

建物・地盤の沈下測定と地盤の剛性評価（その1）

金谷 祐二 秋野 矩之

Measurement of Settlement of Building and Ground under Construction and Estimation of Rigidity of Ground (Part 1)

Yuji Kanatani Noriyuki Akino

Abstract

This report describes settlement measurements of buildings and ground under construction and analyses on three construction sites. The following are disclosed as a result. (1) Building settlement can be successfully simulated through settlement calculation by means of Steinbrenner's equation, finite element method, and the multi-layer group pile equation. (2) Building settlement can be predicted well by calculations using the elastic modulus obtained from simulation analysis of heaving in excavation. (3) The elastic modulus is close to the value obtained from PS logging at small stress level, and to that from N-value (D'Appolonia's equation) at large stress level. (4) In the cases observed, the rigidity of the building did not influence differential settlement very much.

概 要

熊本ニュースカイホテル・四国電力西条火力発電所石炭サイロ・池袋ターミナルホテルで行なった地盤・建物の即時沈下の測定結果と解析結果について示した。要旨は、(1) 沈下計算に、直接基礎ではSteinbrenner式を、杭基礎では多層系群杭式または3次元FEMを使うことによって実際の建物沈下を良くシミュレートできる。(2) 根切り掘削時の地盤の浮き上がり測定結果のシミュレーションから求めた地盤の弾性係数を使うことによって実際の建物沈下を精度良く予測できる。(3) 地盤の弾性係数は、地盤に生ずる応力変化量によって影響される。応力変化量が小さい所ではPS検層によって求めた値に、応力変化量の大きい所ではN値から求めた値(D'Appolonia式)などに近い。(4) 今回の例では建物沈下は最大で25mm程度であったため、建物の剛性は、不同沈下に対し計算上あまり影響しなかった。

1. まえがき

建物の設計・施工に際して建設時の建物の即時沈下を予測しなければならない場合が多い。しかし、建物沈下の実測データが少なく、種々の沈下予測方法があっても、その妥当性について十分検証されていないのが実状である。より精度の高い沈下予測方法を開発するため実際の多くの現場において建物・地盤の沈下の実測と解析を行ない、沈下計算方法とその入力値の決定方法について検討している。ここでは、これまでに実施した3現場（熊本ニュースカイホテル、四国電力西条火力発電所石炭サイロ、池袋ターミナルホテル）で行なった即時沈下を対象とした測定結果と解析結果について示す。

2. 熊本ニュースカイホテル¹⁾

2.1. 概 要

平面形状は図-1に示すごとくであり、地上25階建の高層部と地上3階建の低層部からなり、ともに地下2階、深さGL-12.7mである。地盤状態は図-2のごとくであり、建物基礎はGL-25~30mのN値>50の洪積砂レキ層に地中壁坑を図-1のごとく配置して支持された。この層の直下の火山灰層のN値が低く、建物沈下への影響が懸念されたため、根切り掘削時の地盤の浮き上がりと建設時の地盤・建物の沈下を測定し、沈下の影響について調査したものである。

2.2. 地盤・建物の浮き上がりと沈下測定

図-1に示すごとく高層部中央においてボーリング孔を利用した二重管方式の地盤沈下計を図-2に示す深度に設置して測定した。浮き上がりと沈下測定の最終値を表-1に示した。浮き上がり測定期間の排土重量は、約

19 t/m²、建物の設計杭頭荷重は図-1に示すごとくである。排土重量より建物重量の方が平均で4 t/m²程大きい、浮き上がりとし下の絶対量は、ほぼ一致していた。

2.3. 多層系群杭解析とFEM(3次元弾性)によるシミュレーション

根切り掘削時の地盤の浮き上がり測定に関しては3次元FEMによって、建物建設時の沈下測定に関しては多層系群杭解析と3次元FEMを用いてシミュレートした。多層系群杭理論は山肩・八尾の群杭理論²⁾を多層系地盤に拡張したものである。両解析法の具体的な計算方法については文献1)を参照されたい。

