

(Ⅲ-9)

大きな沈下を伴う大規模・急速埋立 工事の情報化施工

Observational Method for the Large-Scale Reclamation Works in a Short Period on Soft Seabed

関西国際空港(株) ○及川 研*

鈴木 慎也**

山縣 延文***

By Ken Oikawa, Shinya Suzuki, and Nobufumi Yamagata

関西国際空港は、「大水深」「軟弱地盤」「大量急速施工」という特徴を有する大工事であり、最終沈下量は約10mにも及ぶものと推定されている。このような厳しい条件下で将来とも空港機能上問題のない天端高を有する空港島を工期内に造成するためには、沈下及び盛土の安定の両面からの情報化施工が必要である。

本文では、当建設海域のように土質性状が比較的均一な海域においては、先行調査工区によって事前調査で得られた土質条件の検証を行うことの有用性を示した。また、先行調査工区における動態観測の結果をもとに設計された埋立必要天端高を、現地の埋立の施工において過不足なく確保する上での埋立履歴の重要性を示し、合わせて埋立地表面の沈下データを用いた埋立層厚管理手法の一例を提示した。

【キーワード】情報化施工、施工管理、工程計画、計測

1. はじめに

現在大阪湾泉州沖 5kmの海上に建設中の関西国際空港は、世界初の本格的な海上空港であるとともに日本初の24時間空港である。

関西国際空港の建設は、「大水深」「軟弱地盤」「大量急速施工」という特徴を有する、類例のない大工事であり、特に最終沈下量は10mにも及ぶものと予想されている。

このような条件下で所要の天端高をもつ空港島を工期内に造成するには、事前の綿密な土質調査を実施することはもちろんのこと、建設途中において種々の調査・計測を実施しながら、沈下と安定に関して当初設定した地盤条件の妥当性をチェックしていくこと——すなわち情報化施工——が極めて重要である。

本文では、先行調査工区における沈下・安定解析で得られた結果——実測結果にもとづく沖積粘土層

の沈下のフィッティング、洪積粘土層の沈下状況等——を述べるとともに、埋立の段階施工の履歴を考慮し、埋立地表面の沈下計測データを用いた埋立天端高予測による埋立の情報化施工について述べる。

2. 関西国際空港の埋立工事の概要

関西国際空港空港島の建設工事の特徴は、以下の3点に集約される。

①大水深（平均水深約18m）

②軟弱地盤（約20mの沖積層とその下に数100mにわたる洪積層がつづく）

③大量急速施工（面積511ha、埋立土量約1億8千万m³の埋立をわずか6年で行う）

当現場の埋立の施工手順を図-1に示す。サンドマットとして敷砂①を敷設後、埋立地全域にわたりサンドドレーン(2.5m×2.5m)を打設する。その後底開パージにより敷砂②及び直投①を施工していき、直投②（施工高-6m）で6ヶ月放置し、沖積層の強度増加を待ったあと、直投③（同-3m）、揚土（同約6m～約12m）を施工する。揚土船により一気に施工が可能な高さは、盛土の安定面及び揚

* 建設事務所技術課 0724-32-8806

** 建設事務所技術課 0724-32-8806

***建設事務所技術課 0724-32-8806

土船の施工能力から CDL+9.5mに制限されており、これ以上高く埋立てる必要がある地区（約200ha）については、ダンプ・ブルドーザー等を用いた陸上土工によっている。以下前者を揚土①、後者を揚土②とよび区別する。

このような埋立に伴う最も重要な技術課題としては、正確な沈下の予測とそれに基づく必要十分な埋立天端高の管理及び埋立施工時における安定性の確保、特に、12m にも及ぶ埋立を一気に行う揚土①の施工時における盛土のすべり破壊に対する厳重な施工管理があげられる。

3. 調査工区における沈下・安定解析

事前の土質調査から求められた定数（表-1）によると、サンドドレーンで改良された沖積層は、揚土①直前までに約4.5m、最終的には約7mの沈下が予測された。一方、洪積層はO.C.R が1.3 程度の過圧

密粘土であり、無改良のため沈下は非常にゆっくり進み、開港後50年で約1.5mの沈下が予測された。実際の沈下がこれらの予測と異なった場合には、将来目標とする天端高を確保するために必要な埋立天端高、したがって埋立層厚が変化し、工程及び事業費に多大な影響を及ぼすため、埋立初期の段階で実際の沈下特性を把握し、その後の計画に反映させる必要があった。

