

人工島内の橋梁下部工における沈下予測

Estimation of the Settlement for Foundation on a Man-Made Island

斎藤 禎二郎*
Teijiro Saito

伊藤 典生**
Norio Ito

廣田 雅博**
Masahiro Hirota

平野 孝行*
Takayuki Hirano

要 約

関西国際空港は、大阪湾泉州沖約5km、水深18mの海底面上の埋立（埋立土量1.78億 m^3 ）により造成された面積約510haにおよぶ巨大な人工島に建設された我が国初の24時間空港である。人工島造成工事には、当初から「大水深」・「軟弱地盤」の下における「大規模急速施工」という土質工学上の課題があり、計測管理手法の発展に寄与してきた経緯がある。島内構造物についても埋立荷重45 tf/m^2 、下部構施工期間中の平均沈下速度が1.5～5.0 $cm/月$ という大きな沈下速度の下での施工となることから、各構造物毎の施工時期のズレが不等変形量となることが懸念され、その対策として基礎構造物の上げ越しを行った。

本報文は竣工後50年間を想定した上げ越し量を決定するために行った、不等変形量の予測手法について取りまとめたものである。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事の特徴
- § 3. 土質条件
- § 4. 沈下予測方法の概要
- § 5. 沈下量の計算手法
- § 6. マスターカーブの適用範囲設定
- § 7. 計算沈下量の補正
- § 8. 荷重の影響範囲
- § 9. 上げ越し量と実態沈下
- § 10. おわりに

§ 1. はじめに

関西国際空港は、大規模な人工島として大阪湾泉州沖約5kmに建設され平成6年9月4日に我が国初の24時間空港として開港した。当該人工島の造成は「大水深」・「軟弱地盤」の下における「大規模急速施工」として特徴づけられ、島内諸施設の建設に当たっては将来の沈下はもとより施工中における沈下及び沈下速度が大きく、そのため各構造物の施工時期のずれが不等変形量となることが懸念された。本報文では、その対策としての上げ越し量の決定に用いた沈下予測手法についてとりまとめた。

