

建物・地盤の沈下測定と地盤の剛性評価（その2）

金谷 祐二 秋野 矩之

Measurement of Settlement of Building and Ground under Construction and Estimation of Rigidity of Ground (Part 2)

Yuji Kanatani Noriyuki Akino

Abstract

Settlement and heaving of building and ground were measured at a number of construction sites to investigate real settlement of buildings and grounds. The measurement results were simulated by means of multi-layer elastic theory or FEM, and the estimated moduli of elasticity for the grounds were higher than the values used up to this time for calculation of settlement, although they were reduced as strains became larger. The correlations between estimated modulus of elasticity and well shooting, N-value, and unconfined and triaxial compression tests were obtained. The calculations of settlement using the elasticity equation agreed with measurements at the construction sites.

概 要

各地の工事現場で根切り掘削時に地盤の浮き上がりを、建物建設時に地盤・建物の即時沈下を測定し、建物の沈下の実情を調査するとともに、この測定結果に対し、多層系弾性理論（直接基礎、くい基礎）やFEMでシミュレーション解析し実地盤の弾性係数を評価した（評価弾性係数と呼ぶ）。この評価弾性係数は、全体的に、従来使われている沈下計算の弾性係数評価方法の値より大きく、また、ひずみ依存性があり、排土荷重や建物荷重によるひずみ増分が小さい部分では評価弾性係数はPS検層から求まる弾性係数に匹敵する大きな値となり、ひずみ増分が大きくなると急に低下する。このひずみ依存性を考慮して、各現場で求めた評価弾性係数についてPS検層の弾性係数、標準貫入試験のN値及び一軸・三軸圧縮試験の弾性係数との相関関係を求めた。この相関式を用いた計算値と実測値の対応は良く、今後の沈下予測に適用できるものと考えられる。

1. まえがき

建物の設計・施工に際して、建設時の建物の沈下を予測するケースが増えている。建物の即時沈下の予測方法としては、地盤を弾性体と仮定し、地盤の弾性係数を地盤調査や土質試験から推定する方法がある。しかし、これまでに行なわれてきた沈下実測例から見ると現行の推定方法では、予測計算値が実測値の数倍に過大評価している場合が少なくない。安全かつ経済的な設計施工のために、より実情に合った沈下予測方法の開発が望まれる。

以上の観点から沈下予測方法の開発のため以下の調査・検討を行ってきた。

(1) 実際の地盤の剛性を調査するため、現場で根切り掘削時に地盤の浮き上がり測定及び建物建設時に地盤・建物の沈下を測定した。また、これらの測定結果を多層系弾性理論式でシミュレーション解析し実地盤の弾性係数を評価した（以下、評価弾性係数と呼ぶ）。沈下・浮き上がり測定を行なった現場は、前回報告¹⁾した、熊本ニュースカイホテル²⁾、四国電力西条火力発電所石炭サイロ³⁾、

池袋ターミナルホテルビル⁴⁾と今回新たに行なった名古屋東急ホテル⁵⁾及び通産省総合庁舎、興和築地ビルなどがある。

(2) 上記した多層系地盤における弾性沈下計算式を直接基礎の場合とくい基礎の場合についてそれぞれ求めた。さらに、建物の剛性を考慮できるプログラムを開発した。
(3) 評価弾性係数と地盤調査・土質試験結果の相関関係について調査し、実情に即した弾性係数を地盤調査や土質試験から推定する方法を検討した⁶⁾。

今回の報告は、各現場で行なった沈下測定から求めた実地盤の評価弾性係数及び地盤の弾性係数を地盤調査・土質試験から推定するための相関式とその妥当性について、前回報告のデータ及び名古屋東急ホテルの調査結果等を用いて説明する。

2. 沈下実測に基づく地盤弾性係数評価

2.1. 沈下測定（名古屋東急ホテル）

名古屋東急ホテルで行なった沈下測定について示す。当敷地は名古屋市中区栄に位置しており、建物平面は図

一1の通りである。中央の T 字形の高層部は16階、周辺の低層部は4階と5階、地下階は両部とも2階である。

当地盤の状態は図-2に示すごとくであり、建物の基礎はGL-11mの砂層にベタ基礎で支持されている。この支持層直下に比較的N値の小さい地層があり、これによる建物沈下への影響が懸念された。このため、根切り掘削時に地盤の浮き上がりを測定し、このシミュレーション解析から地盤の弾性係数を求め、これを用いて建物沈下を予測している。また、建設時に地盤・建物の沈下測定を行ない安全性を確認している。浮き上がり・沈下の測定方法は、他の現場と同様な方法であり、図-2の右側に示すごとくボーリング孔に鋼製ロッドを、排土荷重・建物荷重による変位への影響が無視できる深度（ここではGL-55mとした）まで降ろし、ここを測定の基準点としている。沈下計はセンターホール型であり、これにロッドを通して所定の各深度まで降ろし、定着羽根を拡げて地山に固定する。ロッドは蛇腹状の樹脂チューブで被覆されていて上下方向の力を受けないようになっている。