一方、関西国際空港では大量急速施工を強いられていることから、調査・計測が埋立工事にできるだけ支障を与えないように配慮する必要があった。幸い、海底地盤の層序や土質性状は比較的均一であることが事前土質調査により判明していた。このため本工事に先立ち護岸・埋立の一部に先行調査工区を設けて（図-2, 3）沈下及び安定に関する地盤の挙動を詳細に把握し、事前設計の妥当性を検討し、一般工区における調査計測は可能な限り簡略化する

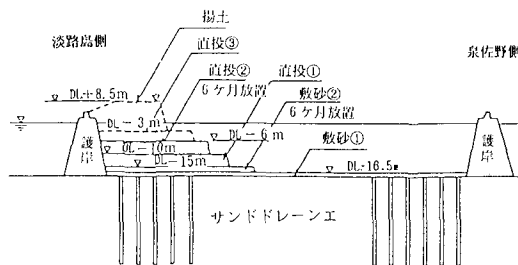


図-1 埋立の施工手順

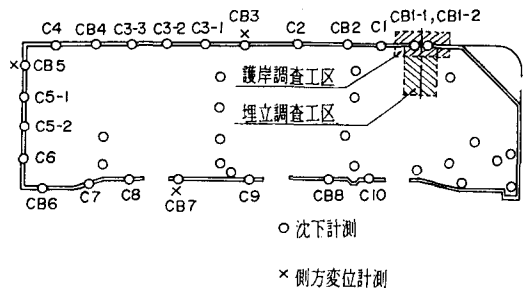


図-2 調査工区の位置と一般工区の計測地点

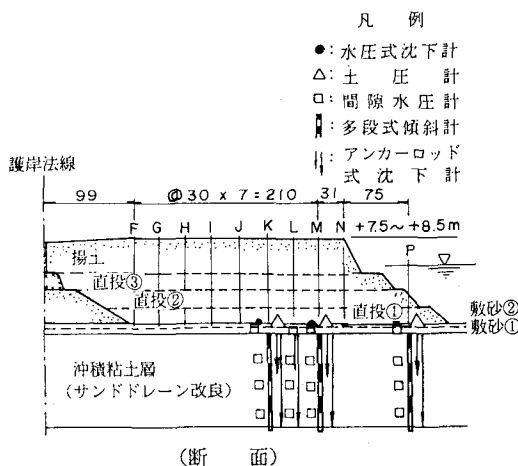
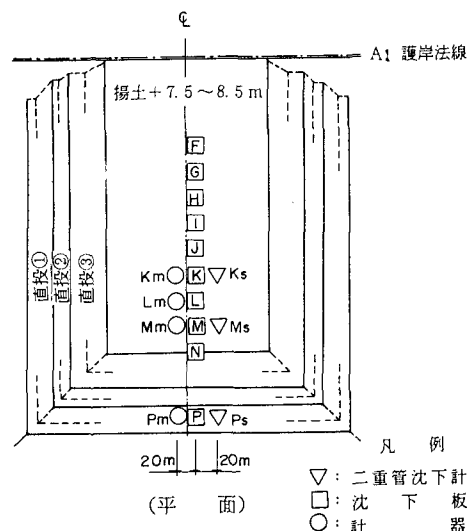


図-3 埋立調査工区における沈下計測器等の配置



沈下安定管理システムを採用することとした。

(1) 沈下解析¹⁾

調査工区では、沈下板、アンカーロッド、二重管式沈下計を設置して沖積層及び洪積層の沈下を計測した。計測された沖積層沈下実測値と当初計算値（mv法による）を図-4に示す。実測沈下量は当初予測と比較して小さめでやや速くなったため、実測沈下に合う定数を表-1のとおり求めた。なお、実測結果に基づいて埋立土の単位体積重量の見直しも行っている。また、この定数を用いて一般工区に配置されている沈下板の実測沈下量と計算沈下量を比較したところ、両者はほぼ一致することを確認している。

一方、実測されている洪積層の沈下は、直投②まではわずかであったが、直投③と揚土が行われると急に大きくなり、揚土後1年を経過した現在までに2mを超える沈下量となっている。当初予測に比べ実際の沈下は非常に速く生じていることになる。この原因は主として沈下計算時に設定した土層モデル