シミュレーションの方法は、両解析方法とも地盤沈下測定の下方の計器の測定値と計算値が一致するように下層から上層に向かって順次弾性係数を決めている。シミュレーション結果の各地層の弾性係数を図-3に示した。建設時の沈下のシミュレーションに関しては、多層系群杭計算もFEM計算も地盤の弾性係数はほぼ等しい値であった。表-1に地盤沈下計の実測値とシミュレーションの計算結果を示した。図-3には当地盤に対して行なったPS検層、孔内水平載荷試験、一軸圧縮試験から求めた弾性係数、D'AppoloniaのN値から換算する式 $E = 102(N + 41)t/m^2$ から求めた弾性係数も示したが、杭先端から下方に離れた応力増分の小さい位置ではシミュレーションによる値はPS検層による値に近く、杭に近い応力増分の大きい位置ではN値などによって求めた値に近い。

3. 四国電力西条火力発電所石炭サイロ³⁾

3.1. 概要

最大貯炭量 13,000 ton、直径約 30 m、高さ約 43 mの鉄筋コンクリート造のサイロ3基が建設された(昭和58年

完成)。サイロ建設地点の地盤の地層構成は図-4に示すごとくで、サイロの基礎は、GL-20 m付近のN値30程度の砂レキ層に地中壁杭(厚さ0.6 m)によって、図-5のごとき配置で支持されるが、この層のN値が若干低いことから沈下に対する安全性を確認するため地盤沈下測定、杭鉛直応力測定などを行なったものである。

測定項目・測定位置は図-5に示すごとくである。地盤沈下測定はNo. 2サイロの中央部で、ボーリング孔を使った二重管方式の沈下計を、図-4に示す深度に設置して計測した。地中壁杭の鉛直応力測定は、図-5に示すNo. 2サイロの4本の杭に対し、図-4に示す3断面

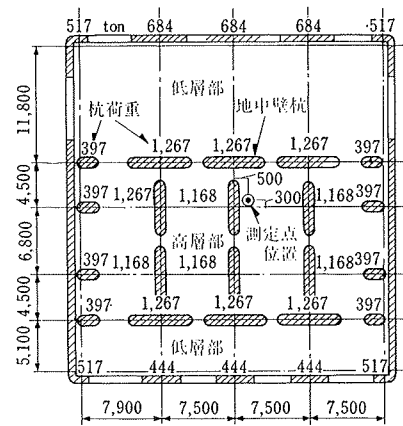


図-1 平面図(杭配置・測定位置)

計器深度 (m)	建物・地盤沈下 (mm)		地盤の浮き上がり (mm)		
	実測値	多層系群杭	三次元FEM弾性解	実測値	三次元FEM弾性解
GL-12.8 ※(GL-13.5)	8.0	7.3(杭頭沈下)	7.5(杭頭沈下)	9.4	13.0
GL-27.0	2.6	4.1	2.0	2.7	2.3
GL-33.0	1.1	1.1	1.2	1.06	1.0

