 로서 구분된다. 규칙의 LHS에 있는 <<pattern>>들은 임의의 리스트 형태가 될 수 있고 ?로 시작되는 패턴 변수를 포함할 수 있다. 그리고 사실 리스트

에 〈〈pattern〉〉과 일치하는 사실이 있으면 규칙의 RHS에 있는 〈〈action〉〉들이 수행되는데 이에 사용할 수 있는 명령으로는 사실을 추가하는 assert, 삭제하는 retract, RHS에 사용되는 변수에 값을 부여하는 bind등과 입출력을 위한 명령 등이 있다. 규칙의 한 예를 들어보면 다음과 같다.

```
(defrule determine-engine-state "rule1"
  ?rem <- (query phase)
  (not)(working-engine?))
⇒
  (retract ?rem)
  (printout "What is the working state of the engine :" crlf)
  (printout " (normal /unsatisfactory /does-not-start) ? ")
  (bind ?response (read))
  (assert (working-state engine ?response))
)
```

'사실'은 CLIPS에서 자료를 표현하는 방법이다. '사실'은 괄호 사이에 공백으로 구분되는 임의의 수의 필드로 구성되는데 이들 필드는 실수, 단어, 문장의 3가지 형태를 가질 수 있다. '사실'들은 규칙들에 의하여 삽입되거나 삭제되므로써 문제해결의 현재 상태를 표현하게 된다. 다음은 '사실'들의 한 예를 보여주고 있다.

```
(spark-state engine normal)
(fuel-level gas-tank sufficient)
(charge-state battery charged)
(rotation-state engine rotates)
```

패턴매칭(pattern matching)을 통하여 현재의 사실들과 규칙의 LHS의 조건들이 부합되는가를 판단하며 추론기관을 통하여 어떤 규칙이 실행되어야 하는가를 판단하여 해당 규칙을 실행시켜 준다. CLIPS에서는 Rete Algorithm이라는 효율적 패턴매칭 방법을 사용하여 추론 기관이 구축되어 있고 현재의 상황에서 목표를 찾아가는 전진 추론 방법을 사용하게 된다.

CLIPS는 고급 전문가 시스템이 지원하는 프레임, 상속 등과 같은 고도의 지식의 표현 방법과 설명 기능, 그래픽을 이용한 고급 사용자 인터페이스 등은 제공하 못하지만 이를 극복하는 방법으로서 외부 함수나 응용 프로그램과의 다양한 접속 방법을 제공하고 있다. 즉 규칙의 실행 중에 다른 응용 프로그램을 실행시켜 주는 system함수와 C 언어 또는 FORTRAN등과 같은 절차형 언어로 작성된 외부 함수를 규칙 내에서 자유롭게 사용할 수가 있다. 본 연구와 같이 수치적인 계산도 함께 요구되는 공학적 문제인 경우, 이점은 상당히 중요한 이점이 된다.

3. SOFTEX의 개요

주어진 건물에 가장 적합한 기초 시스템이란 그 건물이 제 기능을 발휘할 수 있도록 안전하게 지지해 주며 주위의 구조물이나 다른 시설물에 피해를 주지 않으면서 가장 공사비가 적게 드는 기초 시스템을 말한다. 이러한 기초 시스템을 선정하는 절차는 설계자의 취향에 따라 다소 차이가 있게 마련이나 대체로 다음과 같은 절차를 거치게 된다.[4] 아래와 같은 설계 절차의 표준화는 전문가 시스템의 체계적인 구축에 많은 도움이 된다.

(1) 건물의 층수, 기초 하중, 지하 층수와 같은 건물의 특징을 파악한다.
(2) 구조적, 건축적 요구와 건물의 이용에 대한 기초 형식 선정 기준을 설정한다. 보통 건물에 대한 선정 기준은 허용침하, 특히 허용부등침하량으로 표시된다.
(3) 건물이 주어질 위치의 지반에 대한 정보를 정리한다.
(4) 각각의 설계 대안에 대하여 검토한다. 일반적으로 기초 시스템을 선정은 가장 값싼 기초 시스템인 얕은 기초 시스템의 적용 가능성을 진단해 보는 것부터 시작된다.
(5) 가장 유망한 기초 시스템이 결정되면 그에 따른 세부 설계를 실시하게 된다.

