

AI 技術を利用した建物基礎選定エキスパートシステムの開発

茶谷 文雄 宮崎 祐助
中尾 通夫 佐原 守
(本社 情報システムセンターシステム開発第二部)

Development of Expert System for Selecting Building Foundation Using AI Technique

Fumio Chatani Yusuke Miyazaki
Michio Nakao Mamoru Sahara

Abstract

The authors developed a practical expert system for selecting an adequate foundation type for a building under given conditions such as the scale and load of the building, the ground and groundwater conditions, and the area and surrounding environment of the building lot. This system has the following features:

① The foundation types generally assumed such as spread foundations, spread foundations combined with soil improvement, friction piles, and bearing piles are almost all objects of consideration. ② The design processes of the foundations are incorporated fairly faithfully. ③ The calculation routine for foundation construction cost is incorporated. ④ The concept of fuzzy theory is utilized in selection of the piling method. ⑤ Representation by images is to be adopted positively. ⑥ Use with a personal computer independently is possible.

概 要

建物規模、建物荷重、地盤・地下水条件、敷地面積、敷地の周辺環境等の与条件下で、設計・施工が可能な基礎形式を抽出し、その概略設計を行なうとともにコストを算出する基礎選定支援エキスパートシステムを開発した。本システムは、次のような特徴を有する実用的なシステムである。

① 直接基礎、地盤改良併用の直接基礎、摩擦杭、支持杭と一般的に想定される基礎形式のほとんどを検討の対象としている。② 基礎の設計過程をかなり忠実にシステムに組入れている。従って、直接基礎の支持力、杭の鉛直支持力・水平抵抗、即時沈下、圧密沈下、液状化、浮上がり等、基礎の設計上必要とされる計算・検討法をほぼ網羅している。③ 杭工事費の計算ルーチンを組入れている。④ 杭工法の選定にファジィ理論の考え方を利用している。⑤ 画像による表示を積極的に取入れている。⑥ パソコン単独で利用可能である。

1. まえがき

基礎形式を選定する際、建物規模、建物荷重、地盤・地下水状況、敷地面積・形状、敷地の周辺環境等の諸条件に加えて、経済性を考慮する必要がある。これらの多くの条件を検討し、総合的な評価を行なって適切な基礎形式を選定するためには、高度な専門知識と豊富な経験が必要となる。特に、上記の諸条件を検討・評価する際、概略のガイドラインはあっても明快な判断基準がないものも多く、判断の自由度が大きい反面、経験の浅い技術者には判断がむずかしい面がある。このような基礎選定作業の標準化と効率化を図るとともに、初級技術者の支援を目的として、基礎形式選定のエキスパートシステムを開発した。

2. システムの開発

開発の目標としたシステムは、基礎選定に必要な多く

の専門知識、ノウハウ、専門家の思考過程等を検討整理し、知識ベースとしてコンピュータ内に保存し、知識処理技術を利用して基礎形式の選定を行なう実用的なエキスパートシステムである。このような目標を達成するため、図-1に示す手順でシステムの開発を行なった。

開発のスタッフは、知識やノウハウの提供者となる土

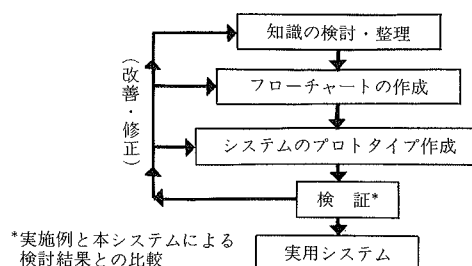


図-1 システムの開発手順

質基礎工学の専門技術者、経験豊富な構造設計者、杭工事・地盤改良工事專業者、積算の専門家、具体的なシステムを構築するシステムエンジニア、およびシステムのユーザーである。システムの開発に際し、ユーザーの意見を取入れた点に特徴があり、これによって、より利用し易いシステムの開発が可能になったと考えている。

