

有効応力解析コード “DIANA-J2” の適用性に関する研究

久保寺 家 光 伊 藤 浩 二
後 藤 洋 三 表 佑 太 郎

Study on Applicability of Numerical Analysis Code “DIANA-J2” Based on Effective Stress Theory

Iemitsu Kubodera Koji Ito
Yozo Goto Yutaro Omote

Abstract

The purpose of this study is to verify applicability to practical work of the numerical analysis code “DIANA-J2” based on effective stress theory. The method of verification is numerical simulation of dynamic centrifuge tests conducted to investigate a countermeasure against soil liquefaction for embankments or semi-buried structures. The major conclusions drawn are as follows: ① With the embankment model, numerical analysis and the dynamic centrifuge test produced similar results qualitatively, and to some extent, quantitatively. ② In simulation of a semi-buried structure where failure consisting of discontinuity between soil and structure when liquefaction occurs, introduction of something like joint elements will be necessary. ③ More improvements, such as stability of analysis and shortening of calculation time will be required for this code to ensure increased practicality.

概 要

本研究は二次元有効応力解析コード “DIANA-J2” に独自の構成則を組込んで実務的な適用性を検討したものである。検討方法は、盛土ならびに掘割構造に対する液状化対策の効果判定を目的に行なわれた既往の遠心模型振動実験結果を数値シミュレーションし、その結果を持って適用性を諮ったものである。主な結論を以下に示す。① 盛土に関する解析では、実験結果を定性的、一部定量的にシミュレーションできた。② 液状化すると地盤と構造物の間の縁が切れるような破壊が起こる掘割構造のシミュレーションには、ジョイント要素等の導入が必要である。③ 本解析コードの実用性を高めるためには、計算の安定性や計算時間の短縮等について、さらに改良すべき点がある。

1. はじめに

地震時に注目している地盤が液状化するか否かを判定する方法のうち、室内液状化試験や地震応答解析を行なう詳細判定法は、特に重要な構造物の安全性を検討する際に用いられている。その地震応答解析には、一般に全応力解析法が用いられてきた。有効応力法と比較してパラメータが設定しやすく実施例が多いことなどがその主な理由と想像される。しかし、全応力解析では地震時に発生する過剰間隙水圧を直接算定することができず、過剰間隙水圧の発生に伴う地盤物性の変化を時々刻々考慮することは困難であるため、適用に当たって高度な工学的判断が要求される。一方、有効応力解析法は液状化により発生する過剰間隙水圧を直接算定するものであるが、選定しなければならない土の物性パラメータが多いこと、

適用される構成則が必ずしも確立されていないこと、計算時間が長くなること等の問題を抱えている。しかし、将来これらの問題が解決されれば有効応力解析を用いる方法が液状化の詳細判定法の主流になるものと思われる。

現在、TARA-3, DIANA-J2, ALISS, FLIP, MuDIAN, NAFSS, LIQCA 等、数多くの有効応力解析コードが開発されており検証が試みられている。これらのコードの決定的な相違は土の構成則であり、それぞれ異なった構成則を用いて適用性を競っている。

解析手法の検証には、実現象を数値シミュレーションするのが最良の方法であるが、残念ながら地震による液状化現象を計測器で捕らえたデータは限られている。実地盤を対象とした液状化に関する一斉解析¹⁾が試みられた例もあるが、実際の応答変位や間隙水圧などのデータが無いために解析で得られた結果を評価しきれない部分

があった。特に構造物の変形量において、用いられた解析コード、構成則により答が大きく異なる傾向にある。そこで、本研究では1 G場の模型実験と比較すると実物に対する相似則が簡明で、実現象の応力関係を再現していると考えられる遠心模型振動実験の報告例²⁾を用いて、有効応力解析コード“DIANA-J2”の適用性の検証を試みた。なお土の構成則には、Multi-mechanismモデルに主応力軸の回転の効果を導入した当社独自のモデルを用いた³⁾。