特に洪積砂層の排水層としての評価の違いによるものと考えられたため、土層モデルを再設定しFEMを用いた沈下計算を行ったところ、洪積層の沈下をよく説明できることが判明した。

この新しい土層モデルを用いた予測によると、空港島の開港50年までの沖積層及び洪積層の沈下量は当初設定より4m多い約11mとなった。

(2) 安定解析^{1) 2)}

調査工区においては、サンドドレーンで改良された沖積層粘土の強度が予測どおりに発現しているかどうかを確認するため、直投②の施工後の放置期間中に経時的にボーリングを行い地盤強度の発現を確認することとした。

サンドドレーンによる改良地盤の強度 C_u は、次式を使って平均的な強度増加量 ΔC で評価した。

$$C_u = C_{u0} + \Delta C \cdots \cdots (1)$$

$$\Delta C = \alpha \cdot (C_u/p) \cdot \Sigma (\Delta P_i \cdot U_i) \cdots (2)$$

ここに、

C_{u0} : 初期のせん断強度 ($0.2z(\text{tf}/\text{m}^2)$),

z : 海底面からの深さ)

(C_u/p) : 粘土の強度増加率($=0.3$)

Δp : 埋立荷重; U : 粘土の平均圧密度

α : 強度発現の遅れを考慮した補正係数($=0.9$)

埋立調査工区で得られた直投②後の強度増加量 ΔC の実測値と式(2)から求められる計算値の経時変化を図-5に示す。なお ΔC は粘土層の深度方向の平均値である。この図から実測強度増加量が徐々に

計算強度に近づき、放置期間6ヶ月目では計算強度と実測値はほぼ一致することが分かる。

一方、計算強度を用いた円形すべり計算の感度分析によると直投②後の放置期間は安定上6ヶ月が必要となっている。したがって、式(2)を用いて6ヶ月放置後の地盤強度を評価することが実用上問題ないことが確認された。

次に、安定計算のうえでは所要の安全率が得られるが、強度のバラツキも考えられるので、施工中の挙動（沈下と側方変位

表-1 圧密定数等の修正

圧密定数等	当初予測	修正予測
圧密降伏応力 p_c	$\Sigma \gamma' H$	$\Sigma \gamma' H + 0.07 \text{ kgf/cm}^2$
体積圧縮係数 m_v	$0.18 p^{-1.08} \text{ cm}^2/\text{kgf}$	$0.152 p^{-1.08} \text{ cm}^2/\text{kgf}$
水平方向圧密係数 c_h	$90 \text{ cm}^2/\text{day}$	$110 \text{ cm}^2/\text{day}$
埋立土砂の 単位体積重量	空中 1.8 tf/m^3 水中 1.0 tf/m^3	空中 2.0 tf/m^3 水中 1.2 tf/m^3

