

(163) 相似則の成立性に関する数値実験による吟味

埼玉大学 工学部 正会員 渡辺 啓行

埼玉大学大学院 学生員 美斎津 宏史

1. はじめに

近年、地盤工学に関わる模型振動実験には遠心力载荷装置が用いられる傾向が強くなりつつあるが、振動台を用いた模型振動実験は古くから行なわれてきており、数多くの実験結果も得られてきている。この場合相似則は模型の現象から実物の現象を推定する上で非常に重要であるが、その成立性には不明瞭な点が少ない。とくに、地中構造物のように埋設構造物と地盤とに相互作用が伴う現象に関して相似則の成立性が検証された例は非常に少ないと思われる。少なくとも著者らは、不勉強ながら、そのような例を知らない。そこで、本報告では、地中ダクトについて実物および相似則を適用したその模型とに対して、横断面方向の2次元動的解析を行い、数値実験による相似則の成立性について検討する。次いで、埋設構造物の剛性が相似則を満たさない場合に生ずる現象と埋設構造物の質量密度の影響について検討する。

2. 解析方法

数値実験用地中ダクト・地盤系の平面ひずみ要素分割を図-1に示す。構造物は梁要素で、周辺地盤は三角形定ひずみ有限要素でモデル化し、梁要素と有限要素の間にジョイント要素を挿入した。下端は一様入力境界、両側は水平ローラー支持とした。¹⁾ 構造物は線形、地盤は等価線形化法で次の動的定数を適用した。

$$G_0=700[(2.17-e)^2/(1+e)](\sigma_m')^{0.321}\dots\dots(1)$$

$$G/G_0=1/(1+\gamma/\gamma_r) \quad \text{表-1 相似則}$$

$$\dots\dots(2)$$

$$h=h_{max}\gamma/(\gamma+\gamma_r)$$

$$\dots\dots(3)$$

$$\gamma_r=2.95\times 10^{-4}\dots\dots(4)$$

$$h_{max}=0.337 \quad \dots\dots(5)$$

相似則には、力の比を全て合わせる香川・国生²⁾の相似則を適用する。この相似則は実物と模型の支配方程式が同等となるよう全ての物理量の比を定める井合の相似則³⁾に包含される。(1)式の平均有効主応力のベキ乗を一般に m (ここでは $m=0.321$)とした相似則を表-1に示す。

(註：モーメントの相似比は平面ひずみ

物理量	相似比
大きさ	λ
質量密度	η
加速度	1
弾性定数	$\lambda^m \eta^m$
ひずみ	$\lambda^{1-m} \eta^{1-m}$
変位	$\lambda^{2-m} \eta^{1-m}$
応力	$\lambda \eta$
モーメント	$\lambda^4 \eta (\lambda^3 \eta \text{註})$
振動数	$(\lambda^{m-2} \eta^{m-1})^{1/2}$

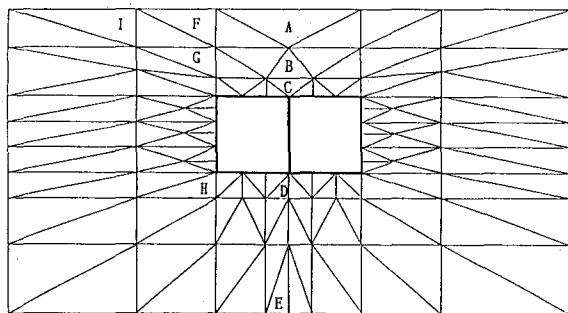


図-1 要素分割図

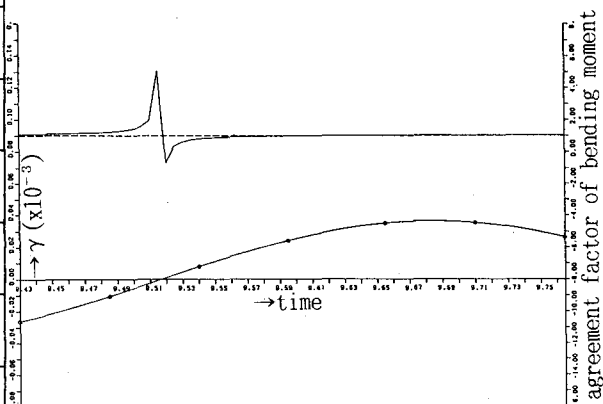


図-2 共振時の地盤内せん断ひずみと一致度の時刻歴

条件で単位厚さを取る場合 $\lambda^3 \eta$ となる。)