§ 2. 工事の特徴

人工島内の空港諸施設の建設工事における特徴を以下に列挙する。

* 土木設計部設計課

** 関西(支)新関西空港(出)

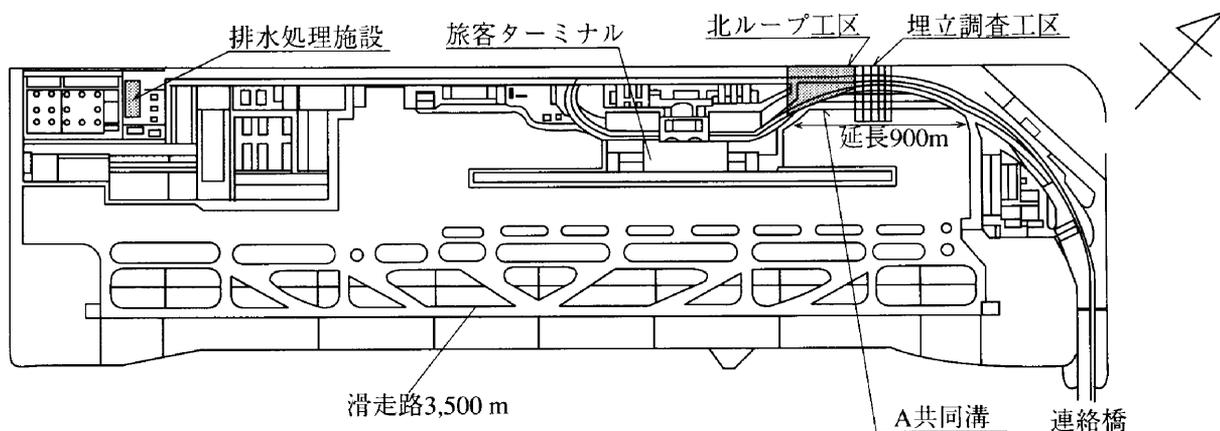


図-1 施設配置計画と弊社施工工区位置図¹⁾に加筆

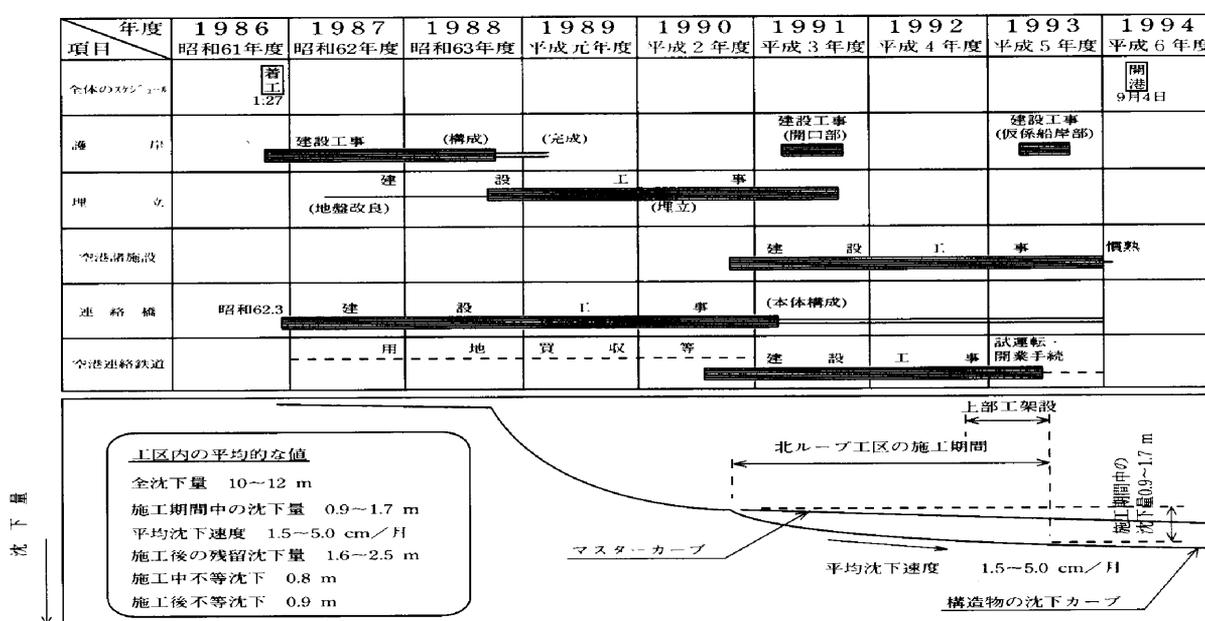


図-2 建設スケジュールと沈下傾向¹⁾に加筆

- ①人工島は短辺1250m,長辺4370m,総面積510ha,埋立土量1.78億m³に及ぶ。ただし,数量は1期分のみである。
- ②平均水深18mという大水深における造成工事であるため,埋立荷重は45tf/m² (441kPa)に及ぶ。
- ③その結果,沖積粘土層のみならず洪積粘土層にも正規圧密が生じて最終沈下量は10~12m程度見込まれた。
- ④約2年間の北ループ工区建設期間においても0.9~1.7mの沈下が見込まれ,沈下の速度が1.5~5.0cm/月と予測された。
- ⑤したがって,構造物によっては施工時期のズレによって施工中に0.8m,施工後に0.9m程度の不等変形が生じると予測された。
- ⑥施工後の残留沈下量は,1.6~2.5mが見込まれた。

上記のような特殊な条件の下で,弊社も人工島において道路鉄道北ループ土木工事, A共同溝築造工事(その2),及び廃水処理施設建設工事に携った。図-1に施設配置計画と弊社施工工区位置図を示す。

各工事における特徴は以下に示すとおりである。

- ①道路鉄道北ループ土木工事:人工島において最初に土木構造物を施工した工区である。300m×400mの範囲にボックスカルバート230m, U型擁壁250m, 橋脚28基, 橋台4基を施工した。基礎形式が多様で,人工島において最初に土木構造物を施工した工区でもあることから,沈下予測については先鞭をつけることとなった。以下北ループ工区とする。
- ②A共同溝築造工事(その2):北ループ工区の南側に

位置する延長900mの共同溝を施工した。増加応力はほとんど生じないため、沈下予測は埋立沈下管理データをそのまま利用した。

③排水処理施設建設工事：100m×200mの範囲に排水処理施設を構築した土木・建築工事である。数ブロックに分けているが各ブロック間の不等変形が生じることが予想された。そのため沈下予測により施工期間中及び将来のブロック間の不等変形量を算定し、上げ越し量を決定して躯体の構築を行った。

以上の3工事のうち本報文においては、北ループ工区における橋梁下部工の沈下予測についてとりまとめた。図-2に当該工区の沈下傾向の模式図と建設スケジュールを示す。

§ 3. 土質条件

人工島基礎地盤の地質は、図-3に示す単斜構造をした厚い沖積世・洪積世の堆積物によって特徴づけられる。層厚20mの沖積粘性土層の下には、数百mに及ぶ洪積層が堆積しており、合計では砂層も含め約180mを圧密の対象層とした。沖積層は島内全域においてサンドドレーンで改良されている。

北ループ工区における改良は、φ400@2500mmで行われた。土質定数については、詳細な事前調査に加えて埋め立て工事に先だって行われた調査工区における沈下計測と解析により決定された値を用いた。