※地盤の浮き上がり測定時

表-1 浮き上がり・沈下測定値・計算値

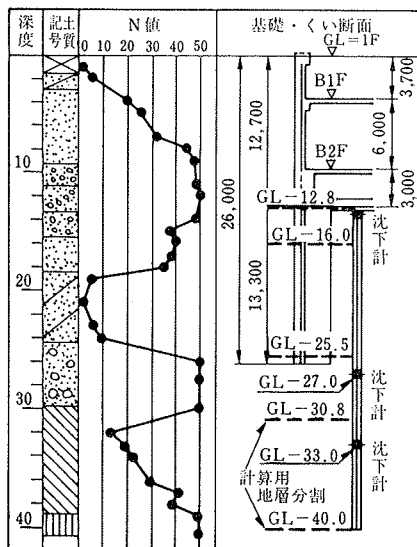


図-2 地盤状態・計器深度

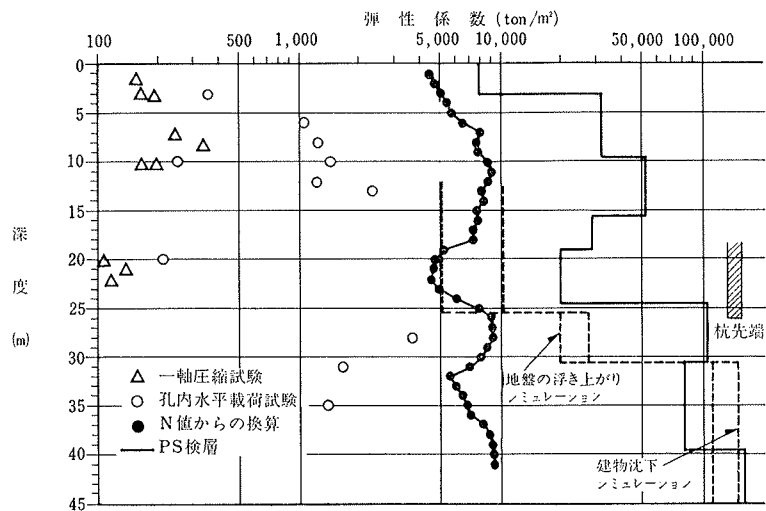


図-3 地盤の弾性係数(熊本)

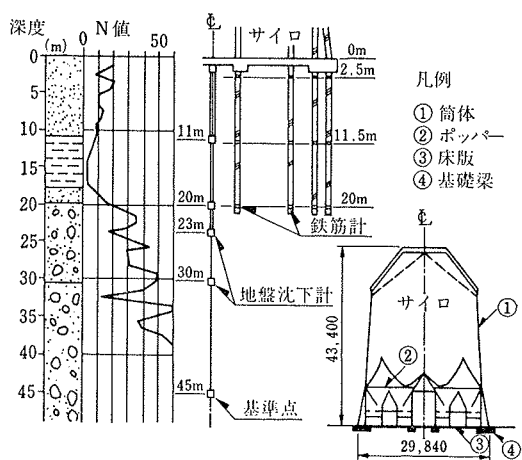


図-4 地盤状態・測点深度

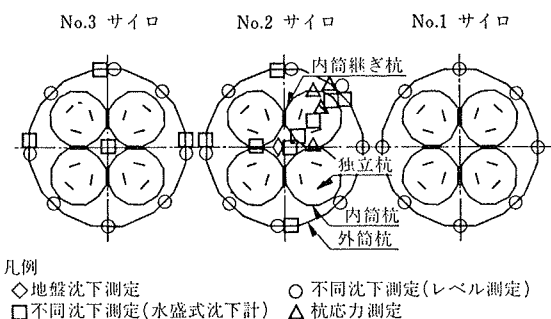


図-5 杭配置・測点位置

において鉄筋計で計測した。その他、不同沈下測定を
図-5 に示す位置で行なっている。

3.2. 沈下測定・杭応力測定

地盤沈下測定による各計器深度の地盤沈下と測定点間の地盤の平均ひずみ、および構造体重量と石炭重量の経時変化を図-6 に示した。各深度の沈下は、上載荷重の増加に比例しているが、石炭負荷試験時に見られるごとく、石炭を除荷しても、あまり戻らず、沈下が残留している。また、石炭を再載荷する場合に、履歴内荷重では、ほとんど沈下は増加しないが、履歴最大荷重に達すると若干沈下が増加している。

次に、各測定点間の地盤ひずみに関しては、図-6 によると GL±0m~11m 間のひずみは基礎コンクリート打設時に他に比べて大きな圧縮が生じているが、以後はほとんど増加していない。一方、その他の測定点間の地盤のひずみは、上載荷重に比例して増加している。特に杭先端下の GL-23m~30m のひずみは石炭載荷時に他に比べて大きく増加し(最大 1200 μ), 杭の先端到達荷重が増大したことが分かる。その下の GL-30m~45m では、ひずみの増加は少ない(最大 400 μ)。