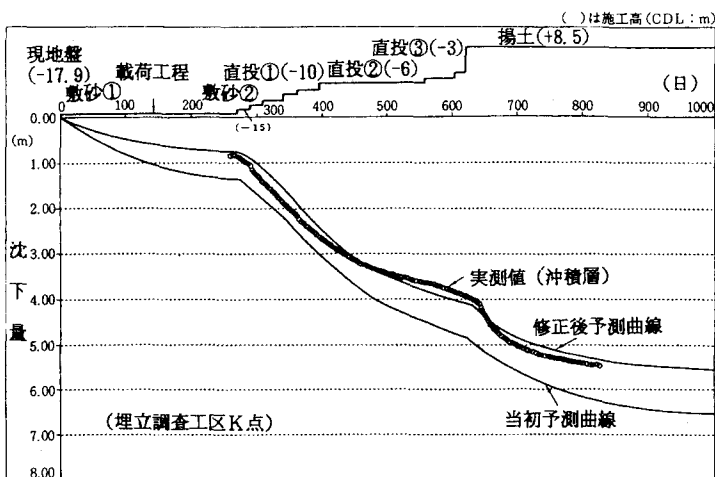


図-4 沖積粘土層の沈下実測値と予測曲線

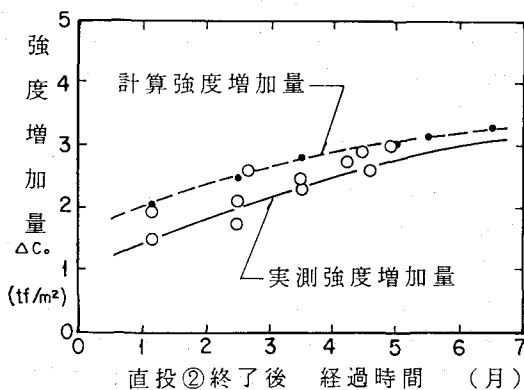


図-5 強度増加の経時変化

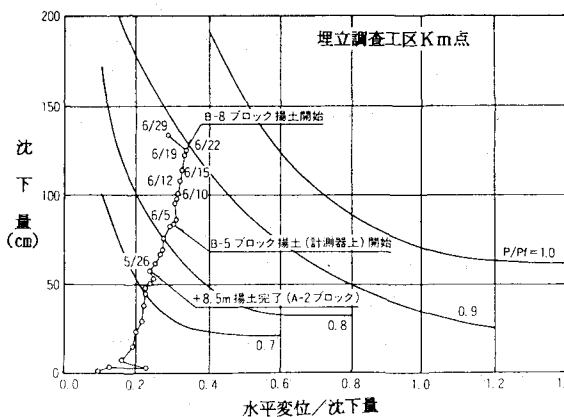


図-6 安定管理図

を計測しその安定性を実証することとした。図-6はその一例として「松尾・川村法」による安定管理図を示したものである。計画天端高までの揚土が完了後、管理線は $p/p_f = 0.9$ まで接近したが、1ヶ月後に押え盛土の役割を果たすブロックに揚土が行われると安定方向に移行し安定性が確保された。

これらの結果から、一般工区においても直投②後6ヶ月の放置期間を置いた後に当初どおりの揚土天端高で工事を進めることとした。

4. 埋立層厚管理

(1) 埋立層厚管理の意義

関西国際空港においては、島内各区域の舗装等を含めた地盤高が、開港時に空港計画上の所定の高さとなること、及び、長期的に空港機能に支障が生じ

ないように開港50年後においても少なくともHHWL (CDL+3.2 m) よりも高くなることが要求されている。

また、一方で不要に高く埋立を行うことは許されない。例えば、所定の高さよりも0.5m高く埋立てただけでも空港島全体での埋立土量の増分は約250万 m^3 に及び、空港の建設工程及び事業費に少なからず影響を与える。

当現場では施工中にかなりの沈下が生じること、また空港諸施設の建設の工程の都合からターミナル部など空港島の一部を集中的に先行して埋立を行うなど、空港島各区域の施工履歴の差が著しいことから、埋立完了までの原地盤沈下量が大きく異なっている。

施工履歴と沈下量の関係を示す一例として図-7に空港島内の1点における揚土前の沖積層の計算沈下量を示す。破線等は、敷砂①、敷砂②、直投①及び直投②の各載荷ステップ後の放置期間が長かった場合の沈下予測曲線である。直投②施工後の放置期間は各区域とも盛土の安定のため最低6ヶ月確保されるため、6ヶ月を越える放置期間の大小が沈下量に与える影響は比較的小さい。しかしながら、敷砂①、敷砂②、直投①は安定面からの放置期間の制約はなく、その施工後の放置期間が区域によって大きく変わることから、揚土直前の原地盤沈下量は優に1m以上の差が生じうることが分かる。

このように、施工履歴を無視して一定の天端高まで埋立を行った場合には、施工区域ごとの埋立層厚が変化し、このため埋立後の残留沈下が想定どおりにならず、不同沈下も招くことになる。

したがって、沈下予測等から算定される埋立必要層厚に過不足ない埋立を施工する必要がある。

(2) 層厚管理法

層厚の管理方法として、埋立に先立つ護岸の施工においては、堤体に多数の沈下板を設置し、各施工段階毎に事前測量を行い、実測沈下量をもとに施工天端高をブロック毎に設定することで層厚の管理を行った。³⁾

しかしながら、埋立海域は多数の土運船、揚土船が錯綜しており、多数の沈下計測を行うことは埋立の施工に支障をきたすため、空港島全域で19ヶ所しか沈下板を設置しておらず(図-2)、埋立の層厚

