

石炭火力発電所本館建屋基礎の検討例（その2）

Design of Foundation Slab of Main Building

齊藤 正忠*
Masatada Saitō

前田 詔一**
Shōichi Maeda

要 約

本文は、東北電力㈱と当社で行った東北電力㈱能代火力発電所第一号機土木工事の共同研究の内、本館建屋基礎スラブの設計概要を示すものである。

当該基礎スラブの設計では、地盤をウィンクラーバネにモデル化する従来の解析手法に加えて、バネ相互の連成を考慮した等方性地盤上の平板解析手法を採用（当該基礎のような大規模な構造物に用いた例はない）し、合理的な設計を目指した。そのため、当設計部において新たに解析プログラムを開発した。

今回採用した基礎スラブの設計方針に従った設計により、従来の設計によるものよりも安全性をより確実に保証できる設計ができたと言える。

目 次

- § 1. まえがき
- § 2. 弾性理論による接地圧
- § 3. Y.K.Cheung&O.C.Zienkiewiczによる
等方性弾性地盤上の平板解析
- § 4. 構造解析モデル
- § 5. 設計方針
- § 6. あとがき

§ 1. まえがき

載荷荷重によって基礎スラブに生じる断面力を算出するには、接地圧（地盤反力）が既知でなければならない。しかし、この接地圧は、土質、荷重の載荷状態、基礎スラブの剛性および根入れ深さ等によって左右されることが知られているものの、真の接地圧分布を事前に知ることはほとんど不可能である。

従来は地盤をウィンクラーバネでモデル化し、接地圧を求めていた。しかし、このウィンクラーバネは地盤の変形を表現するには不適當であると指摘されている。にもかかわらず、従来から採用されてきたのは、設計にお

ける安全率でこの不合理を十分カバーできるものと考えられてきたからと思われる。

今回の本館基礎においては、この点をできる限り明確にし、設計において適切な考え方を提示するべく種々の検討を行った。また、本館基礎は、Fig.1に示すように、ラフト基礎と呼ばれる中空スラブ基礎であるが、この中空スラブをどのような構造モデルにモデル化するかも大きな問題であった。

以下に、これらの問題点に対する考え方を中心に本館基礎スラブの設計概要を報告する。

§ 2. 弾性理論による接地圧

弾性理論による接地圧分布は、Boussinesq, Borowickaらにより与えられている。

Boussinesqは剛体基礎に関して、理論的に接地圧を与えている。1例として帯状基礎に等分布荷重が作用する場合の接地圧分布をFig.2に示す。これによると基礎中心の接地圧は $0.637q$ (q :荷重強度)となり、縁端では無限大となる。

*土木設計部副部長
**土木設計部設計課係長

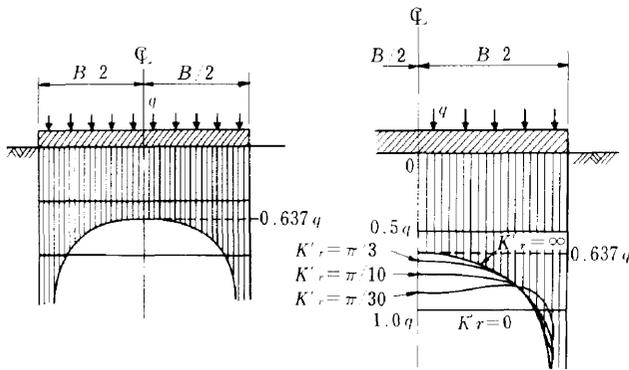


Fig.2 带状剛体基礎の接地圧

Fig.3 種々の相対剛性を持つ带状基礎の接地圧

Borowickaは等分布荷重を受ける円形基礎および带状基礎について、基礎スラブと地盤の相対剛性 K'_r をパラメータとして、接地圧分布を理論的に誘導している (Fig.3参照)。この相対剛性 K'_r は式(1)で与えられるものである。

$$K'_r = \frac{1}{6} \cdot \frac{1 - \nu_s^2}{1 - \nu_p^2} \cdot \frac{E_p}{E_s} \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^3 \quad (1)$$