3. システムの概要

本システムは、図-2に示すように、基礎選定に必要な諸条件を与えて、対話形式で種々の検討・計算を行ないつつ、設計・施工が可能な基礎形式を抽出し、基礎の概略設計を行なうとともに、その工事費を算出する基礎選定支援システムである。システムのプログラム総行数は約119,000行(C言語)であり、その内の約40%がユーザーインターフェースに関するものである。

3.1 システムの適用範囲および検討の対象とする基礎の範囲

- 本システムの適用範囲は以下の通りである。
- 建物：平面形状が正方形、もしくは長方形の低層～高層建物
 - 地盤：一般的な成層地盤を対象とし、下記のような特殊条件の地盤を適用除外とする。
 - ・シラス、泥炭地、その他の特殊な地盤
 - ・切盛り造成地 ・湿地 ・傾斜地
 - ・支持層が傾斜または変化している地盤

また、検討の対象に含める基礎の範囲は、最下階の床レベル以深とした。但し、基礎梁を除いている。これは、基礎梁の断面寸法を決定するためには、上部架構の構造解析から得られる基礎梁の応力を入力する必要がある、この入力が増雑であること、基礎梁は一般に上部構造の一部として扱っていること等の理由によっている。

3.2 システムの特徴

- ① 直接基礎、地盤改良併用の直接基礎、摩擦杭、支持杭と一般的に想定される基礎形式をすべて検討の対象としている(表-1参照)。
- ② 基礎の設計過程をかなり忠実にシステムに組入れている。従って、直接基礎の支持力、杭の鉛直支持力・水平抵抗、即時沈下、圧密沈下、液状化、浮上がり等、基礎の設計上必要とされる計算・検討法をほぼ網羅している。なお、これらの計算・検討法は、基本的に建築基準法施行令、東京都構造行政連絡会「建築構造設計指針」等の法令および行政機関の指導に準拠し、これらに規定のないものについては、日本建築学会「建築基礎構造設計指針」に準拠した。
- ③ 基礎工事費の計算ルーチンを組入れている。
- ④ 杭工法の選定にファジ理論の考え方を利用している。
- ⑤ 画像による表示を積極的に取入れ、ユーザーの利用の便を図っている(162種画面)。
- ⑥ パソコン単独で利用可能である。