기초 설계에 있어서 필요한 자료는 상부 구조에 관한 자료, 지반에 관한 자료, 주변 환경에 관한 자료로 나눌 수 있다. 상부 구조에 관한 자료는 상부 구조의 해석과 설계 과정을 통하여 얻어진 기초에 전달될 하중, 기둥의 크기, 상부 구조의 강성 등을 포함한다. 이러한 자료를 얻기 위하여 본 연구에서는 건물의 일관 설계 프로그램인 BUILDS (integrated BUILding Design System)를 이용하였다.[5]

BUILDS-F[6]는 기초의 세부 구조 설계를 담당하는 BUILDS의 부프로그램으로서 독립기초, 복합기초, 전면기초, 파일기초캡등의 세부 구조 설계를 할 수 있다. BUILDS-F의 입력 자료는 각 기둥과 벽체의 하중과 기초 형식, 지반의 허용지내력 등이며 이같은 자료를 이용하여 허용응력 철근콘크리트 설계법을 기준으로 기초의 크기, 춤, 보강 철근의 설계 등 기초 설계 결과를 출력한다. 이같은 BUILDS-F를 이용하기 위해서는 입력 자료로서 기초형식, 지반의 허용지내력등의 입력이 필요한데 이같은 자료의 결정은 많은 경험을 요구하는 과정이므로 기존의 프로그래밍 방법으로는 쉽게 해결할 수가 있다. 본 연구에서 개발한 기초 설계를 위한 전문가 시스템인 SOFTEX는 이러한 자료들을 쉽게 결정할 수 있도록 해 준다. SOFTEX의 추론 결과로 나오는 기초 형식, 프로그램인 BUILDS-A/C/S로부터 직접 전달받게 된다. SOFTEX의 추론 결과로 나오는 기초 형식, 기초 깊이, 세부 구조에 필요한 설계 상수 등은 BUILDS-F로 절달되고 BUILDS-F에서는 전달된 자료에 의거하여 기초의 세부 구조 설계를 하게 된다.

건물의 기초 설계의 초기 단계에서는 상부 구조에 관한 자료, 지반에 관한 자료, 주변 환경에 관한 자료를 종합하여 적절한 기초 시스템을 선정하여야 한다. 많은 경우 기초 설계는 상부 구조를 설계하는 구조 기술자가 지반 조사 보고서를 기준으로 과거의 예를 참고로 하여 행하게 된다. 그러나 토질 공학에 대한 경험이 많지 않은 구조 기술자는 상부 구조와 지반에 대하여 절적한 기초 시스템을 결정하는데 있어 정보의 부족함을 많이 느끼게 된다. 특히 지반 조사 보고서의 조사결과를 기초 설계에 필요한 설계 기준으로 전환하는 작업은 토질 공학의 지식과 함께 복잡한 계산을 동반하게 되어 자동화의 필요성이 크다. SOFTEX는 이러한 필요를 충족하는 것을 주 목적으로 하고 있다.

4. 허용지내력의 결정

4.1 이론적 배경

건물의 기초 설계에 있어서 일반적으로 가장 많이 사용되는 설계 정수는 허용지내력이다. SOFTEX에서도 기초 형식을 허용지내력을 기준으로 선정하게 된다.

허용지내력이란 기초를 기지하는 흙의 전단 파괴와 과도한 침하에 대하여 안전한 지반의 수직응력을 말한다.[7] 실무적으로 허용지내력은 극한 지지력을 소정의 안전율로 나눈 허용지지력과 허용침하에 대하여 안전한 지지력 중 작은 값을 택한다. 극한 지지력은 전단에 의한 파괴 영역을 가정하여 이론적으로 구할 수 있다. 이러한 극한 지지력 공식으로는 Terzaghi, Vesic, Hansen등이 제안한 공식들이 있는데[7] 이 공식들은 흙의 내부 마찰력에 의해 결정되는 여러 가지 지지력 계수와 점착력, 흙의 단위 중량, 기초의 크기 등의 상당히 많은 변수들에 의해 극한 지지력을 결정하게 된다. 그러나 기초 형식 선정 단계에서의 복잡한 공식의 사용은 불합리하며 또한 기초의 형식, 크기, 깊이 등이 결정되어 있지 않은 상태이므로 상기 공식을 적용하기에는 무리가 있다.

허용 침하에 의한 지지력 추정은 탄성침하와 압밀침하를 계산하는 계산 공식을 이용하여 이론적 값을 계산할 수 있으나 이 경우도 역시 복잡한 공식과 자세한 지반 자료 및 기초 형식에 관한 자료가 필요하게 되어 기초 형식 선정을 위한 단계에서는 적용에 무리가 있다. 따라서 기초 형식 선정 단계에서는 지반 조사 자료로부터 직접 허용지내력을 구할 수 있는 간단한 공식을 이용하는 것이 바람직하다. SOFTEX에서는 이같은 상황을 고려하여 가장 보편적인 원위치 시험인 표준관입시험 결과를 이용하여 허용지내력을 결정한다.