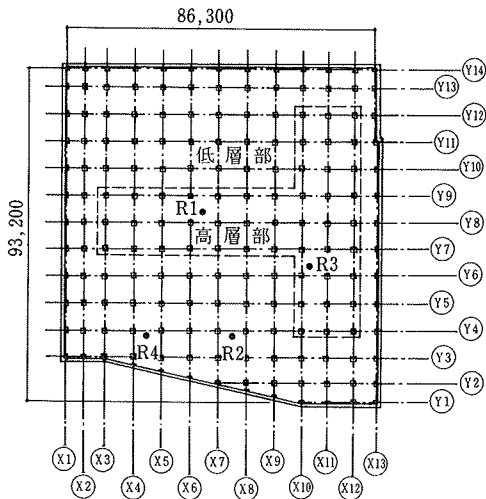


図-1 平面図・測点位置（名古屋東急ホテル）

浮き上がり・沈下は地盤の上下動によって生じるロッドと沈下計の相対変位を計測することによって求めている。測定点の位置は図-1に示すごとく高層部2箇所（R1, 3）、低層部2箇所（R2, 4）であり設置深度は図-2に示すごとく R1, 2は床付け深度、GL-18m, GL-35mの3深度、R3, 4は床付け深度のみである。地盤の浮き上がり測定・沈下測定結果と測定時点の掘削土量・建物荷重の経日変化を図-3に示した。各位置・深度の計器とも排土重量・建物荷重に比例した浮き上がり・沈下を見せており、深い所より浅い所、周辺部より中央に近い部分の浮き上がりが大きい。