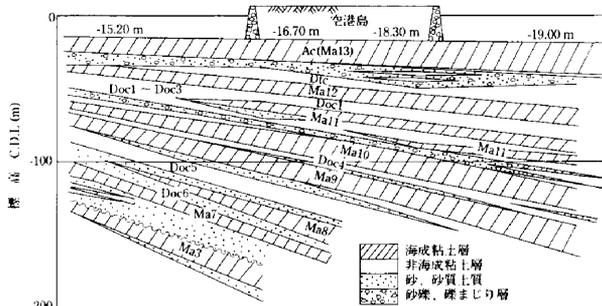


図-3 地質構造断面図（人工島北端）²⁾

§ 4. 沈下予測方法の概要

本報文が対象とする構造物の沈下は、埋立による残留沈下と構造物構築に伴う沈下（掘削による除荷の場合は、浮き上がりとなる）に分けられる。

埋立工事による沈下量は、100mメッシュの各格子点で埋立工程を考慮して計算されており、その経時沈下曲線（以下マスターカーブと呼ぶ）は先行して行われている試

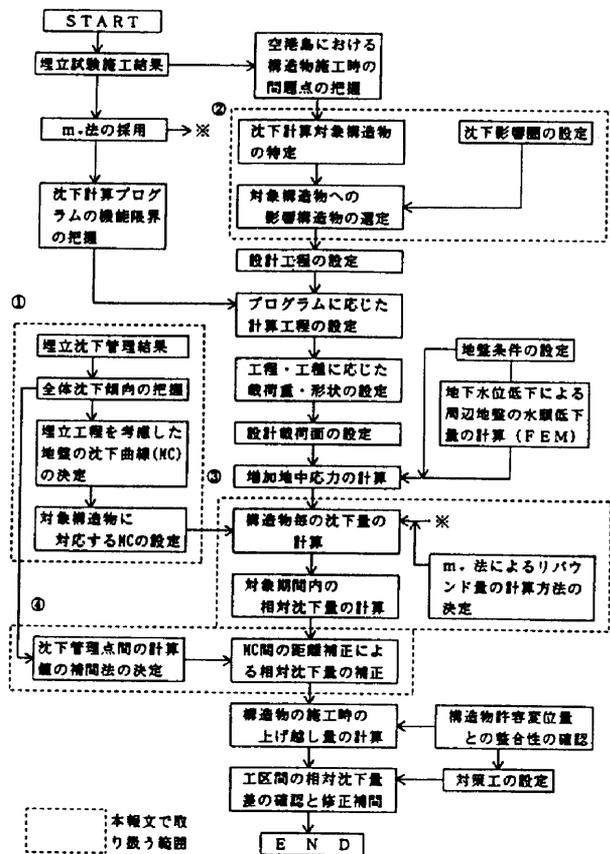


図-4 沈下予測フローチャート

験施工の結果をフィードバックすることによりほぼ正確に沈下の状況を捉えている。

構造物の沈下予測に際しては、マスターカーブに構造物構築に伴う地中増加応力のデータを付加して、§5に示す沈下管理プログラムを用いてm法により沈下計算を行った。図-4に施工時の地盤沈下予測のフローチャートを示す。

§ 5. 沈下量の計算手法

5-1 計算手法の概要

構造物の全沈下を埋立による沈下と構造物構築に伴う沈下の重ね合わせとしたが、埋立による沈下については埋立開始時から測定されている沈下管理プログラム及びデータを使用した。

各構造物の構築に伴う沈下については、各施工段階において構造物直下の地中増加応力を計算し、これを構造物近傍を代表するマスターカーブのデータに追加することで対応した。地中増加応力を追加したデータの模式的な沈下曲線を図-5に示す。

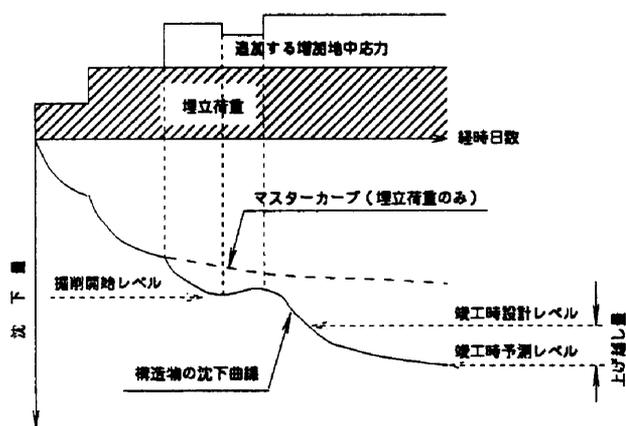


図-5 沈下曲線の模式図

計算の手順を以下に列挙する。

- ①各構造物の計算に用いるマスターカーブを決定する。
- ②各施工段階において構造物直下の地中増加応力を計算する。
- ③マスターカーブのデータに②で計算した地中増加応力を追加する。
- ④沈下管理プログラムで沈下計算を行う。
- ⑤沈下計算結果に § 7 に示す補正を加える。
- ⑥上げ越し量を決定し構造物の施工基面を決定する。

