

1. はじめに

都市域には沖積平野や埋立地などの軟弱地盤上に立地している建物が多く、建物と地盤との動的相互作用の影響が大きい。したがって、建物の耐震性を正確に評価するためには、動的相互作用の影響を適切に評価する必要がある。原子力発電所など重要構造物では動的相互作用に関するさまざまな実験観測・解析が行われ、その結果が耐震設計に反映されてきたが、一般建築物に対しては、解析手法が難解で計算が煩雑なため、ほとんど考慮されてこなかった。

しかし、2000年に導入された限界耐力計算法(限耐法)では、一般建物に対して動的相互作用効果を考慮した新たな検証法が提示された。ここでは、地盤ばねや入力損失を取り入れるための、簡易的な評価方法が初めて提案された。根入れ基礎の場合には、図1のように底面ばねと側面ばねに分けて、それぞれのばねを評価する。計算が複雑な根入れ基礎をより単純な地表面基礎の組み合わせとすることで、容易に地盤ばねの計算をすることができる。

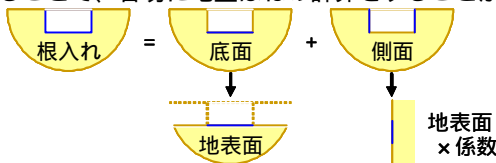


図1 限耐法での地盤ばねを求めるときの考え方

限耐法以外にも、埋め込みSRモデル等のように根入れ基礎を底面部分と側面部分に分離して、それぞれ評価する方法が研究されている。これらの簡易法は、加算が可能であると仮定し、根入れ直接基礎に対するインピーダンスを比較することにより、その妥当性を検証しているが、各部分に分解した状態からの物理的な考察は行われていない。

そこで、本研究では、まず3次元解析によって各部分の地盤ばねと基礎入力動の性質について検討する。また、各部分に分解したばねを再び足し合わせて、根入れ基礎と比較することで、ばねを要素に分解して評価することの物理的解釈を試みる。

また、軟弱地盤上の建物は杭支持されているものが多い。杭基礎建物の評価では群杭効果を考慮する必要がある。しかし、杭本数が数百本になることも多く、そのような場合は解析自由度が膨大になり、解析が困難になる。群杭の評価では解析自由度の縮約が重要である。

本論では、大規模群杭の集約方法を提示する。また、群杭の縮約の有無による解析結果の比較から、その有効性を示す。

2. 解析の手法

本論で用いる解析法は、薄層要素法と有限要素法を、容積法を用いた動的サブストラクチャー法により結合し

た方法であり、基礎と周辺地盤とを分離して、インピーダンスや基礎入力動を算定している。根入れ部分は3次元アイソパラメトリック要素、杭部分はせん断変形を考慮した梁要素でモデル化する。

インピーダンスは振動数依存の複素関数で、実部は地盤剛性に、虚部を振動数で除した値は逸散減衰に対応する。図4以降に示す図中の縦軸は水平(K_{HH})、回転(K_{RR})のインピーダンスをそれぞれ G_b , G_b^3 で除して無次元化した値、横軸は無次元振動数 $a_0 = \omega b / V_s$ である。ここに、 G は地盤のせん断剛性、 b は基礎半幅とする。

3. 根入れを有する基礎の要素分解

以下、半無限一様地盤に埋め込まれた正方形基礎を対象に検討していく。図2に解析モデルを、表1に解析パラメータを示す。なお、梗概ではインピーダンスに関して説明する。

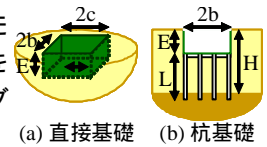


図2 解析モデル

表1 解析パラメータ

地盤	杭支持基礎	根入れ部分	杭部分
$V_{s1}=250\text{m/s}$	$V_{s2}=400\text{m/s}$	$2b=15\text{m}$	$E_p=2.1 \times 10^7\text{kN/m}^2$
$\rho_1=1.8\text{t/m}^3$	$\rho_2=1.9\text{t/m}^3$	$2c=15\text{m}$	本数=4×4
$\nu_1=0.45$	$\nu_2=0.45$	$E=7.5\text{m}$	杭径=1m
$h_1=0.03$	$h_2=0.03$		間隔=5m
			杭長=15m
(杭・表層厚さ)H=20.5m			