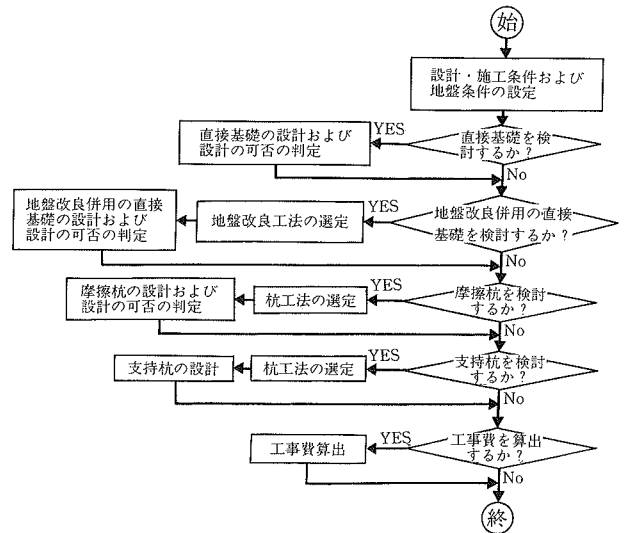


図-2 基礎選定のフローチャート

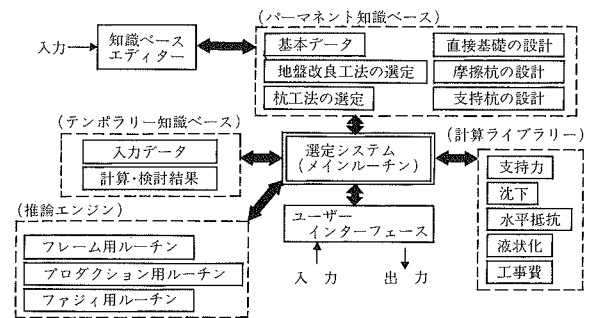


図-3 システムの構成

表-1 検討の対象とした基礎形式・杭工法・地盤改良工法

基礎形式	杭工法	地盤改良工法
・直接基礎 (独立基礎 布基礎 ベタ基礎) ・地盤改良併用の直接基礎 ・摩擦杭 ・支持杭 (中間層支持杭 下部層支持杭)	・打込み杭 ・プレボーリング併用打込み杭 ・埋込み杭 (プレボーリング拡大根固め工法 中掘り拡大根固め工法) ・場所打ち杭 アースドリル リバース オールケーシング BH 深礎	・ラップルコンクリートによる置換工法 ・浅層混合 ・セメントパイルコラム ・グラベルドレーン

3.3 システムの構成

本システムは、図-3に示すような構成となっている。メインルーチン：本システムの総合的なコントロールを行なう部分で、必要な知識ベースや計算ルーチンの呼出し、計算結果のテンポラリー知識ベースへの保存等を行なう。

パーマナント知識ベース：基礎の設計や工事費算出の際必要となる、各種杭の構造的な性能、コンクリート、鉄筋の仕様、資材単価、工事単価等の基本的なデータ、杭工法の選定および各種基礎の設計に関する知識を永続的に蓄積している部分である。なお、これらの知識は、技術の進歩や価格の変動等に伴い、将来変化する可能性がある。このような変化に対応して、ユーザーは知識ベース

エディターを通して知識の変更や追加を容易に行なうことができる。

テンポラリー知識ベース：本システムを稼動すると生成され、一時的に入力データや検討結果を保持する。設計条件を変更して検討を行なった場合、この機能によって、各条件に応じた検討結果がテンポラリー知識ベースに作成されるため、比較設計を行なうことも可能となる。

推論エンジン：知識ベースに従って、フレームデータベースの生成やプロダクションルールの処理、ファジィルールの処理等を行なう部分で、本システムでは、エキスパートシステム開発用ツール、AI-DNA（アドイン研究所）を使用している。

3.4 基礎選定の情報処理の内容

本システムにおける情報処理の内容は、表-2に示すように“設計・施工条件の入力”“検討・工法選定・設計”“工事費”“提供情報（出力）”に分類することができる。

3.4.1 設計・施工条件の入力 基礎選定に必要な諸条件を入力する部分である。なお、種々の検討に必要な基本データは、あらかじめデータベースとして組込まれている。設計荷重については、基礎選定作業を行なう時点で、荷重が明確でない場合があることも考慮し、建物の地上・地下階数および構造種別から推定することも可能である。このような設計荷重の入力形態に応じて設計荷重の精度のグレードを表-3に示すように分類し、これを表示することによってユーザーの注意を喚起することとした。また、土質名、N値から地盤定数の推定値を生成することも可能である。

3.4.2 検討・工法選定・設計 基礎の設計に必要な種々の検討、杭工法や地盤改良工法の選定、基礎の設計を行なう部分である。与条件から適用性の高い工法を2~3種類選定し、これらについて以降の検討を行なう。検討の対象とした杭工法、地盤改良工法は表-1に示した。

杭工法の選定は、従来簡単な分類表に基づいて行なうのが一般的であったが、本システムではファジィ理論を利用し、“あいまいさ”を評価に取り入れて選定を行なうこととした。評価項目は、敷地・環境条件（敷地の大きさ、周辺道路の幅員、騒音・振動規制）、杭の施工深さ、杭周辺の地盤条件、地下水条件等で、各評価項目についてそれぞれ既往の施工実績を考慮して各工法の適性を0~1の数値で表すメンバーシップ関数を作成した。一例として、場所打ち杭の施工深さに関するメンバーシップ関数を図-4に示した。図-4中の縦軸のグレード値は、各工法の適性の程度を示しており、グレード0はその工法が採用不可であることを、またグレード1.0は非常に適していることを示している。例えば、杭の施工深さが45mのとき、アースドリルは採用不可、オールケーシングの適性は0.5、リバースは最適と評価される。グレード0の項目が1項目でもある工法は採用不可とし、採用可能な工法について全評価項目のグレードの平均値を求め、平均値が高い順に数工法を選定することとした。