ここに、 ν_s, ν_p :土およびスラブのポアソン比
 E_s, E_p :土およびスラブの弾性係数
 a :带状基礎の場合は $B/2$,円形基礎の場合は R
 h :スラブの厚さ

すなわち、スラブの剛性が非常に小さいかあるいは地盤の剛性が非常に大きい場合 (相対剛性が0の場合)の接地圧は一様分布となり、逆にスラブの剛性が非常に大きいか地盤の剛性が非常に小さい場合 (相対剛性が無限大の場合)の接地圧は中央で小さく、縁端で無限大となる。

しかし、現実の地盤の支持力は有限であるから、無限に大きい接地圧は生じ得ない。Ohdeはこのことを考慮して、带状基礎に関して実際的な接地圧分布を提案している (Fig.4参照)。

また、Schultzeは、等分布荷重を受ける長方形基礎スラブに関して、相対剛性(Borowickaのものとは若干異

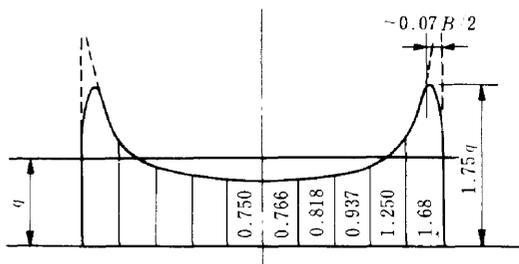


Fig.4 Ohdeの提案する带状基礎の接地圧

なる)をパラメータとして基礎スラブに生じる最大曲げモーメントを与えている (このような特殊な条件下での解は得られるものの、一般的な条件下での解は複雑になり過ぎて現在のところFEM等による数値計算に頼らざるを得ない)。

いずれにしても、弾性理論によると、載荷重が等分布を場合でも接地圧が一様とはならず、基礎スラブには曲げモーメントが生じることになる。

§3. Y.K.Cheung & O.C.Zienkiewiczによる等方性弾性地盤上の平板解析

基礎地盤上に置かれた平板の曲げ解析は、従来、地盤をウインクラーバネにモデル化 (ウインクラー地盤)していた。このウインクラー地盤は、地盤を一連の独立したバネに置換したもので、接地圧はその点の変位に比例し、式(2)で表される。

$$P = k \cdot w \quad (2)$$

ここで、 P :接地圧
 k :バネ定数
 w :変位

式(2)をFig.5に示すように、基礎スラブを $a \times b$ の有限要素に分割した場合に適用すると、式(3)となる。

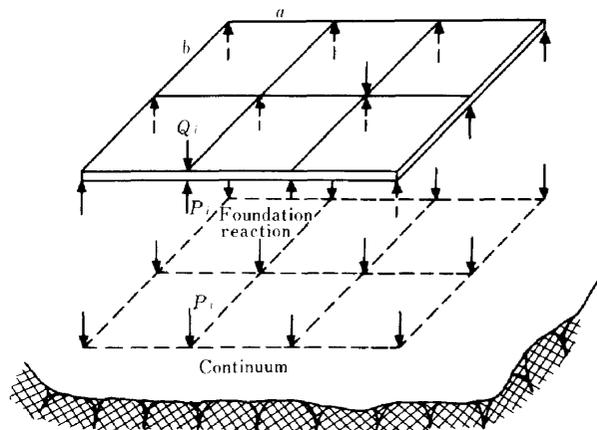


Fig.5 基礎スラブと地盤

$$P_i = a_i \cdot a \cdot b \cdot k \cdot w_i \quad (3)$$

ここで、 P_i :点*i*における接地圧
 a_i :係数で、隅角部 = 1/4
 側辺部 = 1/2
 内部 = 1
 w_i :点*i*の変位

式(3)をマトリックスの形で表したものが式(4)である。

$$\{P\} = a \cdot b \cdot k \cdot \{a\} \{w\} \quad (4)$$

このウィンクラーバネは互いに独立であるから、 $\{\alpha\}$ は非対角項が0となる対角マトリックスとなり、解析上の取り扱いが容易である。しかし、ウィンクラーバネはバネ相互の連成を考慮していないため、現実の基礎地盤の変形と比較して明らかに正しくない。