(1) 根入れ基礎の加振方向に対する側面の影響

ここでは、側面の影響を比較するため、図3(a)~(c)に示す根入れ基礎から側面を除いた解析モデルを用いて、インピーダンスと基礎入力動について図3(d)に示す根入れ基礎と比較する。4モデルとも、底面に剛体がある状態とする。

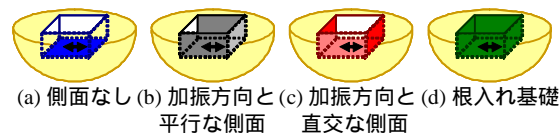


図3 根入れ基礎における側面の影響

結果を図4に示す。図4(A),(B)共に実部の静的な場合では、「根入れ基礎(d)」と「加振方向と直交な側面(c)」の差が殆どない。また、(A)の水平成分では、(d)と(c)が高振動数になるほど実部が小さくなる傾向が見られる。

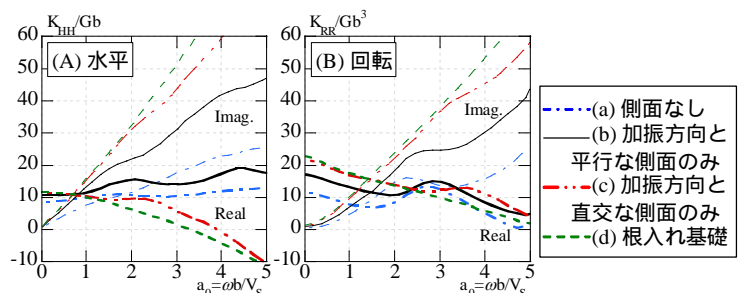


図4 根入れ基礎の側面部分の影響

前者はばね効果の、後者は付加質量効果の特徴を示しており、いずれも加振方向に対して直交な側面の影響が大きいことが確認される。これは、加振と直交な側面に生じる圧縮引張の抵抗の方が、加振と平行な側面に生じるせん断抵抗より強く影響するためである。虚部は、(c),(d)のように側面の枚数が多く、加振方向と直交する側面のついているほうが大きくなっている。

但し、(d)以外は基礎幅に相当する波長での振動数で共振していることが分かる。これは、側面を外すと拘束効果がなくなるためである。

(2) 底面部分の比較

ここでは、底面の特性を見るために図5に示す3モデルのインピーダンスと基礎入力動を比較する。(a)と(b)から基礎底面より上部の地盤の影響、(b)と(c)から排土地盤の影響を比較する。

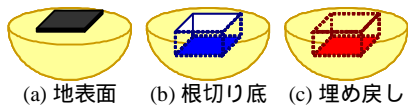


図5 底面部分の比較

図8に示すように、インピーダンスは、実部虚部共にいずれの成分でも(a)地表面基礎よりも(b)根切り底の基礎の方が大きくなっている。これより、基礎底面より上部の地盤の影響が認められる。

埋め戻しの有無による(b)と(c)の差は、実部の静的な場合ではほとんど認められないが、動的性質としては、慣性抵抗の違いや埋め戻し部分の共振の影響が見られる。虚部も、埋め戻しのある方が大きな値となっている。

(3) 側面部分の比較

側面の特性を見るため、図6に示す3モデルのインピーダンスと基礎入力動を比較する。

各モデルについて、根切り幅(図6中の2cの部分)を変えた場合の比較を行った。梗概では(a)根切りの片面に剛体を付ける場合と、(b)根切りの相対する二面に剛体を付け、二枚の剛体の両方に加振する場合について説明する。なお、加振方向は剛体と直交とする。

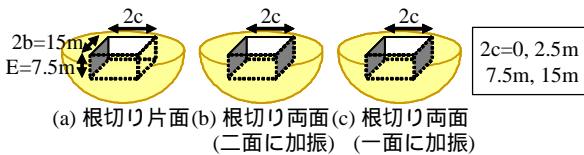


図6 側面部分の比較

・根切り片面に剛体がある場合

図9にインピーダンスを示す。実部はいずれの線も重なっていることから、根切り幅による差が小さいことが分かる。虚部は剛体の両側に地盤が付く場合(2c=0, (a1))の方が、片側にのみ地盤が付く場合(2c=15m, (a4))に比べ減衰が大きくなる。根切り幅が狭い場合(2c=2.5m, (a2))は、 $a_0=2.5$ 程度までは剛体の両側に地盤がある場合と、それより高振動数域では根切り幅が広い場合と似た傾向になる。これは、低振動数の波動は、根切りの対する側に影響を及ぼすが、高振動数の波動は直進性により一方