本章では、上記手順の内④に当たる沈下管理プログラムに採用されている沈下計算の方法と、プログラム使用上の制約条件、及び除荷重の取扱いについて記述する。

5-2 プログラムの概説

(1) 作成目的

当該プログラムは、埋立工事の沈下管理用に作成された。したがって、正規圧密状態を前提としており、荷重の入力については主として埋立施工状況に応じた疑似三次元応力を入力する方式を採用している。

(2) 最終沈下量の計算

沈下量の計算においては、段階載荷の各施工段階における沈下量が大きいため施工段階毎に層厚を変化させている。i番目の増加圧密圧力に対する各層の最終沈下量 S_{fi} は、 m_v 法により、式(1)で計算される。

$$S_f = \sum S_{fi} = \sum \Delta P_i \cdot m_{vi} \cdot H_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

添字*i* : *i*番目の載荷ステップを表す

ΔP_i : 増加圧密圧力 (kgf/cm²)

S_{fi} : *i*番目の増加圧密圧力に対する最終沈下量 (cm)

m_{vi} : 体積圧縮係数 (cm²/kgf),

$$m_{vi} = a \cdot \bar{P}_i^b \quad , \quad a, b \text{は無次元の係数}$$

\bar{P}_i : 平均圧密圧力 (kgf/cm²),

$$\bar{P}_i = P_0 + \sum_{j=1}^{i-1} \Delta P_j + 1/2 \cdot \Delta P_i$$

H_i : 計算時の層厚 (cm),

$$H_i = H_0 - \sum_{j=1}^{i-1} S_{fj}$$

H_0 : 初期層厚 (cm)

式(1)の特徴は、各計算ステップ毎に層厚の減少分を沈下量の算定に考慮していることにある。これは、当該工事においては最終沈下量が10m~12mにも及ぶため各経時沈下量の算定に際し、圧密対象層の層厚の変化が無視できないからである。

(3) 経時沈下量と圧密度

経時沈下量 S_t の計算は、式(2)で行われる。

$$S_t = S_{fi} \cdot U(t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

S_{fi} : 式(1)で示した*i*番目の増加圧密圧力に対する各層の最終沈下量 (cm)

$U(t)$: 経時時間*t*における圧密度、サンドドレーンで改良している沖積層はBarronの式を用い、洪積層ではTerzaghiの式を用いている。排水距離については三笠の簡便法によって設定されている。

5-3 計算処理上の制約条件

(1) 計算する応力の状態

前述のように、当該プログラムは埋立工事の沈下管理用に作成されたものであり、図-6に示すような除荷の状態や除荷によって発生する過圧密状態~正規圧密状態への移行などは当該プログラムにおける m_v 法の計算では想定されていない。

しかし、構造物の構築においては除荷の状態や除荷後の再載荷状態が生じるので、なんらかの対処が必要になる。対処方法については5-4で述べる。

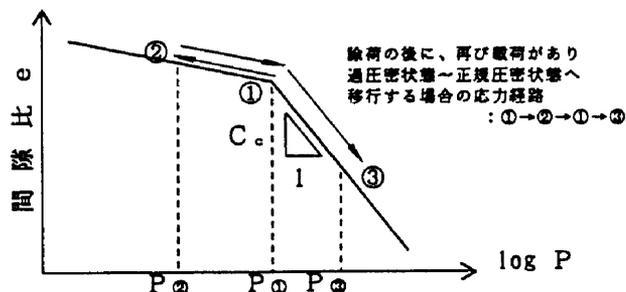


図-6 除荷のある場合の応力経路

(2) ステップ数の制限

当該プログラムにおいて荷重を載荷するステップの数は限られているため、構造物の構築に要する2年を分割し3ヵ月を1ステップと設定した。すなわち、3ヵ月間の施工に伴う荷重は一度に載荷されたものとして扱い、載荷時期については、設定したステップの中間日とした。

5-4 除荷重の取扱い

(1) FEM解析における除荷重の考え方

沈下管理プログラムの利用にあたっては、Biotの理論に基づく多層地盤の一次元圧密沈下現象としてモデル化した有限要素解析が行われている。本埋立工事によって洪積層の応力状態は過圧密領域～正規圧密領域に移行するが、応力～歪関係は図-7のモデルで与えられており、