2.2. 地盤の弾性係数評価

各現場で行なった根切り掘削時の地盤の浮き上がり測

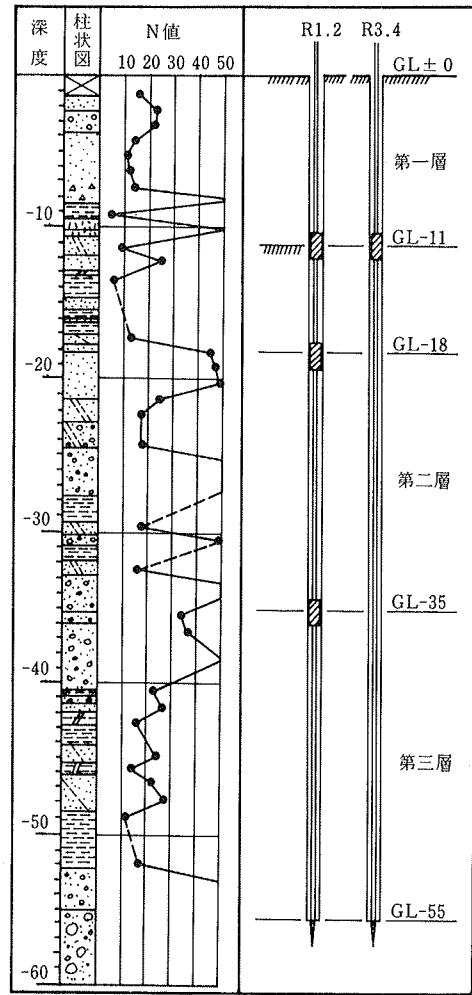


図-2 地盤断面・測点深度

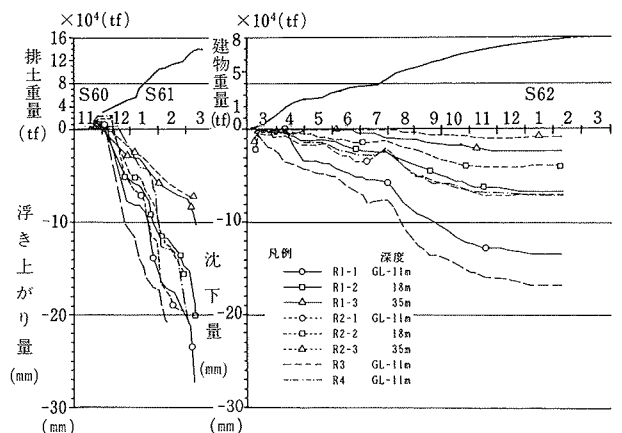


図-3 測定結果経日変化

定及び建設時の地盤・建物の沈下測定結果に対してシミュレーション解析を行なって求めた地盤の評価弾性係数について示す。

シミュレーション解析には、直接基礎の場合は MIN-

DLIN 第一解を積分して矩形等分布荷重が載る場合の変位・応力の計算式を求め、これを更に多層系地盤の場合に拡張した式を用いた。多層系の沈下計算方法は沈下計算地点の直下にある各層の層間圧縮量を、各層が単独に存在する場合について求めこれを合計した値がその地点の沈下量としている。くい基礎の場合は山肩・八尾の群ぐい理論を、直接基礎と同様にして多層系の場合に拡張した式を求めた。また、FEM を用いた解析も行なっている。シミュレーションの方法は、図-2 のように各深度に設置されている沈下計の位置で地盤を層別し、下端の沈下計位置における沈下量実測値と計算値が一致するように下端層の弾性係数を決める。上の層についても同じ方法で下から順に各沈下計位置の実測値と計算値が一致するように地層の弾性係数を決める。

このようにして求めた各現場の評価弾性係数の深度分布を片対数で図-4~7 に示した。図には現地で行なった PS 検層や一軸・三軸圧縮試験から求めた弾性係数及び D'ppolonia の標準貫入試験の N 値による換算式 $E = 102(N + 41) \text{tf/m}^2$ から求めた弾性係数も示した。

評価弾性係数について言えることは、根切り掘削が進

行して地中の応力増分またはひずみ増分が大きくなると評価弾性係数は減少する。また、根切り底面や建物の基礎よりかなり深く、ひずみ増分の小さい位置では PS 検層から求めた弾性係数に近い値であり、浅く、ひずみ増分が大きい位置では N 値からの換算弾性係数や一軸・三軸の弾性係数に近い値となる。次に、各地層について求めた評価弾性係数と建物中央直下の各層の中心における鉛直方向ひずみ増分 ϵ の関係について述べる。図-8 は縦軸に評価弾性係数 E_c を PS 検層から求めた弾性係数 E_{ps} で割った値を、横軸にシミュレーション計算によるひずみ増分 ϵ を示した図である。図-9 は、縦軸に E_c を N 値で割った値を、横軸は上記と同じ ϵ を示した。図-10 は、縦軸に E_c を一軸・三軸の弾性係数 E_1, E_3 (初期接線こう配) で割った値を、横軸は ϵ を示したものである。

各図ともばらつきが見られるが、 ϵ が 200×10^{-6} 程度のところで E_c は ϵ の増加とともに急激に減少し、さらに大きくなると減少の割合は緩やかになる。各図にプロットの平均的な曲線を太い実線で示した。この平均曲線は次式で表わされる (以下、相関式と呼ぶ)。

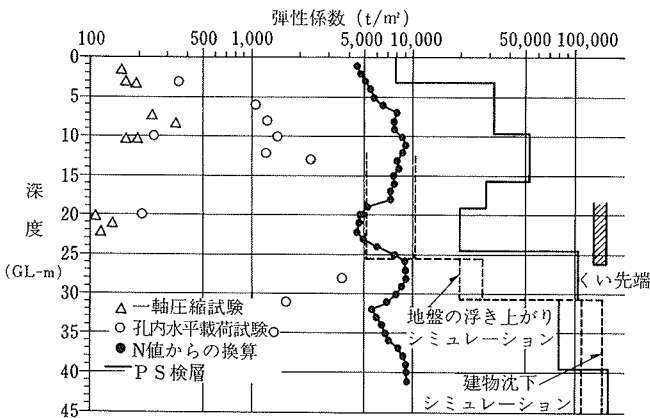


図-4 地盤弾性係数 (熊本ニュースカイホテル)