にだけ逸散するためと考えられる。

・根切り両面に剛体がある場合(2面共に加振)

図10にインピーダンスを示す。剛体間の距離が大きくなるほど、剛体間の地盤の影響により実部も虚部も大きくなる。また、底面基礎の押さえの効果が期待できないため、剛体間の距離による共振がある。

(4) 杭基礎における底面部分の比較

根入れを有する杭基礎も直接基礎の場合と同様に、底面部分と側面部分に分けられるものとする。側面部分は直接基礎の場合と同じものを用いるものとし、ここでは杭基礎底面部分の比較をする。杭先端は基礎に支持されているものとする。

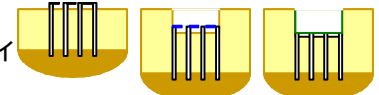


図7 杭基礎底面の比較

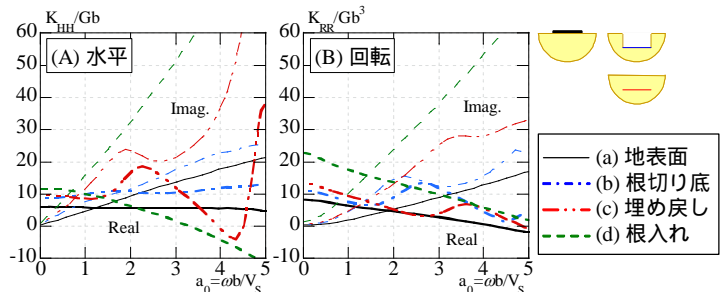


図8 底面部分の比較

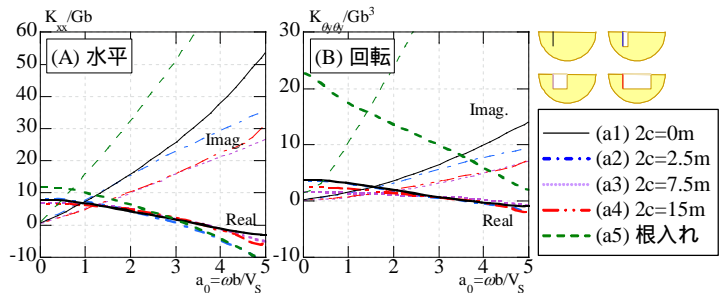


図9 側面部分の比較(根切り一面に剛体)

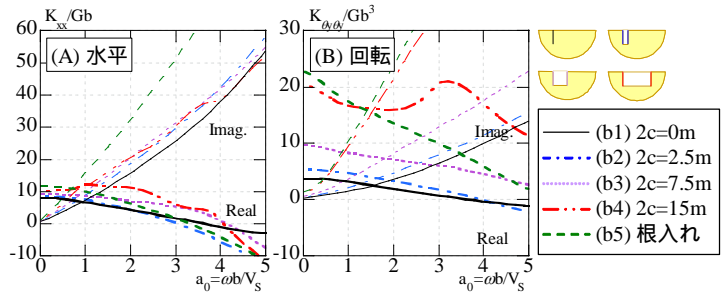


図10 側面部分の比較(根切り二面に剛体)

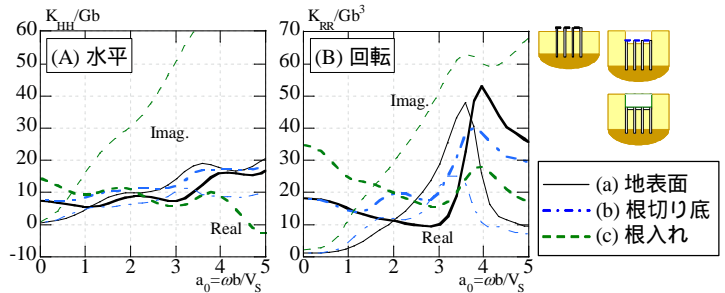


図11 杭基礎の底面部分の比較

はほとんど見られない。これは杭の効果により、相対的に上部の地盤の影響が小さくなるためである。

4. インピーダンスの足し合わせ

3章の分析結果を基に、一枚ずつ分解して計算した要素の単純な足し合わせについて検討する。即ち、各振動数において「底面要素」のインピーダンスと「側面要素」のインピーダンスを実部同士、虚部同士でそれぞれ加算し、これを根入れ基礎のもの(正解値)と比較する。