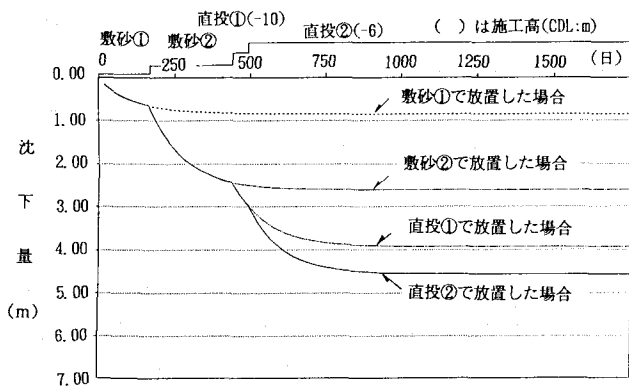


図-7 各载荷ステップで放置した場合の
沖積層計算沈下量

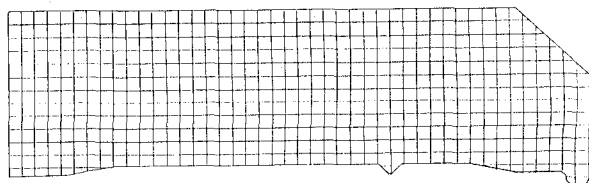


図-8 空港島100mメッシュ点

を護岸と同様に沈下板の実測値に基づいて管理することは極めて困難である。

このため、埋立については、揚土①までの層厚については基本的に沈下計算に基づいて管理することとし、揚土①直後に設置した埋立地表面沈下板の沈下計測をもとに、その後の揚土②の層厚管理を行って、最終的に埋立層全体の層厚管理を行うこととした。

このシステムの採用の前提条件として事前の土質試験結果及び護岸工事の実績から判断して空港島建設海域の沖積層の沈下特性はほぼ均一であることが確認されており、また、先行調査工区方式により沈下予測の精度向上が図られていることがあった。

揚土②を必要とする区域については、揚土②施工前に、揚土①の表面沈下実測値をもとに予測計算のチェックを行い、設定した揚土②の層厚の妥当性を確認しながら施工することで、より層厚管理の精度向上を図ることとした。

揚土①により最終埋立天端高まで仕上げられる区域についても、揚土①の表面沈下実測値に基づく沈

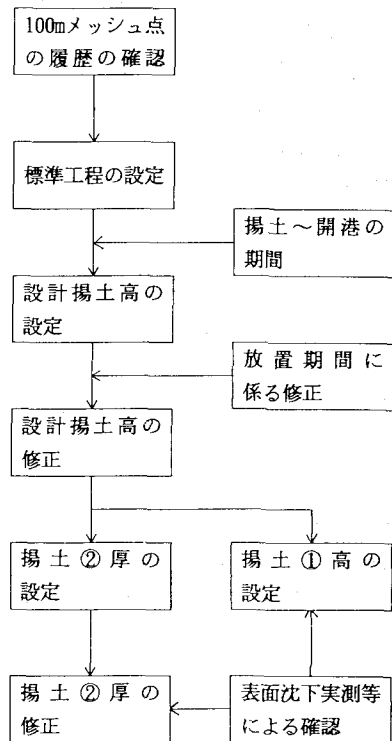


図-9 揚土①高さ及び揚土②厚設定フロー

下予測計算をおこなって将来天端高を予測し、所要天端高が確保できるか確認を行うこととした。

具体的な層厚管理法は以下のとおりである。(図-9)

①空港島全体を図-8のような100m×100mのメッシュに分割し各メッシュの4隅の揚土前の施工履歴を調べる。

②それらの履歴をもとに平均的と思われる履歴を設定し(標準工程)、各点毎に揚土から開港までの期間を考慮し、開港時に所定の天端高となり、かつ開港50年においても少なくともHWLよりも高くなる設計揚土高を算定する。

③各点の実際の工程と設計時に想定した標準工程は必ずしも一致していないため、沖積層の計算沈下量等を基に図-11に示すような各载荷ステップ後の放置期間の大小に係る設計揚土高の補正量を設定し、これをもとに②で算定した層厚と一致するよう設計揚土高を微修正する。(図-10)