サイロ床版の不同沈下を調べるため、図-5 に示すごとく No. 1~3 サイロの外周部をレベル測定によって、

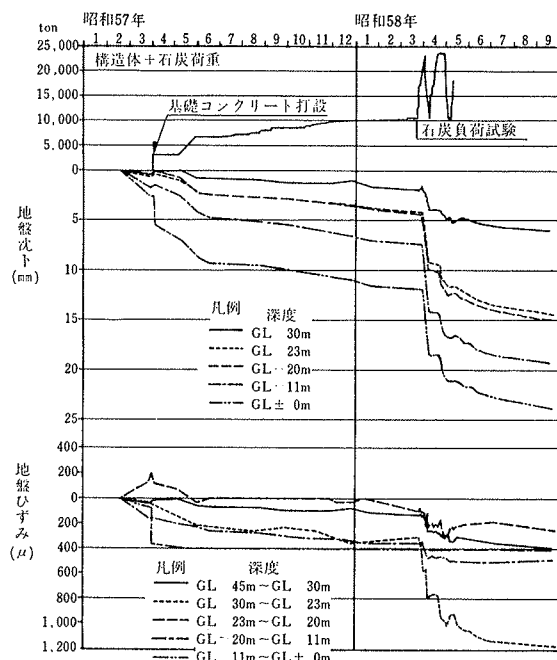


図-6 地盤沈下・ひずみ経時変化

No. 2, 3 サイロの内外部を水盛式沈下計で測定した。各測点の沈下傾向は、前述の地盤沈下測定での沈下傾向と全般的に一致している。また、不同沈下は最大でも 1/1,000 以下で構造上支障ない範囲の値であった。

杭の鉛直応力測定に関しては、図-5 に示す 4 本の杭で測定したが、コンクリート打設時の硬化熱の影響を受け、測定期間の前半に不合理な測定結果が見られた。ここでは、この影響が少なくなった石炭負荷試験時の傾向について述べる。図-7 は、図-5 に示す外筒杭の鉛直応力と石炭荷重の経時変化を示したものである。他の測定杭も定性的に同じ傾向を示しており、石炭荷重の増減に呼応して圧縮応力も増減している。しかし、石炭満杯時の 4 月 19 日から 4 月 30 日の間の一定荷重時においても圧縮応力が漸増している。また、石炭荷重が零になっても応力は零に戻っていないが、これは杭と杭、杭と地盤の間で応力伝達を経時的に行なわれているためと考えられる。石炭満杯時の最大圧縮応力は、外筒杭で約 95 t/m², 内筒杭 30 t/m², 内筒継ぎ杭 40 t/m², 単独杭 50 t/m² であり、これを各種杭の代表値とすると杭頭の合計荷重は約 9,000 ton となり、石炭荷重 13,000 ton に対し、約 4,000 ton 少なく、これが地盤に直接伝達されていることが考えられる。しかし、前述のごとく、杭・地盤の間で応力伝達が行なわれており、時間とともに杭への荷重伝達がさらに増加すると考えられる。