図15(a)は、その結果である。実部は、足した値の方が正解値より大きな値になる場合がある。これは図12に示すように「底面部分」では底面より上部の地盤の影響、「側面部分」では側面より下部の地盤の影響を含めて考えており、同じ部分の影響を過剰に加算してしまうことが原因である。虚部は加算したものと正解値との差は小さい。この理由は、虚部の影響は面積に比例しているためである。

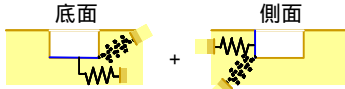


図12 過剰に加算した場合

この結果を改善するために、「底面部分」では底面より上部の地盤の影響を複数回加算しないように底面を地表面基礎のインピーダンスに置き換える。「側面部分」でも平面的に同じ部分の影響を何度も足さないように工夫した結果が図15(c)である。しかし、側面部分より下部の地盤の影響は除けていないため、正解値よりも大きな値となっている。虚部は同様の処理をしても結果はあまり変化していない。

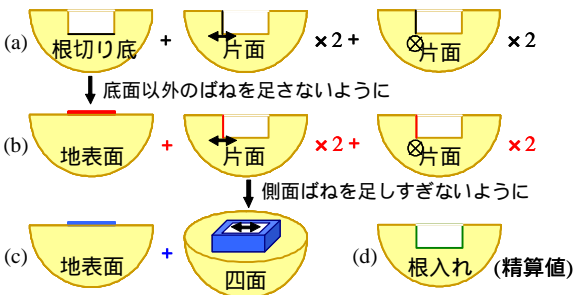


図13 各要素の足し合わせの方法

実設計における根入れ基礎の簡易的な計算法として、埋め込みSRモデルと限耐法について述べる。埋め込みSRモデルは原子力発電所の設計などで用いられており、図14(a)のように底面地盤ばねを地表面基礎の地盤ばねで、側面地盤ばねをNovakばねで表現する。Novakばねは、単位厚さの均質層に埋め込まれた無質量の剛円盤が定常振動するときの抵抗係数である。

限耐法は図14(b)のように底面ばねを地表面基礎の地盤ばねとし、側面ばねを地表面基礎のばねを面積や地盤剛性などの各種補正係数をかけた値で組み合わせる根入れ基礎の地盤ばねを計算する。

埋め込みSRモデルの手法で、足し合わせた結果を図16(a)に示す。側面より下部の地盤を加算し

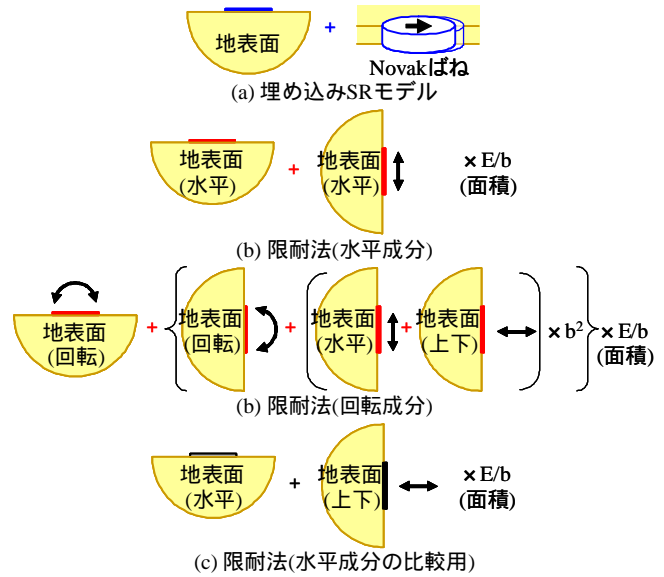


図14 限耐法と埋め込みSRモデルの手法

すぎないので、正解値に対して比較的よく対応している。

また、限耐法のように、足し合わせた結果を図16の二点鎖線に示す。限耐法では振動数依存性を考慮しないため、静的値のみの計算になるが、ここでは、動的な場合についても静的な場合と同様の足し合わせをしている。水平成分について、静的な場合は対応がよいが、動的な部分の慣性抵抗や減衰が考慮されない。側面では主に圧縮引張の抵抗を受けるため、せん断抵抗である水平成分の地盤ばねを用いるのは適当でない。実部の高振動数域や虚部では、圧縮引張の抵抗を表現するために図14(c)のようにすると正解値との対応が改善する。