표준관입 시험은 64kg의 해머를 76cm높이에서 자유 낙하시켜 샘플러가 30cm 관입하는데 소요되는 타격 횟수로 지반의 성질을 파악하는 지반조사 방법으로 현재 가장 많이 실시되는 원위치 시험 방법이다. 이 방법은 1927년에 개발된 이래 미주 지역에서는 85%에서 90%정도의 기초 설계가 이를 기준으로 이루어 질 정도로 가장 보편화된 방법이며 표준관입 N값과 흙의 상대 밀도, 내부마찰각, 탄성계수 등 여러 가지 계수와의 경험적인 상관관계가 많이 정립되어 있다. 한편 표준관입 N값의 측정은 측정 장비, 측정 깊이, 지하수위 등에 의해 영향을 받으므로 공식에 사용하기 위해서는

표준상태로 보정되어져야 한다.[7]

보정된 표준 관입 시험치 N을 기준으로 허용지내력 계산 공식인 Parry공식[8]과 수정 Meyerhof 공식[9]을 사용하여 허용 침하량이 25mm일때의 허용지내력 q_a를 결정하다. 표준관입시험치에서 직접 허용지내력을 계산할 수 있는 Parry공식은 다음과 같다.

$$q_{ult} = 30\,N(KPa) \approx 3\,N(ton/m^2) \quad (1)$$

$$q_a = \frac{q_{ult}}{3} = 10\,N(KPa) \approx N(ton/m^2)$$

여기서 N은 기초밑면에서 0.75B 깊이까지의 SPT 값의 평균을 취한다.

Parry의 공식은 기초의 크기에 관계가 없으로 쉽게 허용지내력을 결정할 수 있는 장점이 있는 반면 구한 값의 신뢰성이 떨어진다는 단점이 있다. 따라서 기초 형식을 선정하기 위한 값으로는 Parry공식에 의한 허용지내력을 사용하고 기초 형식이 결정된 후 가정한 허용지내력이 타당한가를 검토하는 단계에서는 다음과 같은 수정 Meyerhof공식을 사용한다.

$$B \le 1.2(m)\text{일때}\quad q_a = \frac{N}{0.05}K_d(KPa)$$

$$B \le 1.2(m)\text{일때}\quad q_a = \frac{N}{0.08}\left(\frac{B+0.3}{B}\right)^2 K_d(KPa) \quad (2)$$

$$K_d = 1+0.33\frac{D}{B} \le 1.33$$

여기서 B와 D는 각각 기초의 폭과 깊이이다.

지반 조사 보고서의 지반의 종류, 표준관입시험 차등 허용지내력의 결정에 필요한 자료는 화일을 통하여 SOFTEX에 입력되게 된다. 일반적으로 고층 건물의 경우, 지반 조사를 위한 보링수는 4회 이상을 행하도록 되어 있는데 이 각각의 보링자료를 조합하여 설계용 N값을 채용하는 방법으로는 다음의 두 가지 방법이 주로 사용된다.

(1) Terzaghi-Peck(1948)의 방법

기초 밑면으로부터 아래로 기초 밑면의 폭 B와 같은 두께의 토층에 대하여, 각 보링에 있어서의 평균값을 구하여 그 중에서 가장 작은 평균값을 설계용 N값으로 한다.

(2) 일본 기초 설계 규준(1960)의 방법

Terzaghi-Peck의 방법은 많은 수의 보링이 필요하고, 조사량에 따라서는 여유가 없는 값을 얻게 될 우려가 있으므로, 한 지역에 있어 동일 토층에서의 설계용 N값은 각 보링에서의 측정값의 평균에서 표준편차를 뺀 값을 사용하는 것이 안전측이라고 지적하고 있다.

4.2 SOFTEX에서의 허용지내력 결정

SOFTEX에서는 각 보링별로 지반 조사 보고서의 지반의 높이, 지하 수위, SPT의 N값등을 사실의 형태로 입력받게 된다. 입력된 사실들의 예를 들면 다음과 같다.

```
; (BORING boring-number elevation water-table)
; (SPT boring-number sample-number taken-depth N-blows penetration)
(BORING 1 33.3 -0.5)
(SPT 1 1 1 6 30)
(SPT 1 2 2 11 30)
(SPT 1 3 3.5 19 30)
(SPT 1 4 5 22 30)
(SPT 1 5 6.5 25 30)
(SPT 1 6 8 31 30)
(SPT 1 7 9.5 40 30)
(SPT 1 8 11 50 15)
(SPT 1 9 13 50 10)
(SPT 1 10 15 50 5)
(SPT 1 11 17 50 3)
(BORING 2 33.8 -0.6)
(SPT 2 1 1 7 30)
(SPT 2 2 2 13 30)
(SPT 2 3 3.5 18 30)
(SPT 2 4 4.5 21 30)
(SPT 2 5 6 24 30)
(SPT 2 6 7.5 35 30)
(SPT 2 7 9 37 30)
(SPT 2 8 10.5 40 30)
(SPT 2 9 12 50 2)
(SPT 2 10 14 50 3)
```

