

招待論文
INVITED
PAPER

招待論文

関西国際空港の沈下問題

SETTLEMENT OF KANSAI INTERNATIONAL AIRPORT ISLAND

中瀬明男*

Akio NAKASE

* 正会員 工博 (株)日建設計・特別顧問 中瀬土質研究室長
(〒112 文京区後楽1-4-27)

Keywords : consolidation settlement, precompression stress, man-made island

1. ま え が き

関西国際空港の建設は、世界的に注目されているわが国の大規模建設事業の一つである。土木事業の規模の大きさを表す場合、扱う土量をその尺度に使うことがあるが、この尺度で言えば人類史上最大の土木事業はパナマ運河であり、その土量は約3億 m^3 である。関西国際空港は第一期と第二期に分けて建設されるが、第二期の終了時には総土量が約5億 m^3 に及ぶものと見込まれており、もしもこの通りに進めば関西国際空港の建設は世界最大の土木事業となるはずである¹⁾。

関西国際空港の建設については、その規模の大きさからマスメディアで取り上げられることが多い。しかし、これら報道の関心事は空港島の沈下であり、この島が将来水没するのではないかという記事が出されたこともあった。このような報道は、地盤に荷重を載せると沈下するという現実を強く認識せしめたことでは意義があったが、一方で一般の人々に過大な心配を与えるものように思われる。

関西国際空港の建設場所に関しては、大きな沈下が生じたことから、地盤条件のよりよい場所、あるいは陸に近く浅い場所を選ぶべきではなかったかという意見もある。国際空港の計画は、大きくは国家的な航空輸送計画からの判断によるが、大都市周辺の土地利用に厳しい制限のあるわが国の場合には、環境問題つまり空港騒音の問題がとくに重要視される。この関西国際空港の滑走路の位置は、永年にわたる試験飛行と環境調査の結果に基づいて、周辺の住民に対する騒音を許容範囲にすることから決定されるものである。このように、国際空港の計画時においては航空機の航行の安全性と騒音の影響などが優先し、地盤条件あるいは施工の難易によって候補地を変更する余地は殆どないのである。

この関西国際空港の建設は、地盤の深部の洪積層の圧縮を設計当初から本格的に考慮したわが国で最初の建設事例である。これまでの沿岸域での建設事例においては、海底面上に載荷をした時の沈下としては、表層の沖積粘性土層の圧縮によるもののみを考え、その下の硬い洪積層の圧縮は無視しても差し支えないとされていた。地盤の深部にある硬い洪積粘性土といえども、表層載荷によって地中応力とその降伏応力を超す大ききになれば圧縮を生じる。しかし、これまでの事例では、載荷重の強度が小さいか、載荷重の強度が大ききても載荷の範囲が小さいために、地中応力の大きき降伏応力を超すことがなかったのである。しかし、関西国際空港の空港島の場合には、載荷範囲と荷重強度のいずれもが在来の事例と比べて極端に大きいため、深部の洪積層が圧縮することが予想されていたのである。

現在のところ、空港島自体の建設はほぼ終了し、その上の空港施設の建設が進められている。空港島の沈下に関しては時間とともに測定結果が集積され、予測と実際の比較検討が着実に進められている。以下には関西国際空港の土質工学的問題、とくに沈下について、現時点までに分かったものについて述べる。

2. 関西国際空港の概要

(1) 空港の構造形式の検討

関西地域における新しい国際空港の計画は1968年から行われた。四つの候補地点の自然条件、ならびに空港自体の各種構造形式を比較検討した結果、泉州沖に埋立方式によって空港島を建設することが1974年に決定された。その後、造船業界の不況から、船舶のように海上に浮かぶ浮体方式を推す声が高まり、再度この埋立方式と浮体方式の両者の比較検討が行われたが、その結果として1980年に従来通りの案に落ち着いた。

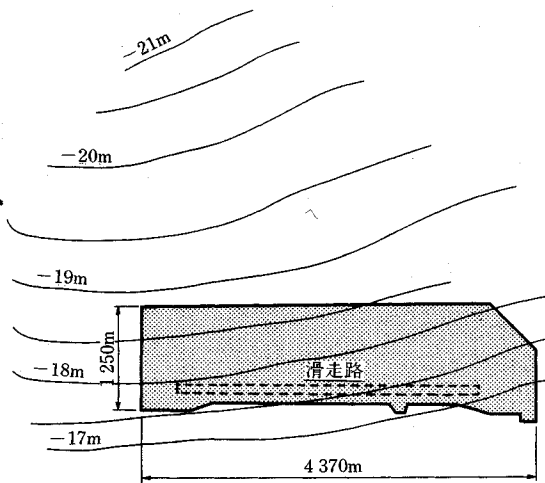


図-1 空港島周辺の水深

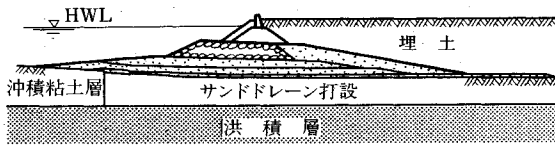


図-2 緩傾斜石積護岸の断面

海中に土砂を埋め立てて人工島を建設するという空港島方式の場合には、それまでにわが国の沿岸域で多くの経験があったので深刻な土質工学的問題は無かったが、従来の範囲を超えた大規模急速施工となることが最大の技術的問題とされた。