表-3 設計荷重の精度のランク

設計荷重の種類	鉛直荷重		地震時全水平荷重	設計荷重の精度のランク
	長期荷重	地震時変動荷重	概算値	
設計荷重の入力A	精算値	精算値	精算値	A
設計荷重の入力B	精算値	ゼロとして扱う	概算値 (長期荷重に設計震度を乗じた値)	B
設計荷重の入力C	概算値 (建物の地上・地下階数および構造種別から求めた値)	ゼロとして扱う	概算値 (長期荷重に設計震度を乗じた値)	C

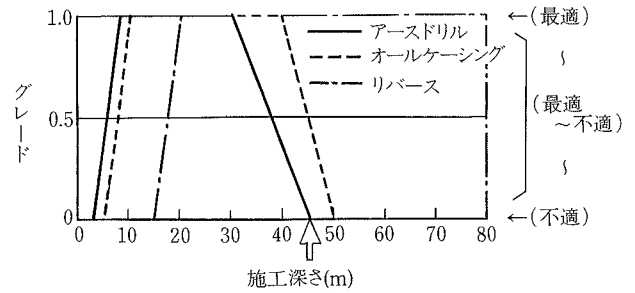


図-4 場所打ち杭の施工深さに関するメンバーシップ関数

表-4 基礎に関する検討ランクの分類

検討項目	検討ランクの分類を行なうケース	検討ランクの分類基準		検討ランク
		判定項目	判定内容	
直接基礎の支持力	基礎底面下に粘性土層がある場合	粘性土層の強度定数	室内土質試験結果を利用する場合	A
			N値からの推定値を利用する場合	B
摩擦杭および支持杭の鉛直支持力	杭周面にある粘性土層の層厚の合計が杭長の1/3以上である場合	粘性土層の強度定数	室内土質試験結果を利用する場合	A
			N値からの推定値を利用する場合	B
杭の水平抵抗の検討	すべてのケース	軸力および曲げモーメントに対する杭の断面設計法	断面応力の検討結果に基づいて断面設計を行なう場合	A
			簡易な構造規定に基づき杭種または配筋を決定する場合	B

直接基礎、地盤改良併用の直接基礎、杭基礎等、各基礎の設計は、表-1に示すような手順で、種々の検討を行ないつつ進める。検討項目は、既述のように、直接基礎の支持力、杭の鉛直支持力・水平抵抗、圧密沈下、即時沈下、液状化、浮上がりである。

直接基礎の支持力に関しては、基礎底面下の地盤が一樣な場合と、上部が砂層、下部が粘性土層の二層系地盤の場合について検討を行なうことができる。杭の鉛直支持力は、打込み杭、埋込み杭、場所打ち杭と各杭工法に応じた支持力算定式によって計算する。杭の水平抵抗に関しては、地盤の成層性や液状化による杭周辺地盤の部分的な抵抗力低下の影響を考慮できるよう、弾性支承梁法を多層地盤に拡張した方法を利用している。圧密沈下に関しては、圧密未了地盤、正規圧密地盤、過圧密地盤