3.3. 3次元 FEM によるシミュレーション

サイロは図-5 に示すごとく 3 基が 39m 間隔で並んでいるが、計算では 1 基のみを対象とした。計算方法に

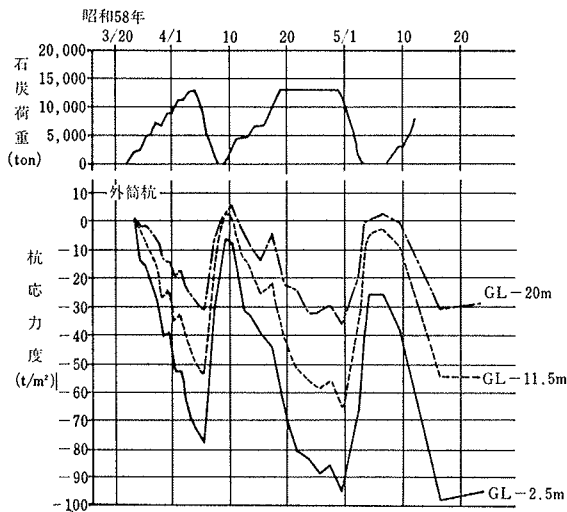


図-7 杭応力経時変化（石炭負荷時）

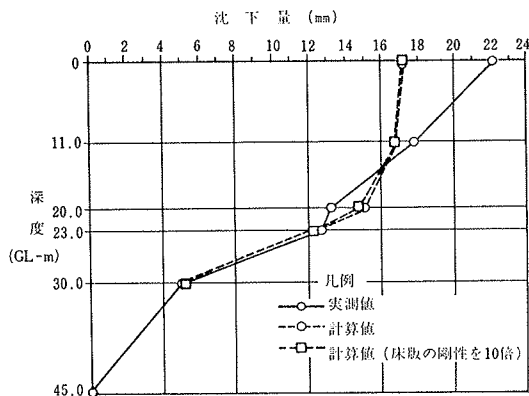


図-8 地盤沈下（鉛直分布）

については文献4)を参照されたい。シミュレーションでは、サイロ部分の剛性として、床版（厚さ75cm）の剛性を考慮した場合と、床版の剛性を10倍にした場合の計算を行なった。サイロ荷重は、石炭負荷試験時の各種杭への荷重配分実測値を考慮して、外筒杭、内筒杭、内筒継ぎ杭、独立杭に載る床版および、その他の床版にサイロ荷重の45%、15.7%、4.8%、4.6%、29.7%が作用するものとした。

シミュレーション方法は、2.3.と同様、地盤沈下測定の下方の計器の実測値と計算値が一致するように、下層の地盤の弾性係数から順次決めていく。表-2は、床版コンクリート打設時、石炭負荷試験直前および石炭満杯経過時の3段階についてシミュレートして求めた地盤の弾性係数である（床版コンクリート打設時には床版の弾性係数は零とした）。各地層の弾性係数は、各段階とも下層地盤の方が大きい、これは下層の方が堆積年代が古く堅いので、サイロ荷重による応力増分が小さいため高い弾性係数に評価されたものと考えられる。この3段階のシミュレーションでは、荷重が大きい段階ほど、各

深 度	基礎コンクリート打設時	石炭負荷試験前	石炭満杯経過時
GL ± 0			
GL-11.0	2,000	1,000	1,000
GL-18.5	2,000	1,000	1,000
GL-21.0	17,000	8,000	8,000
GL-30.0	100,000	13,000	12,000
GL-45.0	150,000	50,000	40,000

表-2 シミュレーション（弾性係数）

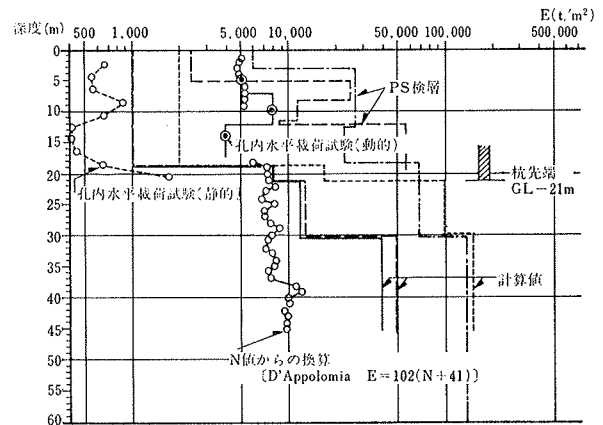


図-9 地盤の弾性係数

層の弾性係数は低下する傾向にあるが、これも前述と同じ理由で応力増分が大きくなり弾性係数が低く評価されたためであろう。図-8は石炭満杯時の地盤沈下の鉛直分布の実測値と計算値である。計算値として、サイロ床版の剛性のみを考慮した場合と、その剛性を10倍にした場合を併記したが、基礎の剛性による差はほとんど見られず、また、平面的な沈下量分布に関しても両者の差は少なく、当現場に関しては、建物剛性による沈下性状への影響はあまりなかった。