浮体方式としては半潜水式の形が提案されていたが、造船所で制作された個々の部分を海上で一体化する際の溶接精度、ならびに台風時に浮体に作用する膨大な水平力に抵抗する係留ドルフィンの設計が技術問題であった。これらは理論上では解決可能と思われたが、実大の構造物による検証が必要であるとされていた。

浮体以外の方式としては、単純な島の他に干拓、半干拓ならびに棧橋などの方式が検討された。しかし、干拓方式では大地震の際の十分な安全性を確保するために膨大な工費を要したし、棧橋方式では杭などの部材の維持管理が主な問題であった。関西国際空港はわが国最初の24時間空港であるため、鋼材などを用いた構造形式では将来の部分的補修を如何にするかが大きな問題であった。空港島は、図-1に示すように、水際線から5kmの場所に位置し、その平均水深は18mである。

(2) 空港島建設の概要

工事はまず空港島を囲む延長約11kmの護岸の建設から始まった。護岸を先行したのは、土砂の投棄による海水の汚濁を最小にするためである。海底地盤の土層構成は、表層に軟弱な沖積粘土層があり、その下には洪積

層の粘性土と砂礫の互層が続いていた。護岸の基礎地盤となる層厚約20mの表層粘土層は支持力が十分でなかったため、地盤改良によって強度を増加させる必要があった。護岸の構造が、図-2に描くように、柔らかい盛土形式の場所では、直径40cmで2.5m×1.6mの長方形配置で打設したサンドドレーン(SD)を用いた圧密工法を採用した。コンクリートケーソンや鋼板セルのように剛な構造の場所では、直径2mで置き換え率70%のサンドコンパクションパイル(SCP)で複合地盤を造成した。

SCPを打設したのは護岸の一部約2.5kmの区間であったが、置き換え率70%ということは表層の軟弱粘土の70%を砂で置き換えたことになる。この程度の置き換え率でSCPを打設すると、粘土が強制的に排除されるため、粘土地盤の表面は4~5mの盛り上がりを示すが普通である。在来のSCPによる地盤改良工事では、この盛り上がった分の粘土を取り除くのが普通であったが、この場合には盛り上がった粘土を取り除かずにそのまま圧密することにした。SCPの打設に際して、海底面より上の部分の粘土については、砂の圧入をせずに緩い砂の柱を造成してドレーンの機能のみを持たせたのである。この工法は前例がなかったため、工事に先だって現場試験を行いその有効性を確かめた²⁾。ここで打設したSCPの総数は約3万6千本であった。

護岸内部の表層粘土地盤には、直径40cmのSDを2.5mの正方形配置で打設した。空港島全体で打設したSDの総数は約百万本であった。この広大な空港島の内部にSDを採用したのは、埋立土砂を圧密荷重とする自然な地盤改良であり、それまでに十分な経験があったからである。表層の沖積粘土層のみにSDを打設したのは、全体の土層の圧縮の中でこの表層の軟弱粘土の占める割合がとくに大きいからである。空港島の維持管理で最も懸念されるのは開港後に生じる不等沈下であるが、この不等沈下は開港後の残留沈下の大きさに比例する。そこでSDで圧密を早めて、表層粘土層の圧縮量の大部分を開港までに生じさせておけば、将来の維持管理が容易になる。

深部の硬い洪積粘性土層群も、この空港島のような規模で載荷をすれば圧縮する。しかし、最も圧縮量の大きい表層沖積粘土層はSDで圧密を早めるので、開港後の残留圧縮は殆どないと思われたし、その上にはこれも残留圧縮の殆どないといえる層厚約30mの埋め土が存在する。したがって、空港の維持管理に関しては、この深部の洪積粘性土層群の圧縮の影響は、あたかも航空母艦の吃水が変化するようなものと考えられた。そこで、残留圧縮量を減少させるためのSDは表層沖積粘土層のみ打設し、深部の洪積層群には施工しなかった。これは施工上の制限にもよるものであって、海上工事では-50

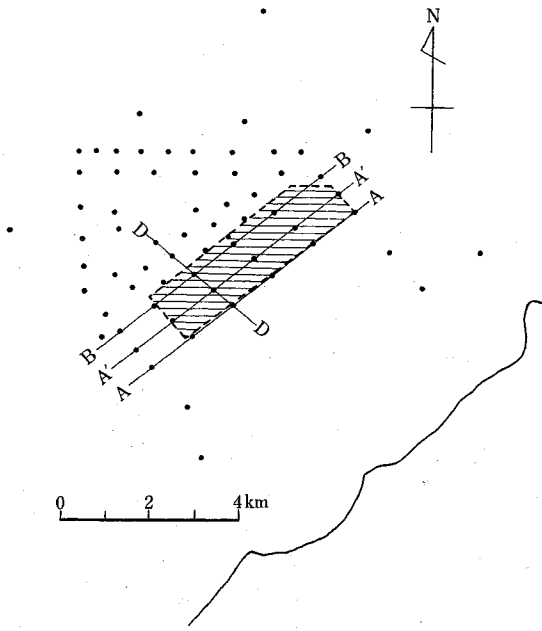


図-3 ボーリング調査地点

m を超してドレーンを打設した前例がないし、またそのための杭打ち船も存在しなかった。

空港島を囲む護岸には、3 箇所の開口部が設けてあり、これを土採り場から土砂を運ぶ土運船の通行口とした。土砂の投入は順次この土運船によって行われたが、埋立土表面の標高がある高さに達した後は、陸上から土砂の敷き均しを行った。

