

台湾・花蓮地点地震観測・起振実験結果にみられる 模型基礎直下砂礫層の異方性挙動とそのモデル化

田中幸久¹・西好一²・岡本敏郎¹
工藤康二³・上島照幸¹・國生剛治⁴

¹正会員 工博 (財)電力中央研究所 地盤耐震部 (〒270-11 我孫子市我孫子 1646)

²正会員 工博 (財)電力中央研究所 地盤耐震部長 (〒270-11 我孫子市我孫子 1646)

³正会員 工修 (財)電力中央研究所 バックエントプロジェクト (〒270-11 我孫子市我孫子 1646)

⁴正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112 東京都文京区本郷春日 1-13-27)

大地震時の地盤ならびに地盤と構造物の相互作用を調べるため、地震発生頻度の大きい台湾の花蓮地点で『花蓮プロジェクト(HLSST)』と呼ばれる国際共同研究が現在進行している。本報告では、花蓮地点で実施された礫地盤に対する地盤調査結果、礫地盤ならびに礫地盤上の構造物の地震観測結果に基づき、模型基礎直下の砂礫層のせん断弾性係数の異方性が地震応答に及ぼす影響およびそのモデル化について検討した。その結果、模型基礎直下の砂礫層を層面が水平面に対して傾斜した層状弾性体としてモデル化することにより、クロスホールPS検層結果、三軸試験結果、強制加振試験結果の特徴を表わせることがわかった。

key words : *gravelly soil, anisotropy, earthquake observation, forced vibration test, initial shear modulus*

1. はじめに

大地震時の地盤変形挙動ならびに地盤と構造物の相互作用を調べるため、『花蓮プロジェクト(HLSST)』と呼ばれる国際共同研究が平成2年度から開始され現在進行している。このプロジェクトの模型構造物の基礎地盤は砂礫より成り、構造物の強制振動時の応答ならびに地震応答に関して正確な予測をするために詳細な地盤調査・試験が行われた。本報告では、シミュレーション解析に必要な物性値を得ることを目的として花蓮地点で実施された礫地盤に対する一連の地盤調査・試験結果に基づき、模型建屋基礎直下の砂礫層のせん断弾性係数の異方性が地震応答に及ぼす影響およびそのモデル化について検討した。

尚、本報告において、不攪乱試料とは、原位置凍結サンプリングによって得られた試料を意味している。

2. 花蓮プロジェクト(HLSST)の概要

HLSST の結果の一部は既にいくつか報告されている^{1)~4)}。ここでは地盤調査結果を中心にその概略を述べる。

HLSST は、地震発生頻度が高い台湾の花蓮地点で行われている(図1参照)。図2に模型建屋と周辺地盤の概要を示す。模型建屋は円筒型であり、実物原子炉建屋の1/4縮尺模型である。模型建屋は、まず、表層の5mの層厚の砂層を掘削し、礫層表面を露出させた後にその