3.4. 地盤の弾性係数

図-9にシミュレーションで求めた地盤の弾性係数と深さの関係を半対数グラフで示した。また、当敷地で行なった孔内水平載荷試験（静的・動的）、D'AppoloniaのN値から換算する式、およびPS検層から求めた弾性係数を併記した。シミュレーションで求めた弾性係数は、杭先端付近および以浅の建物荷重による応力増分が大きいと考えられる部分では、PS検層による値よりかなり小さく、N値からの換算値などと同等程度か小さい。杭先端部より深く、応力増分も小さいと考えられる部分では、大きく評価され、N値からの換算値より大きく、PS検層による値に近くなる。

4. 池袋ターミナルホテルビル

4.1. 概要

当建物は図-10に示すごとくで、地上25階の高層部と

地上4階の低層部からなり、両部とも地下3階（床付けはGL-12m）である。両部を同時一体施工することになったが、取合い部で不同沈下による障害が懸念されたため、根切り時の地盤の浮き上がり測定から地盤の弾性係数を評価して建物沈下を予測し、さらに建物沈下の実測も行ない、沈下の影響を検討することになった。

地盤状態は図-11に示すごとくである。当建物は、GL-11m付近の層厚4~6mのN値>40の砂レキ層にベタ基礎で支持される。地盤と建物の浮き上がり測定は図-10に示す位置にボーリング孔による二重管方法の沈下測定装置で、図-11に示す深度に計器を設置して測定した（基準点深さはGL-48m）。

4.2. 地盤・建物の浮き上がり測定

根切り工事の掘削深さがGL-6m, 9m, 12mの時（各掘削深さでの排土重量は、それぞれ9.9t/m², 14.4t/m², 19.4t/m²である）の地盤の浮き上がり測定の平面分布と鉛直分布を図-12, 13に示した。浮き上がりの平

面分布状態は中央付近で大きく周辺部に向って急減している。また、鉛直分布は、GL-22mからGL-31mにかけて急減しており、GL-30数mあたりで零に収束すると見なせる。

建物・地盤の沈下測定に関しては、竣工直前の建物沈下の平面分布を図-14に地盤沈下の鉛直分布（高層部中央）を図-15に示した。定性的な傾向は地盤の浮き上がり測定と同じである。この時点での建物荷重は、高層部26.1t/m², 低層部11.7t/m², および13.3t/m²である。

4.3. シミュレーションと地盤の弾性評価

シミュレーションには有限層厚の弾性体に矩形の一律分布荷重が作用する場合の沈下量を求めるSteinbrenner式を多層系地盤に拡張して用いた。シミュレーションの方法は2.3.と同様であり、図-11に示すごとく3層に分け、GL-48m以深の沈下は無視し、各計器深度における計算値と実測値が合うように下層の方から弾性係数を決める。根切り掘削時の地盤の浮き上がり測定の実測値に対し、シミュレーションして求めた地盤の弾性係数を表-3に示した。表に見られるごとく、掘削深度が増し、排土除荷による応力変化量が大きくなるに従って弾性係数が低下している。この各層の弾性係数を使って求めた

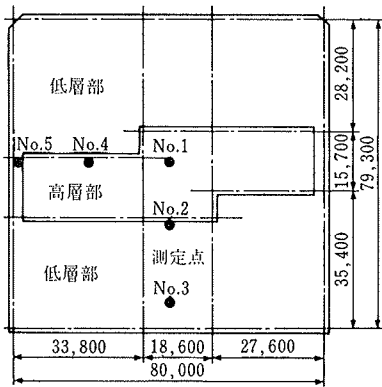


図-10 平面図・測定点位置

掘削深さ GL-m	第1層 GL-12m~23m	第2層 GL-23m~32m	第3層 GL-32m~48m
GL-6.2	22,500t/m ²	10,500t/m ²	253,000t/m ²
GL-9.0	20,500t/m ²	9,100t/m ²	250,000t/m ²
GL-12.0	15,000t/m ²	8,500t/m ²	200,000t/m ²