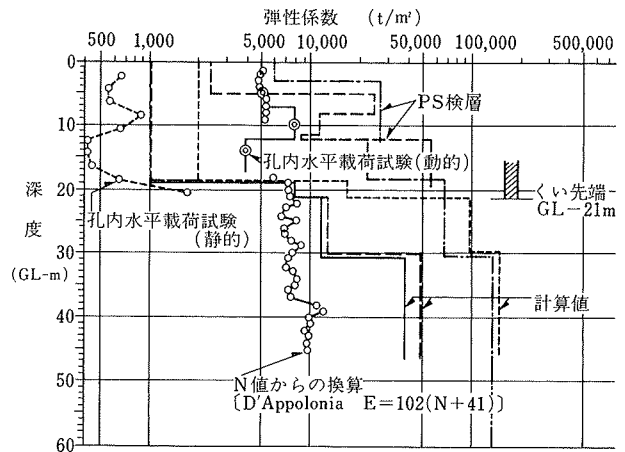


図-5 地盤弾性係数 (四国電力西条石炭サイロ)

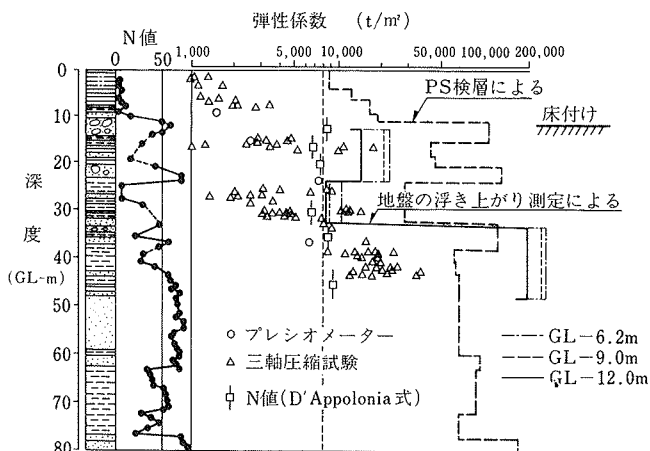


図-6 地盤弾性係数 (池袋ターミナルホテル)

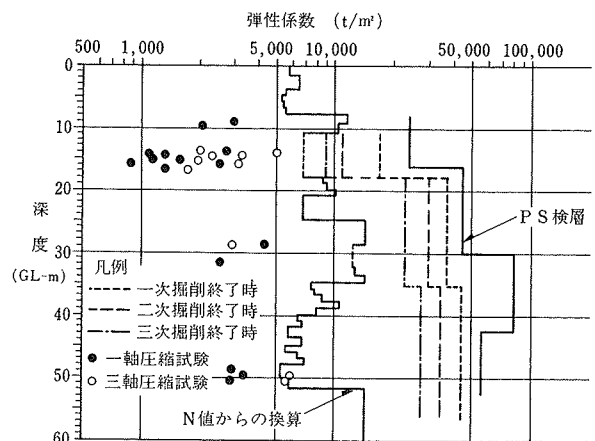


図-7 地盤弾性係数 (名古屋東急ホテル)

$$E_c/E_{Ps} = (\epsilon/10^{-4})^{-0.55} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$E_c/N = 1500(\epsilon/10^{-4})^{-0.55} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$E_c/E_1, E_3 = 10(\epsilon/10^{-4})^{-0.55} \quad \dots\dots\dots(3)$$

なお、(1)式の評価弾性係数 E_c は E_{Ps} を上回らない範囲とする。

3. 相関式による弾性係数を使った計算値と実測値の比較

次に、相関式(1)、(2)を用いて、各現場で実測したPS検層から求めた弾性係数 E_{Ps} 及び N 値から地盤の浮き上がり及び地盤・建物の沈下量を計算する。算定方法は上記の多層系弾性式またはFEMを使い、地盤を数層に分割し、各層の E_c/E_{Ps} または E_c/N を適当に仮定して沈下計算を行ない各層の建物直下の鉛直ひずみ増分 ϵ を求める。次にこの ϵ を(1)、(2)に代入し、 E_c/E_{Ps} または E_c/N を求め、再度、沈下計算を行なう。この手順を収束するまで繰り返す。このようにして求めた浮き上がり及び沈下の計算値と実測値の比較を図-11、12に示した。ばらつきがあるが、地盤の不均一性を勘案すれば比較的良好に対応していると言える。