3. 地盤条件

(1) 地盤の成層状態

空港島の建設に関する土質工学的設計を行うため、1977 年から 1982 年にかけて 65 本のボーリングが行われた。このうち、24 本は -100 m まで、34 本は -150 m までであったが、-400 m に達するものが 2 本実施された。この -400 m までの深いボーリングは、港湾技術研究所で開発したワイヤーライン方式を使用して、通常の深さのボーリングと同様な土質力学的品質を持つ試料の採取を行ったものである³⁾。

この土質調査では、通常の土質試験の他に地質学的調査も行った。各採取試料に含まれる貝殻、有孔虫、珪藻、花粉、石灰質ナンノプランクトンなどの微化石の含有状態を調べ、各試料の堆積環境と堆積年代を推定した。とくに石灰質ナンノプランクトンの調査結果から、各ボーリング地点の土層の対比を行った⁴⁾。

図-3 は空港島周辺で実施されたボーリング地点を描いたものである。この図に示す二つの軸線 B および D について土質断面を描いたものが図-4 である。図から分かるように、海底地盤は粘性土と砂質土の互層となっ

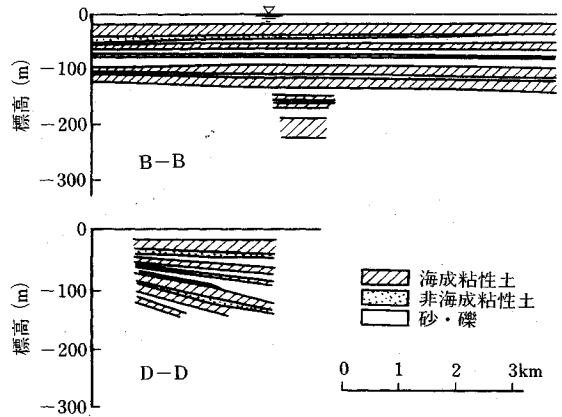


図-4 土質断面

ており、しかも海成と非海成のものが交互に堆積している。表層は沖積粘土であるが、堆積年代はその中央深さで 6000 年、下端で 23,000 年と推定されている⁵⁾。この表層の下は洪積粘性土層と洪積砂礫土層の互層となっているが、この互層状態は調査の最大深さの 400 m まで続いている。滑走路に沿う方向の土層はほぼ水平に堆積しているが、滑走路に直行する方向では沖に向かって落ち込むように傾斜している。

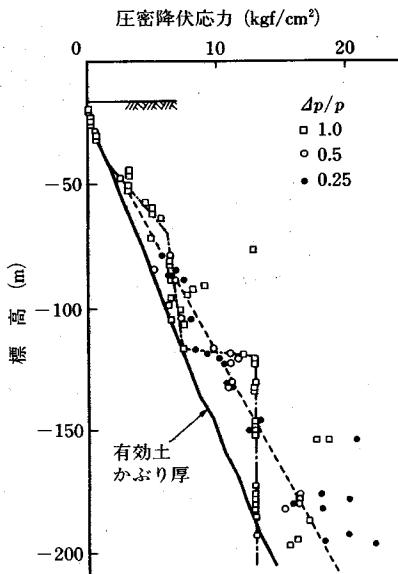
大阪地区の地盤については、以前から丘陵部や平野部で詳細な調査が行われている。それによると、大阪の地盤は花崗岩、中・古生層、第三紀層などの基盤岩類、大阪層群、上部洪積層(段丘層)および沖積層からなっている。このうち大阪層群の中部より上位層については、海成粘土層と火山灰層の組合せによって、深部から上に向かって順に Ma 0, Ma 1, Ma 2, ..., Ma 13 層と名づけている。最後の Ma 13 層は最も浅い層で表層の沖積土層にあたる。

分類特性試験結果からみると、この表層の沖積粘土層はわが国の沿岸域の海底で普通に見られる海成粘土と変わりはなく、その下の洪積粘性土の分類特性も表層の沖積粘土のそれと差異はなかった。

(2) 土の圧密特性

海底表層の沖積粘土は、その有効鉛直応力と原位置間隙比の関係、非排水せん断強度と圧密降伏応力の深さ方向の分布など、いずれを見ても正規圧密状態であると判定されている⁶⁾。したがって、圧密降伏応力の大きさは鉛直有効応力にほぼ等しい。圧縮曲線から求められる正規圧密領域における圧縮指数はほぼ $C_c = 1.0$ であり、正規圧密領域での圧密係数は $c_v = 60 \sim 300 \text{ cm}^2/\text{day}$ であった。

その下の洪積粘性土層群は、見掛けの過圧密状態⁷⁾にある。その圧縮曲線は、降伏応力より大きな応力範囲で逆 S 字の曲線となるという、セメンテーションを受けた土に特有の形をしている。海底の粘性土の調査でよく