これに対して、Y.K.Cheung & O.C.Zienkiewiczは、半無限の等方性弾性地盤上に置かれた平板に対して、バネ相互の連成を考慮した解析手法を提案している。

等方性弾性地盤上で、 i 点に荷重が作用した場合の任意点 n での変位は、Boussinesqの式により、式(5)で表される。

$$w_{ni} = \frac{P_i(1-\nu_s^2)}{\pi E_s r_n} \quad (5)$$

ここで、 P_i : i 点に作用する荷重

w_{ni} : P_i による n 点での変位

ν_s : 地盤のポアソン比

E_s : 地盤の弾性係数

r_n : i 点と n 点との距離

したがって、 $a \times b$ の長方形に一樣荷重を加えた時の長方形の中心での変位は、式(5)を長方形の範囲で積分し、式(6)で与えられる (Fig.6参照)。

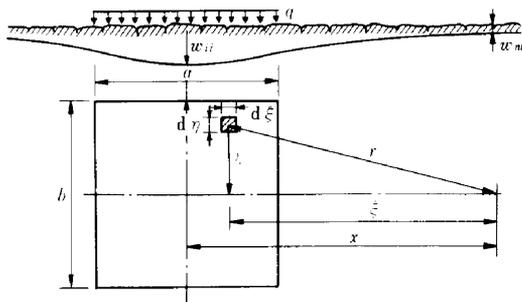


Fig.6 等方性弾性地盤に長方形の等分布荷重が作用した場合の地盤の鉛直変位

$$w_{ii} = 2 \int_{\xi=0}^{\xi=\frac{a}{2}} 2 \int_{\eta=0}^{\eta=\frac{b}{2}} \frac{P_i}{a b} \cdot \frac{1-\nu_s^2}{\pi E_s} \cdot \frac{d\xi \cdot d\eta}{\sqrt{(\xi^2 + \eta^2)}} = \frac{P_i(1-\nu_s^2)}{a \pi E_s} f_{ii} \quad (6)$$

荷重領域外の点に関しても、同様の積分を行うことで変位が求まる。しかし、荷重領域外に関しては、式(5)における P_i を長方形要素に作用している荷重の合計とし、 r_n を要素の中心間距離とすることで、積分を行わなくとも十分良い精度で変位を算出できる。

