

長大免震構造物のピット層温度と免震装置に生じる 相対変位の関係についての考察 実測と解析結果比較

中山 昌尚

概 要

長大免震建物の免震装置の温度伸縮により生じる相対変位と免震ピット層の温度を1年強に渡って計測した。建屋、ピット層、基礎スラブ、地盤系を1次元モデル化し、外気温データを入力として、FEM(Finite Element Method)手法による温度解析をおこなった。観測された免震ピット層の温度にほぼ一致する結果を得た。この計算された上屋と基礎スラブの温度の時間変化と、基礎スラブ下に適切な剛性を持つ水平地盤反力バネを考えることにより、観測された免震装置の相対変位をほぼ説明することができた。算定された水平地盤反力バネ定数はx、y方向で差が見られたが、生じている相対変位の基本的な機構は把握することができたといえる。

A Study on Relative displacements of Rubber Bearings on a Very-long-span Base-isolated Structure Caused by Atmospheric Temperature --- Comparison of Field Measurement and Analysis ---

Abstract

Relative horizontal displacements of rubber bearing on a very long span base-isolation building were measured for more than one year. Over the same period, the ambient temperature around the rubber bearings (that is, atmospheric temperature in the pit space for rubber bearings) was measured. Observed temperatures are well explained by the one-dimensional thermal EFM (Finite Element Method) model, which consists of floor slab, air layer, foundation slab and soil layers. The structure was then modeled as a system of floor slab and foundation slab with uniformly distributed ground reaction force linear spring. Based on this structural model and the results of thermal analysis, the stiffness of ground reaction force spring is inversely evaluated to produce relative displacement results consistent with observed ones. The values of reduced stiffness of ground reaction force spring for two horizontal directions (x and y) are a little different, but it can be said that we could get to the root of the mechanism of occurrence of relative rubber bearing displacements caused by atmospheric temperature.

キーワード: 免震構造物 温度伸縮 水平地盤反力係数 実測 温度解析

§1. はじめに

筆者は長大免震プレストレスト構造物(倉庫用途)の梁の軸方向クリープ現象を扱い、夏冬数回の測量結果から、現象として、概ね上屋が日平均外気温変化の約 1/2 に対して自由伸縮していると見られることを報告した。¹⁾²⁾ この 1/2 の意味は経験的な事実として受け止め、当時、それ以上追求しなかった。本報告では、同建物の隅部の免震装置上下の相対変位、免震ピット層(以下ピット層)内気温を 1 年あまりにわたって計測した結果を分析し、上記の現象を 1 次元温度解析、簡単なマクロモデルに基づいて概ね解釈できることを報告する。要点は、上屋躯体、免震装置下の基礎スラブは概略日平均外気温に従って伸縮するが基礎スラブは杭基礎の水平地盤反力係数による拘束を受けその差分が観測されていると解釈するものである。なお、文献³⁾も同じ問題を扱っている。本報では、1 次元温度解析モデルにおいて、ピット層に表面熱伝達要素、換気要素、輻射要素を用いたより自然なモデルを用いている点に違いがあり、また結果を詳細に示している。

§2. 計測および結果概要

2.1 計測概要

図 2.1 に対象建物の外形状(280・103・26.4m(H)、4 階建、杭基礎)測定位置を示す。ピット層の高さは 1.9m、約 5cm のギャップを通じて空気の出入りがある。免震装置の上下の相対変位はレーザー変位計で、ピット層気温は熱電対で 2 箇所 10 分間隔で計測した。計測期間は 2008 年 6 月 12 日～2009 年 7 月 14 日まで 398 日間である。ピット層内温度の位置による違いは小さく、また、温度、相対変位の 1 日の中での変化は小さいので、隅角部での Data について、日平均と日最大最小値に集約して分析することにした。以下、特に断らない限り日平均についての量である。

2.2 計測結果概要

図 2.2 にピット層の温度変化を、図 2.3 図 2.4 に相対変位 u_x, u_y の日変化を示す。後の解析値との比較を容易にするため、2009 年 1 月 1 日から 7 月 14 日、2008 年 7 月 15 日から 12 月 31 日の順に Data を繋げて表示している。横浜の気温情報は同期間の AMeDAS の Data による。“ピット層の温度変化は、外気温変化に比べて相当小さいであろう”との予想に反して同期間の横浜の温度とほぼ同じ変化をしている。 u_x, u_y の年間変動は u_x の概ね 1/2 であり、 u_x よりも短周期の変動が目立つように見える。図 2.5 にはピット層温度と横浜の外気温との関係を示す。