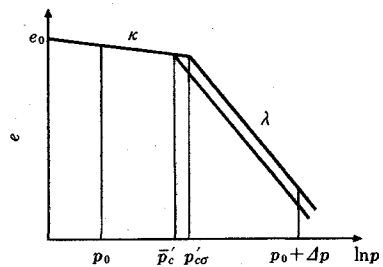
図—5 圧密降伏応力の深度分布

見られるように、深さの増大とともに試料の乱れが大きくなり、非排水せん断強度や圧密諸定数の値のバラツキが目立っている。正規圧密領域における圧縮指数 C_c は 0.8 から 1.6 程度である。正規圧密領域での体積圧縮係数と圧密圧力の関係は、表層沖積粘土のものとはほぼ等しい。

このような過圧密粘性土の圧縮量を推定する際には、土の圧密降伏応力の設定が問題となる。図—5 は圧密試験で求めた圧密降伏応力 p_c の値の深度分布である。図中に□で示した値は、圧力増分比が $\Delta p/p=1$ の標準試験によるものであるが、これによる圧密降伏応力の深度分布は現実的なものとは思われない。そこで、圧力増分比を 0.5 および 0.25 と細かくした圧密試験を行い、そこで求めた p_c の値が図中の○および●で示したものである。この小さい圧力増分比の試験で求めた降伏応力 p_c を考慮すると、降伏応力の深度分布は、図中の破線のように、深部の洪積粘性土層群の過圧密比はほぼ 1.3 である。

4. 沈下の事前解析

空港島の沈下の事前解析は、島内で滑走路に平行な 3 本の線、すなわち図—3 に示した A、A' および B 線に沿う土質条件に対して行われた。ここで行われた地盤調査によれば、最大の深さの 400 m に達しても基盤というべき岩盤は現れていない。これまでに行われた大阪地区の地盤沈下の調査結果によれば、Ma7 層以下の土層は実際上は非圧縮の土層と考えてよいとされているので、この沈下解析では -200 m 付近に存在する Ma7 層



図—6 有限要素法計算で用いた圧縮曲線

より上部の土層の圧縮を考えた。この Ma7 層の下端標高は、A 線で -140 m、B 線で -180 m である。ここでは B 線に沿う土質断面についての解析結果を述べる。

この沈下解析では、通常の圧縮曲線を用いる方法、体積圧縮係数を用いる方法、ならびに非線形次元圧密理論に基づく有限要素法計算⁹⁾の 3 種類によって沈下量を求めた。このいずれにも共通な問題として、圧密降伏応力、排水条件ならびに圧密係数の設定がある。

圧密降伏応力としては、前に述べたように圧力増分比を小さくした圧密試験で求めた p_c の平均値 \bar{p}_c を考えるが、大深度の試料採取に伴う試料の乱れによるこの降伏応力の過小評価を考慮して、 p_c の平均値にそのバラツキの標準偏差分だけを加えた p_{ca} も考えた。

地盤の排水条件の設定は、地盤内に現れる薄い砂層の判断によって条件が異なる。そこで次の 3 種類の排水条件を設定した。

- 排水条件③：層厚が約 3 m 以上で連続して分布しており、礫および砂分含有の多い表層沖積層下層の砂層と Ma7 層下部の基底礫層のみを排水層と見なす場合
- 排水条件②：排水条件③で排水層と見なした 2 層以外に、部分的に層厚が 3 m 以上と厚く、礫および砂分が多くしかも連続性のよい砂層を排水層と見なす場合
- 排水条件①：層厚が 1 m 以上で比較的連続性のよい砂層をすべて排水層と見なす場合

圧密係数としては、圧密試験結果からその正規圧密領域で求めた c_v の他に、それに一次圧密比を乗じた $c_v^{(2)}$ も計算に用いた。

埋立土砂の水中単位体積重量は $\gamma' = 1.0 \text{ tf/m}^3$ としたが、比較のために 0.9 tf/m^3 、 1.1 tf/m^3 および 1.2 tf/m^3 の場合についても計算した。埋立工程としては半年ごとに 8 段階で載荷し、埋立開始後 15 年目、開港後 10 年目に島の天端標高が +4.0 m になるように設定した。

圧縮曲線に基づく方法においては代表的な曲線を決める必要がある。表層沖積層では全層を 5 等分して、その各々で代表的圧縮曲線を決め、その下の洪積粘性土については各層ごとに曲線を決めた。体積圧縮係数 m_v を用

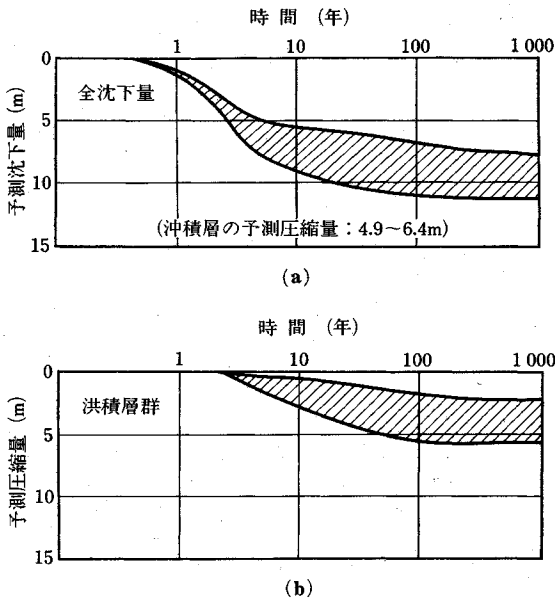


図-7 沈下量と時間の関係 (事前予測)