式(5)及び式(6)をまとめて、マトリックスの形で表すと、式(7)のようになる。

$$\{w\} = \frac{1-\nu_s^2}{a \pi E_s} \{f\} \{P\} \quad (7)$$

式(7)から式(8)が得られる。

$$\{P\} = \frac{a \pi E_s}{1-\nu_s^2} [K_p] \{w\} \quad (8)$$

ここに、 $[K_p] = \{f\}^{-1}$

有限要素法によって問題を解く場合の基本式は式(9)である。これを解くには、作用荷重と変位との関係式を与える剛性マトリックスが必要となる。

$$\{F\} = [K] \{U\} \quad (9)$$

ここに、 $\{F\}$: 荷重ベクトル

$[K]$: 剛性マトリックス

$\{U\}$: 変位ベクトル

平板に作用する荷重は、載荷重 Q から接地圧 P を引いた値である。したがって、式(9)は、剛性マトリックスを変形して、式(10)のように表される。

$$\{Q\} - \{P\} = \frac{D}{15 \cdot a b} [K] \{w\} \quad (10)$$

ここで、 $D = \frac{E_p t^3}{12(1-\nu_p^2)}$: 平板の剛性率

E_p : 平板の弾性係数

ν_p : 平板のポアソン比

t : 平板の板厚

以上のことから、等方性弾性地盤上に置かれた平板の作用荷重と変位との関係式は、式(10)に式(8)を代入することにより、式(11)で表される。

$$\{Q\} = \frac{D}{15 \cdot a b} ([K] + \frac{15 \cdot a b}{D} \cdot \frac{a \pi E_s}{1-\nu_s^2} [K_p]) \{w\} \quad (11)$$

式(11)から剛性マトリックスが計算され、さらに、変位ベクトル $\{w\}$ が計算される。変位が計算されると、式(8)から接地圧が計算され、平板に生じる曲げモーメントは、簡単なマトリックス計算により計算できる。

参考までに、ウィンクラー地盤の場合の載荷重と変位との関係式を示すと、式(10)に式(4)を代入することにより、式(12)のようになる。

$$\{Q\} = \frac{D}{15 \cdot a b} ([K] + \frac{15 \cdot a b}{D} \cdot a \cdot b \cdot k(\alpha)) \cdot \{w\} \quad (12)$$

本解析理論による計算結果を以下に例示する。

平板に等分布荷重が作用した場合の計算結果は Fig.7, 8 のようである。Fig.7の縦軸は等分布荷重 q に対する接地圧 p の割合を表し、横軸は板と地盤との相対剛性 $\gamma = 180\pi (E_s/E_p) (a/t)^3$ の対数である。Fig.8の縦軸は

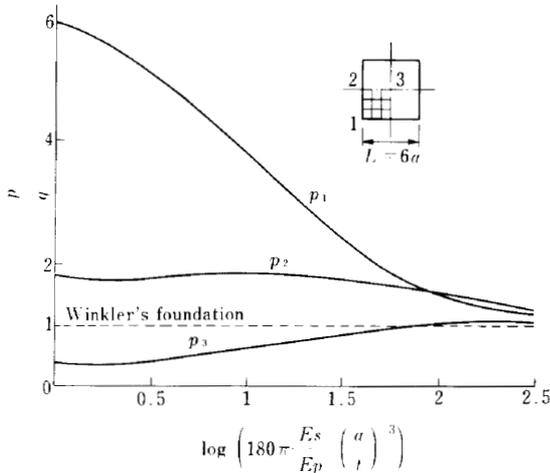


Fig.7 等分布荷重 q を受ける板の接地圧 (p_i : i 点における接地圧)

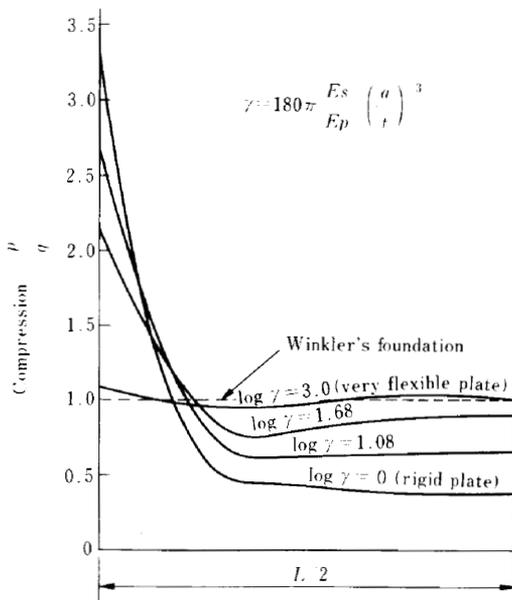


Fig.8 等分布荷重 q を受ける板の中心線上の接地圧

Fig.7と同じで、横軸は端部から中央までの距離である。

この2つの図から明らかなように、ウィンクラー地盤では等分布荷重を作用させた場合、平板は全ての点で一様に沈下し、板に曲げモーメントは発生しない。これに対して、等方性弾性地盤では、接地圧は端部・隅角部で大きくなり、相対剛性が大きくなるほど、つまり板の剛性が大きくなるほどその傾向は大きくなっており、より実際に適していると言える。