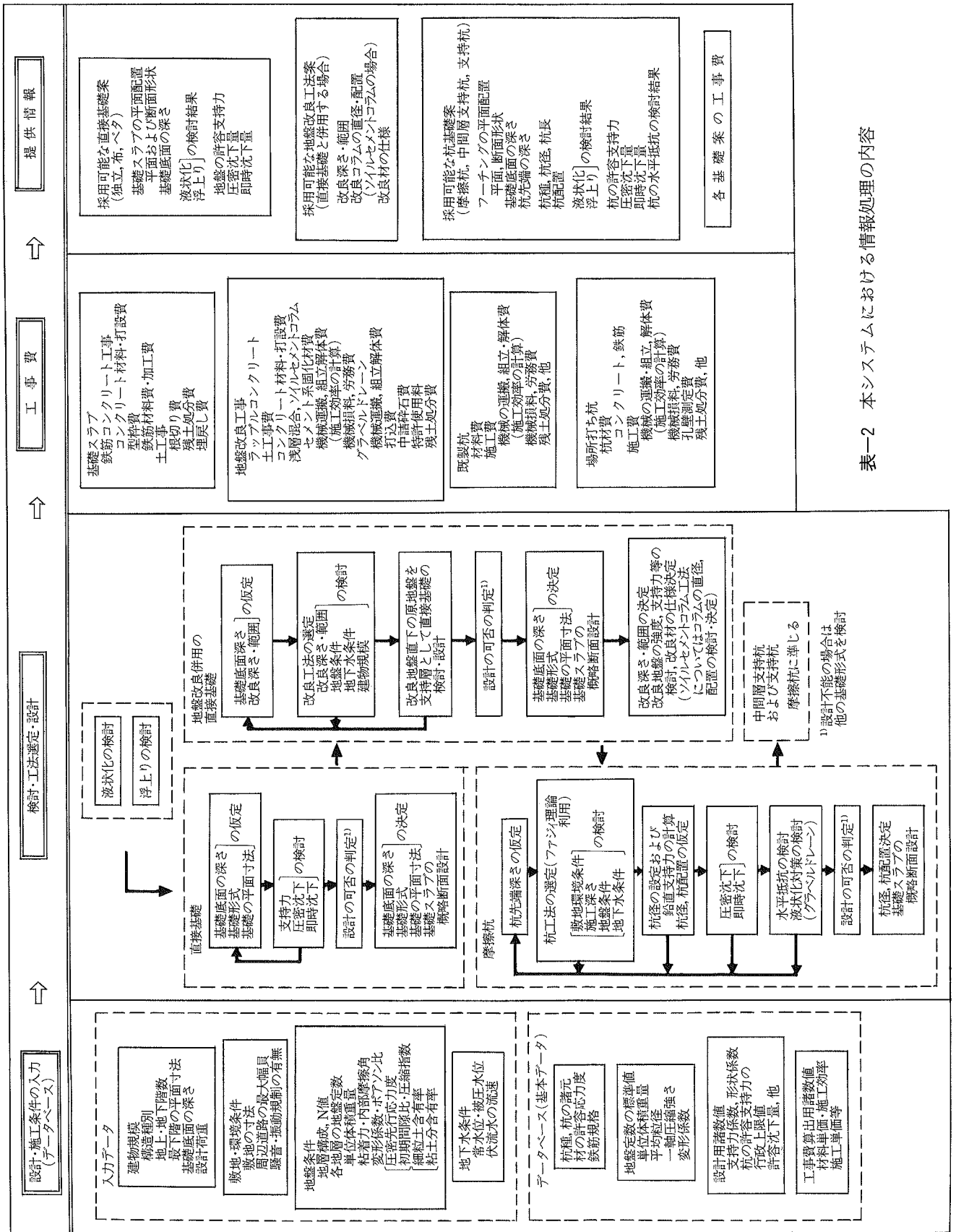


表-2 本システムにおける情報処理の内容

のいずれの地盤にも対応可能である。なお、過圧密領域における圧密沈下量はゼロと仮定している。即時沈下は、地盤を弾性体と仮定し、多層地盤に対応できるよう、Steinbrenner の解を利用している。浮上りの検討は、常時と地震時（液状化時を含む）について行なう。

また、基礎の検討に際して必要となる地盤のモデル化については、地層区分を考慮した層分割および各分割層内の地盤定数の自動設定が可能である。しかしながら、推定値を使用すると基礎検討の精度が低下することから、そのような場合は、検討項目に応じて表-4 に示すように検討のランクを明示し、ユーザーの注意を喚起することとした。基礎に関する検討後、直接基礎については、基礎スラブの配置、平面寸法等を決定し、概略断面設計を行なう。また、杭基礎については、杭配置、杭径、杭長等を決定する。