いる場合には、各層での平均的な m_v を求め、圧密降伏応力としては各層の中央深さでの値を考えた。有限要素法の計算では、圧縮曲線を図-6の様に単純化した。圧縮指数 λ は圧密試験で求めた圧縮指数 C_c から $\lambda=0.434 C_c$ とし、膨張指数としては $\kappa=0.1\lambda$ とした。

以上のような条件で26種類の計算を行った結果を図-7に示す¹⁰⁾。この図では26本の沈下・時間曲線の範囲を描いている。図に見られるように計算沈下量には大きな幅があるが、そのいずれが最も現実に近いかは判断できなかった。

沈下解析結果には図-7のように大きな幅があり、そのいずれもが土質工学的には同様な信頼性をもつとされていた。この事業の主体である関西国際空港株式会社は1984年10月に設立されたが、1986年7月の埋立免許申請の際には、空港島の将来沈下として一本の時間沈下曲線を決める必要があった。そこで、上述の26本の時間沈下曲線の中から、比較的信頼性が高く、しかも予測と実状が合わない場合でも、施工途中に埋立計画の修正で対処できるものということから、前述の沈下解析のうち排水条件②、 c'_v 、 p'_{c0} の場合に近いものを選んだ。この予測では、開港50年後の空港島の平均地盤高+4mを確保するために、埋立層厚は29.5mとし、開港後50年後における沈下量としては、沖積層で6.5m、洪積層で1.5m、合計8.0mとした。ただし、このような大深度に及ぶ地盤を対象とする場合の常として、埋立て施工中に沈下観測を行いながら、詳細な地盤挙動の検討を行うべきものとされていた。

この沈下予測に基づいて、表面舗装厚0.5mを考慮

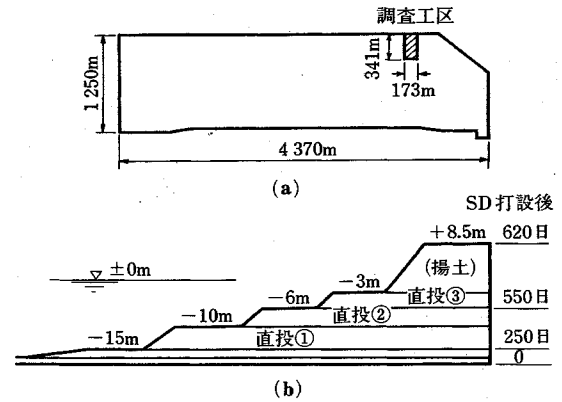


図-8 調査工区と施工順序

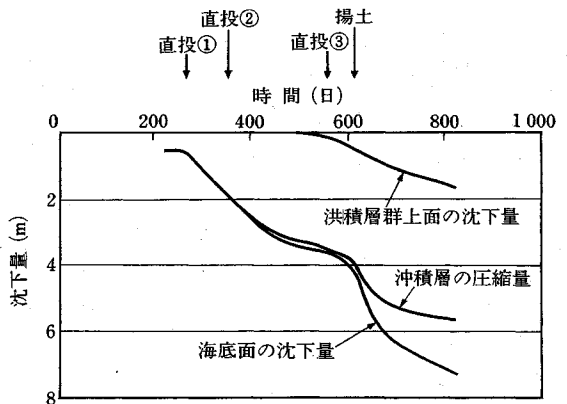


図-9 調査工区における実測沈下

して、開港50年後の空港島の天端標高が既往最高潮位の+3.2mを下まわらないという条件で、開港時の天端標高を+5.0mとすべく、施工計画が策定された。

5. 実測沈下と予測沈下の比較

工事着手のための各種の交渉で10ヵ月を費やした後、空港島の施工が開始されたが、沈下予測精度が全体工事を左右することから、空港島の一部に図-8(a)の様に調査工区を設けて、ここで載荷を先行して沈下の進行状況を測定することになった。ここでの載荷工程は、図-8(b)に示す様に、実際の工事とほぼ同様な順序で行われた。ここで直投とは底開き土運船で土砂を投入するもので、揚土は揚土船を使って横づけされた箱形バージから土砂を積み上げるものである。この調査工区を含む区域の表層粘土層はSDで改良されている。

この調査工区内のほぼ中央点での沈下測定結果が図-9である。この図中の洪積層群上面の沈下は、洪積土層群の上端に埋め込んだ二重管式沈下計で測定したものである。ここで注目されるのは、洪積層群の圧縮の速さである。会社の事前予測では開港時に0.5mとされてい

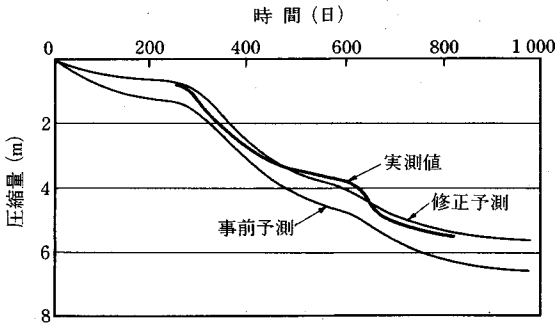


図-10 表層沖積粘土層の圧縮 (調査工区)

