

不同沈下と地盤

まつ 松
うら 浦

まこと 誠*

1. はじめに

周知のように基礎の支持力にしる、沈下にしる、地盤だけで定まるものではない。基礎の寸法・根入れ深さや形式、更には上部構造の剛性や非線形性・時間依存性などが関与してくる。標題は不同沈下と地盤となっているが、必然的に基礎の形式・工法、上部構造などに触れることになる。ここでは総説との重複を避け、重点的に2つのことを述べる。1つは建物・基礎・地盤系における不同沈下および不同沈下応力の問題であり、今1つは地盤の種類ごとに不同沈下障害を防ぐ方策を事例を挙げて解説することにした。

2. 建物・基礎・地盤系における不同沈下ならびに不同沈下応力に関する理論の展望

小規模建築物の基礎は通常直接基礎であり、軟弱な圧密層を含む沖積低地に建てられることが多い。この場合、理論的には建物・基礎・地盤を一つの系として取扱うことになる。問題は次のようである。①基礎を通じて地盤に加わる荷重が上部構造の応力解析から定まる（不同沈下はないものとしている）。②この荷重により地盤内に生ずる地中応力を求める。③地中応力による地盤の変形量を計算する。これが建物全体にわたって均一になることはまずない。不均一な変形によって基礎の不同沈下が生ずる。④盛土の場合のように剛性のない場合は、地盤の変形がそのまま盛土の沈下として現れるが、建物の場合は剛性による応力の再配分が生じ、その結果として⑤基礎を通じて地盤に加わる荷重が変化する→地中応力の変化→地盤の変形量の変化→不同沈下応力の変化→荷重の変化と循環する。剛性を含めてすべての量が経時的に変化する。

この問題を扱った初期の論文に横尾・山肩¹⁾(1955)、大崎²⁾(1956)、Chamecki³⁾(1956)、木丈⁴⁾(1957~61)、松浦⁵⁾(1960)のものがある。今日のように電算機の普及していない時代のもので、大崎、Chamecki(チャメッキ)、木丈のものはどちらかという不同沈下応力に、横尾・山肩、松浦のものは不同沈下量に重点が置かれている。①については格別のことはない。べた基礎や、フーチングが近接しているフーチング基礎の場合は等分布荷重として扱ってよい。②の地中応力を求めるのに通常は Bussinesqu(ブーシ

ネスク)の弾性解が用いられる。砂層は弾性体でなく、修正論もないわけではないが、砂層と粘土層の二層地盤に対する解は得られていない。③には当時 Terzaghi(テルツァーギ)の一次元圧密理論があったが、そのままの形では使いにくいのでそれぞれ工夫があり、横尾・山肩は圧密基本式を修正し、大崎は圧密度 U を $U=1-e^{-\beta U}$ とおき β を $U=50\%$ で Terzaghi と一致するように選ぶ近似をし、松浦は Kelvin 粘弾性体として扱っている。同工異曲の近似である。Chamecki は粘土の応力ひずみ関係を適当な形で近似化するだけで時間的経過は追っていない。④では上部構造の剛性の扱い方が問題になる。横尾・山肩はラーメン構造を対象に柱を剛体として各スパンの単位相対変位(不同沈下)に対する抵抗力 Q を求めて組合せているので、やや剛性を大き目に評価する結果になる。松浦は Q を D 法を採用して求めることによりラーメン構造のみならず壁式構造、壁のあるラーメン構造にも適用できる形にしている。大崎は撓角法(近似解法として固定法)、Chamecki は漸近解法によっている。⑤については横尾・山肩のものは時間について1階の連立微分方程式に帰着する。松浦のものも最終的には同じ形になるが、陽な解を得るため地中応力の修正項を求める際、2次修正以降でマトリックスの対角項以外を0とする近似を行っている。したがってこの近似解は、初期荷重の異同が大きい場合や圧密層中央面が深い時は使用できない。なお Chamecki や木丈は立体ラーメンも対象にしている。

以上初期に提出された理論の各項の具体的取扱いを概述してその異同をのべたが、①②③については大同小異、④⑤は各人各様であるが、その時代の制約を受けておおむね弾性的取扱いに終わっている。大崎が上部構造のクリープ性状に注目しているのが特筆される。

剛性を考慮した不同沈下量を求めるのであれば、上部構造を適当な剛性分布(クリープ関数を付与することも可能)を持つ等価連続梁に置換して扱うことが考えられる。

松浦・芳賀⁶⁾(1971)は建物全体の剛性の効果を表す係数(剛性係数 α)を導入し、任意の時刻における剛性を無視して求めた沈下量と、初期荷重とで定まるばね定数をもつばねを各基礎位置に想定し、松浦(1960)の方法で剛性の効果を評価していく実用算定法を提出している。芳賀⁷⁾(1973, 1974)はこの方法の広汎な適用を試み、モデル建物