3.4.3 工事費 基礎の設計・検討結果に基づき、材料費および工事費を算出する。地盤改良工事費および杭工事費の算出に当たっては、地盤改良工法、杭工法、土質条件等に応じて、施工効率を考慮に入れた施工所要日数も計算する。

3.4.4 提供情報 採用可能な基礎案を提示し、その基礎案の設計・検討結果および工事費を表示・印刷する。

4. システムの適用例

本システムによる建物基礎選定の1例を以下に示した。検討の対象とした建物および地盤条件は下記の通りである。なお、直接基礎および地盤改良併用の直接基礎の検討は省略するが、いずれも採用不可との結果が得られている。

建物：地下1階，地上7階，RC造
 平面寸法 27×44 m（長方形）
 最大接地圧 11.7 tf/m²

地盤：図-5 参照

杭先端深さを21.5 mと仮定すると、深さ11~19 mに

径の大きな礫を含む砂礫層があるため、杭工法はオールケーシング工法が最適との結果が得られる。

杭工法の選定後、杭の鉛直支持力の検討に入ると、杭頭から杭先端までの各地層は、システム内で砂質土または粘性土に分類され砂質土については平均N値が、また粘性土層については一軸圧縮強さの平均が求められ、ディスプレイ上に表示される(図-6参照)。この地層構成および地盤定数に基づき、種々の直径を有する杭の鉛直支持力が計算され、一覧表として表示される(表-5参照)。ユーザーがこの一覧表を見て、代表的な各柱位置について適切な直径の杭を選択すると各柱下の所要杭本数が表示される。

杭長、杭径の設定後、杭の水平抵抗の検討に入り、杭周辺地盤は水平抵抗検討用に細分割され、各分割層の水平地盤反力係数が自動設定される。一般には、杭径が異なる杭を混用するので、各杭の分担水平力が計算され、その水平力が作用したときの変形曲線および曲げモーメント分布曲線が表示される(図-7参照)。ここでユーザーは、せん断力、軸力、曲げモーメントに対して対話形式で断面のチェックを行ない、設計不能であれば杭径を再設定して検討を繰返す(図-8参照)。

表-5 杭の許容鉛直支持力

対象位置：隅		長期柱荷重：109.2tf		拡底の場合軸部径：0.000	
		短期柱荷重：			
杭径 (m)	許容支持力		杭径	許容支持力	
	(長期)	(短期)		(長期)	(短期)
1) 0.80	81.6	163.3	8) 1.50	353.9	707.8
2) 0.90	100.2	200.4	9) 1.60	477.5	955.1
3) 1.00	126.2	252.4	10) 1.70	516.9	1033.8
4) 1.10	152.2	304.4	11) 1.80	579.0	1158.0
5) 1.20	178.2	356.4	12) 1.90	618.2	1236.4
6) 1.30	207.9	415.8	13) 2.00	685.0	1370.1
7) 1.40	321.7	643.5			

杭径 (m)	許容支持力 (長期)	許容支持力 (短期)
1) 0.80	81.6	163.3
2) 0.90	100.2	200.4
3) 1.00	126.2	252.4
4) 1.10	152.2	304.4
5) 1.20	178.2	356.4
6) 1.30	207.9	415.8
7) 1.40	321.7	643.5