たが、この実測によれば2年強で1.5 mの沈下となっている。

沖積粘土の圧縮量については、図-10に示すように、予測の精度はかなり高い。この場合の予測沈下曲線は m_v を用いて求めたものである。これまでのわが国の海成粘土地盤の埋立工事において、サンドドレーンを用いた場合の沈下予測の精度が高いとされているが、この空港島でも同じことがいえるようである。

沈下の事前解析結果と実際の沈下量を比較し、沈下予測の精度を向上するため種々の検討が行われた。埋立土砂の単位体積重量については、 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 1\text{ m}$ の大型鋼函内への投入試験、 $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ の孔を使っての水置き換え試験、さらに直径0.5 mの孔による砂置き換え試験などを行った。その結果、実際の施工状況や今後の投入土砂の種類などを勘案して、空中で $\gamma_t = 2.0\text{ tf/m}^3$ 、水中で $\gamma' = 1.2\text{ tf/m}^3$ と変更した。

表層の沖積粘土層については、土砂の単位体積重量の修正の他に圧密降伏応力のより詳細な検討を行って、予測精度の向上を計った。この粘土層は正規圧密状態にあるとみてもよいが、その深度分布をさらに細かく調べると、降伏応力は有効土被り圧より 0.7 tf/m^2 大きいことが分かった。さらに、実測された沈下と時間の関係に合わせるように検討し、体積圧縮係数とサンドドレーン領域内の圧密係数についてもわずかな修正を行った。これらの修正により、図-10に示したように、計算沈下と実測値の一致はさらによくなった。

洪積粘性土層群の圧縮は、その大きさも速さも予測されたものよりはるかに大きい。過圧密状態にある粘性土地盤内で、載荷重にともなって増大する地中鉛直応力が圧密降伏応力より大きくなると、過圧密状態から正規圧密状態に移り、その圧縮も急増する。図-11は調査工区内における地中鉛直応力の増加と圧密降伏応力を比べたものである。この図では、各深さにおける土の圧密降伏応力は、その有効土かぶり圧との差の形で表してある。図-11を参照して、直投②の段階では-70 m以深の土層は過圧密状態にとどまっているが、揚土の載荷終了時

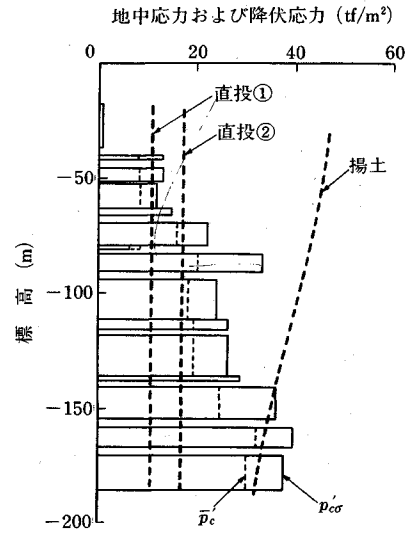


図-11 地中鉛直応力の増加と圧密降伏応力

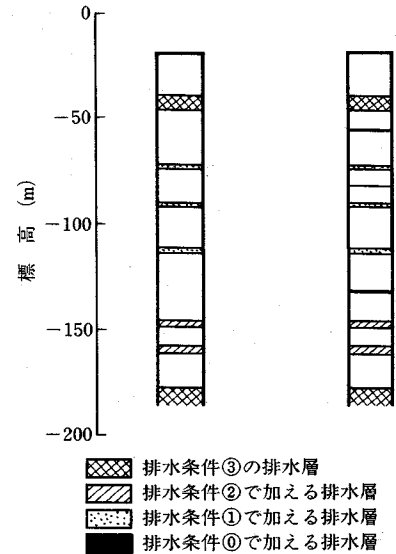


図-12 排水条件の設定

には-200 mまでの洪積粘性土層群のほとんどすべてが正規圧密状態に移ることになる。

事前解析の結果において、予測沈下量に大きな差がた要因の一つは地盤の排水条件であった。そこで、地盤調査結果に基づいて排水条件の詳細な検討が行われた。非常に速い沈下の進行状況を説明するためには、以前には無視していた薄い砂層も排水層と考えた方がよいことが分かり、図-12に描くように、存在を確かめた砂層の全てを排水層とする④の排水条件を設定した。

以上の修正と新たな条件設定の下に、洪積粘性土層群の圧縮について種々の条件の下で有限要素法による計算を行った。その結果、実測結果は、圧密係数が c_v で圧

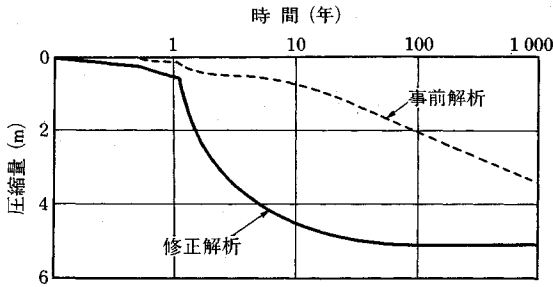


図-13 洪積粘性土層群の予測圧縮量 (B線)