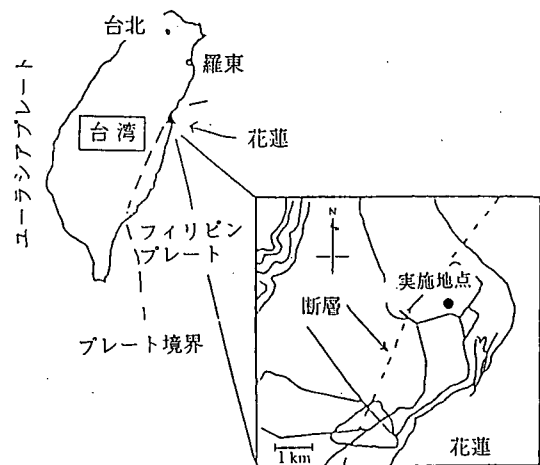


図1 花蓮地点の位置

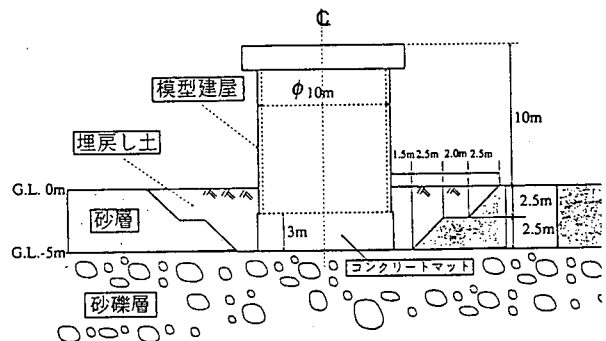


図2 模型建屋ならびに周辺地盤の概要

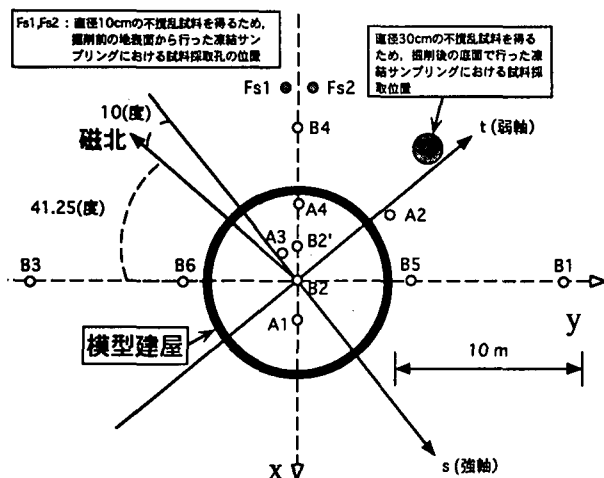


図3 模型建屋ボアリング孔等の平面位置

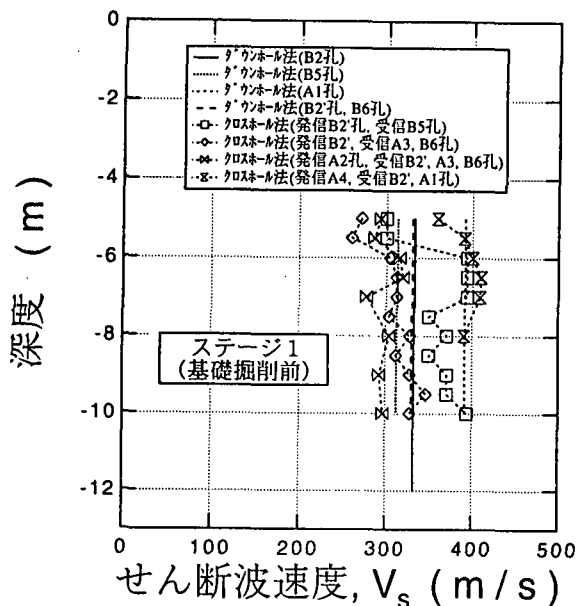


図4 砂礫層のせん断波速度分布

上に設置された。更に模型建屋周辺は入念に締固められた砕石で埋戻された。

地震応答解析に必要な地盤物性値を求めるために、地盤調査と室内試験を行った。地盤調査としては、ボアリング、大型貫入試験、PS検層、屈折法弾性波探査ならびに凍結サンプリングを行った。室内実験としては、三軸試験と物理試験を行った。

3. 試験結果の概要

図3に地盤調査の際に用いたボアリング孔の平面位置を示す。以下に各地盤調査の概要を記す。

(1) 弾性波探査

砂礫層、砂層ならびに埋戻し礫の初期せん断弾性係数は、弾性波探査を実施することにより把握した。特に、模型建屋直下の砂礫層については、以下に示す模型建屋建設過程の各段階で弾性波探査を行い、詳細な把握に努めた。詳細は文献3)4)を参照されたい。

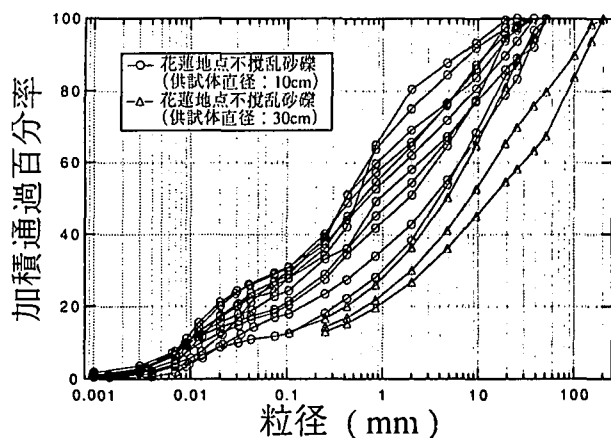
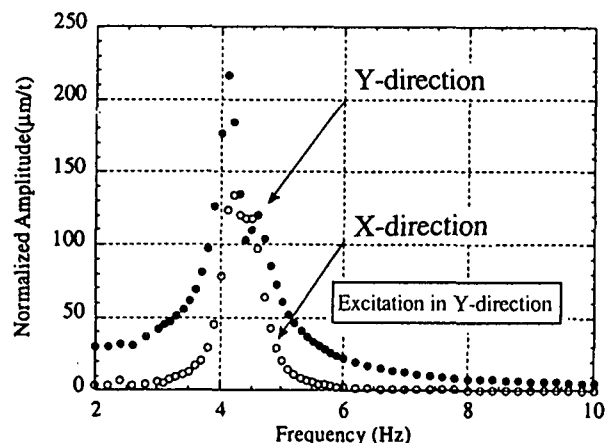
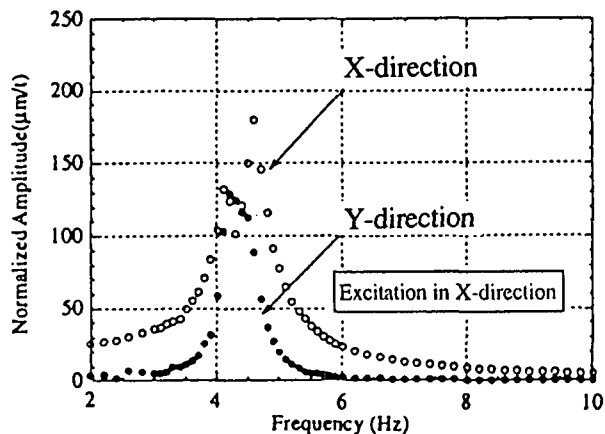