以上の地盤の剛性のひずみ依存性を他のデータと比べ

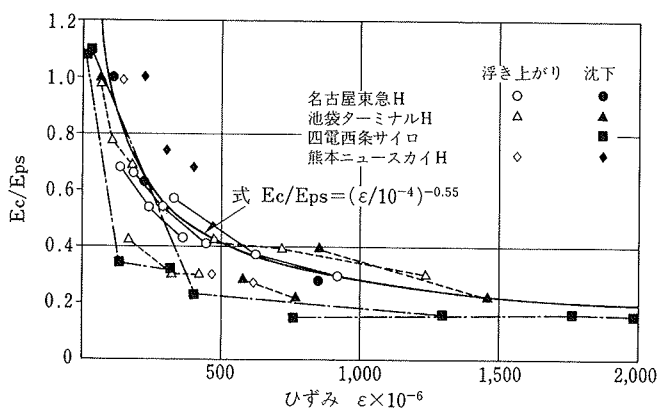


図-8 $E_c/E_{Ps} \sim \epsilon$ 関係

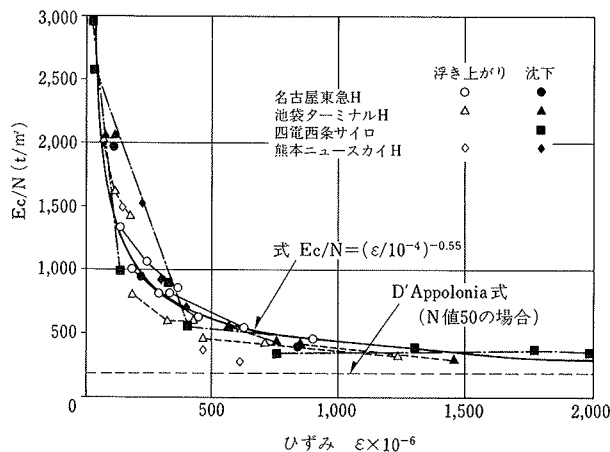


図-9 $E_c/N \sim \epsilon$ 関係

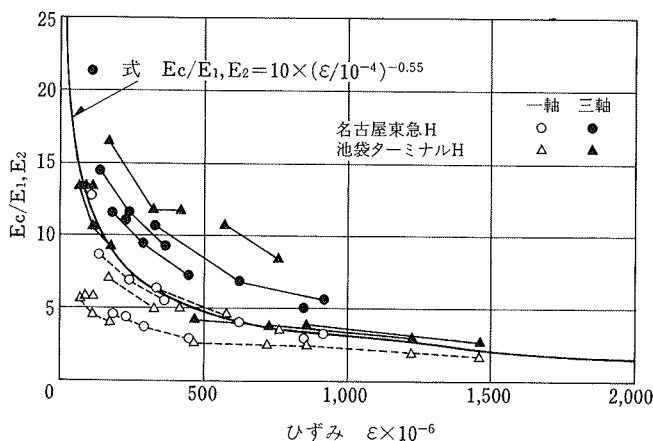


図-10 $E_c/E_1, E_2 \sim \epsilon$ 関係

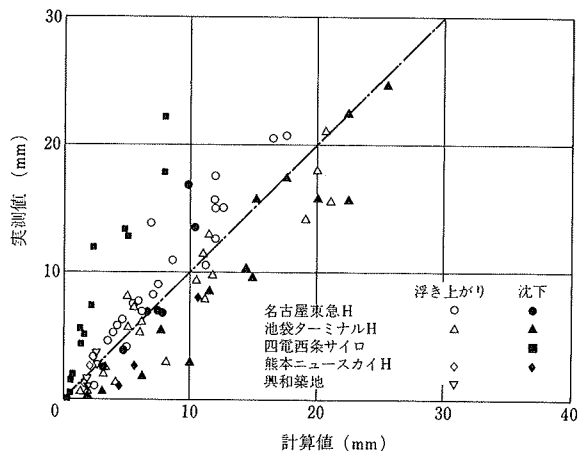


図-11 (1)式による計算値と実測値の比較

る。図-13は、いままでに行なわれた砂についての室内実験（動的）結果を集め、ひずみ振幅に対してプロットしたものである⁷⁾。拘束圧 $\sigma'_0 = 0.5 \sim 1.0 \text{ kg/cm}^2$ に対応するデータであり、各ひずみで得られたせん断定数を 10^{-5} 以下の微小ひずみ時のせん断定数で割った値が縦軸に示してある。横軸はせん断ひずみである。鉛直ひずみ ϵ とせん断ひずみ γ との間の近似式 $\gamma = (1 + \nu)\epsilon$ を用いて本実験式(1)式をせん断ひずみ γ に関する式に変換した曲線を図中に重ねたものであるが、これまでに提案されている曲線群と全体的に合っている。