施工計画(各载荷ステップ後の放置期間)に変

更が生じた場合は、再度設定する。

なお、層厚が同一であっても、水中と陸上の割合が異なれば、厳密には荷重が違い沈下量も異なるが、微修正の範囲では無視する。

- ④揚土①施工後 100mメッシュ点に沈下板を設置し表面沈下を計測する。揚土②を施工する区域については、揚土②を施工する前に、この実測値等をもとに予測計算のチェックを行い、設定した揚土②の層厚の妥当性を確認し、必要に応じて微修正する。

揚土①のみの区域も同様にして埋立層厚の妥当性を確認する。

- ⑤揚土②の施工は、揚土①表面が依然沈下継続中で天端高管理は無理であるため、基本的には揚土①表面に設置する丁張りをを用いた層厚管理とする。

ただし多数の丁張りを設置することはダンプ・

ブルドーザー等の施工に支障となるため、丁張りの設置は基本的には100mメッシュ点のみとし100mメッシュ点の間については揚土②の施工前後の丁張りの高さをもとにした天端高管理とする。

5. おわりに

空港島造成の使命は、所定の時期に所定の高さを満足する地盤を工期内に造成することであり、当現場のように大きな沈下を伴う大規模急速施工の場合は土質性状及び施工管理の両面に関する情報化施工が必要である。

現在空港島造成工事は最盛期を迎えており、既に約70%の土砂が投入されている。今後とも地盤の挙動、工程等を的確に施工計画に反映し、空港島の造成を進めていく予定である。

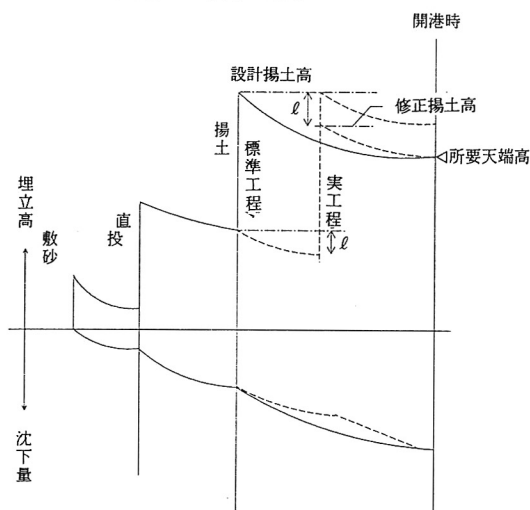
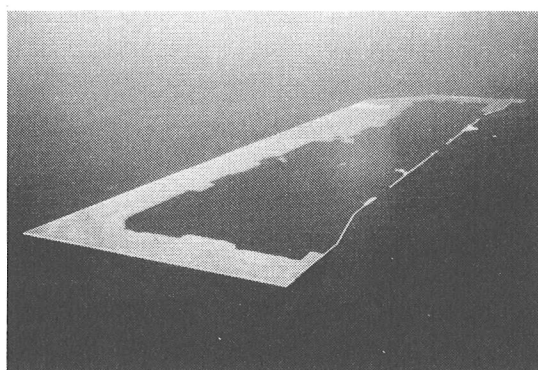


図-10 実際工程を考慮した設計揚土高修正概念図



空港島現況（平成2年8月16日）

【参考文献】

- 1) 及川 研, 鈴木慎也, 山縣延文: 大規模埋立工事の沈下安定管理のための調査計測トータルシステム, 新しい調査・計測技術に関するシンポジウム発表論文集, 1990年11月
- 2) 及川 研, 天坂三明, 井上文三, 岸田隆夫: 関西国際空港におけるサンドドレーン改良地盤の沈下安定管理(その2), 第25回土質工学会研究発表会論文集 平成2年6月
- 3) 前田 進: 大規模沖合人工島の建設における地盤改良工法の将来展望と一事例, 土木学会論文集第406号/Ⅲ-11 1989年6月

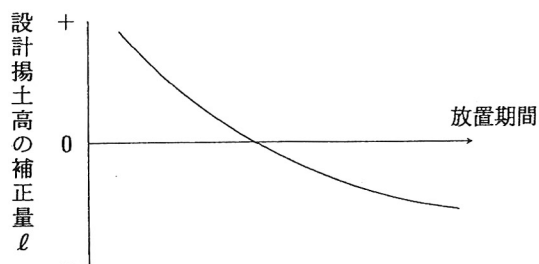


図-11 放置期間の大小に係る揚土高さ補正量概念図