次に、集中荷重が作用した場合の計算結果を示すと、Fig.9~11のようになる。Fig.9,10は等方性弾性地盤における計算結果で、Fig.11はウィンクラー地盤の計算結果である。Fig.10,11からわかるように、板の剛性が非常に小さい範囲においては、両者は同様の傾向を示すが、板の剛性が大きくなると、ウィンクラー地盤では端

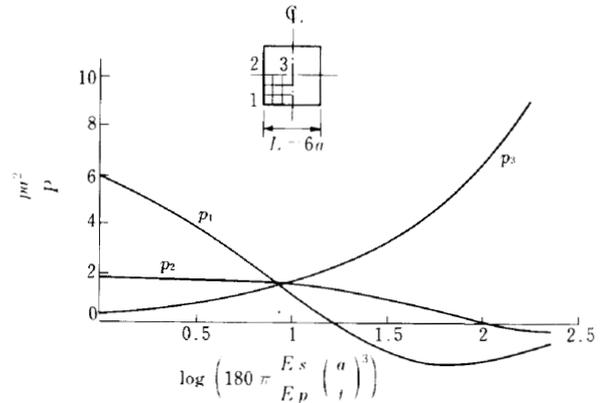


Fig.9 中央に集中荷重 P を受ける板の接地圧

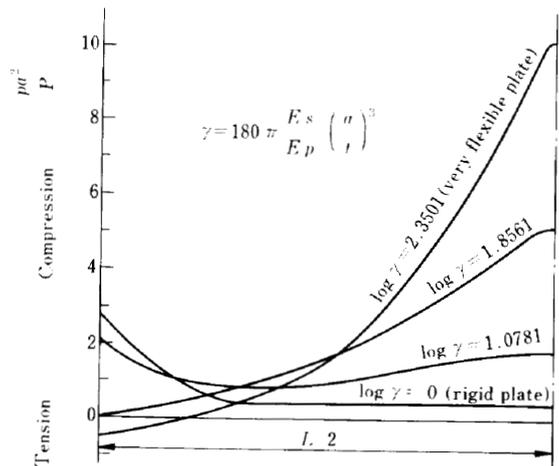


Fig.10 中央に集中荷重 P を受ける板の中心線上の接地圧(等方性弾性地盤)

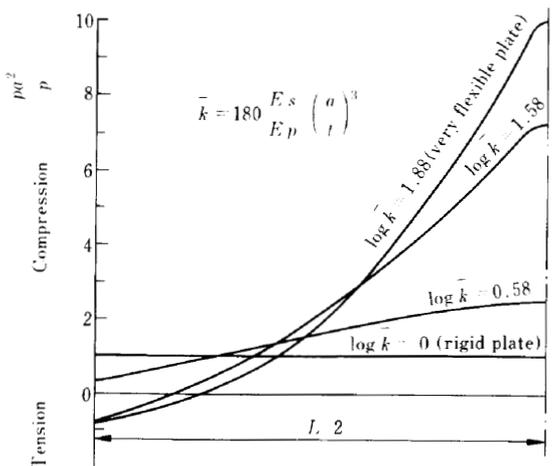


Fig.11 中央に集中荷重 P を受ける板の中心線上の接地圧(Winkler地盤)