なお、杭基礎のばねの加算については、根切り底の杭基礎と地表面杭基礎との差はないため、側面要素を足しすぎないように工夫していく必要がある。杭基礎でも、埋め込みSRモデルや限耐法の手法を利用すると正解値との対応がよくなることを確認している。

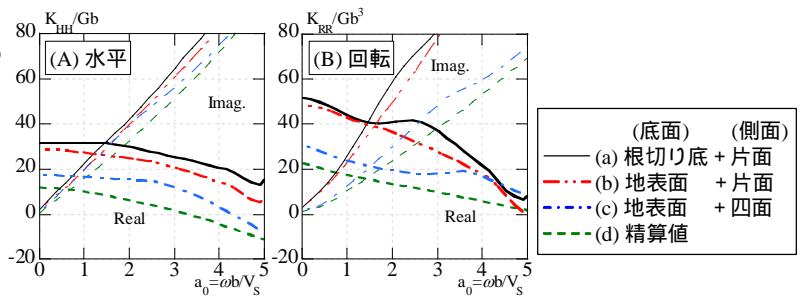


図15 各要素の足し合わせ

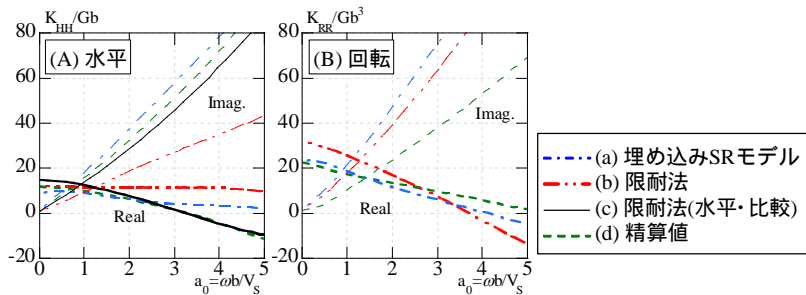


図16 各要素の足し合わせ・限耐法と埋め込みSRモデル

5. 大規模群杭の評価

(1) 評価手法

ここでは、上下方向の離散化は保持したまま、水平方向に近接する複数杭を1本杭に集約して、小規模な集約群杭とすることで自由度を減少させる方法を提示する。

群杭をブロック化し、各ブロックで複数の杭を1本の集約杭に置換する。集約杭の剛性については、集約前の杭の水平剛性と上下剛性を保存するように集約する。そのため、集約杭の断面パラメータ(断面積、断面二次モーメントなど)は群杭の断面パラメータの単純和とする。集約杭の座標位置は集約する杭断面の図心位置とする。

杭周面の地盤ばねについては、グリーン関数としてブロック内の同一平面上の杭位置で同時加振した場合の受振平面上でのグリーン関数の重み付き平均値を用いることにする。すなわち、図17に示すように、(b)のS節面に作用する加振力によるR節面の変位は、群杭(a)のS節面の多点加振によるR節面の多点の変位を重み付き平均した値とする。重み付けには加振面及び受振面の杭の断面積を用いる。

S節面の多点に作用する加振力の総和が1として、各加振力によるR面の各杭位置の変位を重み付き平均した、集約杭の薄層解 U_{RS} は、杭断面が同じ場合は次式のようになる。

$$U_{RS} = \frac{\sum_{i=1}^{N_R} \sum_{j=1}^{N_S} u_{RSij}}{N_R N_S}$$

ここに、 N_S, N_R はブロック内の杭の本数、 u_{RSij} は薄層要素法による加振解である。

なお、図17は、同一のブロック内での加振解の誘導の例を示しているが、異なるブロック間での多点加振解も同じ手続きで求めることができる。

(2) 有効性の検討

以上に示し簡易法の妥当性を検証するため、群杭の集約の有無による解析結果の比較をする。図18(a)に示すような等間隔に正方形配置した群杭を想定する。解析パラメータを表2に示す。表層地盤の厚さは18mとする。杭の集約方法が解析誤差に与える影響を考察するために、図18(b)~(d)に示す3ケースを比較する。