일반적으로 타격 효율은 지반 조사 보고서에 제시되어 있지 않으므로 타격 효율에 대한 보정은

하지 않는다. 유효상재압에 대한 보정은 흙의 단위 중량을 1.8ton/m^3이라 가정하여 측정이 행해진 높이에서의 유효상재압을 계산하여 보정한다. 유효상재압에 대한 보정을 위한 규칙을 보이면 다음과 같다.

```
(defrule correction-overburden-pressure ""
  (phase-make-faces-from-file)
  (BORING ?bid ?elev ?water)
  ?facl <- (spt-depth ?bid ?nt ?depth ?nvalue ?penet)
; unit of unit-weight : kg/cm^2
  (unit-weight-normal ?gamma)
  (unit-weight-effective ?gammap)
=>
  (retract ?facl)
  (bind ?wl (* 100.0 (+ ?elev ?water)))
  (if (> ?depth ?wl) ; above water table
    then
      (bind ?d1 (- (* 100.0 ?elev) /depth))
      (bind ?d2 0.0
    else
      (bind ?d1 (- (* 100.0 ?elev) ?wl))
      (bind ?d2 (- ?wl ?depth)
)
(bind ?p1 (* ?d1 ?gamma))
(bind ?p2 (* ?d2 ?gammap))
(bind ?press (+ ?p1 ?p2)
(bind ?factor (sqrt ( / 1.0 ?press)))
(bind ?new (* ?nvalue ?factor))
(assert (spt-depth-press ?bid ?nt ?depth ?new ?penet))
```

건물의 기초가 위치하는 높이는 BUILDS-A에서 입력받게 되는데 사용자의 편의를 위하여 수행중에 그 값을 변경할 수 있도록 하였다. 기초가 위치하는 높이가 결정되면 기초폭(B)을 3m로 가정하여 기초가 위치하는 높이에서 +0.5B, OB, -0.5B, -1.0B, -1.5B, -2.0B의 높이에서의 N값을 각 보링자료별로 평균하게 된다. 이때 해당하는 높이의 자료가 입력되어 있지 않으면 선형보간된 값을 사용한다. 각 보링자료별로 구해진 N값을 평균하여 설계용 N값으로 사용한다.

5. 기초 형식의 추론

5.1 기초 형식 추론의 방법

기초 형식의 추론은 우선 얕은 기초와 깊은 기초 시스템의 선택으로 부터 시작하게 된다. 이 결정은 건물 전체의 관점에서 필요한 기초 면적과 건물의 기초층 면적과의 비를 계산하여 판단하게 된다.

상부 구조에 관한 자료를 상부 구조 해석 프로그램인 BUILDS-A로부터 전달받아 전체 건물의 수직 하중, 기초 층의 면적 등을 계산하여 다음 식과 같이 건물 전체에 필요한 기초의 총면적 $A_{footing}$을 계산하게 된다.

$$A_{footing} = \frac{P_{building}}{q_a} \tag{3}$$

기초의 총면적이 구해지면 기초 층의 면적과의 비를 계산하여 그 값을 기준으로 전체 기초 시스템을 잠정 결정하게 된다.

$$P_{footing} = \frac{A_{footing}}{A_{building}} \times 100 \tag{4}$$

즉, $R_{footing}$이 100%보다 작으면 기초 시스템을 얕은 기초로 하고 100%보다 크면 깊은 기초로 하게 된다. SOFTEX의 깊은 기초는 파일에 의해 지지되는 기초 형식으로 한정한다.

이와 같은 간단한 방법으로 건물 전체의 기초 시스템이 결정되게 되면 각각의 기둥과 벽체의 기초 형식을 다음과 같은 과정에 따라 결정하게 된다.

(1) 각 기둥과 벽체의 하중과 허용지내력을 바탕으로 독립기초일때의 기초 크기를 추정한다.

(2) 각각의 독립 기초의 중첩 여부를 검토한다.

(30 독립 기초가 중첩되면 중첩되는 기초들의 총 기초 면적과 같은 면적을 가지는 새로운 기초로 변경하게 된다.

(4) 기둥의 기초형식이 독립 기초일 경우에는 기둥의 크기가 같은 기둥들은 같은 크기의 독립 기초를 갖도록 한다.