2. 解析対象

解析は、盛土と掘割構造に対する液状化対策工法の効果を検証するために行なわれた遠心模型振動実験の結果を対象に行なった。図-1, 2に模型の断面を表-1に模型材料の諸元を示す。模型地盤材料には豊浦標準砂が用いられた。実験で想定した実物の地盤は、層厚3~5mの液状化の可能性のある緩い層（以降、液状化層）が支持層の上部に堆積している状態である。実際の液状化対策工法は構造物の両脇の地盤を深層混合処理工法により固化するものである。実験はこの固化体を剛体でモデル化した改良モデルと固化体のない未改良モデルの2種について実施された。なお、掘割構造については改良モデルのみが実施された。

3. 解析例

解析に用いたモデルパラメータを表-2に、模型地盤の物理定数を表-3に示す。各パラメータは豊浦標準砂に対する既往の室内試験結果を参考に決定した。その内の硬化パラメータ a_m , a_c は、液状化層 ($D_r \approx 60\%$) については文献⁴⁾より繰り返し回数 $N_L = 20$ 回における液状化強度 $\tau_{xy}/\sigma'_m = 0.15$ を要素シミュレーションで満足するように決定した。支持層 ($D_r \approx 100\%$) については参考になる室内試験結果が見当たらなかったため、要素シミュレーションでひずみが増大しないこと、ほとんど過剰間隙水圧が発生しないことを目標に決定した。

3.1 要素シミュレーション

液状化層の土の要素を取出して室内非排水繰り返しせん断試験を行なう状態をこの有効応力解析コードによりシミュレーションした。その結果を図-3に、支持層のそれを図-4に示す。液状化層では繰り返し回数がほぼ10回でサイクリックモビリティを生じ、それ以上は平均有効応力が減少せず完全な液状化状態 $\sigma_m = 0$ にならなかったが、過剰間隙水圧比が約0.8に達しており、液状化したとみなすこととした。それに対して支持層では、繰り返しせん断力が働いているにもかかわらず平均有効応力は大きく減少せず、過剰間隙水圧もほとんど発生しないので液状化しないことが分かる。

3.2 構造物を含む二次元モデル

図-5, 6に構造物の両脇を改良した場合の解析モデルを示す。境界条件は、解析の対象とした遠心模型振動実験の土層が剛土層であったことから、解析モデルの側

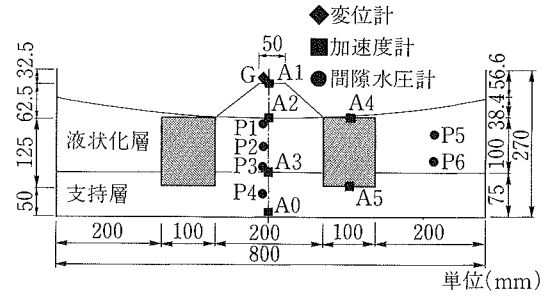


図-1 改良モデルの盛土（遠心模型振動実験）

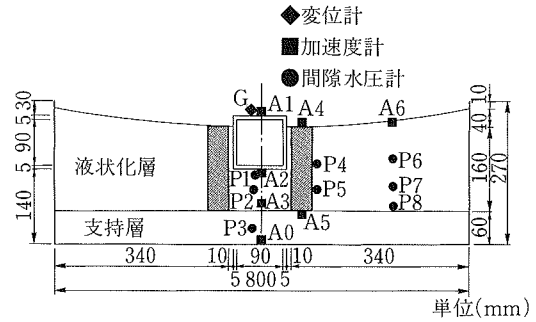


図-2 改良モデルの掘割（遠心模型振動実験）

表-1 遠心模型振動実験における模型材料の諸元

模型材料	諸元
液状化層	豊浦標準砂, $D_r \approx 60\%$, $\gamma' = 0.955 \text{ t/m}^3$
支持層	豊浦標準砂, $D_r \approx 100\%$, $\gamma' = 1.055 \text{ t/m}^3$
盛土体	カオリンと豊浦標準砂の混合体, $\omega = 15\%$, $\rho = 1.9 \text{ t/m}^3$
掘割	アクリル製, 比重約 1.7
固化体	板厚6mmの鋼製, 比重約2.05
間隙水	30CSシリコンオイル, $\gamma_w = 0.955 \text{ t/m}^3$