図19に、インピーダンスと基礎入力動を示す。何れも水平成分については精算解と良く一致しており、分割ブロック数の影響は小さい。これに対して回転成分は、2×2本に集約したCASE3の場合には、精算法との差が大きくなる。集約範囲と基礎規模の比が大きいと、回転剛性を無視した影響が大きくなり、誤差が発生するためである。これに対して4分割(CASE1)にすると誤差は大きく減少し、さらに、周辺部のみ細かく分割した不等間隔の場合(CASE2)には、誤差がさらに小さくなっている。なお、基礎入力動についても水平成分はよい対応を示したが、回転成分は集約方法によっては誤差が大きくなるという結果を得ている。

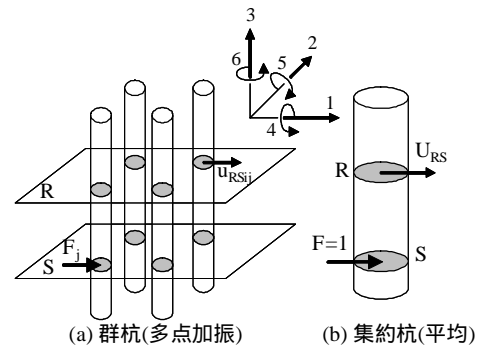
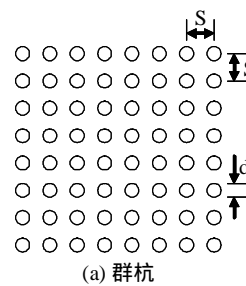


図17 多点加振解



表層地盤		支持基盤	
$V_{S1}=150\text{m/s}$	$V_{S2}=300\text{m/s}$		
$\rho_1=1.5\text{t/m}^3$	$\rho_2=1.8\text{t/m}^3$		
$\nu_1=0.45$	$\nu_2=0.45$		
$h_1=0.03$	$h_2=0.03$		
杭			
$E_p=2.1 \times 10^7\text{kN/m}^2$	$\nu_p=1/6$	本数=8×8	杭径d=1.2m
$\rho_p=2.4\text{t/m}^3$	$h_p=0.03$	間隔S=2.5d	杭長L=20m

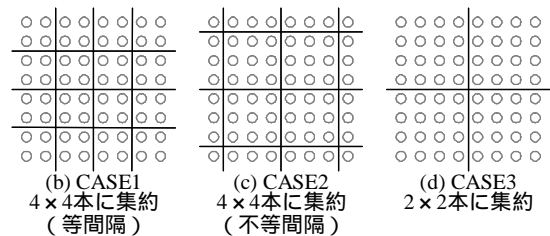


図18 大規模な群杭

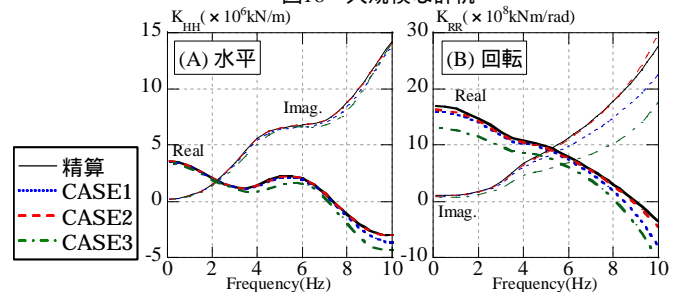


図19 集約方法がインピーダンスに与える影響

6. まとめ

側面と底面の各部の地盤ばねと基礎入力動について3次元解析を行って検討し、その特性を把握した。その結果、根入れ基礎は加振方向と直交の面の影響が大きいこと、要素に分けると底面位置より上部の地盤など他の部分の影響も受けることが確認された。

分解した要素を足し合わせることで、その妥当性を検証した。要素に分解した地盤ばねをそのまま足し合わせると解が大きくなるため、工夫が必要であり、現在利用されている方法は結果として正解値と対応がよいことが分かった。

また、大規模群杭の集約方法を説明し、集約による解と精算解との比較をすることでその有効性を示した。この方法を用いることで、実在する杭本数1500本程度の大規模群杭建物を集約杭本数100本程度にし、解析することができた。