部で接地圧が大きくなるという特徴が表現できなくなってしまう。

§ 4. 構造解析モデル

基礎スラブの構造解析モデルには次のようなものがある。

- ① 剛体モデル
- ② バネ支持された格子桁モデル
- ③ バネ支持された平板モデル
- ④ 等方性弾性地盤上の平板モデル

これらの構造解析モデルの特徴を以下に示す。

① 剛体モデル

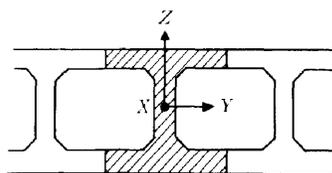
フーチングの設計において一般に採用されるモデルである。これは、接地圧分布を直線と仮定するもので、この取扱いは、通常、安全側の設計となると言われている。しかし、今回のように基礎スラブがL形で、その面積も大きく、さらに荷重の載荷状態が不均一である場合には、局部的な断面力の評価が難しく、全体的に過大な断面力を与えることが考えられる。

② バネ支持された格子桁モデル

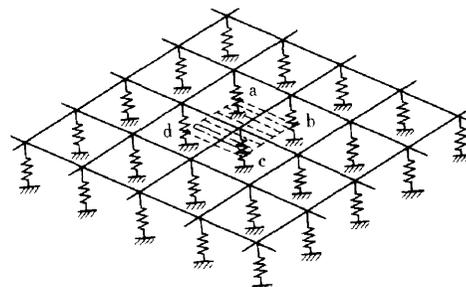
今回のような中空スラブ基礎の場合、②のバネ支持された格子桁モデルにより解析されることが多く、従来の本館建屋基礎の設計事例でも、このモデルが採用されている。

このモデルはFig.12に示すように隔壁をはりと考え、格子桁に置き換えるものである。そして、バネについては、計算を容易にするために連続バネとは考えず、格点のみをバネ支持し、その大きさについては地盤の鉛直地盤反力係数に各格点の支持面積abcdを乗じて決定する。このバネは、§3に示したウィンクラーバネであり、先にも述べたように、現実の基礎地盤の変形を表すことが難しい。

また、中空スラブを格子桁に分割するため、解析結果として大きなねじりモーメントが計算される。しかし、実際には、隣接するはりには互いに頂版及び底版が結合されているため、そのねじりモーメントは主に直交方向の頂版及び底版に作用する軸方向力として評価されるべきものである。



(1)格子桁モデル化



(2)格子桁バネ支持モデル

Fig.12 格子桁モデル

③ バネ支持された平板モデル

平板を有限要素法により解析する際に、その節点に②のバネ支持された格子桁モデルと同じウィンクラーバネを考えるものである。したがって、ウィンクラーバネのもつ不合理性を有している。

また、当該スラブのような中空スラブに対する適用にあたっては、その取扱いに問題が生じる。一つには、中空スラブを中実スラブに置換する際のスラブ厚の換算方法である。接地圧分布は基礎スラブの曲げ剛性に関係することから、曲げ剛性がほぼ等しくなるようなスラブ厚を有する中実スラブに置換すればよいと思われるが、その妥当性を明らかにすることは難しい。また、平板解析の場合には曲げモーメントは求められるものの、せん断力が求まらないことも中空スラブを中実スラブに置換することによる問題の一つである。

④ 等方性弾性地盤上の平板モデル

§3に詳述したように、この解析モデルのバネは全てが従属であり、弾性地盤をうまく表すことができる。このため、この解析モデルによると、Fig.2に示したような接地圧分布を求めることができる。すなわち、③のバネ支持された平板モデルでは、等分布荷重を載荷しても曲げモーメントが生じないのに対し、本解析モデルによると、平板と地盤の相対剛性を考慮した曲げモーメントを計算できるのである。

しかし、この解析モデルでは、弾性地盤を考えているために、接地圧分布は周辺部で非現実的なほど大きくなり、曲げモーメントは過大評価されることになる。

また、中空スラブへの適用については、③と同じである。

§ 5. 設計方針

基礎スラブの設計においては、どのような接地圧を考えるか、そして基礎スラブをどのような構造にモデル化して解析するかが要点である。

本設計においては、当該基礎の重要性を考慮して、次のような設計方針に従うものとした。以下、帯状基礎で等分布荷重が載荷される場合についてその考え方を説明する。

(1) 接地圧

設計に際し、実際の接地圧を確定できないので、Fig.13に示すように2つの接地圧を考えて設計する。すなわち、一様な接地圧と、弾性理論による接地圧分布のように、中央部で小さく、縁端部で大きい分布の接地圧の場合の両方で設計し、両者の結果の包絡値を採用する。これは、実際の接地圧がこの中間にあると推測され、構造物の重要性からして、より高い安全性を確保しようとしたためである。