表-2 モデルパラメータ

歪の成分	パラメータ名	記号	液状化層	支持層
剪断成分	破壊角	Φ_f	35°	37°
	変相線の傾斜パラメータ	C	1.00	1.00
	変相線の応力比	μ_{max}	1.20	1.20
	硬化パラメータ	S_c	0.0035	0.0035
	硬化パラメータ	a_m	0.00006	0.000005
圧縮成分	硬化パラメータ	a_c	0.00006	0.000005
	圧縮時勾配	λ_c	0.0043	0.0008
	膨潤時勾配	λ_s	0.0013	0.0002
弾性成分	間隙比	e_o	0.760	0.593
	初期剪断剛性	G_o	25,000kN/m ²	34,000kN/m ²
	初期弾性係数	K_o	66,500kN/m ²	90,440kN/m ²
	基準有効応力	σ'_{ref}	98kN/m ²	98kN/m ²
	ポアソン比	ν	0.33	0.33
回転成分	回転角	δ	30°	30°

表-3 模型地盤の物理定数

項目	土粒子骨格	間隙水(シリコンオイル)
体積弾性係数	K	$1.0 \times 10^{40} \text{ kN/m}^2$
質量密度	ρ	2.635 t/m^3
Rayleigh減衰	α	0.00
Rayleigh減衰	β	8.0×10^{-5}
間隙率	n	0.432
透水係数	k	$5.00 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$

壁は鉛直ローラー、底面は固定とした。固化体と掘割構造は模型のせん断剛性と等しい剛性を持つ要素でモデル化し、非排水とした。動的解析を行なう前に、線形自重解析により初期応力を求めた。この時の境界条件は、動的解析と同じである。なお、未改良の解析モデルは図-5, 6の固化体の部分が地盤に置き換わるだけである。また、掘割構造モデルにおいては、遠心模型振動実験では実施していない未改良のモデルについても解析を行ない、合理的な結果が得られるか比較した。

3.2.1 盛土モデルの解析 図-7, 8にそれぞれ未改良モデルと改良モデルの自由地盤の過剰間隙水圧経時変化を示す。これらの図から、実験値ならびに解析値ともに自由地盤が液状化に達し、両者はほぼ一致した経時変化を示したと言える。一方、未改良モデルの解析結果は改良モデルに比べて、水圧の立ち上がりが早く、かつ0.1秒後に経時変化に乱れが生じている。図-9, 10に線形自重解析による主応力方向を示す。図の円内の主応力方向

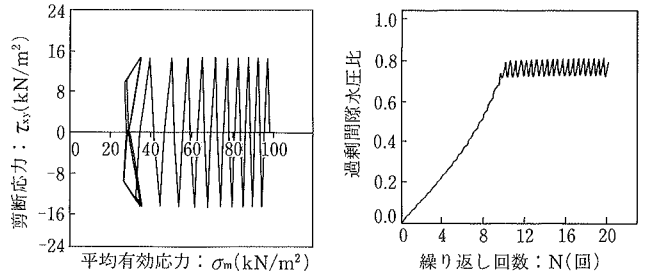


図-3 液状化層の要素シミュレーション結果

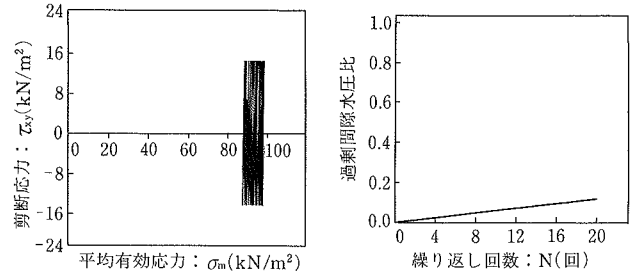


図-4 支持層の要素シミュレーション結果

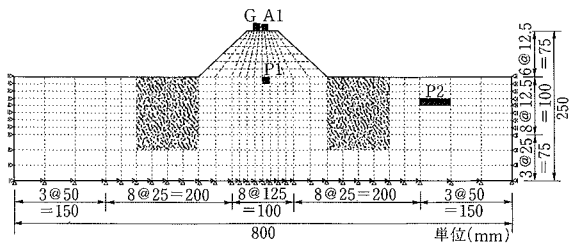


図-5 解析モデル (盛土)

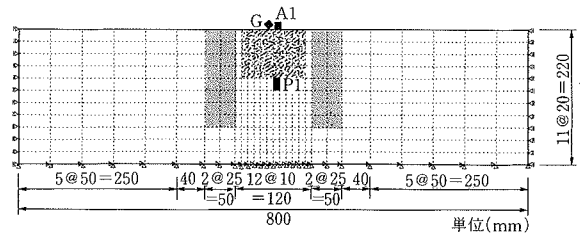


図-6 解析モデル (掘割構造)