ピット層温度変化は外気温変化に対して 0.88 倍の変化で相関係数は 0.94 と高い値を示している。図 2.6 は u_x, u_y と外気温関係を示す。外気温との相関性は u_x が 0.83、 u_y が 0.92 と高い。表 2.1 に計測結果をまとめた。横浜の年間外気温変化は 26.7°C、上屋躯体の線膨張率 η を $1.0 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 、上屋の代表的温度変化が外気温変化の約 1/2 とすると、 u_x の年間変化は $18.7\text{mm} = 26.7/2 \cdot 1\text{E}^{-0.5} \cdot 140000$ となり、観測された 19.4mm に近い。つまり、既報¹⁾²⁾の結果が裏付けられた。ピット層温度も外気温にほぼ同程度に連動しているのでこの約 1/2 の意味を以下で考察する。

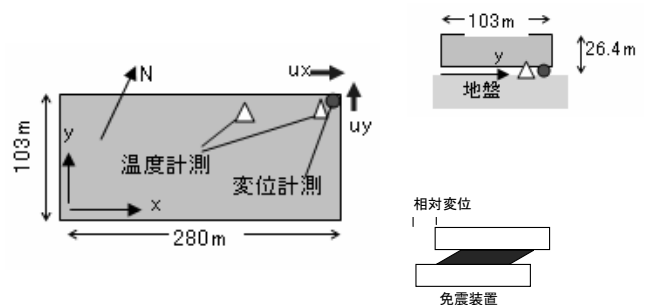


図 2.1 建物概要とピット層計測位置

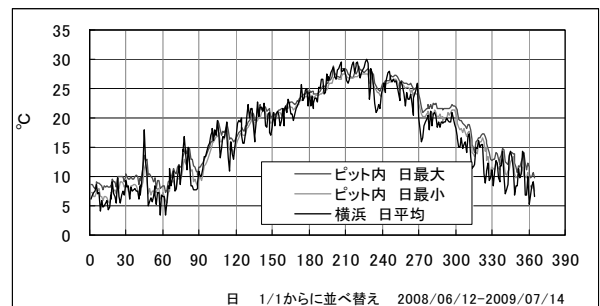


図 2.2 ピット層温度変化 計測結果

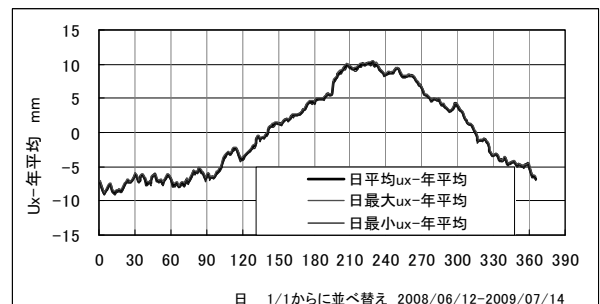


図 2.3 相対変位 u_x の変化 年平均からの偏差 計測結果

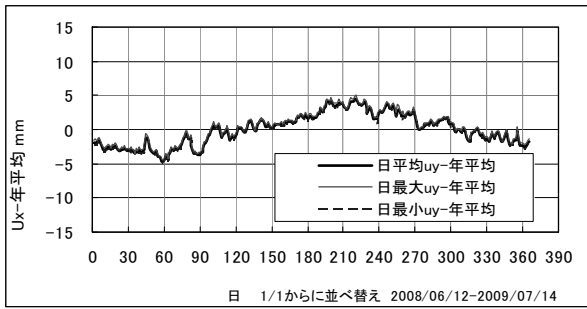


図 2.4 相対変位 uy の変化 計測結果

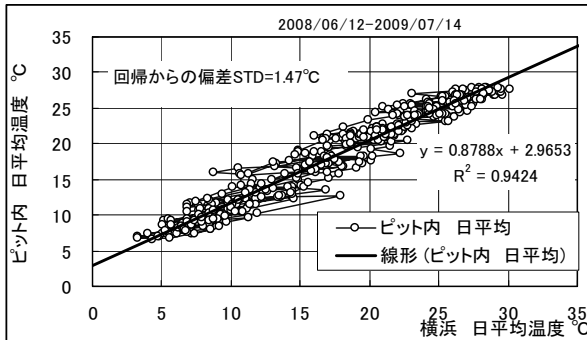


図 2.5 ピット層温度と外気温の対応 計測結果

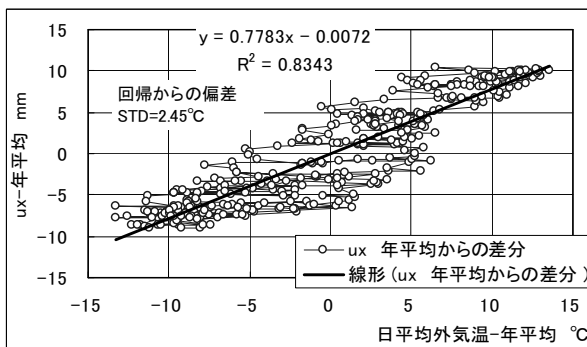


図 2.6 ux と外気温の対応 計測結果

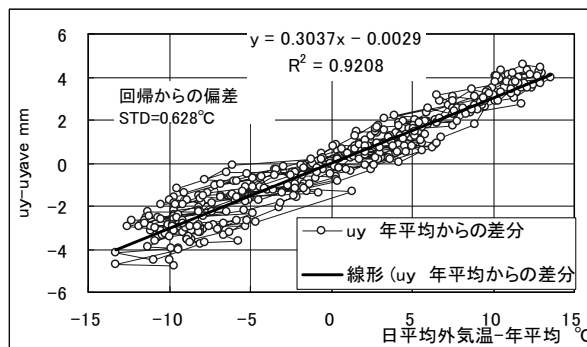


図 2.7 uy と外気温の対応 計測結果

表 2.1 計測結果まとめ

	ピット内温度 °C	横浜 °C	Ux mm	Uy mm
日平均の年平均	17.53	16.58	-2.94	-1.56
日平均の年最大	27.90	30.00	7.40	3.01