図5 不攪乱砂礫試料の粒度分布



(a) Y方向に加振した場合



(b) X方向に加振した場合

図6 強制共振実験結果

ステージ1：基礎掘削前

ステージ2：基礎掘削後建屋建設前

ステージ3：建屋建設後埋戻し前

ステージ4：埋戻し後

図4に、ステージ1(基礎掘削前)における砂層ならびに砂礫層のせん断波速度分布を示す。G.L.-5m ~ -10mの砂礫層のせん断波速度は、クロスホール法による結果もダウンホール法による結果も300~400m/sの範囲でバラついている。

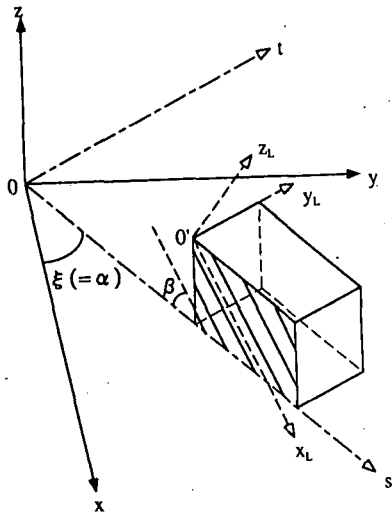


図7 層面が傾斜した層状弾性体の座標系

(2) 不攪乱砂礫試料の粒度分布

ステージ 1ならびにステージ 2で、不攪乱試料を得るために凍結サンプリングが実施された。図5に不攪乱砂礫試料の粒度分布特性を示す。

(3) 地震観測の逆解析から同定されたせん断波速度

模型建屋からある程度離れた自然地盤において観測された小規模な地震の観測結果に基づき自由地盤を仮定して、掘削前(ステージ 1)における砂礫層のせん断波速度を同定することが行われている。その結果によれば、EW 方向の地震記録から同定されたせん断波速度は、およそ 190～250 m/s の範囲にあるのに対して NS 方向の地震記録から同定されたせん断波速度はおよそ 330～390 m/s の範囲にあり、その差は大きい。その結果は、後述する図 8 中にも示されている。

(4) ステージ 3における強制加振実験結果

水平方向強制加振実験が行われた。その結果を図6に示すが、2つのピークが現われる点が特徴的である。また、X 方向加振と Y 方向加振で各々の最大応答に対応した振動数が異なっている。

4. 考察

(1) 傾斜した層面を有する層状弾性体によるモデル化

HLSST で実施された地盤調査や実験結果には、模型基礎地盤の動的物性値に関して下記の特徴があった。

- 1) 砂礫層内のせん断波速度のバラツキが大きい。
- 2) 地震観測の逆解析から同定されたせん断波速度に異方向性が見られる。
- 3) 強制加振実験結果に2つのピークが現われる上、X 方向加振と Y 方向加振で各々の最大応答に対応した振動数が異なっている。