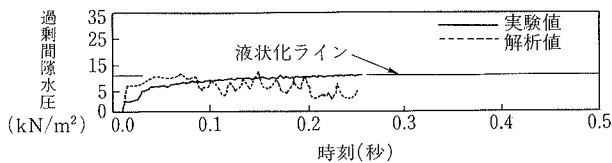


図-7 自由地盤の過剰間隙水圧経時変化 (未改良モデルの盛土)

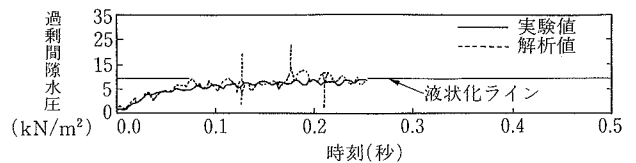


図-8 自由地盤の過剰間隙水圧経時変化 (改良モデルの盛土)

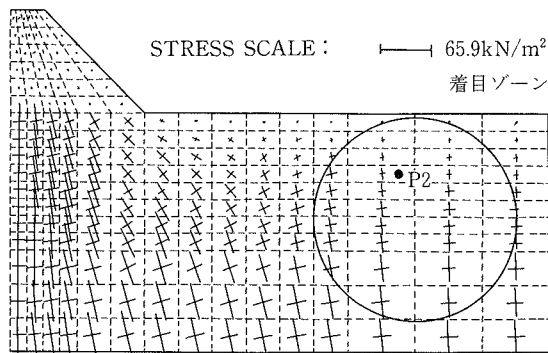


図-9 未改良モデルの盛土の線形自重解析における主応力方向

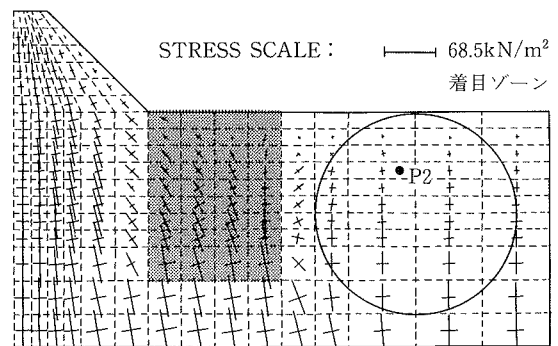


図-10 改良モデルの盛土の線形自重解析における主応力方向

を比較すると未改良モデルの方が改良モデルのそれに比べて盛土方向に傾いていることが分かる。従って水圧の立ち上がりが早いのは、盛土自重の影響による自由地盤の初期せん断が未改良モデルの方が大きく、その影響が解析結果に現れたからと推察される。0.1秒後の解析値の乱れは盛土変形によるせん断力と本プログラムの数値解析上の不安定性により生じたものと推定される。未改良モデルの盛土天端の応答加速度を図-11に、改良モデルのそれを図-12に示す。図-11で実験値と解析値は0.1秒まではほぼ一致した応答を示しているが、その後両者の間に位相のずれが見られる。しかしながら、応答加速度はほぼ一致した値を示している。図-12でも0.1秒まで両者は良好な一致を示している。0.1秒後に両者に位相のずれが見られるようになってくるが、応答加速度が増加しなくなる定性的な傾向は一致している。実験値、解析値ともに応答加速度の比較から、両脇を固化した場合の構造物の応答加速度に増幅傾向が見られず、むしろ定常的な応答を示していることが分かった。これは固化体に拘束された地盤、すなわち盛土直下地盤が加振中に健全であったためと思われる。

盛土直下の液状化層の過剰間隙水圧経時変化を図-13、14に示す。図-13で実験値と解析値は負圧を示し定性的な傾向は一致している。また、ほぼ0.1秒までの水圧値はほぼ一致しているが、その後は両者にずれが見られる。図-14では図-13ほど明瞭な一致は見られないが、負圧を示した後に正圧に向かう定性的な傾向は一致した。

盛土の鉛直変位を図-15、16に示す。これらの図から、どちらの解析も実験と定性的、定量的に一致した値が得られたといえる。また、両脇を固化した方が沈下量が少なく、合理的な傾向にあるといえる。