表-3 地盤の弾性係数

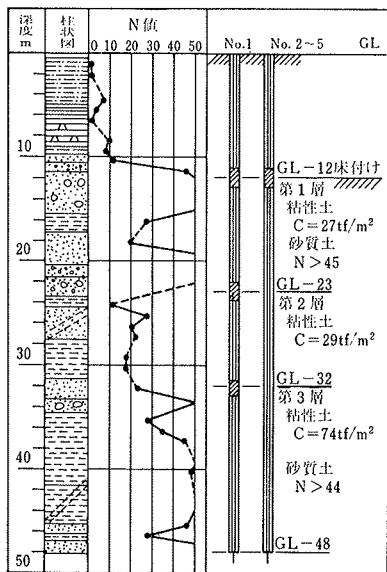


図-11 地盤状態・測定点深さ

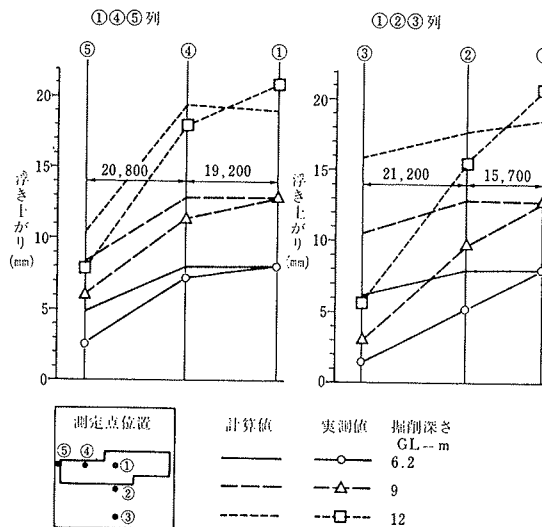


図-12 地盤の浮き上がり（平面分布）

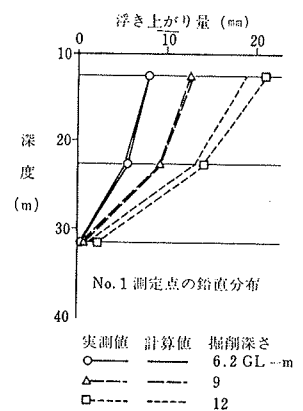
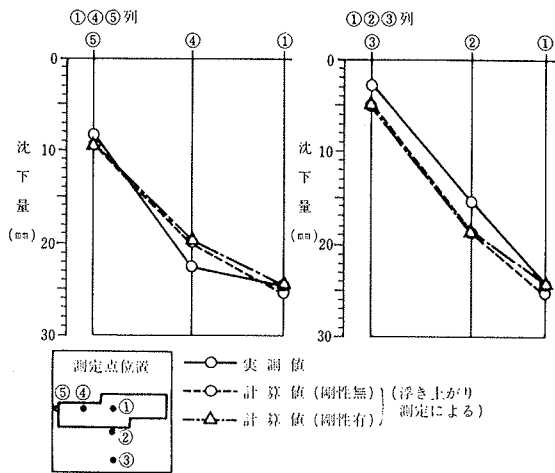
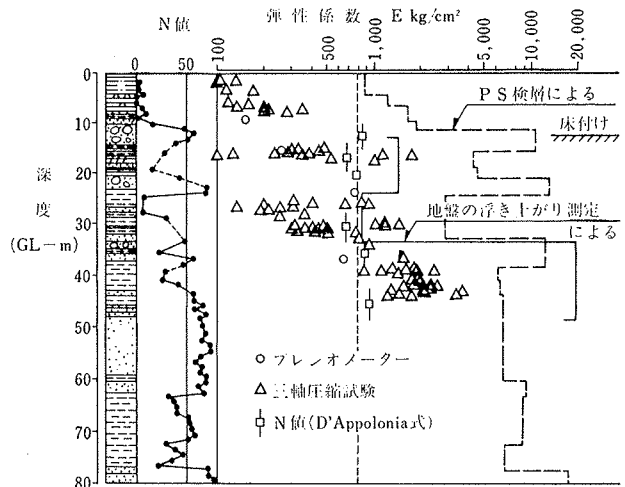