*近畿大学教授 工学部建築学科

論 説

による試算と実測値から α の時間的推移を検討し、また不同沈下障害に対する限界変形角 θ_{cr} を上部構造の種別ごとに定め、これに基づく許容相対沈下量の標準値と最大値を示した。これは実態調査による実証的裏付けがあり、実用に耐えるものであるが、適用範囲が中低層の学校、集合住宅、病棟、宿舎等に限られる。また上記の論文では上部構造の不同沈下応力には触れていない。

この頃電算機の普及に伴い、粘土層の圧密について、間隙水圧の場を考慮した1次元F・E・M解析⁹⁾が始まる。地中応力に関する弾塑性解析の道も開けて来たが、砂の弾塑性ははなはだ難物で、二層地盤の解析は寡聞にして知らない。

上部構造の不同沈下応力ではR・C造の非線形について解析上の仮定を設定することが可能になったが、その時間依存性についてはなお情報不足の状態が続く。R・C造の剛性が有害なひびわれの発生により経時的に低下してくることは明らかであり、また応力弛緩を無視することはできない。

山本・松浦⁹⁾(1981, 1982)はR・C部材の非線形・時間依存性についてモデルを想定し、簡単な柱・梁問題に適用して、解析結果と実験結果を比較して適合の度合いが満足できるものであることを確認した上で、これによる建物地盤系の一体性解析をラーメン骨組のモデル建物について行った。解析は弾性(ただしコンクリートの弾性係数を1/3に低下させておく芳賀の方法による)、弾塑性、および粘弾塑性解析の3種を行い、その結果を比較検討して定性的所見を示した。

壁を含む建物については、単なるたすきに入れた置換トラスでは不十分なので、斜の格子状に多数入れて解析を試みているが成功していない。耐震性を要求される我が国の建物では壁のないR・C造は稀であるから、この問題が現在の大きな課題である。

べた基礎のスラブ応力の一体性解析も残された課題の一つである¹⁰⁾。

3. 不同沈下障害を防止するための注意事項

(1) 機能的障害と構造的障害

不同沈下障害には機能的障害と構造的障害がある。前者は主として過度の傾斜¹¹⁾や一様な沈下¹¹⁾によって生じ、接続管の破断、雨水の侵入、採光不良、不安感などその現れ方は様々である。許容量も建物の用途によって一概に言えないが、通常の小規模建築の場合の目安は、一様な沈下に対して30 cm、傾斜に対して1°といったところであろう。機能的障害で頻繁に起こっているのは窓や出入口の開閉不良ないし不能で、大修理を余儀なくされる。これは主として相対沈下¹¹⁾によるせん断変形の結果である。相対沈下は形をひずませるだけでなく、不同沈下応力により壁面に有害なひびわれを発生させ、沈下の進行に伴い繰返し補修が

必要となれば障害と判定される。さらに柱、梁にもひびわれが入り、梁端の破断、地中梁のせん断破断に至った場合もある。いずれにせよ剛性の低下、耐震性能の大幅な低下になるので構造的障害といわれている。

(2) 防止の一般的原則

地盤の不等変形(建物の沈下を0として算定された荷重による地盤の変形量から生ずるもの)を小さくすること、建物の剛性を高めてその平均化作用を期待することの2つにつきる。前者については建築基礎構造設計規準・同解説 pp. 175~176の(1)(2)(4)(5)(8)(9)に、後者については(3)(6)に述べられている。

(3) 直接基礎の場合の注意事項

以下地盤種別ごとにできるだけ事例を挙げて述べる。

a. 砂丘地¹²⁾

古砂丘の整地面で5 mグリッドで N_{sw} 値を調査した報告によると、ちらばりは予想以上に大きく、隣接測点(間隔5 m)間の N_{sw} 値の差が60(N 値で約5に当たる)以上になる場合が40%になっている。独立フーチングの場合繋ぎ梁を剛強にする必要がある。砂丘砂は細砂で淘汰が進んでおり塑性流動を起こしやすい。CB造布基礎の集合住宅でそのために障害に至った例がある。基礎幅を広げるよりは、根入れ深さを増して土被り圧で抑える方がよいであろう。地下水位上の部分は事前に水締めを行うのが望ましい。

b. まさ地盤¹³⁾

まさの造成地は切土部分でも、風化程度の異なる部分が露出してゆるむため強度変動が大きく、変動係数が40%を越すこともある。安易に地山として独立フーチングで設計されることが多いが、学校・宿舎などに障害例があり、地中梁の剛性不足、梁間方向の繋ぎ梁の欠如等が原因である。また基礎底面下への雨水の浸透、樹木の根の侵入は地盤を劣化させるから、極力防ぐようにする。宅造地全体の排水計画が肝要で、降雨時隣接高台から雨水が流入する場合U字管開渠などで防止できるものではない。