図-17、18に解析時間0.25秒におけるモデル全体の変形パターンを示す。これらの図から、この有効応力解析により、盛土ならびに盛土周囲地盤の大規模な側方流動を固化体がふんばることにより防いでいることがよくシミュレーションされている。

3.2.2 掘割構造モデルの解析 地盤液状化時の掘割構造の浮上メカニズムは古関⁹⁾らが示したように、次の二つが考えられる。

- ① 周囲地盤が液状化して掘割構造直下に回り込むことによるもの
- ② 掘割構造下の過剰間隙水圧により掘割に働いていた浮力のバランスが崩れることによるもの

このうち、①は加振中に、②は加振終了後に主に発生することが観測されている。ここでDIANA-J2は微小変形理論に基づいた解析手法であることから大変形は扱えないが、①と②の浮上メカニズムにより発生する連続的な変形に注目して解析を行なった。

掘割の応答加速度を図-19に示す。加速度振幅は解析値の方が2倍ほど大きい値を示している。これは、掘割と周囲地盤の境界でのすべりと剝離を適切にモデル化していなかったことに原因があると思われる。

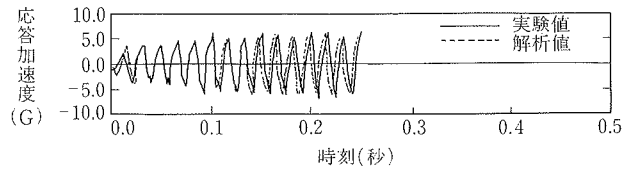


図-11 未改良モデルの盛土天端応答加速度：A1

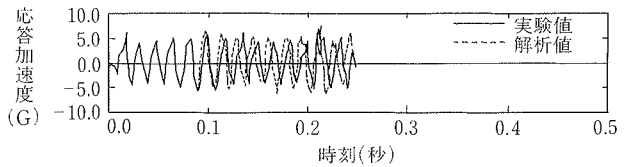


図-12 改良モデルの盛土天端応答加速度：A1

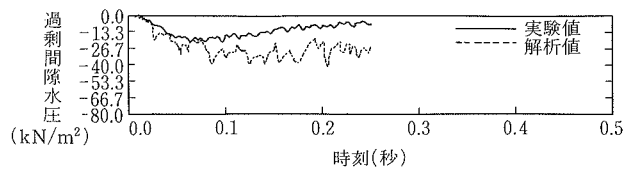


図-13 未改良モデルの盛土直下過剰間隙水圧：P1

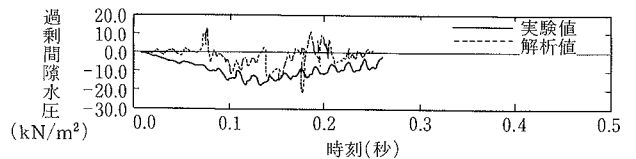


図-14 改良モデルの盛土直下過剰間隙水圧：P1

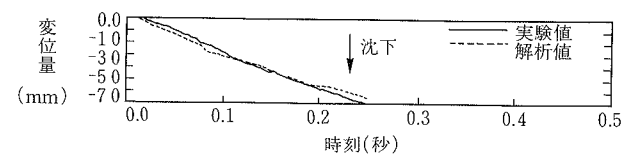


図-15 未改良モデルの盛土変位経時変化：G

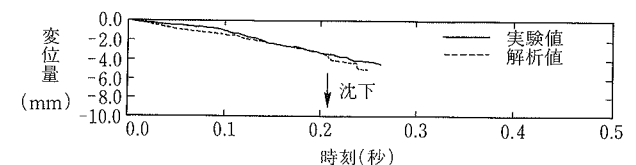


図-16 改良モデルの盛土変位経時変化：G

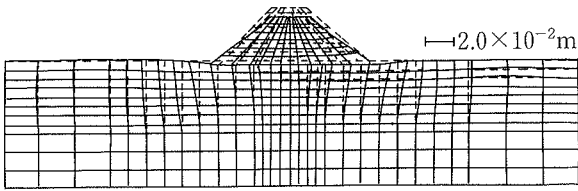


図-17 未改良モデルの変形パターン
(加振開始0.25秒後)