독립 기초의 크기를 추정하는 (1)단계에서의 기둥은 정방향 모양으로 가정한 후 전달된 양방향의 모멘트와 전단력에 대하여 기초 하부에 작용하는 지반응력이 허용지내력이 이하가 되도록 기초의 크기를 단계적으로 증가시킨다. 벽체인 경우에는 한 방향은 벽체의 길이와 같은 장방형 모양의 독립 기초로 가정하고 전달되는 모멘트와 전단력에

대하여 기초 하부에 작용하는 지반응력이 허용지내력 이하가 하부에 작용하는 지반응력이 허용지내력 이하가 되도록 양 방향으로 기초의 크기를 단계적으로 증가시킨다. 이 과정을 거치게 되면 기둥의 배치 상태와 하중의 크기, 허용지내력의 크기 등 요인에 따라 각 기초들이 중첩되게 되는데 모든 기초들에 대하여 서로의 중첩 여부를 검토하게 된다. 이 중첩되는 기초들을 다음과 같은 방법으로 등가의 새로운 기초 모양으로 변경하게 된다.

두 기초 F_1, F_2가 중첩되어 새로운 기초 F_3로 변경된다고 하면 F_3의 면적은 F_1, F_2의 단면 1차 모멘트의 합으로부터 구하게 된다. F_3의 X방향 길이와 Y바향 길이의 비는 F_3에 대한 단면 2차 모멘트는 F_3의 면적 중심을 원점으로 하는 좌표축에서 구한 F_1, F_2의 단면 2차 모멘트와 합과 같다는 조건에서 구하게 된다. 이같은 방법을 수식으로 정리하면 다음과 같다.

$$A_3 = A_1 + A_2 \tag{5}$$

$$G_{x3} = G_{x1} + G_{x2} = A_1 \cdot c_{y1} + A_2 \cdot c_{y2}$$

$$G_{y3} = G_{y1} + G_{y2} = A_1 \cdot c_{x1} + A_2 \cdot c_{x2} \tag{6}$$

$$c_{x3} = \frac{G_{y3}}{A_3}$$

$$c_{y3} = \frac{G_{x3}}{A_3} \tag{7}$$

$$R_3 = \frac{l_{y3}}{l_{x3}} = \sqrt{\frac{I_{x1}+I_{x2}}{I_{y1}+I_{y2}}} \tag{8}$$

$$l_{x3} = \sqrt{\frac{A_3}{R_3}}$$

$$l_{y3} = \sqrt{A_3 \cdot R_3} \tag{9}$$

여기서 A_i는 i번 기초의 면적이고 G_{xi}, G_{yi}는 각각 X축, Y축에 대한 i번 기초의 단면 1차 모멘트이고, c_{xi}, c_{yi}는 i번 기초의 면적 중심의 X, Y좌표값이다. I_{xi}, I_{yi}는 새로운 기초의 면적 중심을 원점으로 하는 좌표축에서 구한 단면 2차 모멘트이고, l_{xi}, l_{yi}는 i번의 기초의 X, Y방향의 길이다.(그림 1 참조)

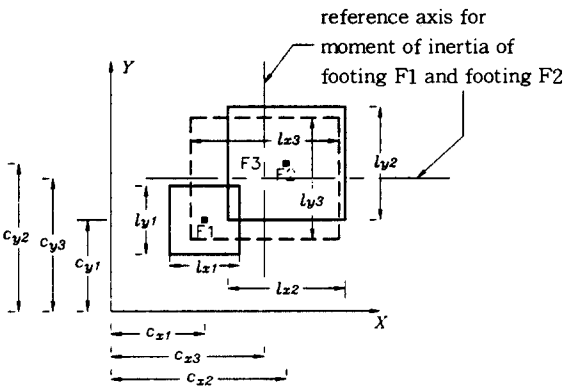

그림 1. 기초합병 방법의 기호 설명

위에서 제안한 기초 합병 방법은 새로이 생기는 기초의 위치와 그 크기는 좌표축과 무관하게 중첩되는 기초들의 위치와 그 크기에만 영향을 받아 결정됨을 알 수 있다. 그림 2는 4개의 기둥이 각각 독립 기초로 그 크기가 결정되었을 때 중첩된 기초의 합병이 이루어지는 과정을 보여 주고 있다. 독립기초일때의 각 기초들의 크기는 표 1에 나타내었고 각 기초들이 합병될 때의 단면 1차 모멘트, 단면 2차 모멘트 등도 함께 나타내었다.