日平均の年最小	6.50	3.30	-12.00	-6.31
日平均の(最大-最小)	21.40	26.70	19.40	9.32

§3. 1 次元温度解析

3.1 解析対象モデル

上屋から地盤までを 1 次元モデルとして年間の温度解析を行なう。解析目的は、観測されたピット層温度を説明すること、その結果に基づいて上屋、基礎スラブ部分の代表温度の日変化を算定し、観測された免震装置の相対変位の解釈を行なうことにある。今回のモデルは、ピット層に表面熱伝達要素、輻射伝達要素、換気要素を用いており既報³⁾よりも自然なモデルになっている。

解析モデルを図 3.1 に示す。1 次元モデル化にあつての前提は次とした。

- ① 上屋の温度は 1 階床スラブコンクリートで代表する。
- ② 比較的開放的な建物とし、1 階床スラブは室内の代表的表面熱伝達係数 α_i で外気温度に曝される。 $\alpha_i = 33480. \text{ J}/(\text{m}^2\text{Hour}^\circ\text{C})$
- ③ ピット層の空気は換気回数 N_v 回/Hour を受ける。
- ④ ピット層の空気と、1 階床スラブ、基礎スラブ間は室内の標準的な表面熱伝達係数で熱の授受がある。
- ⑤ 1 階床スラブ、基礎スラブ間には輻射を通じた熱の授受がある (288K でのコンクリート壁面同士の値で $\alpha_{\text{rad}} = 17280. \text{ J}/(\text{m}^2\text{Hour}^\circ\text{C})$)

なお、地盤最下層には表面熱伝達係数 $\alpha_o = 83700. \text{ J}/(\text{m}^2\text{Hour}^\circ\text{C})$ を用いた。主要部分の熱特性を表 3.1 に示す。土部分については文献⁴⁾の値を採用している。

外気温度の時刻歴は拡張 AMeDAS 気象標準 Data(横浜、1 時間間隔)を用いた。計算は 1 時間間隔で 2 年間分行ない、初期温度影響が消えた解を得た。計測 Data と同様に日平均、日最大、最小値に変換した。多くのパラメーターが関係するので次の段階を踏んでパラメーターを絞り込んで行った。