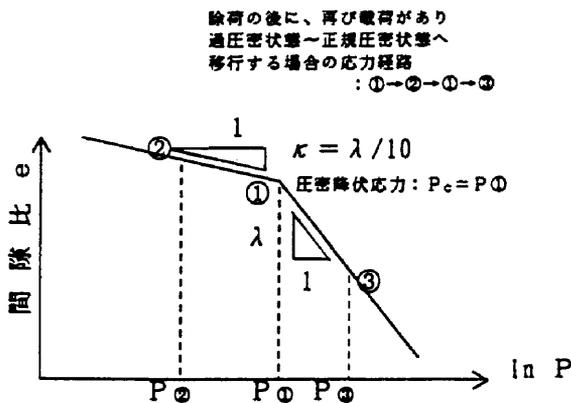
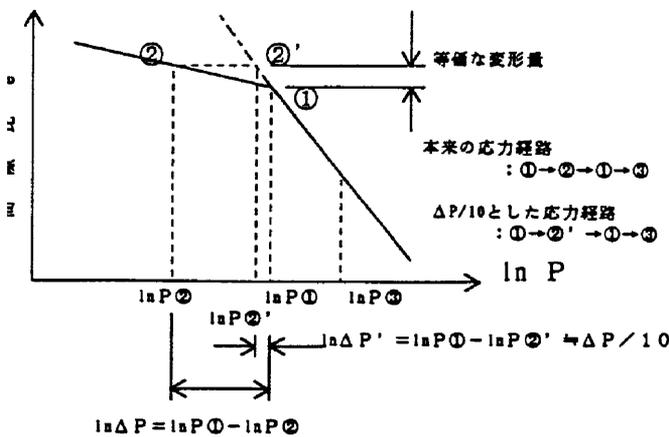


図-7 応力～歪関係のモデル



除荷時: $\Delta P' = \Delta P / 10$

載荷時: $\Delta P \leq P_0 - P_2$ のときは、 $\Delta P' = \Delta P / 10$

$\Delta P > P_0 - P_2$ のときは、 $\Delta P' = \Delta P$

$*m_v = \frac{de}{dp} = \frac{1}{1+e_0} \cdot \frac{\Delta e}{\Delta p} \approx \kappa \cdot \lambda$

図-8 等価な浮き上がりを得る場合のモデル

膨張係数 κ は、 $\kappa = \lambda / 10$ と設定してある。

実測沈下量との比較においては、実測初期沈下量が計算値より小さいことから、 κ は上記の値よりも小さい可能性があることが予想されたが、揚土後の沈下量の増分をみると計算値と実測値はほぼ一致しており実用上問題ないと判断されている。

(2) 沈下管理プログラムにおける除荷の考え方

構造物の沈下予測に際しても上記の応力～歪モデルを採用することとした。m_v法において上記と同様の計算を行うことは、体積圧縮係数 m_v を1/10にすることに対応するが、当該プログラムはこのような対応ができないので、図-8に示すように荷重を1/10にすることで等価な浮き上がり及び沈下を得られるように対処することとした。

本沈下計算では、体積圧縮係数 m_v は圧密圧力 P の非線形関数として定義したので厳密には m_v を1/10にすることと、増加圧密圧力 ΔP を1/10にすることは等価ではない。このため図-9に示すように、誤差が許容できるか否かを確認するため実際にテストデータにより計算を行い問題がないことを確認した。なお、最近の研究で洪積層については $\kappa = \lambda / 2$ とした方が良いことが判ってきている。

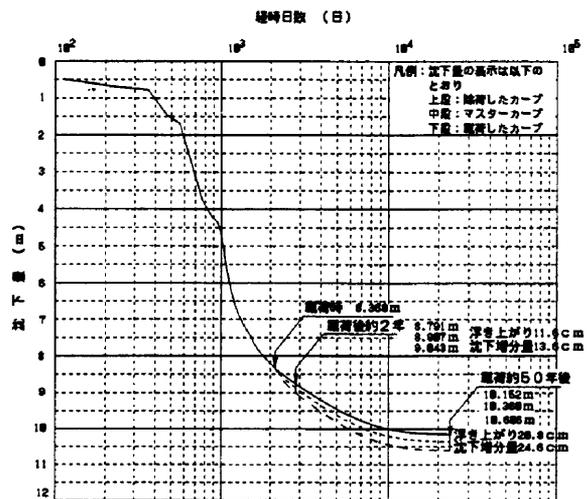


図-9 浮き上がりのテスト計算

§ 6. マスターカーブの適用範囲

マスターカーブは各構造物直下において存在するわけではない。そのため、施工期間中の沈下量の分布傾向から構造物近傍を代表するいくつかのマスターカーブを選定して計算に用いることとして、その結果に対して必要な補正を行うこととする。調査工区の平面位置及びマスターカーブの適用範囲を図-10に示し、マスターカーブの沈下傾向の一例として北ループ工区に隣接する調査工区の沈下カーブを図-11に示す。