★拡底杭を選択しますか？(Yes=1/No=0)
 選択：

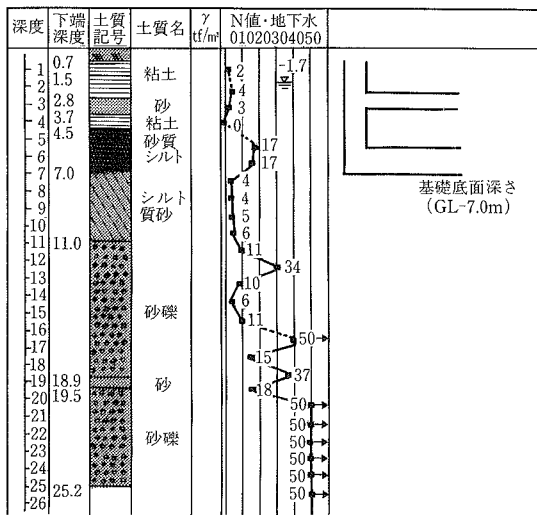


図-5 土質柱状図

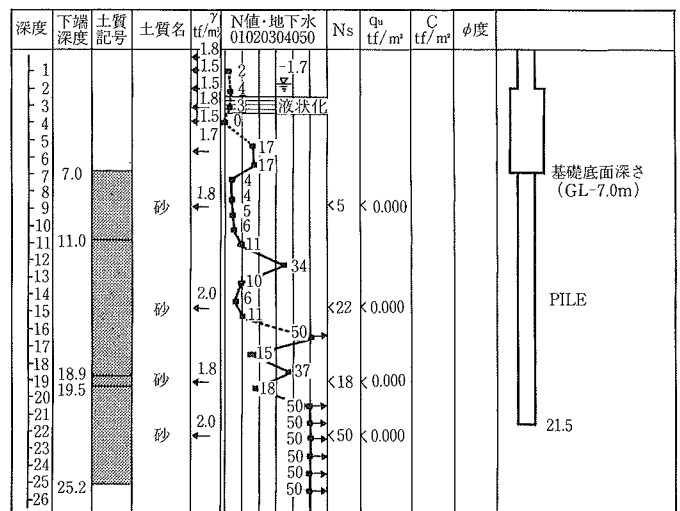


図-6 杭の鉛直支持力検討用モデル化図

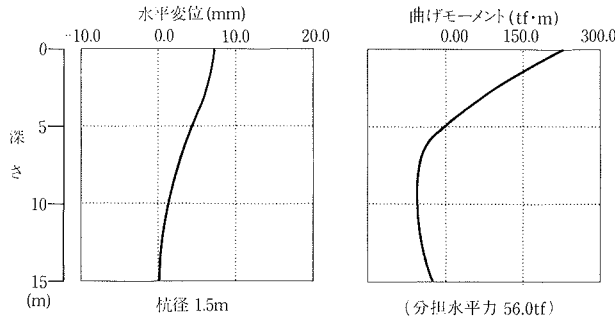


図-7 杭の変形および曲げモーメント分布曲線

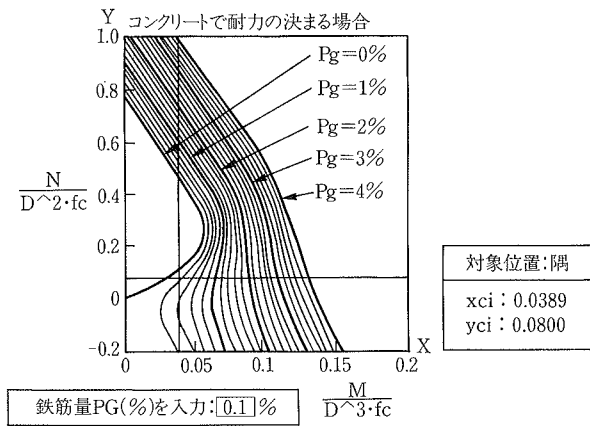


図-8 場所打ち杭の所要鉄筋量検討図

さらに、杭先端深さを荷重面として、杭群全体の即時沈下量、圧密沈下量を計算することも可能であるが、本適用例では杭先端地盤が密実な砂礫層で沈下障害の可能性が低いと判断し、検討を省略している。