相似則の適用性は以下の手順で評価する。

- ①設定入力に対して実物の応答を計算する。
- ②相似則に従う模型と入力について応答を計算し、各種応答量を相似則を介して実物大の応答に戻す。これらを『実物相当値』と呼ぶ。
- ③各種応答量毎に②で得た『実物相当値』と実物の応答の比を求め、その時刻歴と特定時刻における断面内分布を求める。

ここで、上記③で述べた比を『一致度』と呼び

$$『一致度』 = 『実物相当値』 / 『実物値』 \cdots (6)$$

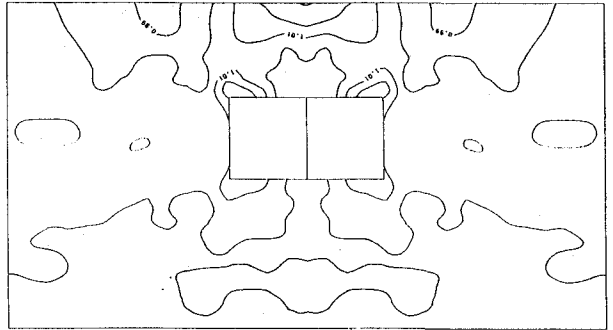
と定義する。上述した手順の実施例として、砂地盤（式(1)～(5)の動的定数を持ち、質量密度 $\rho=1.369(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、厚さ23.1(m)に幅10.8(m)、高さ5.8(m)、板厚0.6(m)の横断面を持つRCダクトが地表から天端まで6.65(m)の深さに埋設されているケースを対象に実物とその1/35縮尺の模型の動的応答¹⁾を検討する。地盤模型には同じ砂を用い得ることとし、始めに、全材料とも $\eta=1$ として表-1の相似則により模型の物性を定めた。ただし、地盤のポアソン比と間隙比は、それぞれ0.25および0.931とした。また、(1)式を模型地盤に適用する際、当然のことではあるが、基準ひずみは表-1の相似比により定め、表-1における弾性定数の相似比は(1)式から決まってくることになる。

上述したように、地盤工学に関連した模型振動実験では地盤模型に実地盤材料を用いることが可能であるケースは少なくない。反面、模型の縮尺に依りては、構造物の模型に相似比を満足できる材料を捜し出すことが困難なケースが非常に多い。この場合、構造物の相似則が満足されないとどのような応答が模型実験で観察されるかは非常に興味あることである。そこで、“『模型実現剛性値』/『実物剛性値』の相似比からの変動倍率”を『相似剛性に対する変動倍率』と定義し、その変化の影響を検討する。表-1の記号を用いると、この量は次式で定義され、相似則が満足される場合には1となる。

$$『相似剛性に対する変動倍率』 \equiv \kappa = \{(\lambda \eta)^m + \delta(\lambda \eta)^m\} / (\lambda \eta)^m \cdots \cdots (7)$$