切土盛土部分にまたがって建てられる場合、盛土に載っている部分が垂れ下り、境界付近の壁面に大きなひび割れが発生する。盛土部分を杭基礎にして防ごうとする場合も、杭基礎先端地盤は斜面であり、施工を入念に行う必要がある。まさ土は粘土分を含み純砂層に比べ、塑性流動の心配は少ない。盛土部分の締め固めは通常行われていないので、この部分に建つ建物は盛土の厚い側に傾く例が多い。

砂丘地やまさ地盤のように地盤の強度変動が大きい場合は、相対沈下曲線がじぐざぐ形になりやすい。不同沈下応力は建物が長くなれば曲げによるものも加わってくるが、一般には隣接柱間のせん断変形によるものであり、その大きさを表す変形角に限界値がある。松浦・芳賀が実態調査を整理してまとめた限界値は表-1のようである。下限値に達すると有害なひび割れが入り始め、上限値を越えると

表—1 限界変形角 θ_{cr} (単位 $\times 10^{-3}$ ラジアン)

	支持地盤	構造種別	下限変形角	上限変形角
直 接 基 礎	洪積粘土	R・C	0.5	1.0
	砂丘砂	R・C, R・C(W)	0.5	1.0
	まさ地盤	R・C	0.6	1.4
		R・C(W)	0.7	1.7
	沖積砂層 (下位に圧密層)	R・C	0.7	1.5
		R・C(W)	0.8	1.8
支 持 杭	地盤沈下なし	R・C, S・R・C	1.0	2.0
	地盤沈下あり	R・C, S・R・C	0.7	1.5
	地盤沈下急激	R・C	0.4	1.0

R・C：鉄筋コンクリート造, R・C(W)：同壁式構造
S・R・C：鉄骨鉄筋コンクリート造

障害に至る。じぐざぐ形の不同沈下では局部的に変形角が大きくなるところができるので、障害に至りやすく、剛性を高めて防止する必要がある。

c. 洪積台地¹⁴⁾

複雑な地形が多く、基礎底面が同一強度の地盤に載りにくい。根入れ深さを変えたり、基礎底に貧コンクリートの地業を設けるのも一法であるが、建物の剛性を高めておくのが肝要であろう。火山灰土やスレーキングを起こす頁岩などは、こね返すと強度が期待できなくなるので注意を要する。切土面でも含水により強度が低下するので、敷地の排水、根入れ深さの確保、埋戻し土の突固めなどに留意すべきである。

d. 沖積の低地

軟弱な圧密層の存在が問題で、1で理論を展望した。相対沈下曲線は一般に下凸の皿形になる。隣接する直接基礎の建物（特に後で建てられる場合）からの応力重畳によって、端部が折れたり、剛性の大きな部分で若干くびれたりするが、じぐざぐ形になることはほとんどない。下凸の相対沈下曲線では一般に最大相対沈下量は中央部に生じ、変形角は端部で最大となり、最大相対沈下量が大きくなれば、端部の変形角も大きくなる傾向がある。この相関から表—1にもとづいて許容（最大）相対沈下量を定めているが、別に¹⁵⁾詳しく書いているので省略する。ただ許容相対沈下量は剛性を考慮した計算値に対するもので、一方許容最大沈下量は剛性を考慮しない計算値に対するものであることに注意を喚起しておきたい¹¹⁾。

e. 埋立地盤

埋立地盤が安定するまでには、いわゆる造成が終ってから10年以上を要するのが普通である。残留沈下量が数十cm以上ある時点で建物を建てれば、直接基礎にし、杭基礎にしる不同沈下障害が発生する可能性が大きい。安易に杭基礎が採用される傾向があるが、浮上りによる機能的障害やネガティブフリクションによる不同沈下から生ずる構造的障害が考えられるので、一考を要する。