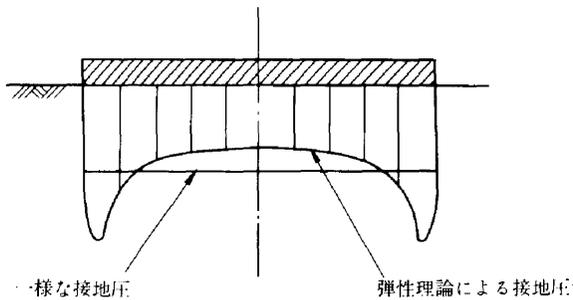


Fig.13 設計採用接地圧

ただし、弾性理論による接地圧分布をそのまま採用すると、中央部の接地圧を過少評価するため、曲げモーメントを過大評価することになる。そのため、Ohdeの接地圧分布を採用することにした。

以上の考え方を実際の基礎スラブに厳密に適用することは困難なので、次のような便宜的な取扱いをした。

- ① 等分布荷重に対して接地圧が一様に生じるとする場合の解析は、ウィングラーバネを考慮して計算する。
- ② 中央部で小さく、縁端部で大きい接地圧分布を考える場合の解析は、実務上、等方性弾性地盤上の平板モデル解析によらざるをえない。ただし、帯状基礎に等分布荷重を載荷した場合の接地圧分布がOhdeの接地圧分布に似た分布となる仮想地盤の変形係数を試算により求め、この仮想地盤の変形係数を用いて、実形状、実荷重について計算する。これにより、基礎スラブ断面に生じる曲げモーメントが過大になることは避けられる。