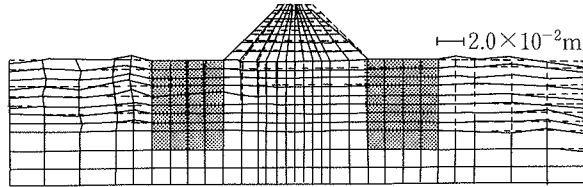


図-18 改良モデルの変形パターン
(加振開始0.25秒後)

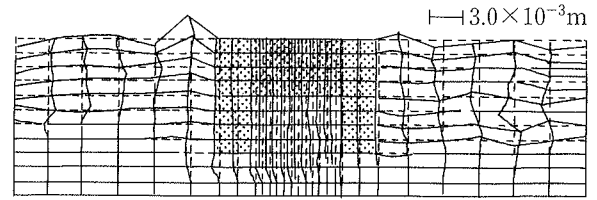


図-22 改良モデルの変形パターン
(加振開始0.25秒後)

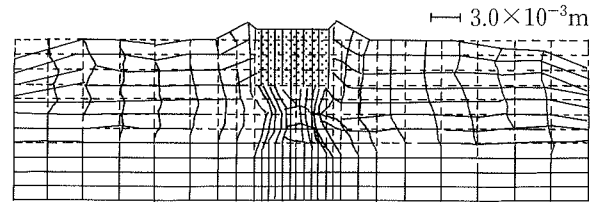


図-24 未改良モデルの変形パターン
(加振開始0.25秒後)

掘割直下の液状化層の過剰間隙水圧経時変化を図-20に示す。この図から掘割直下は液状化に達していることが分かる。過剰間隙水圧上昇過程ならびにその値には良好な一致が見られた。

掘割両脇を固化したモデルの掘割の鉛直変位の実験値と解析値を図-21に、加振開始から0.25秒経過時のモデル全体の変形パターンを図-22に示す。また、未改良の場合の同様な図を図-23, 24に示す。図-21, 22から実験値、解析値とも掘割直下は液状化に達しているが、掘割は加振中にほとんど浮上していないことが分かる。一方、図-23から未改良の場合、加振中に掘割が浮上していく結果が得られた。

3.2.3 ジョイント要素導入による掘割モデルの解析

上記の掘割モデルの解析結果において、掘割の応答加速度が実験結果とかなりの差があり、良好にシミュレーションできたとはいえない。そこで、掘割と周囲地盤の境界にジョイント要素を導入し解析を行なった。ジョイント要素のパラメータを表-4に示す⁶⁾。図-25に掘割の応答加速度を図-26に掘割の浮上量経時変化を示す。図-25から、応答加速度の値ならびにその低下していく傾向が、先で示した解析結果図-19と比べてより良好にシミュレーションできていることが分かる。次に、図-26の掘割の浮上量経時変化では実験の現象と異なり、加振と同時に浮き上がりが始まる結果となった。しかしながら、その浮上量は0.25秒時点で0.25 mm程度であってほとんど浮上していないと言え、実験値との差は約0.3 mmで図-21に示すジョイント要素を用いない場合の差約1.0 mmより小さい。実験値の経時変化で見られるいったん沈んでまた浮き上がる現象の最初の沈下は、掘割模型が試料容器や周囲地盤となじむために生じた可能性があり、そのような現象をシミュレーションすることは不可能と思われる。