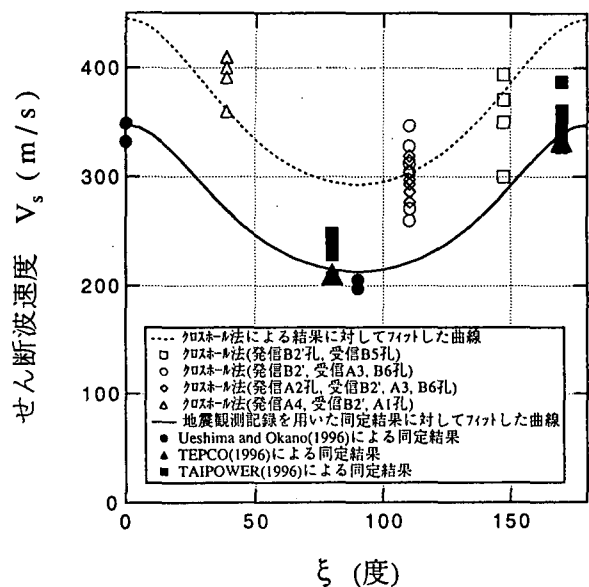


図8 せん断波速度とξの関係

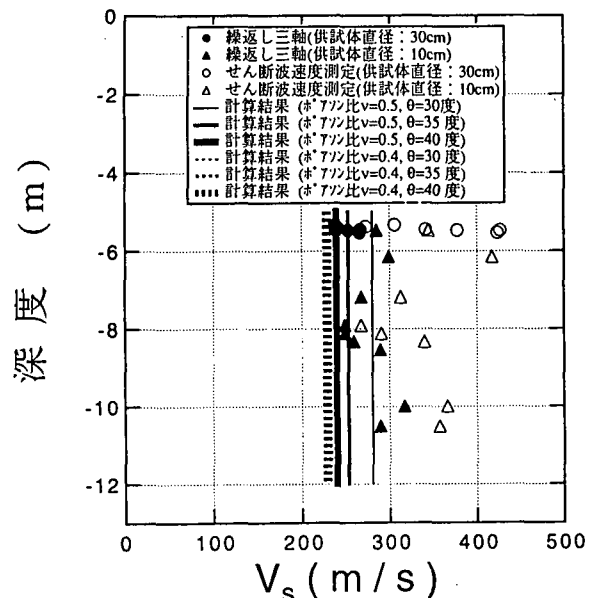


図9 繰返し三軸結果から換算した V_s の実測値と計算値ならびに供試体せん断波速度の実測値の比較

ところで、ステージ 2において、不攪乱試料を得るため凍結サンプリングが実施され、掘削底面の砂礫層から凍結した土塊(直径約 1.5m)が採取された。その土塊の側面を観察したところ、磁北から磁南にかけて砂礫層の堆積面が傾斜していることが判明した。そこで、図7のような傾斜した層面を有する層状地盤を想定してみた。このような層状地盤の各層がポアソン比 0.5 の等方弾性体であると仮定すると $\beta < 60$ (deg) であれば、 G_{yz} 、 G_{zx} は次式で表される(図7参照)。

$$1/G_{yz} = -\sin^2 \xi \cdot (1/G_{\min} - 1/G_{\max}) + 1/G_{\min} \quad (1a)$$

$$1/G_{zx} = -\cos^2 \xi \cdot (1/G_{\min} - 1/G_{\max}) + 1/G_{\min} \quad (1b)$$

ここで、

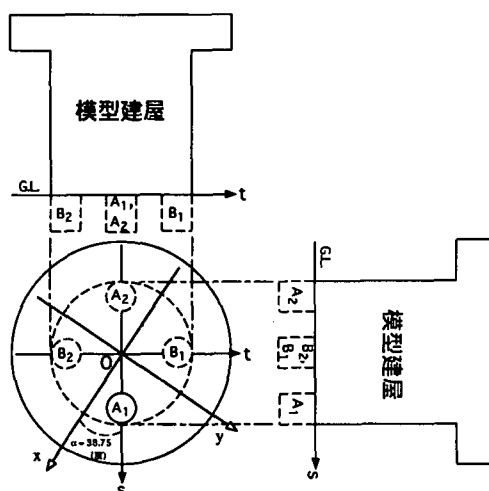
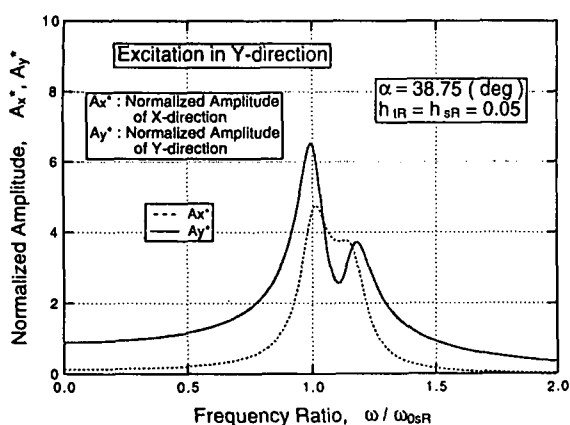
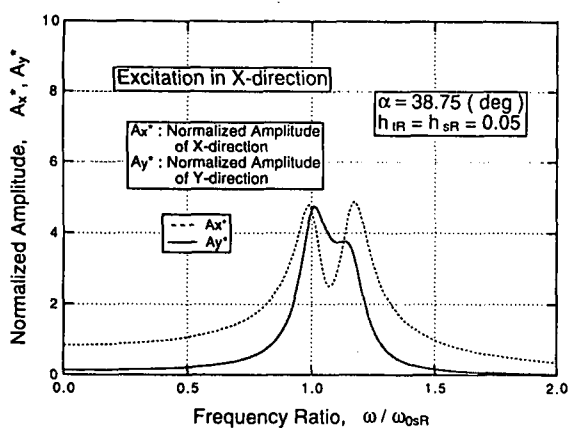