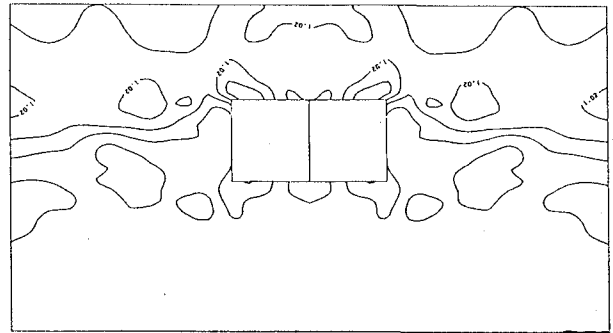
3. 相似則の適用性に関する考察

振幅50(gal)、共振振動数をもつ正弦波入力に対する定常応答時の地盤内のある点の応答せん断ひずみと



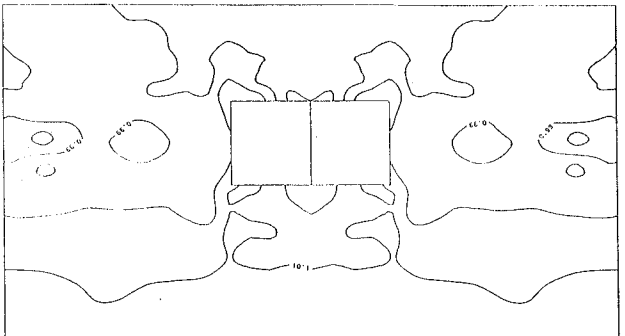
共振振動数正弦波入力（加速度振幅=50(gal)）
 $\eta=1, \kappa=1$

図-3 共振応答時の地盤せん断ひずみ一致度分布



El Centro 1940(NS), Peak Acc.=50(gal)
天端・底変位差最大時刻, $\eta=1, \kappa=1$

図-4 地震応答時地盤せん断ひずみ一致度分布 (50gal)



El Centro 1940(NS), Peak Acc.=200(gal)
天端・底変位差最大時刻, $\eta=1, \kappa=1$

図-5 地震応答時地盤せん断ひずみ一致度分布 (200gal)

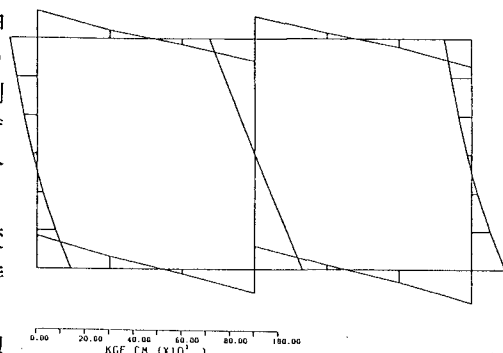
せん断ひずみ一致度との時刻歴の例を図-2に示す。縦軸は左側にせん断ひずみ、右側にせん断ひずみ一致度を取っている。図から明らかな通り、せん断ひずみ一致度の時刻歴はひずみがゼロ付近を除いてほぼ1となっている。ひずみがゼロ付近では、(6)式の下母がほぼゼロであるため分子の『実物相当値』にわずかな差異が生じても比が大きく誇張されるため一致度があたかも衝撃波のように1から変動する。地中構造物の天端と底との変位差が最大となる時刻の地盤内のせん断ひずみ一致度の分布を図-3に示す。図よりほぼ全域で一致度は、0.99~1.01の範囲にあり相似則の適用性が極めて良好であることを示している。地震波入力に対しても同じ傾向にあり、El Centro 1940(NS)波を最大振幅50(gal)で入力した時の天端・底最大変位差時刻におけるせん断ひずみ一致度の分布を図-4に示す。図より明らかな通り、地震波入力に対しても一致度は1に集中し相似則の適用性は良好である。さらに、最大振幅を200(gal)とした場合の分布を図-5に示す。この場合も相似則の適用性は良好であり、地盤材料の非線形性に対しても相似則の適用性が良好であることを示している。

地中構造物の応答に関しては、上記地震波(最大振幅50(gal))入力における上記と同時刻の実物の曲げモーメント分布を図-6に、各部材における曲げモーメント一致度の分布を図-7と図-8とに示す。図から明らかな通り、曲げモーメントがゼロとなる位置ではせん断ひずみ一致度の時刻歴と同じ現象が認められるが、このような位置を除くと曲げモーメント一致度は全部材でほぼ1となっており、地中構造物においても相似則の適用性は良好と言える。