図-13 地盤の浮き上がり（鉛直）

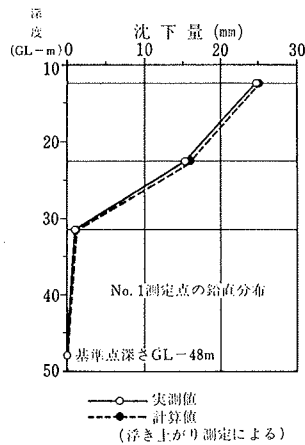


図一14 建物沈下（平面分布）



図一16 地盤の弾性係数

地盤の浮き上がりの計算結果を実測値とともに、図一12, 13に示した。図一12の床付け深度での地盤の浮き上がりの平面分布に関しては、計算値に比べ実測値の方が、地盤の浮き上がりが中央から周辺に向かって減少する勾配が急である。



図一15 地盤沈下（鉛直）

次に、表一3の掘削深さGL-12mの時の地盤の弾性係数を用いて求めた建物沈下の予測計算値を実測値とともに図一14, 15に示した（地下部分の剛性を考慮した場合と考慮しない場合の計算を行なった）。沈下の平面分布、鉛直分布は両者ともによく一致しており、根切り掘削時の地盤の浮き上がり測定の実測値から求めた地盤の弾性係数を使った沈下計算は、実際の建物沈下を精度良く予測できることを示している。

図一16に地盤の浮き上がり測定から求めた地盤の弾性係数（掘削深さGL-12mの時の値）と深さの関係を半対数グラフに示した。また、同図にPS検層、プレシオメータ、三軸圧縮試験、D'AppoloniaのN値による換算式から求めた地盤の弾性係数を併記した。床付け面に近い応力変化量の大きい地層では、N値からの換算値などに比較的近いが、床付け面から下に遠ざかった応力変化量が小さい位置ではPS検層から求めた弾性係数に匹敵する大きさになっている。

5. まとめ

以上3現場における測定および解析結果をまとめると、(1) 多層系群杭理論、FEM弾性解およびSteinbrenner式を多層系に拡張した沈下計算式は、それぞれ建物沈下の実測値を良くシミュレートでき、沈下予測に有効であることが分かった。(2) 根切り掘削時の地盤の浮き上がり測定結果から求めた地盤の弾性係数を用いることによって、建物沈下を精度良く予測できる。(3) 地盤の弾性係数は、応力変化量の大きさによって使い分ける必要があり、応力変化量が小さい所ではPS検層によって求めた弾性係数に、応力変化量が大きい所ではD'AppoloniaのN値からの換算式などによって求めた値に近い値となる。しかしその定量的な関係については、さらに検討する必要がある。(4) 今回の3現場の例では、基礎や建物の剛性の大きさは沈下性状にあまり影響しなかった。

参考文献

- 1) 金谷祐二・秋野矩之：熊本ニュースカイホテル建設時の地盤・建物の浮き上がりと沈下測定，日本建築学会大会学術講演梗概集，（昭和61.8），pp. 1165～1166
- 2) 山肩邦男・八尾真太郎：マサツ群杭の沈下に関する理論解について，第9回土質工学研究発表会，（1974），pp. 481～484
- 3) 広瀬譲治・金谷祐二・秋野矩之：石炭サイロ建設時の沈下・杭応力の測定（その1，2），第21回土質工学研究発表会，（昭和61.6），pp. 1057～1064
- 4) 飯森照好，秋野矩之，他：池袋ターミナルホテルビルの沈下予測と実測（その1，2），日本建築学会大会学術講演梗概集，（昭和60.10），pp. 1063～1066