以上の検討結果に基づいて、ディスプレイ上に表示された杭配置を図-9に示した。杭径は1.3~1.8mで1柱1本の杭配置となっている。なお、鉛直支持力の検討の際、杭径を1mに設定すると杭配置は図-10に示すように群杭による配置となる。いずれの杭配置も可能であるが、次のステップでコストを計算すると、図-10の杭配置を採用した場合の杭工事費は、図-9の約1.7倍となり、ユーザーはコスト比較によって図-10の杭配置が不経済であると判断できる。

また、上記の適用例とは直接関係ないが、許容支持力が小さい地盤上で独立基礎を採用した場合の基礎配置例を図-11に示した。この例では、建物荷重に対して地盤の許容支持力が小さく、大きな寸法の基礎が必要となったため、独立基礎の多くが相互に重なり合っている。

ユーザーは、この配置図から独立基礎よりむしろベタ基礎を採用すべきであると判断できる。

5. おわりに

以上、開発した基礎選定のエキスパートシステムの概要、およびその適用例について報告した。今後1年程度の試用期間を経て本システムの改善を図り、よりグレー

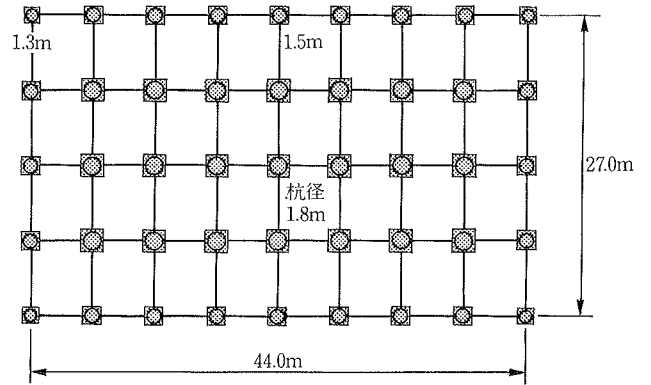


図-9 杭の配置例 (その1 単杭タイプ)

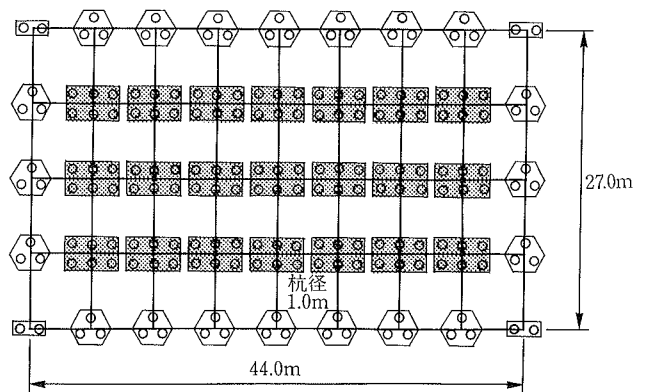


図-10 杭の配置例 (その2 群杭タイプ)

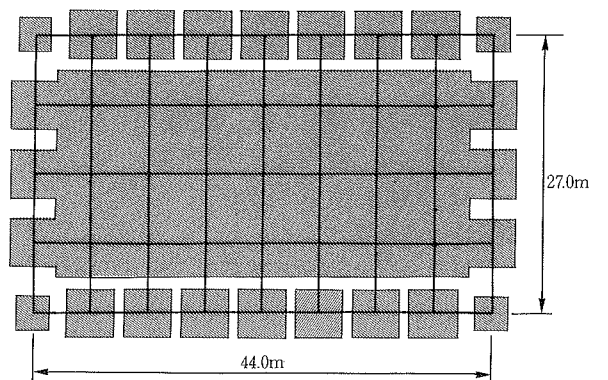


図-11 支持力不足の地盤で独立基礎を採用した場合に表示される基礎配置例

ドの高いシステムを完成させる予定である。

謝辞

本システムは、東京電力(株)技術研究所の委託により開発したものである。関係各位のご指導、御協力に感謝致します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，(1988)
- 2) 住宅都市整備公団建築部：ソイルセメントコラム工法設計・施工指針(案)，(1988)