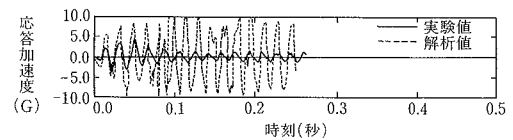


図-19 改良モデルの掘割の応答加速度：A1

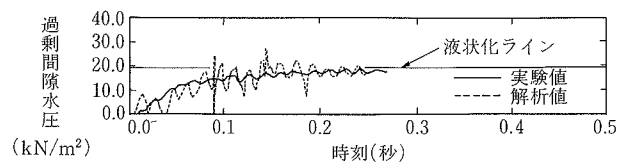


図-20 改良モデルの掘割直下過剰間隙水圧：P1

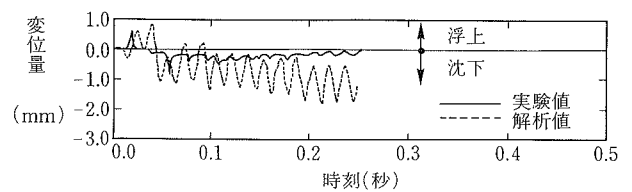


図-21 改良モデルの掘割の変位経時変化：G

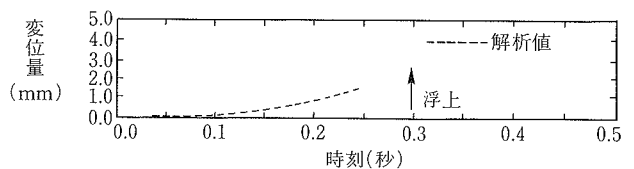


図-23 未改良モデルの掘割の変位経時変化：G

表一4 ジョイント要素の
パラメータ

摩擦角 ϕ_j	30°
粘着力 C	0
剪断バネ ks	$4.3 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$
鉛直バネ kn	$1.69 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$
ポアソン比	0.3
弾性定数 E	$2.68 \times 10^4 \text{ kN/m}^2$

4. まとめ

主応力軸回転の効果を導入した Multi-mechanism を構成則に用いた二次元有効応力解析コード DIANA-J2 を遠心模型振動実験の数値シミュレーションをすることにより検証した。その結果、以下のことが分かった。

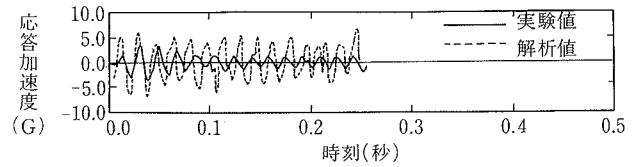
① 盛土モデルの解析では実験結果を定性的にシミュレーションすることができ、特に盛土沈下量に対しては定量的に一致した。

② 掘割モデルの解析では掘割と地盤との間にジョイント要素を導入することにより、シミュレーションの精度を向上することができた。

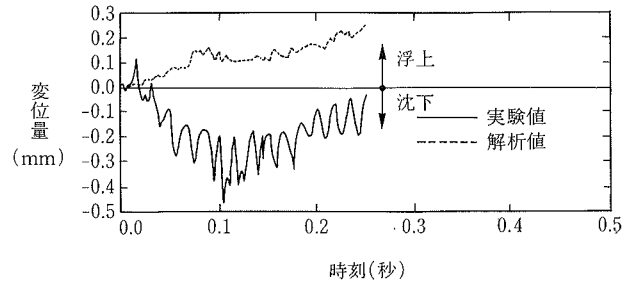
③ 地盤が液状化した後に過剰間隙水圧と加速度の計算結果に乱れが生じる場合があり、今後の実務展開を図る上で課題が残った。また、計算ルーチンの合理化による計算時間の短縮、図化機能の改善等が必要である。

謝 辞

本報告の数値シミュレーションの対象とさせて頂いた遠心模型振動実験は、建設省土木研究所および(株)竹中工務店、(株)竹中土木、不動建設(株)、(株)大林組で構成された官民連帯共同研究『耐震地盤改良(固化工法)』の一環として実施されたものである。関係各位にはここに記して感謝します。



図一25 掘割応答加速度：A1
(ジョイント要素モデル)



図一26 掘割の変位経時変化：G
(ジョイント要素モデル)

参考文献

- 1) 土質工学会編：地盤の液状化対策に関するシンポジウム発表論文集，(1991. 1)
- 2) Y. Koga, et al.: Applicability of the dynamic centrifuge model test method in developing countermeasures against soil liquefaction, CENTRIFUGE '91, p. 431, (1991. 6)
- 3) 伊藤浩二，他：液状化解析で用いる地盤構成モデルに関する提案と解析，大林組技術研究所報，No. 42, p. 49～54, (1991)
- 4) 例えば，松岡 元，他：土のダイレイタンスーを考慮した地盤の有限要素解析，土木学会論文報告集，No. 266, p. 95～106, (1977. 10)
- 5) 古関潤一，他：掘割道路の地震時浮上がりとその対策，土木技術資料，Vol. 33, No. 5, p. 4～5, (1991)
- 6) 土木学会編：動的解析と耐震設計(第2巻)，動的解析の方法，p. 123, (1989. 7)