4. 構造物剛性の相似則が満足されない影響と慣性力の影響

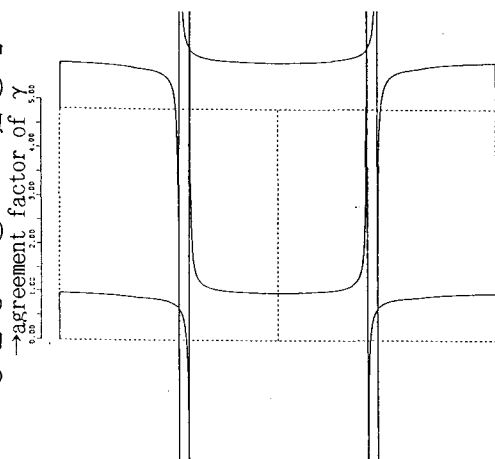
地盤の相似則は満足するが、構造物剛性の相似則は相似剛性に対する変動倍率 κ が0.2、0.5、2.0となる程度に満足されないケースについて $\eta=1$ の場合を検討した。図-9に $\kappa=0.2$ のケースにおける地盤せん断ひずみ一致度の分布例を示す。これらの変動を見易くするために、地盤せん断ひずみ一致度については、図-1に示すA~Iの要素毎に縦軸にせん断ひずみ一致度を取り、横軸に κ を取ってプロットし、曲げモーメント一致度については、図-7、8に示す分布の全横断面積平均値を求め、『曲げモーメント一致度の平均値』として κ に対する変動をプロットした。

地盤せん断ひずみ一致度の変動の例を要素AとCについて図-10と図-11に示す。曲げモーメント一致度の変動の例を図-12に示す。図-9の地盤せん断ひずみ一致度の分布特性は模型構造物の剛性が極端に小さいためインピーダンス比に起因して構造物直上地盤の応答が地表に近づくほど増幅するため一致度が悪くなると



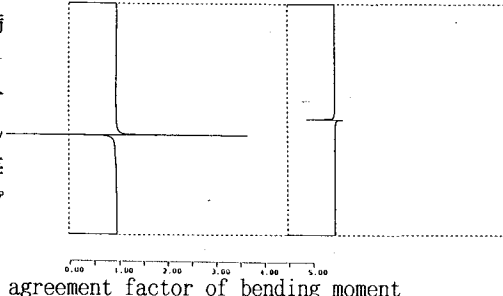
El Centro 1940(NS), Peak Acc.=50(gal)
天端・底変位差最大時刻, $\eta=1$, $\kappa=1$

図-6 モーメントの分布(実物・地震波)



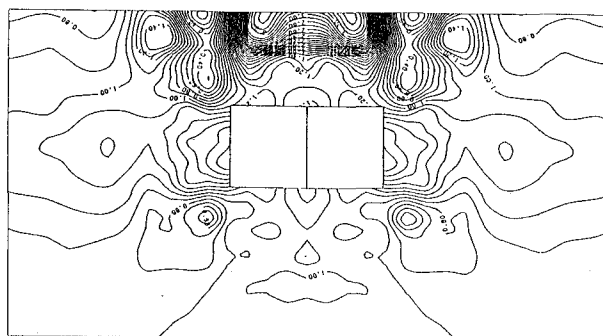
El Centro 1940(NS), Peak Acc.=50(gal)
天端・底変位差最大時刻, $\eta=1$, $\kappa=1$

図-7 モーメント一致度の分布(水平部材)



El Centro 1940(NS), Peak Acc.=50(gal)
天端・底変位差最大時刻, $\eta=1$, $\kappa=1$

図-8 モーメント一致度の分布(鉛直部材)

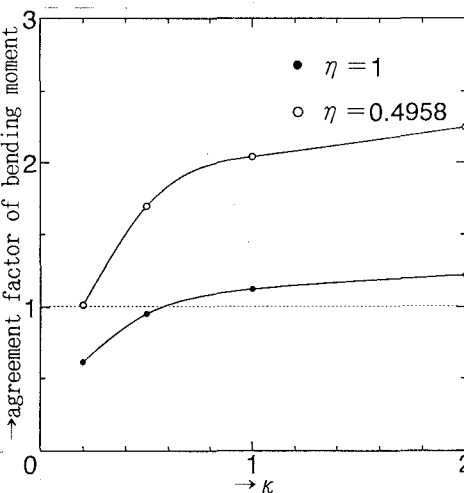


El Centro 1940(NS), Peak Acc.=50(gal)