(2) 構造のモデル化

中空スラブ構造をどのようにモデル化するのが適切であるかについては明らかではない。しかし、実務的には、

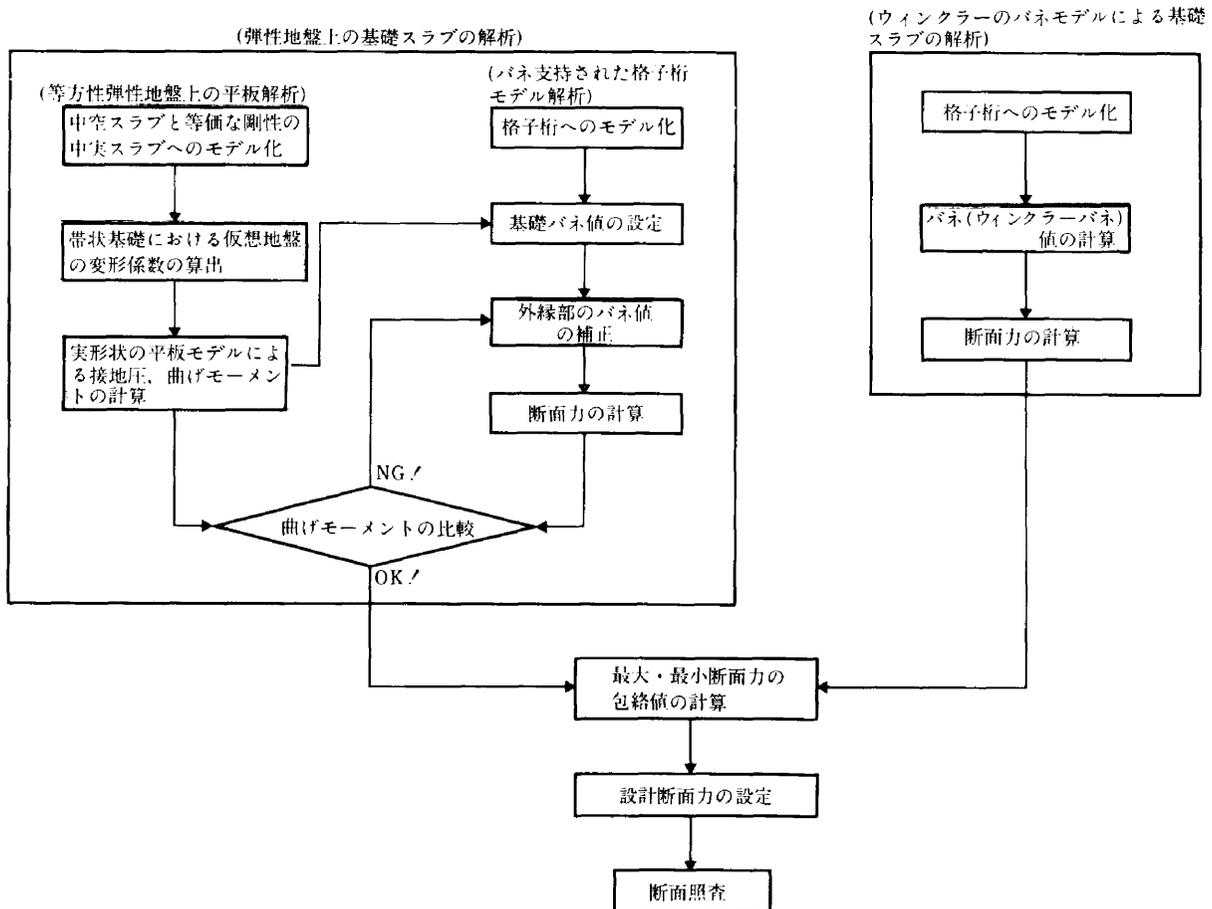


Fig.14 解析フロー

先の構造解析モデルに示した格子桁モデルか平板モデルのいずれかによるしかない。

本検討では、やはり構造物の重要性を考慮して接地圧について採った考え方と同じく、両者についての計算結果の包絡値を設計に反映し、その安全性を確保することとした。

(3) 解析フロー

以上の考えに従う解析フローをFig.14に示す。

Fig.14に示すように、接地圧の考え方の違いに対応した二つの大きな流れがある。すなわち、ウインクラーのバネモデルによる解析は、等分布荷重に対して一律な接地圧が生じると考える場合で、等方性弾性地盤上の平板モデル解析はOhdeの接地圧的なものを考えるものである。

弾性地盤上の基礎スラブの解析において、等方性弾性地盤上の平板解析とバネ支持された格子桁モデル解析を行うのは、解析モデルとして一つに絞ることを避けたものである。

この内、バネ支持された格子桁モデル解析では、そのバネがウインクラーバネであるため、等方性弾性地盤の平板解析で求められる接地圧分布を再現するためには、部分的にバネ値を補正する必要がある。その際、直接に接地圧を合わせることは実務上困難であるので、平板解析モデルの曲げモーメントと同程度の曲げモーメントを与えるように設定することとした。これにより、ほぼ同様の接地圧を再現することができる。

§6. あとがき

本館建屋基礎スラブの設計において、等方性弾性地盤上の平板解析手法を取り入れ、合理的な設計を目指した。

結果について詳細に報告はできなかったが、従来の設計によるものよりも、一段と安全性を高く保証できる設計ができたと言える。今後、大規模な基礎スラブの設計を行う際に、本設計が参考となれば幸いである。

(参考文献)

Y.K.Cheung & O.C.Zienkiewicz; Plates and tanks on elastic foundations—an application of finite element method, Int. J. Solids Structures. 1965. vol. 1. pp. 451 to 465.