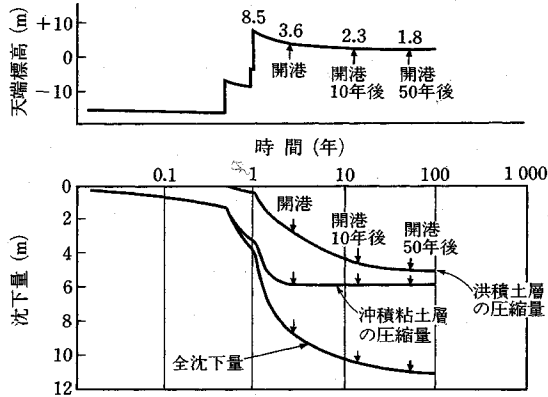


図-14 修正条件に基づく沈下予測 (B線)

密降伏応力を p_{co} とした場合よりも少し小さいが、これとはほぼ平行していることが分かった。また、圧密係数が c_v で圧密降伏応力を p_c とした場合の沈下量よりはかなり小さいことが分かった。

これまでの沈下解析では、Ma7層より上、つまり-200mまでの土層の圧密による圧縮を考えている。しかし、空港島では 40 tf/m^2 に近い大きな荷重強度の載荷を $4375 \text{ m} \times 1250 \text{ m}$ の広大な面積に行うため、地中応力の増加分も大きくその深度方向の分散の影響も小さい。空港島の中央を考えれば、深さ400mにおいてさえ、鉛直応力の増分は地表面の載荷強度の90%にしか減少しない。

このような事情を考慮して、-200m以浅の地盤内の砂層の圧縮と-200m以深の土層の圧縮についても調べた。砂層については、その N 値を推定し、 N 値と間隙比の関係から圧縮量を推定した。-200m以深の土層の圧縮量は、PS 検層試験結果から静的ヤング率を推定し、その弾性圧縮量として求めた。これらは圧密による圧縮ではないので、即時沈下として取り扱うこととした。この即時沈下量は空港島の中央で約40cmであった。また、埋立土自体の圧縮についても調査が行われているが、約30m厚さの盛土を施工した後、埋立土の圧縮は60~90日の間に終了するが、その大きさは30~60cmであっ

表-1 沈下量の予測と経過

	埋立層厚	開港時	開港10年後	開港50年後
(A) 当初予測	29.5m	埋立地盤圧縮量	—	—
		沈下量 沖積層	6.5m	6.5m
		洪積層	0.5m	1.0m
		合計	7.0m	7.5m
		(天端高 +5.0m)	(+4.5m)	(+4.0m)
(B) 当初予測の見直し	29.5m	埋立地盤圧縮量	0.5m	0.5m
		沈下量 沖積層	5.0m	5.0m
		洪積層	3.0m	4.5m
		合計	8.5m	10.0m
		(天端高 +3.5m)	(+2.0m)	(+2.0m)
(C) 修正案	33.0m	埋立地盤圧縮量	0.5m	0.5m
		沈下量 沖積層	5.5m	5.5m
		洪積層	4.0m	5.5m
		合計	10.0m	11.5m
		(天端高 +5.5m)	(+4.0m)	(+4.0m)

- 注1) 本表の数値は空港全体の平均値である。なお、天端高には舗装等の厚さとして0.5mを加えている。
- 注2) 表内の数値は0.5m単位で記載している。
- 注3) 天端高は基本水準面 C.D.L. (年間を通じてほぼ最低の潮位) からの高さである。

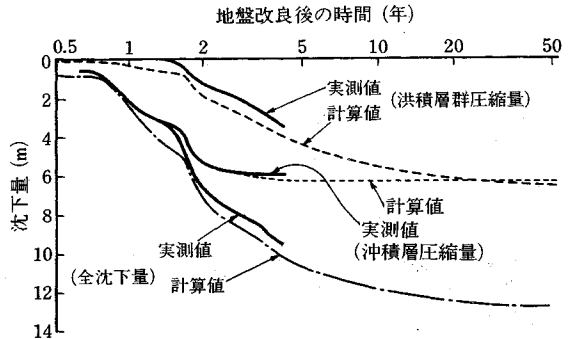


図-15 修正沈下予測と実測沈下 (調査工区)

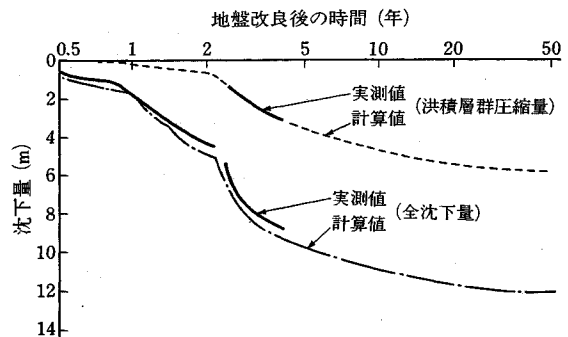


図-16 修正沈下予測と実測沈下 (B線中央)

た。

予測と実際の比較で最も重要な洪積粘性土層群の圧縮について、条件を修正して計算した圧縮量と事前解析における圧縮量を図-3の軸線のB線について比べたものが図-13である。以上のような新たな条件の下で計算した修正沈下予測のうち、B線に沿う土質断面につ

いて c_u , p'_{cu} , 排水条件①に対応したものが図—14である。

しかし、図—14で分かるように、地盤条件と土質定数を検討した修正解析の結果によれば、沈下が大き過ぎて、空港島の将来の天端標高についての条件を満たすことができない。そこで、開港後50年目に最高潮位の+3.2mを下わないという条件を満たすための検討を行った結果、沈下の増大に応じて当初29.5mとしていた埋立層厚を33mに増さざるを得なかった。このような沈下予測の修正過程を示したものが表—1である。この修正のために、追加土量として1200万 m^3 の土砂が必要となった。