まず、土の熱特性影響を検討した。土の熱特性は含水率の異なる 3 種類(湿潤、乾燥、中間度)を $N_v=1$ の場合について検討した。土層部分には温度分布に差が見られるが、それより上の部分にはほとんど差が現われてこないことを確認した。それ故、以降の解析では、土の熱特性は湿潤土に限定した。

続いてピット層の換気回数 N_v を 2~0.05 に変化させて影響を検討した。図 3.3 に図 3.1 の Node4,5 の時間変化を示す。換気回数は Node4 にはほとんど影響せず、Node5 に表れ、換気回数小さいほど外気温の短周期成分が消える傾向がみられる。ピット層気温の観測位置は Node4 に近く、その意味では換気回数の影響はみられないことになる。それ故、以下では $N_v=1$ の場合を代表値として扱うことにした。図 3.4 には観測値(図 2.2)と比較

すべき Node4 の日平均、日最大最小の時間変化を示す。図 3.5 には、観測値(図 2.5)と比較すべきピット層温度と外気温関係を示す。観測値と計算値のレンジは良く一致しているが解析の方が相関性が高く、回帰線からの偏差の標準偏差(STD)がやや大きめである。図 3.6 には床スラブ、基礎スラブ、両者の温度差の時間変化を示す。

床スラブ、基礎スラブ間の温度差変化は外気温変化よりも相当小さく、単純にスラブ、基礎スラブの温度変化による自由伸縮では計測結果を説明できないことになる。

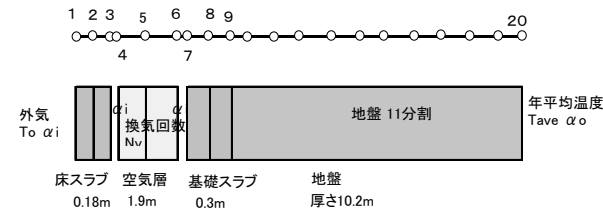


図 3.1 1次元熱解析モデル

表 3.1 用いた熱特性一覧

	熱伝率率 λ J/(mHour°C)	質量比熱 C J/(Kg°C)	密度 ρ Kg/m ³
コンクリート	5868	879	2300
空気	86.8	1006	1.25
土 湿潤	2743	3170	1236
土 乾燥	6660	1360	2137
土 中間	4536	2110	1639