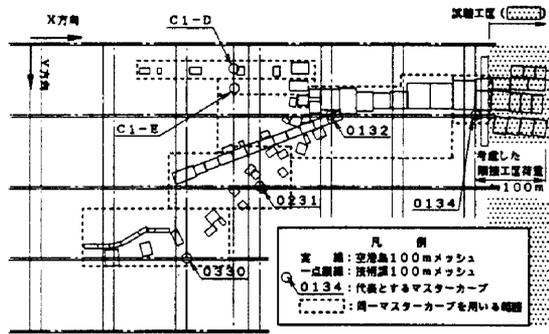


図-10 マスターカーブの適用範囲

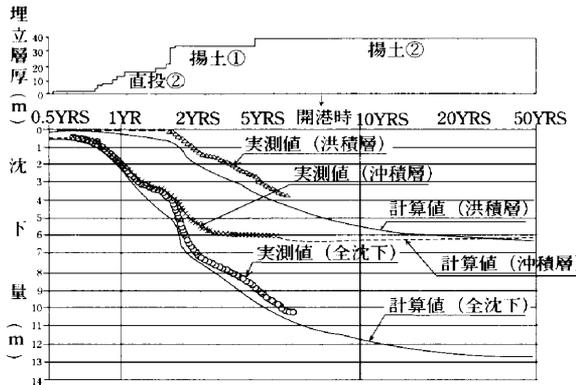


図-11 調査工区の沈下曲線³⁾

§ 7. 計算沈下量の補正

護岸法線方向は施工中の沈下量差が少ないため補正は行わないが、護岸直角方向は施工期間中の沈下量差が無視できないため補正を行うものとする。

図-10にマスターカーブの適用範囲を示したが、適用範囲の境界付近の構造物について考察すると、同じ地中増加応力であっても護岸側のマスターカーブを用いて計算された沈下量と、空港島中心側のマスターカーブを用いた沈下量は差分を生じることになる。

したがって、補正なしに沈下予測を行って管理した場合マスターカーブの適用範囲境界において段差を生じるため、適用境界で同一の沈下量となるように補正を行う。

図-12に、沈下計算の模式図を示し補正方法を説明する。本来、求めるべき補正沈下量 $S_{C'}$ (図中C')は、A点及びB点において、計算点Cにおける増加応力を用いて沈下計算を行い、図中の点A'と点B'間の内挿によって補間するべきである。しかし、この方法では1点について沈下計算を2回行った上で補正を行わなければならない。工期的に無理があったため、以下のような補間を行った。

①計算点Cはマスターカーブ計算点であるA点とB点に挟まれる位置にある。沈下量の計算はC点がマスターカーブAを代表とする範囲にあるのでマスターカーブAの

データにC点直下の地中増加応力を追加して計算沈下量 S_L を求める。

②空港島中心側の方が護岸側よりも沈下量が多いので、実際にはA点より空港島中心側にあるC点の沈下量は計算沈下量よりも大きいはずである。護岸法線方向に対しては補正は不要と判断して護岸法面直角方向(Y方向)の補正を行う。C点は、A点とB点に挟まれているので2点間の沈下量の内挿補間で求めることができるとして式(3)でC点におけるマスターカーブの値を算定する。

$$S_C = S_A + \frac{(Y_C - Y_A)}{(Y_B - Y_A)} \times (S_B - S_A) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

S_A, S_B, S_C : 各点におけるマスターカーブの沈下量 (cm)

Y_A, Y_B, Y_C : 各点の護岸法面からの距離 (m)

③A点とC点では、埋立荷重及び構造物荷重による応力レベルが異なるが、計算沈下量 S_L はA点のマスターカーブを用いているため、計算沈下量とは異なると思われる。そこで、沈下量は地中応力に比例するものとして式(4)より、C点での補正沈下量 $S_{C'}$ を求め、この値を当該構造物の沈下管理に用いることとした。

$$S_A : S_L = S_C : S_{C'} \text{ と仮定する。}$$

$$S_{C'} = S_L \times \frac{S_C}{S_A} \dots\dots\dots (4)$$

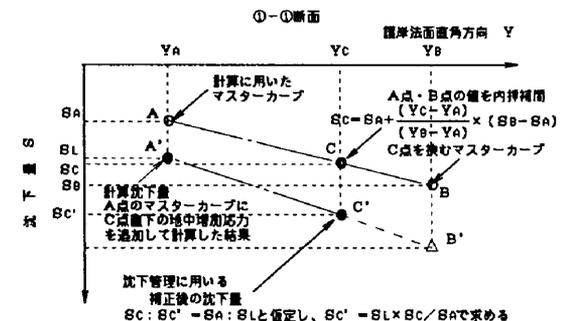
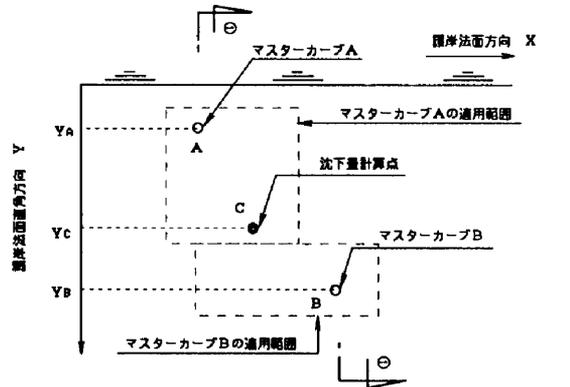