図 10 模型建屋直下に想定した要素



(a) Y 方向に加振した場合



(b) X 方向に加振した場合

図 11 強制加振実験に対するシミュレーション計算結果

$$1/G_{\max} = 1/G_{\min} - \sin^2 \beta \cdot (4 \cos^2 \beta - 1) \cdot (1/G_v - 1/G_h) \quad (2a)$$

$$1/G_{\min} = \sin^2 \beta / G_h + \cos^2 \beta / G_v \quad (2b)$$

(2) セン断波速度の異方性について

上島・岡野²⁾が逆解析から定めた強軸(図3, 図7における s 軸)と x 軸の成す角 ξ (図7)とせん断速度の関係を図8に示す。式(1a)を用いてフィッティングしたものが図8中の曲線である。式(1a)によって、地盤の異方性が表現できることがわかる。ところで、図8中で実線と破線は

一致せず、破線は実線より上にある。これは、砂礫層内の不均一性によるものと思われる。

(3) 繰返し三軸試験結果との比較

繰返し三軸試験結果から計算によって得られたせん断波速度と傾斜した層面を有する層状弾性体で三軸応力状態を仮定した場合のせん断弾性係数から算出されたせん断波速度を比較したものが図9である。計算結果は、直径 30cm 供試体に対する試験結果とほぼ一致している。直径 30cm 供試体に対する試験結果は直径 10cm 供試体に対する実験結果よりも大粒径の礫粒子の存在の影響を受けず信頼性が高い。したがって、実験結果と計算結果はよく一致していると言える。

(4) 強制振動実験結果のシミュレーション

図6に示す強制振動実験結果をシミュレートすることを試みる。簡単のために図10のように建屋直下の A1, A2, B1, B2 の要素だけで模型建屋は支えられており、各々の要素は傾斜した層面を有する層状弾性体の応力・ひずみ特性を有しているとする。また、簡単のために図3, 図7ならびに図10における s 軸, t 軸を中心としたロッキングのみ生じると仮定する。このようにして得られた結果が図11である。図6と比較すると極めて簡略な解析モデルであるにもかかわらず、ダブルピークを示すこと等、全体的な傾向は十分に再現できていることがわかる。

参考文献：

- 1) 山谷博愛, 小林俊夫, 杉山達也 (1995) : 建屋—地盤相互作用大型模型の強制振動実験研究, 実験結果及びその分析, 日本建築学会構造系論文集, 第478号, pp.81 - 90.
- 2) Ueshima, T. and Okano, H. (1996) : "Further investigation of seismic response of soil and embedded structure in Haulien LSST program, Paper No.1930, 11th World Conference on Earthquake Engineering, Elsevier Science Ltd.
- 3) Okamoto, T., Kokusho, T., Tanaka, Y., Kudo, K. and Kawai, T. (1995) : "Ground model for seismic response analysis in Haulien project of large scale seismic test," Transactions of the 13th International Conference on Structural Mechanics In Reactor Technology, Vol.3, pp.103 - 108.
- 4) Kokusho, T., Nishi, K., Okamoto, T., Tanaka, Y., Ueshima, T., Kudo, K., Kataoka, T., Ikemi, M., Kawai, T., Sawada, Y., Suzuki, K., Yajima, K. and Higashi, S. (1997) : Distribution of Ground Rigidity and Ground Model for Seismic Response Analysis in Haulien Project of Large Scale Seismic Test, to be published.