天端・底変位差最大時刻, $\eta = 1$, $\kappa = 0.2$

図-9 地盤せん断ひずみ一致度 (非相似構造模型)

考えられ、地盤全域としては構造物より上部の地盤慣性力が同程度であるため構造物頂底部の地盤せん断応力とせん断ひずみが実物相当値から大きく変動せず構造物近傍のせん断ひずみ



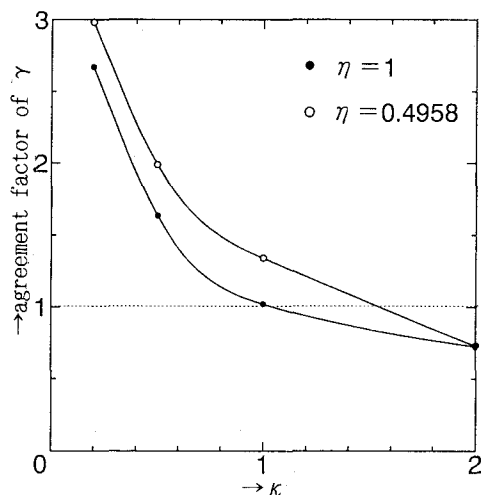
El Centro 1940(NS), Peak Acc.=50(gal)

天端・底変位差最大時刻

ものと考えられ、図-12 曲げモーメント一致度 $\sim\kappa$ 関係。上記推測は、図-12に見られるように構造物の曲げモーメント平均一致度は $\kappa=0.2$ でもA要素地盤ひずみより変動が小さいことから裏付けられていると考えられる。せん断ひずみ一致度と曲げモーメント平均一致度共に変動は図-10 $\sim$ 図-12に示されている通り κ が1より大きい範囲ではそれほど大きくならない。

構造物模型のみ η を0.4958としたケースの結果を図-10 $\sim$ 図-12に重ねて示してある。地盤ひずみへの影響は κ ほど大きくないが、図-12に見られる通り曲げモーメント平均一致度は大きく変動し、 $\eta=1$ のケースの丁度 $1/\eta$ 倍ほど大きい。この理由は地中構造物の慣性力が小さく曲げモーメントは主に地盤変位に強制され、構造材料の質量密度に関係に決定されるにも拘らず、実物相当値を求める際 $1/\eta$ 倍したことにある。地中構造物の質量密度に関する相似則は慣性力等荷重機構を正確に考慮して構築する必要がある。

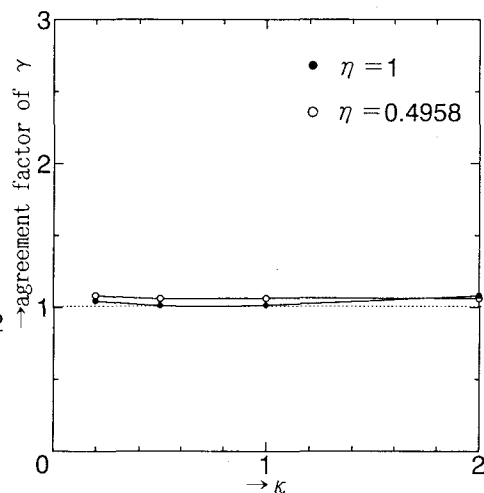
参考文献 1)渡辺啓行, 他, 土木学会論文集, No. 431/III-15, pp. 163-172, 1991, 7. 2)香川崇章, 土木学会論文報告集, No. 275, pp. 69-77, 1978. 3)井合 進, 第19回地震工学研究発表会講演概要, pp. 341-344, 1987.



El Centro 1940(NS), Peak Acc.=50(gal)

天端・底変位差最大時刻 (A要素)

図-10 地盤せん断ひずみ一致度 $\sim\kappa$ 関係



El Centro 1940(NS), Peak Acc.=50(gal)

天端・底変位差最大時刻 (C要素)

図-11 地盤せん断ひずみ一致度 $\sim\kappa$ 関係