空気層の換気回数: $Nv=2\sim 0.05$ 回/Hour

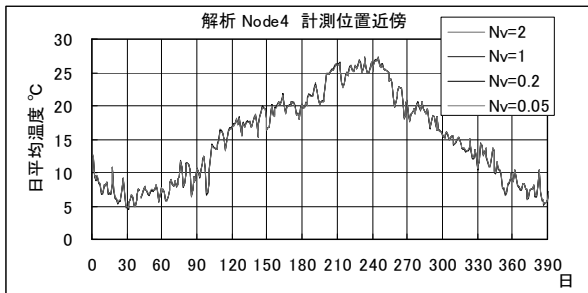


図 3.2 Node5 の温度への換気回数 Nv 影響 解析結果

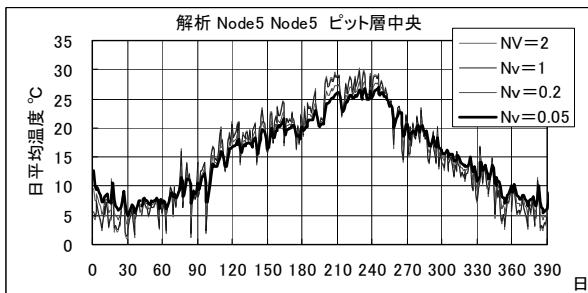


図 3.3 Node5 の温度への換気回数 Nv 影響 解析結果

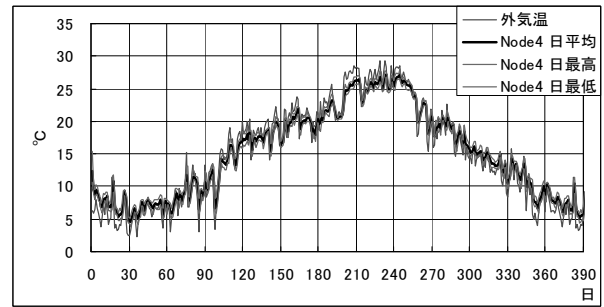


図 3.4 ピット層(Node4)温度の時間変化 解析結果

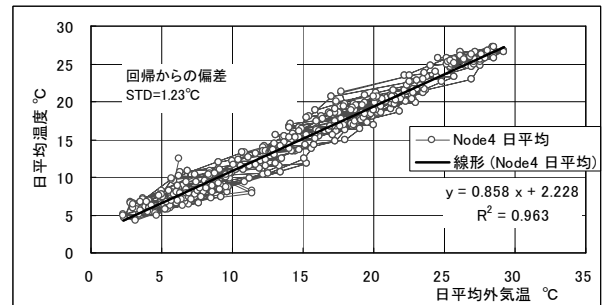


図 3.5 ピット層温度と外気温の対応 解析結果

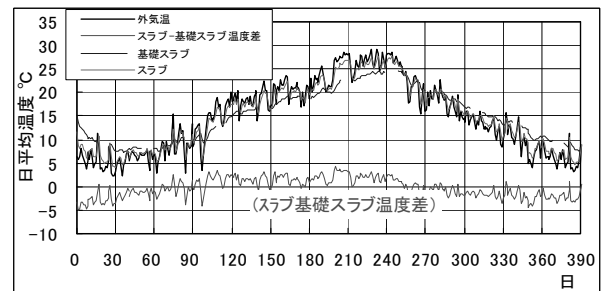


図 3.6 床スラブ、基礎スラブ、両者の温度差の時間変化 解析結果

§4. 簡地盤反力係数推定

相対変位 u_x, u_y の時間変化の機構を考える。床スラブとを支える免震装置の水平剛性は床スラブ、基礎スラブの軸剛性に比べて無視できるほど十分小さいので、床スラブは温度変化に対して自由伸縮するが、基礎スラブの伸縮は図 4.1 の様な杭地盤系の地盤反力係数の存在により自由伸縮が抑制されていると考える。

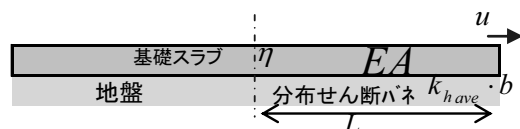


図 4.1 基礎スラブの温度伸縮検モデル

このモデルで x 位置の水平変位は次である。

$$u(x) = \mu \cdot \Delta T \cdot L \frac{\sinh(\beta \frac{x}{L})}{\beta \cosh \beta} \quad (1)$$

β : 地盤バネ/軸剛性比, \tilde{k} : 一定とした地盤反力係数
 B : 基礎スラブ幅 (直交方向のスラブ幅/2), EA : 基礎スラブの軸剛性

$$\beta = \sqrt{\frac{\tilde{k} B \cdot L^2}{EA}} \quad (2)$$

最外縁 $x=L$ では 次のように書ける。

$$u = \eta \cdot \Delta T \cdot L \cdot \phi \quad (3) \quad \phi = \frac{\tanh(\beta)}{\beta} \quad (4)$$

ϕ : 最外縁変位/自由伸びによる最外縁変位 (図 4.2 参照) 地盤・基礎スラブ系の Φ を仮定すると $x=L$ においては 床スラブと基礎スラブの相対変位は次の様に表現できる。

$$u(t) = \eta(T_2(t) - \bar{T}_e)L - \eta(T_8(t) - \bar{T}_e)L \cdot \phi \quad (5)$$

T_2, T_8 : 床スラブ、基礎スラブの温度、 \bar{T}_e : 年平均気温 η : 線膨張係数 ($10^{-5}/^{\circ}\text{C}$) t : 時間

ここでは、解析による床スラブ、基礎スラブ温度を用いて(4)式に従い、測定された外気温と u_x, u_y 関係 (図 2.6、図 2.7) に近い関係を得られるように x, y 方向の ϕ を定めることができ、次の様に地盤反力係数 \tilde{k} を逆算的に求めることができる。その具体的な手続きは次である。

① $\frac{du}{dT_e}$ の回帰係数、 $u_{\max} - u_{\min}$ が計測値にほぼ一致する。

②(4)式より対応する β を求め ③(2)式より \tilde{k} を決定する。適切な ϕ を導入することにより、相対変位と外気温との相関性が劇的に改善され、計測結果にほぼ近い結果を得ることができる。