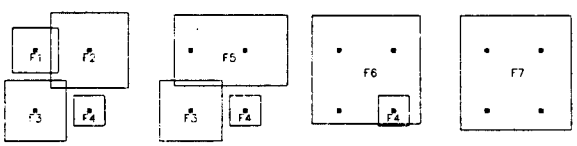

그림 2. 4개의 독립기초들의 기초합병의 예

표 1. 4개의 독립 기초의 크기와 합병될 때의 중간 계산값

	C_x	C_y	l_x	l_y	A	G_x	G_y	I_x	I_y
F_1	5.0	5.0	1. 2	1.2	1.440	7.200	7.200	0.173	1.699
F_2	6.4	5.0	2.0	2.0	4.000	20.000	25.600	1.333	1.883
F_3	5.0	3.4	1.6	1.6	2.560	8.704	12.800	3.577	1.801
F_4	6.4	3.4	0.8	0.8	0.640	2.176	4.096	0.684	0.303
F_5	6.029	5.000	2.896	1.878	5.440	27.200	32.800	3.025	4.393
F_6	5.700	4.488	2.784	2.874	8.000	35.904	45.600	5.558	5.187
F_7	5.752	4.407	2.847	3.035	8.640	38.080	49.696	6.633	5.834

이상과 같은 기초 합병 과정을 거친 후에도 기초 형식이 독립 기초로 되어 있는 기초들은 각각 그 크기가 다르게 된다. 각 기둥마다 각기 그 크기가 다른 기초들로 설계를 하는 것은 바람직하지 않으므로 기초의 크기가 비슷한 것들은 같은 기초 크기로 그루핑(Grouping)하여 설계하게 된다. 이 때 그루핑 기준은 기둥의 크기가 같은 기초들은 그중 가장 큰 크기를 갖는 기초로 통일한다는 것이다. 이같은 기준은 상부 구조의 설계시 축하중이나 모멘트등의 작용 하중이 비슷한 기둥들은 같은 크기의 기둥들로 설계되어 있다는 가정을 바탕으로 한 것이다.

5.2 SOFTEX에의 기초형식 추론 방법의 구현

각 기둥과 벽체의 기초를 독립 기초와 벽체 기초로 기초 형식을 가정하여 그 크기가 계산되면 각 기초들은 형식이 각각 RECTANGLE과 WALLFDN로 부여되어 사실 리스트에 추가된다. 동시에 각 기둥 또는 벽체와 기초를 연결시켜 주는 사실도 리스트에 추가되어 기록된다. 각 기초들의 크기를 결정하는 과정은 축방향력 뿐만 아니라 모멘트, 전단력등에 의한 지반응력도 검토하게 되므로 계산 과정이 다소 복잡하게 된다. CLIPS에서의 수치 계산을 위한 명령은 연산자를 먼저 쓰고 피연산자를 나중에 쓰는 방법을 사용함으로 계산이 복잡한 과정을 나타내기에는 불편하다. 따라서 독립 기초의 크기를 결정하는 계산 과정은 외부함수로 작성하여 사용하는 것이 편리하다. 각 기둥의 독립 기초 크기를 추정하는 규칙을 예로 들면 다음과 같다.

```
(defrule assume-column-footing-size) ""
  (phase-assume-individual-footing)
  (allowable-bearing-capacity ?qa) ; ton/m2
  ?fac1 <- (Cdata ?ic ?xc ?yc ?ax ?xm ?ym ?xs ys)
  ?fac2 <- (number-of-footing ?if
  =>
  (retract ?fac1 ?fac2)
  (bind ?qa ( /?qa 10000.0))
  (bind ?ax (* ?ax -1.0))
  (bind ?if (+ ?if 1)
  (assert (number-of-footing ?if))
  (bind ?f1 (gensym))
  (design_column_footing ?f1 ?qa ?xc ?yc ?ax ?xm ?ym ?xs ?ys)
  (assert (column-footing-relation ?ic ?f1))
  (printout ".")
)
```

위의 규칙에서 design-column-footing은 C언어로 작성된 외부 함수로서 CLIPS 내부의 함수처럼 사용되게 된다. design-column-footing은 허용지내력, 기둥의 위치와 축하중, 모멘트, 전단력 등을 전달받아 독립 기초의 크기를 계산하여 그 결과를 사실 리스트에 추가시키는 기능을 하게 된다.