また、PS検層の弾性係数と N 値の相関性について図-14の関係が報告されている⁸⁾。図中に示した本実験の直線は上記(1)、(2)式から求めたものであるが、データ群とこう配が若干異なるが良く対応していると言える。

4. あとがき

ひずみ増分の依存性を考慮し、PS検層や N 値から地盤弾性係数を評価する方法について示したが、実情に即した考え方と思われる。相関式(1)、(2)、(3)式の妥当性については、データ数がかならずしも多くないので、今後

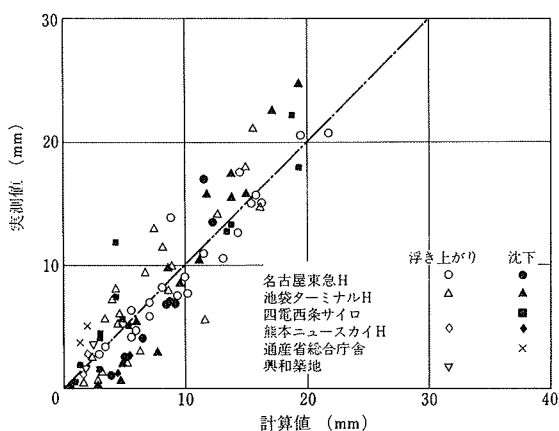


図-12 (2)式による計算値と実測値の比較

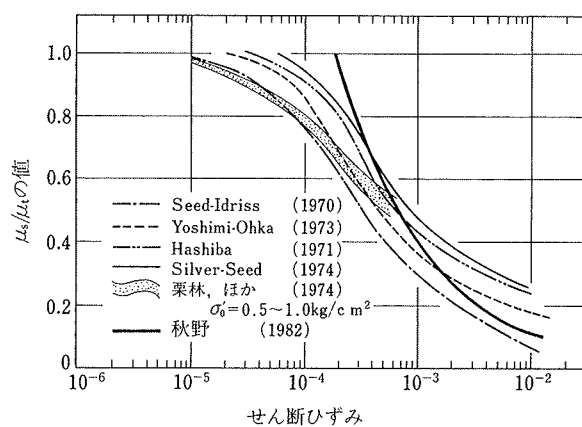


図-13 μ_s/μ_0 ～せん断ひずみ

さらに検討したい。

参考文献

- 1) 金谷, 秋野: 建物・地盤の沈下測定と地盤の剛性評価 (その1), 大林組技術研究所報, No. 34, (1987), pp. 26~31
- 2) 金谷, 秋野: 熊本ニュースカイホテル建設時の地盤・建物の浮き上がりりと沈下測定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和61. 6), pp. 1165~1166
- 3) 広瀬, 金谷, 秋野: 石炭サイロ建設時の沈下・くい応力の測定(その1), (その2), 第21回土質工学研究発表会講演集, (昭和61. 6), pp. 1057~1064
- 4) 飯森, 金谷, 秋野: 池袋ターミナルホテルの沈下予測と実測(その1), (その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和60. 10), pp. 1063~1066
- 5) 金谷, 秋野: 名古屋東急ホテルの沈下予測と実測, 第23回土質工学研究発表会講演集, (昭和62. 6), pp. 1057~1060

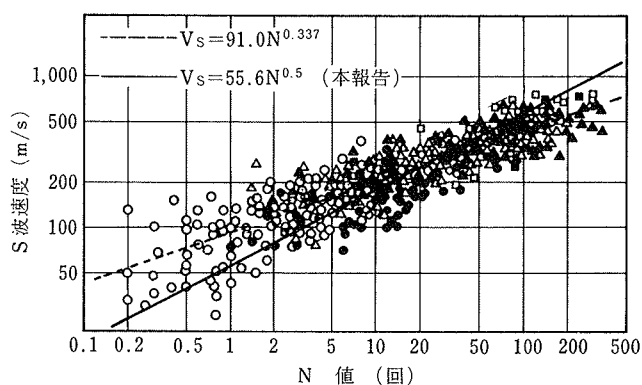


図-14 S波速度～N値関係

- 6) 金谷, 秋野: 建物沈下予測のための地盤弾性係数評価方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和62. 10), pp. 1147~1148
- 7) 石原研而: 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, p. 197
- 8) 土質調査法: 土質基礎工学会編, p. 122