(4) 杭基礎の場合の注意事項

小規模建築物に杭基礎を用いることは、その工費が上部構造の工費に対して相当の割合になるので、従来は避けられていたが、近年は杭基礎を用いるケースが増えて来ており、それに伴って不同沈下障害も見られるので、以下工法別に注意事項をのべる。

a. 打込み杭

打込み杭は施工実績の積み重ねがあり信頼できる工法であるが、振動と騒音の規制により使用される機会が激減している。杭打ち式が施工管理に有用であることが浸透して来ているが、打止まり貫入量を4mm以内という管理方式によった場合に、実施された打止まり貫入量が1.5mm～4mmにばらついてしまい、R・C 2階建の建物が不同沈下障害を起こした例がある。打止まり貫入量を適正な数値に揃えるよう管理を行う必要がある。

b. 埋込み杭

この工法は実績が十分でなく信頼性に問題があるにもかかわらず、設計者・施工者とも安易な姿勢をとっており、トラブルが多発している。不同沈下に関連しては高止まり量と先端抵抗の問題がある。建築センターの評定を受ける際提出した資料では、高止まりはすべて50cm以内になっていても、実施例では1mをこえるものが少なくない。筆者が高止まり量と先端抵抗の関係を整理した結果¹⁶⁾では、高止まり量0.5m以内の場合に比べて、0.5～1.0mで90%に、1.0～1.5mで75%に、1.5～2.0mで60%に先端抵抗が低下するようである。高止まり量が不揃いであればその程度に応じて不同沈下が生じ、広島地区でも障害に至った例は1,2に止まらない。

近年拡底埋込み杭が出現しているが、鉛直支持力が増加する結果として、杭径を一段小さくしたり、杭本数を減らすことができる。しかし水平抵抗を検討すると、地下室がない場合はほとんど不可となる。新耐震発足間もないので、ややもするとまだ鉛直耐力重点の設計になり勝ちであるが、鉛直耐力と水平耐力のバランスのよい杭の設計が求められているので、頭の切替えが必要であろう。

c. 場所打ちコンクリート杭

小規模建築物でこの種の杭を採用することは少ないと思われるので簡単に触れる。ここでも拡底杭が登場しているが、この工法が施工できるという事前確認が肝要である。調査は支持層深度のほか、支持層厚や下位の軟弱層の有無などの確認が必要である。支持層の礫の大きさも問題で、洪積世末期の流路の近辺とか、埋没丘陵の麓などには玉石がゴロゴロあって、施工不能に陥ることがあるので注意を要する。

文 献

- 1) 横尾・山肩：地下粘土層の圧密による建築物の不同沈下について、日本建築学会論文集，50号，1955；軟弱地盤における建築物の不同沈下対策に関する基礎的考察，日本建築学会論文集，65号，1960。

論 説

- 2) 大崎：不同沈下による上部構造応力の理論解および実用近似解法，建築研究報告，No. 18, 1956.
- 3) S. Chamecki: Structural Rigidity in Calculating Settlements, A.S.C.E. Vol. 82, SM1, 1956.
- 4) 木丈：基礎の不同沈下による立体架構応力の解法，日本建築学会論文集，57号，1957；基礎の不同沈下による一層ラーメンの応力と変形，同上63号，1959；基礎の不同沈下による矩形ラーメンの変形について，同上66号，1960；軟弱地盤上の矩形ラーメンの変形および不同沈下，同上69号，1961.
- 5) 松浦：構造物の剛性を考慮した不同沈下の実用算定法，日本建築学会論文報告集，66号，1960.
- 6) 松浦・芳賀：不同沈下におよぼす剛性等の影響について，第8回自然災害総合シンポジウム，1971.
- 7) 芳賀：不同沈下におよぼす建物の剛性等の影響について，第1報～第6報，日本建築学会論文報告集，205号，206号，207号，208号，1973；218号，219号，1974.
- 8) Y. Yokoo, K. Yamagata & H. Nagaoka.: Finite element method applied to Biot's consolidation theory, Soils & Foundations, Vol. 11, 1971.
- 9) 山本・松浦：鉄筋コンクリートラーメンの非線形および時間依存性挙動を考慮した不同沈下に関する理論的研究，広島大学工学部研究報告，30巻1号，1981；鉄筋コンクリートはり，柱部材の非線形および時間依存性挙動，日本建築学会論文報告集，322号，1982.
- 10) 松浦・山本：軟弱地盤上のベタ基礎を有する構造物の不同沈下に関する解析的研究，日本建築学会論文報告集，331号，1983.
- 11) 日本建築学会：建築基礎構造設計規準・同解説，(1974改)，p. 154，図15.21，図15.22，pp. 176～178，1974.
- 12) 日本建築学会中国支部基礎地盤委員会：砂地盤上の建物の不同沈下*，1975.
- 13) 同上：マサ地盤上に建つ建物の基礎設計*，1974.
- 14) 同上：洪積台地の地盤と基礎*，1977.
- 15) 松浦・芳賀：建築物の許容沈下量，土と基礎，Vol. 22, No. 12, 1974.
- 16) 松浦：埋込み杭（セメントミルク工法）の高止りによる支持力の低下について，昭和60年度中国支部研究発表会，1986.

*印は頒布可能，お申込は筆者まで

(原稿受理 1986. 2. 28)