다음의 규칙은 design-column-footing과 design-wall-footing 함수에 의해 생긴 독립 기초에 관한 사실들을 받아들여 독립 기초 상호간의 중첩여부를 판단하고 중첩되어 있으면 기초 합병의 방법으로 새로운 기초로 변경하는 규칙이다. 이 규칙에서도 기초를 합병하는 과정은 다소 복잡한 계산 과정이 필요하므로 C언어로 작성된 foundation-merge라는 외부 함수로 처리되었다.

```
(defrule check-footing-overlapping ""
  (phase-foundation-merge)
  ?fac1 <- (Footing ?t1 ?f1        ?xc1 ?yc1 ?lx1 ?ly1)
  ?fac2 <- (Footing ?t2 ?f2& ~?f1 ?xc2 ?yc2 ?lx2 ?ly2)
  =>
  (bind ?x-ctoc (abs (- ?xc2 ?xc1)))
  (bind ?y-ctoc (abs (- ?yc2 ?yc1)))
  (bind ?lx (+ (* ?lx1 0.5) (* ?lx2 0.5)))
  (bind ?ly (+ (* ?ly2 0.5) (* ?ly2 0.5)))
  (if (&& (> ?lx ?x-ctoc) (> ?ly ?y-ctoc))
    then
      (retract ?fac1 ?fac2)
      (bind ?f3 (gensym))
      (foundation_merge ?t1 ?t2 ?xc1 ?xc2 ?yc1 ?yc2
                                  ?lx1 ?lx2 ?ly1 ?ly2 ?f3)
      (assert (merged-footing ?f1 ?f2 ?f3)
```

복잡한 계산 과정의 처리를 위하여 C언어로 작성된 외부 하수의 예를 들면 다음과 같다. 예에서와 같이 외부 함수로 전달된 인수는 rstring(), rfloat() 등과 같은 CLIPS의 함수를 이용하여 외부 함수에서 이용하게 되고 계산된 결과는 assert()함수를 이용하여 사실의 형태로 CLIPS의 사실 리스트에 추가시키게 된다.

```
int foundation_merge()
{
char *t1, *t2, *f1, *f2, *f3;
float xc1, yc1, xc2, yc2, lx1, lx2, ly1, ly2;
float lx, ly, xc, yc;
float ix1, ix2, iy1, iy2, area2, dx1, dx2, dy1, dy2;
float gx1, gx2, gy1, gy2, asp;
char str[100];

    /* pop up passed variables */
    t1 = rstring(1);      t2 = rstring(2)
    xc1 = rfloat(3);      xc2 = rfloat(4);
    yc1 = rfloat(5);      yc2 = rfloat(6);
    lx1 = rfloat(7);      lx2 = rfloat(8);
    ly1 = rfloat(9);      ly2 = rfloat(10);
    f3 = rstring(11);

    /* get new center coordinates */
        .
        .
    /* get aspect ratio of merged foundation asp = ly /lx */
        .
        .
        .
    /* assign new foundation type */
    if(strcmp(t1, "RECTANGLE")||strcmp(t2, "RECTANGLE"))
            t3 = "MATFDN"
    else
            t3 = "COMBINED"

    /* assert merged foundation */
    sprintf(str, "Footing" %S %S %f %f %f %f", t3, f3, xc, yc, lx, ly);
    assert(str);

    return(1);
}
```

Foundation-merge에서는 앞에서 설명한 방법으로 중첩되는 기초를 합병하게 되고 합병된 기초의 형식은 중첩되는 기초의 형식에 따라 표 2와 같이 결정된다.

표 2. 각 기초형식의 합병후의 기초형식

+	독립기초	벽체기초	복합기초	전면기초
독립기초	복합기초	전면기초	저년기초	전면기초
벽체기초	전면기초	전면기초	전면기초	전면기초
복합기초	전면기초	전면기초	전면기초	전면기초
전면기초	전면기초	전면기초	전면기초	전면기초

사용자의 편의를 위해 기초 형식 선정을 위해 독립 기초로 가정하여 기초의 크기를 결정하는 단계, 기초의 합병 단계, 독립 기초의 그루핑 단계를 거치면서 각 단계에서의 상화을 그래픽을 이용하여 사용자에게 보여 주는 것이 바람직하다. CLIPS는 자체에 그래픽의 기능을 가지고 있지 않으므로 기초 형식 선정 상황을 그래픽을 이용하여 보여주는 외부 응용 프로그램을 이용한다. 이같은 목적으로 개발된 프로그램인 FDNVIEW는 SOFTEX가 save-facts라는 명령을 사용하여 저장한 그 단계에서의 사실 리스트를 읽어 들여 그림 3과 같이 사용자에게 기초의 설계 상황을 보여주게 된다. FDNVIEW와 같은 외부 프로그램은 CLIPS의 system 명령을 이용하여 규칙 중에서 실행시킬 수 있다.