以上の様に修正した沈下予測と現在までの実測沈下とを比較したものが図—15および図—16である。図—15は前に述べた調査工区での比較であり、図—16は空港島の中で最も建設の進んでいる図—3の軸線のB線上の中央付近のものである。現状では、実測沈下は予測値をやや下まわっているが、この修正予測は妥当なものと考えられる。

6. 今後の問題

前節で述べたように、修正した沈下予測は現在のところ工学的にはほぼ妥当なものと思われる。しかし、この空港島の建設は、その規模の大きさからこれまでにない技術的問題を幾つか提供している。地盤深部の洪積層群の圧縮については、さらに詳細な各種の実測結果の集積が予定されているが、圧密降伏応力の検討など深部の土の力学特性の判定と、大深度におよぶ原位置での計測方法などが今後の問題となろう。

本文で述べた深部の洪積粘性土の圧縮の予測もその一つであるが、空港島の上に建設する構造物の設計においても新しい問題が発生している。表層の沖積粘土層は開港後の残留沈下を減少させる手段を講じているので、小規模の構造物の場合には将来の沈下によって深刻な問題が起きるとは思われぬ。しかし、大規模なものでは深部の洪積粘性土層の圧縮による問題に対処しておく必要がある。

空港島で最大の構造物としてのターミナルビルディングは、南北に長い構造物である。このビルは基礎杭を一切使用せずに、浮き基礎の形式を採用している。しかし、その中央部分では深い地下室を設けるため、他の部分より掘削深度が大きく、しかも構造物の重量が小さいので、完成後もこの中央部の正味荷重は他の部分より小さい。この場合の正味の荷重の不均一は沖積層の圧縮に関する限り心配はないが、将来の深部の洪積粘性土層群の圧縮量に影響を与えることになる。そのため、この中央部の掘削に際して、必要深さより余計に掘削した後、重量の大きい鉄鉱石で埋戻して正味の荷重の不足の一部を

補っている。

海底地盤に載荷する荷重の強度については、この空港島で前例のない大きな荷重を加えたことによる問題が浮き彫りにされた。今後の第二期工事が予定されている海域ではさらに水深が大きくなるので、在来と同様に普通の土砂による埋立てを行えば、施工管理と完成後の維持管理の両面で沈下問題はより一層その深刻さを増すものと思われる。この問題を解決するためには、沈下管理を実行可能な範囲内に納めることのできるように、正味の荷重を軽減する手段を用意することが必要であろう。

7. あとがき

関西国際空港の空港島建設に関する技術的検討、とくに土質工学的検討は、運輸省港湾技術研究所で四半世紀にわたって行われており、著者も港湾技術研究所在職当時はその仕事に関係した一人である。関西国際空港株式会社が発足し建設が始められた後は、その土質工学的検討は土質工学会関西支部に委託され、「空港島の土質に関する技術課題の検討調査委員会（委員長：赤井浩一京都大学名誉教授）」は現在も継続中である。本文で報告した内容の殆ど全てはこの委員会の検討結果に基づいている。

この空港島の沈下問題は現在も研究途中の状態であるが、この複雑な沈下解析は、上記委員会と密接な連絡をとりながら、港湾技術研究所土質部長の小林正樹博士の指導の下で行われている。

この空港島では前例を見ない大規模急速施工が進められている。この巨大工事を無事に管理しながら、膨大な技術資料を連日のように収集整理している関西国際空港株式会社の技術者、とくに設計課長小松明氏をはじめとする本社工務一部の各位、ならびに技術課長及川研氏をはじめとする建設工事事務所の各位に敬意と感謝の意を表する次第である。

引用文献

- 1) 中瀬明男：Kansai International Airport—Construction of Man-made Island (Guest Lecture), Proc. 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.2, pp.87~101, 1987.
- 2) 前田 進・高井俊郎・福手 勤：サンドコンパクションパイルの大規模施工に伴う隆起地盤の形状と物性, 土木学会論文集, 第403号/VI-10, pp.55~63, 1989.
- 3) 堀江宏保・石井一郎・善 功企：改良型ワイヤーライン工法による大阪湾深層土質調査, 土と基礎, Vol. 34, No. 1, pp.57~62, 1986.
- 4) 中世古幸次郎：関西国際空港地盤地質調査, 災害科学研究所報告, 285 p., 1984.
- 5) 小野寺駿一：大阪湾泉州沖地盤の工学的性質に関する研究, 東京工業大学学位論文, 219 p., 1984.
- 6) 中瀬明男・亀井健史：日本近海における海底沖積粘土の工学的特性, 土木学会論文報告集, 第338号, pp.217~

- 224, 1983.
- 7) 中瀬明男：海洋土質—新体系土木工学 84, 技報堂出版, 174 p., 1984.
- 8) 小林正樹：非線形一次圧密沈下の解析法とその適用, 港湾技術研究所報告, Vol. 21, No. 1, pp. 57~79, 1981.
- 9) 三笠正人：圧密試験の整理方法について, 土木学会第 19 回年次学術講演会講演概要集, 1964.
- 10) 港湾技術研究所土質部内部資料. (1992. 7. 10 受付)