図-12 計算沈下量の補正

ここに、

S_L : 計算沈下量 (cm)

S_C' : C点における補正沈下量 (cm)

§ 8. 増加地中応力計算

8-1 計算手法

増加応力の計算は、各荷重・各ステップ毎に行う。計算方法は、Boussinesqの理論に基くNewmarkの公式を用いて長方形荷重として行った。その際、①地盤を等方弾性体でありかつ②載荷面では等分布であると仮定し、③複数の荷重による増加応力は個々の荷重による増加応力の重ね合わせによるものとした。

8-2 影響範囲の考え方

各計算ステップにおける荷重計算に当たって、当該工区については全ての構造物を施工計画に沿って考慮した。

しかし、隣接する工区については沈下予測に全ての構造物を考慮できる進捗状況ではなかったことや、対象範囲が広くかつ構造物が多種にわたることから、当該工区に有意な沈下または浮き上がりを及ぼすと判断できる影響範囲を設定することにした。影響範囲は、図-13に示す一様地盤に対するKöglerの地中応力分布をもとに決定した。

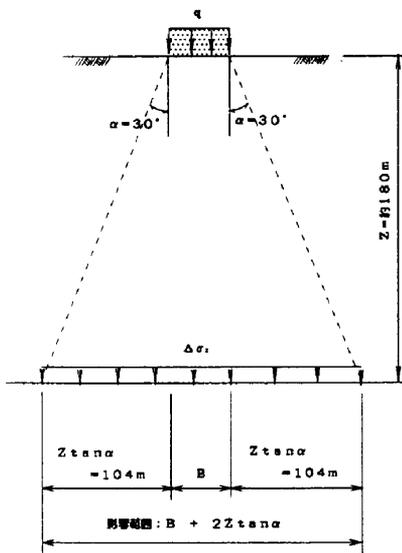


図-13 応力分布と影響範囲

当該工区においては、載荷面である計画地盤高～圧密対象層の下端は約180mであり、道路橋示方書等を参考に応力分散の角度を $\alpha = 30^\circ$ と仮定すると影響範囲は104mとなる。したがって、隣接工区については100mの範囲まで考慮することとした。各基礎の荷重は一次掘削、杭打

設、二次掘削、基礎構築、浮力、上部工に分割し工程に応じて増加応力を入力した。

§ 9. 上げ越し量と実態沈下

9-1 上げ越し量

施工基面高は、基本的にはこれまでに述べた沈下計算で得られた施工期間中の沈下分量を上げ越した値とした。決定に際しては、①施工開始時(施工基面)、②基準日である平成5年3月31日、③平成6年8月31日(開港予定と想定)、④平成16年8月31日(開港後10年)、及び⑤平成56年8月31日(開港後50年)の各時における補正後の計算沈下量を用いて施工縦断面図を作成した。

作成した施工縦断面図を基に、開港時、開港後10年、及び開港後50年の各基準日における縦断線形を基準値を設けて照査した。このような施工基面の決定方法を、道路・鉄道及び排水構造物等の全構造物について行った。

9-2 実測沈下

予測の一例として杭基礎であるN5橋脚基礎の施工期間中の予測沈下量と実測沈下量の経時変化を図-14に示す。図-15には予測沈下量と実測沈下量の相関を示す。相関係数は0.79とかなり信頼性の高い予測ができています。

図-14のように予測と実測とが完全一致せずに乖離する原因は、①沈下計算を行った時点では明確になっていなかった荷重がある場合や、②載荷時期がずれた荷重がある場合、また③土層の不均一性・層構成の複雑さ等の地盤条件に帰因するもの、あるいは④地中応力の算定に