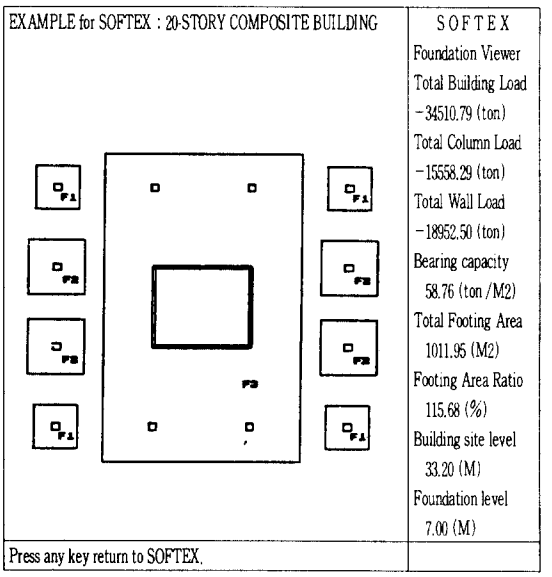

그림 3. 그래픽을 이용한 기초설계 상황 표시 프로그램 (FDNVIEW)

6. 결 론

본 논문에서는 BUILDS-A로부터의 상부 구조에 관한 자료와 지반 조사 보고서로부터의 지반에 관한 자료를 읽어 들여 허용지내력을 추정하고 주어진 상황에 적절한 기초 형식을 추론하는 방법에 대하여 설명하였다.

기초 형식을 선정하는 과정은 기존의 절차적인

언어를 사용하는 것보다 규칙을 이용하여 지식을 표현할 수 있는 전문가 시스템의 기법을 이용하는 것이 적절하다. 따라서 전문가 시스템 구축 도구인 CLIPS를 이용하여 기초 형식 선정을 위한 규칙 기반 시스템을 개발하는 것이 효과적이다. 기초 형식 선정 과정에서 계산이 요구되는 단계는 외부 함수를 작성하여 사용하고 사용자 편의를 위하여 형식 선정 단계마다 설계 상황을 보여 줄 수 있는 그래픽 프로그램을 개발하여 사용하는 것이 필요하다. 이같은 외부 함수나 프로그램과의 연계는 CLIPS의 가장 중요한 장점 중의 하나라고 할 수 있다.

기초 설계에 있어서 가장 중요한 자료인 허용지내력은 가장 일반적인 원위치 시험인 표준관입 시험치로부터 쉽게 추정된다. 추정된 허용지내력을 바탕으로 각 기둥과 벽체의 기초 형식은 우선 독립 기초 또는 벽체기초라고 가정하여 그 크기를 계산하고 각 기초의 중첩 여부를 조사하여 중첩되는 기초들은 본 연구에서 개발된 기초 합병의 방법을 이용하여 새로운 기초 형식으로 변경될 수 있다. 이같은 방법을 사용함으로써 일반적으로 가장 경제적인 기초 시스템인 독립 기초의 타당성을 우선 검토하고 만일 적절하지 못하면 복합 기초나 전면 기초로 그 기초 형식을 변경하게 된다. 또한 사용되는 기초의 종류를 줄이기 위하여 독립 기초의 경우, 기둥의 크기를 고려하여 같은 종류의 기초를 갖도록 그루핑하는 것이 실용성 면에서 효과적이다. 기초 형식이 결정되고 허용지내력과 함께 입력 화일이 자동 작성되면 BUILDS-F는 기초 두께 결정, 보강 철근 설계 등 세부 기초 설계를 실시하게 된다.

참 고 문 헌

[1] Waterman, D., *A Guide to Expert Systems*, Addison-Wesley Publishing Company, 1985.

[2] Guida, G. and Tasso, C., *Design and Development of Knowledge-Based Systems*, John Wiley & Sons, 1995.

[3] Giarratano, J.C., *CLIPS User's Guide, Version 4.2*, 1987.

[4] Peck, R.B., Hanson, W. E., and Thornburn, T. H., *Foundation Engineering*, 2nd edition, John Wiley and Sons, 1974.

[5] 최창근, 정혜교, 김이두, **건물구조의 일관설계 시스템(제1편) 3차원적 선형해석**, 구조공학연구보고서 SEMR 89-01, 한국과학기술원 토목공학과, 1989.

[6] 최창근, 김한수, "건물구조의 일관설계 프로그램의 기초설계," **대한건축학회 추계학술발표회대회 논문집**, 10권 2호, 1990, pp.459-462.

[7] Bowles, J.E., *Foundation Analysis and Design*, 4th edition, McGraw-Hill, 1988.

[8] Parry, R.H.G., "Estimating Bearing Capacity of Sand from SPT Values," *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.103, GT9, 1997, pp.1014-1019.

[9] Meyerhof, G.G., "Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol.82, SM1, 1956, pp.1-19.

(접수일자 : 1995. 6. 22)