こうして、水平地盤反力係数として $1.44 \cdot 10^{-04} \text{ tonf}/(\text{cm}^3)$ (x 方向)、 $1.35 \cdot 10^{-05} \text{ tonf}/(\text{cm}^3)$ の値を得た。 y 方向の値が x 方向より約 1 桁小さい結果となった。これほどの差があるのは明らかに矛盾であるが、今回考えた機構が大きくは外れていないものと考えている。

こうして求めた u_x, u_y の時刻歴を図 4.5、図 4.6 に示

す。図 2.3 図 2.4 の計測結果に比べると短周期成分が多いが全体的な傾向は良く捉えている。次に、今回得られた水平地盤反力係数の値のオーダーを検討する。文献⁵⁾による単杭の地盤反力係数は、変位依存性があるから、“変位は基礎スラブ中心からの距離に比例する”と仮定した平均的な地盤反力係数を、ここで逆算定された \tilde{k} と比較する。文献⁵⁾による平均的な地盤反力係数の表現は Appendix に示してある。比較の結果を図 4.7 に示す。最大 1 cm 程度の変位を考えた場合、 x 方向で指針から算定される値の約 1/4 程度であることがわかる。長時間載荷の状態が想定されるので約 1/4 程度という値には妥当性があると考えられる。

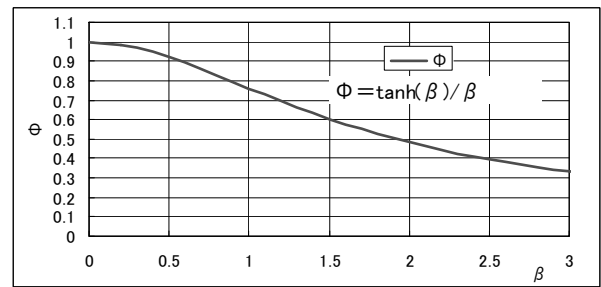


図 4.2 β と ϕ 関係 (4)式

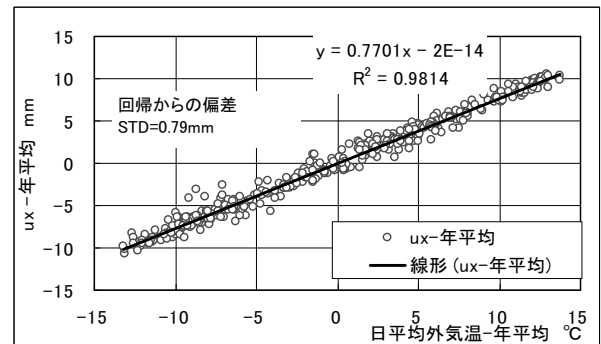


図 4.3 u_x と外気温の対応 $\phi=0.50$ 解析結果

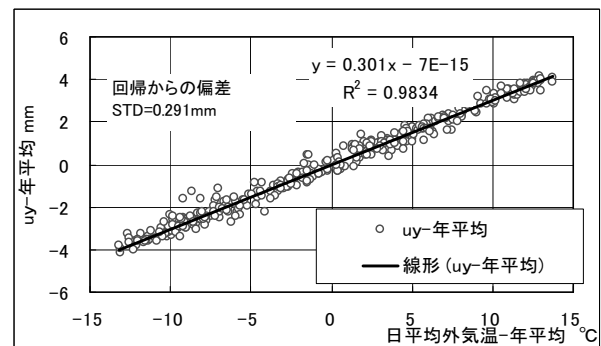


図 4.4 u_y と外気温の対応 $\phi=0.45$ 解析結果

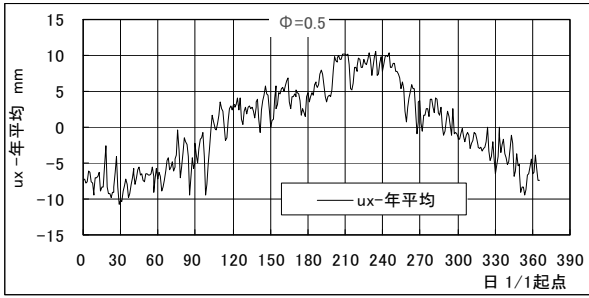


図 4.5 ux の時間変化 解析結果

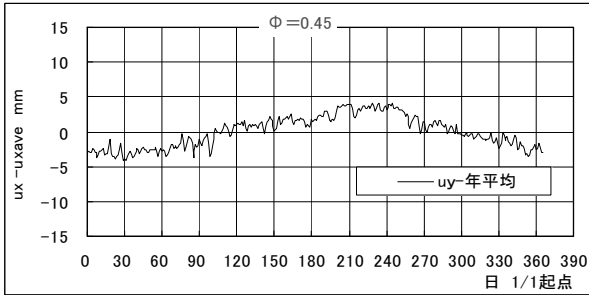


図 4.6 uy の時間変化 解析結果

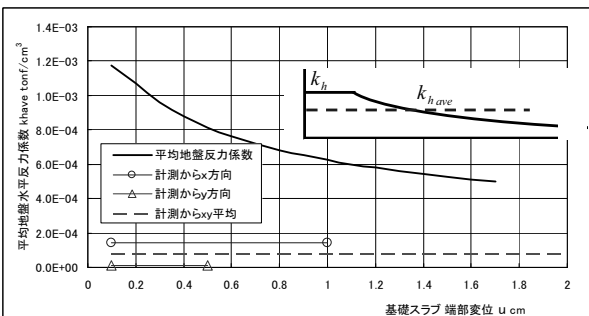


図 4.7 平均水平地盤反力係数 計測からの推定値と
指針値からの計算値の対応

§5. まとめ

1 年強にわたるピット層の気温、免震装置上下の相対変位計測結果を報告した。また、1次元温度解析、簡単なマクロモデルに基づいて、観測された免震装置上下の相対変位は、上屋躯体、基礎スラブは概略日平均外気温に従って伸縮するが基礎スラブは杭基礎の水平地盤反力係数による拘束を受けその差分が観測されていたと解釈できることを示した。また、その時の水平地盤反力係数の値が知れた。

参考文献

- 1) 中山昌尚,長大免震プレストレスト構造物のクリープ解析,日本建築学会大会梗概集(中国),No23418,2008