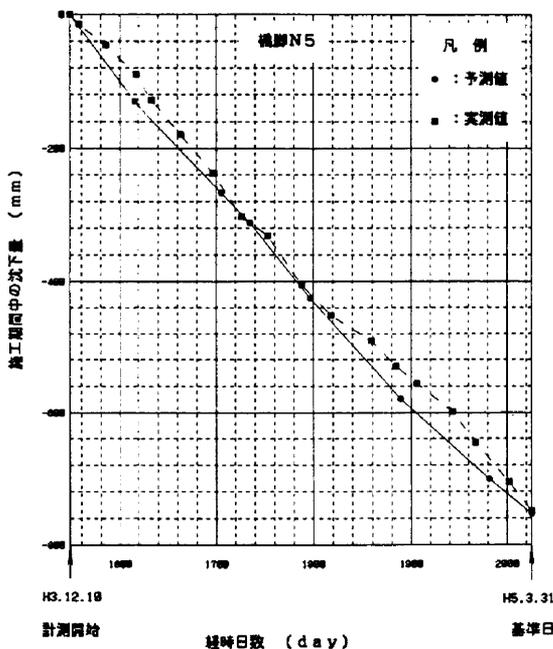


図-14 施工期間中の予測沈下量と実測沈下量

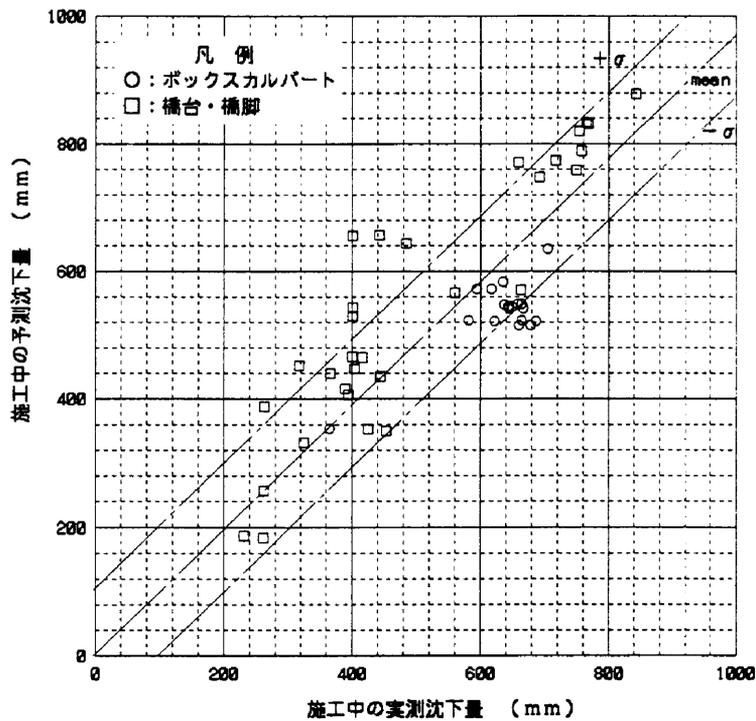


図-15 予測沈下と実測沈下の相関

当たって等方弾性体と仮定したことや除荷重の取り扱いを大胆に仮定したこと等の計算上の仮定条件に帰因するものなどである。また、⑤波浪の影響を受け易い海上やぐらからの測量であったことも一因と考えられる。

この内、原因の特定が可能な①・②についてはプログラムの制約条件の許す限り追加・修正計算を行った。

在の土質力学では非常に困難である。しかし、乖離の一原因として明らかな場合については極力対応した予測を行った上で、不確定要素による乖離に対処すべく構造物のメンテナンス等を行うべきである。関西国際空港(株)においては、施工後の構造物のメンテナンスを当初から考慮した沈下管理が当初から計画されている。施工後の沈下管理のフローチャートを図-16に示す。

§ 10. おわりに

多数の問題がある中で乖離の原因を特定することは現

最後に、沈下予測を始め全般にわたり御指導を頂いた関西国際空港(株)の関係各位に謝意を表します。

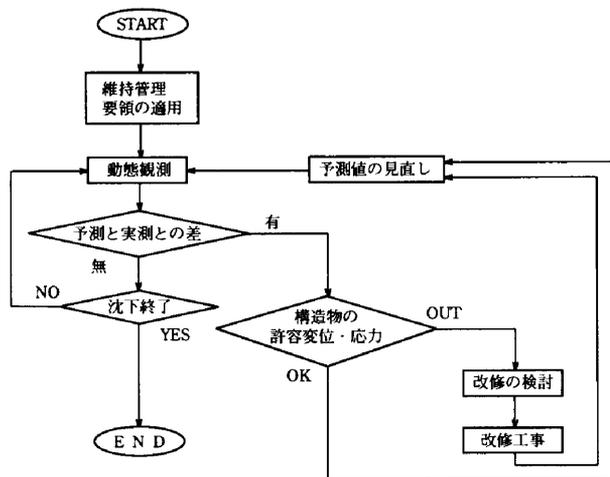


図-16 施工後の沈下管理のフローチャート

参考文献

- 1) 千山善幸, 田中信佳, 田辺義男: 関西国際空港の地盤改良工事, 建設の機械化, 1992.3
- 2) 小松明, 及川研, 岩崎三日子: 関西国際空港一空港島の造成一, 土と基礎, vol.39, No.5, 1991.5
- 3) 及川研, 新井洋一, 鈴木慎也, 元野一生: 沖合人工島の護岸近接区域における沈下と変形, 第27回土質工学研究発表会概要集, 1992. 6
- 4) 鈴木慎也, 新井洋一, 及川研, 元野一生: 沈下進行中の空港施設施工基面設定法, 第27回土質工学研究発表会概要集, 1992.6
- 5) 関西国際空港(株): 関西国際空港の造成技術, 平成5年8月