- 2) 中山昌尚,平面構造物のクリープ解析 解析法と長大免震プレストレストプレキャストコンクリート構造物についての解

析・計測結果比較,フジタ技術研究報告 44 号,2008 3) 中山、長大免震構造物の温度伸縮計測と解釈,日本建築学会大会梗概集(北陸),No20118,2010, 4)伊藤博夫,蓄熱層を有する地下躯体の温度分布性状に関する研究,構造系論文集,第471号,19-28,1995年5月, 5)日本建築学会 建築基礎構造設計指針 1988(pp253-254)

Appendix

指針の水平地盤反力係数 K_h の表現は変位依存性があり、次の形をしている。

$$\left. \begin{aligned} K_h &= A \cdot K_{h0} \\ A &= 3.16 : u < 0.1 \text{cm} \\ A &= 1/\sqrt{u} : u > 0.1 \text{cm} \\ K_{h0} &= \alpha \cdot \xi \cdot E_0 B^{-3/4} \quad \text{KN/m}^3 \end{aligned} \right\} \text{(a1)}$$

B: 杭径(cm)/1cm 無次元

E_0 : 変形係数 $\text{KN/m}^2 \div 700 \cdot \text{Nave}$

Nave: 平均 N 値 ξ : 単杭の時 1

α : $\div 700 \cdot \text{Nave}$ で算定した時 今回は 60

今回 $B=110, \xi=1, \alpha=60$ より次を得る。

$$K_{h0} = 3704 \cdot \text{KN/m}^3 = 3.7 \text{E}^{-04} \text{Tonf/cm}^3$$

”変位は基礎スラブ中心からの距離に比例する”として材に渡っての平均値(最外縁変位の関数となる)を求めると次のようになる。u: 最外縁変位(cm)を独立変数として、無次元化された平均水平地盤係数: K_{have}/K_{h0} の表現は次となる。

$$\begin{aligned} K_{have} / K_{h0} &= \left[\int_0^{L\zeta_1} 3.016 dx + \int_{L\zeta_1}^L \frac{1}{u \cdot \frac{x}{L}} dx \right] / L \\ &= 3.16\zeta_1 + \frac{2 - 2\sqrt{\zeta_1}}{\sqrt{u}} \end{aligned} \text{(a2)}$$

$$\text{ただし } \zeta_1 \equiv 0.1/u \text{ (a3)}$$



中山 昌尚

ひとこと

考えてみれば当たり前の機構でしたが、経験知として一旦受け入れた事実の説明がついてスッキリしました。