

格子間隔が広い格子状改良直上の アスファルト舗装の変形に関する模型振動実験

大矢 陽介¹・小濱 英司²・菅野 高弘³
今井 政之⁴・東中 邦夫⁵・佐伯 嘉隆⁶

¹正会員 独立行政法人港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail: ooya-y@pari.go.jp

²正会員 独立行政法人港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail: kohama-e83ab@pari.go.jp

³正会員 独立行政法人港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail: sugano@pari.go.jp

⁴正会員 株式会社竹中土木 (〒136-8570 東京都江東区新砂1-1-1)
E-mail: imai-m@takenaka-doboku.co.jp

⁵正会員 株式会社竹中土木 (〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1)
E-mail: higashinaka-k@takenaka-doboku.co.jp

⁶正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 (〒206-8550 東京都多摩市関戸1-7-5)
E-mail: yoshitaka.saeki@ss.pacific.co.jp

アスファルト舗装の直下地盤の液状化対策として格子状改良工法の適用に際し、地震時の対策効果と舗装表面の変形についてアスファルト合材を用いた1g場の大型模型振動実験にて確認した。実験は土被りが薄く地下水位が高い砂地盤において、格子間隔が広い格子状改良が適用された断面を対象とした。舗装外周のみを改良する場合、舗装の変形と表面の傾斜を軽減する効果も見られたが、入力地震動が大きくなると舗装の沈下量は大きくなり未対策と同程度となった。舗装外周に加えて直下にも固化体がある場合、格子間隔が広いと固化体と格子内の未改良地盤の間に変位差が発生し、舗装表面に不陸として現れることが分かった。

Key Words : *liquefaction countermeasure, grid-type improvement, shake table test, asphalt pavement, airport basic facility*

1. はじめに

仙台空港では、一般空港（成田、羽田等の大都市圏拠点空港以外の空港）として全国初となる耐震化工事が2008年より実施され、工事開始から3年後にあたる2011年、東北地方太平洋沖地震により液状化を原因とする被害が発生した。液状化対策が実施予定であったが未実施の誘導路では、うねりや局所沈下による被害（写真-1、図-1参照）があった¹⁾。地震後に実施したFWD（Falling Weight Deflectometer）による非破壊構造調査より、荷重支持性能等に問題があると判断された箇所においては、暫定供用のための復旧工事が行われた²⁾。一方、液状化対策実施済み箇所においては、液状化の発生および地盤変状はほとんど見られず、被害があった未対策の箇所と対照的であった³⁾。今後発生が予測される巨大地震時に

において、空港施設が緊急物資及び人員の輸送拠点等として機能できるよう、対策が必要な施設について早急な工事実施が望まれる。

既設の空港基本施設である滑走路や誘導路を対象とした液状化対策工事の多くは、施設が供用中であることから時間的・空間的な制約がある。また、地盤条件による制約も加わるため、多数ある液状化対策工法のうち適用可能な工法は限られる。例えば、仙台空港では細粒分が多い、土被りが薄いといった地盤条件により、液状化対策工法が限られたため、誘導路において試験施工を行い工法の選定を行った⁴⁾。早急に液状化対策工事を進める上では、種々の地盤条件に対応可能な対策工法の開発も必要と考えられる。

本研究では、細粒分を多く含む地盤にも適用できる深層混合処理工法のうち、改良率を低減させて固化体を格

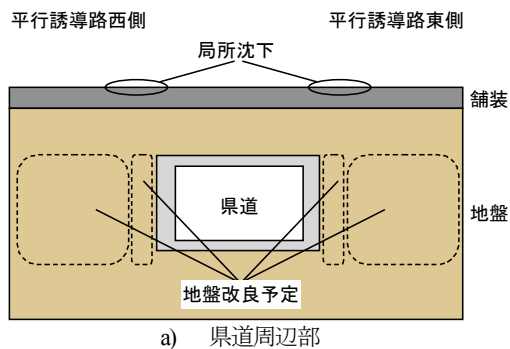


a) 県道周辺部（局所沈下）

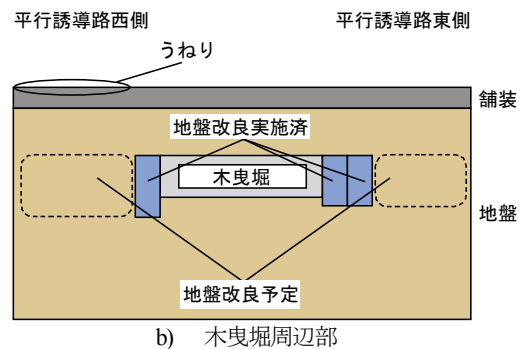


b) 木曳堀周辺部（うねり）

写真-1 仙台空港平行誘導路の被害²⁾



a) 県道周辺部



b) 木曳堀周辺部

図-1 地震発生時の平行誘導路の地盤改良概要図²⁾

子状に配置した格子状改良を対象とした。土被りが薄く地下水位が高い砂地盤を対象に、一般的な格子間隔より広い格子状改良が適用された断面において、地震時の対策効果と舗装表面の変形を確認する目的で、アスファルト合材を用いた1g場の大型模型振動実験を実施した。

2. 空港舗装への格子状改良適用への課題と模型実験の方針

(1) 空港舗装への格子状改良適用への課題

空港舗装を対象とした液状化対策は、ほとんどが供用中の既設舗装を対象とするため、航空機の離発着に支障が無いように舗装面の削孔径を小さくする必要がある。そのため空港舗装を対象とした場合、一般的に広く適用されている機械攪拌式深層混合処理工法での施工は困難となる。それゆえ、削孔径を小さく、改良径を一定に保てる高圧噴射攪拌工法が採用される場合がある^{例えは5)}。また、深層混合処理工法には改良率を低減させた経済的な形式として、固化体を格子状に配置した格子状改良がある。液状化が想定される地盤を格子状に改良することで、固化体により囲まれた未改良地盤において地震時に発生するせん断応力が低減され、液状化が抑制できる⁶⁾というのが格子状改良の液状化抑制メカニズムである

(図-2参照)。仙台空港では誘導路の地下構造物近傍において、格子状改良の施工実績がある⁴⁾。ただし、ここでの固化体の間隔（以後、格子間隔と称する）は一般的な設計^{例えは7)}より狭く、改良率が低いブロック状改良と考えることもできる。

格子状改良において、コスト縮減や工期短縮を考えれば、固化材の量を減らせるよう格子間隔を広く設定することが最短の方法と考えられる。また、空港舗装においては削孔数を小さくできるメリットがある。しかし、格子間隔を広く設定すると、固化体のせん断変形抑制効果が小さくなり、未改良地盤において過剰間隙水圧の上昇量が大きくなる⁶⁾。そして、過剰間隙水圧が上昇すれば、過剰間隙水圧の消散により、格子内の未改良地盤は沈下すると考えられる。格子間隔が一般的な間隔であっても格子内の未改良地盤が緩詰めの場合、沈下することも報告されている^{例えは8)}。それゆえ、格子状改良において格子間隔を広くすると、格子内の未改良地盤とほとんど沈下しない固化体の鉛直変位の差異が大きくなると考えられる。このような格子状改良対策済みの地盤内における変位差と、格子状改良直上の舗装構造への影響を把握することが課題となっている。格子状改良ではないが、地盤内における変位差の影響が舗装表面の不陸となって現れた事例として、前述の仙台空港平行誘導路におけるうねりや局所沈下が発生した事例が挙げられる。

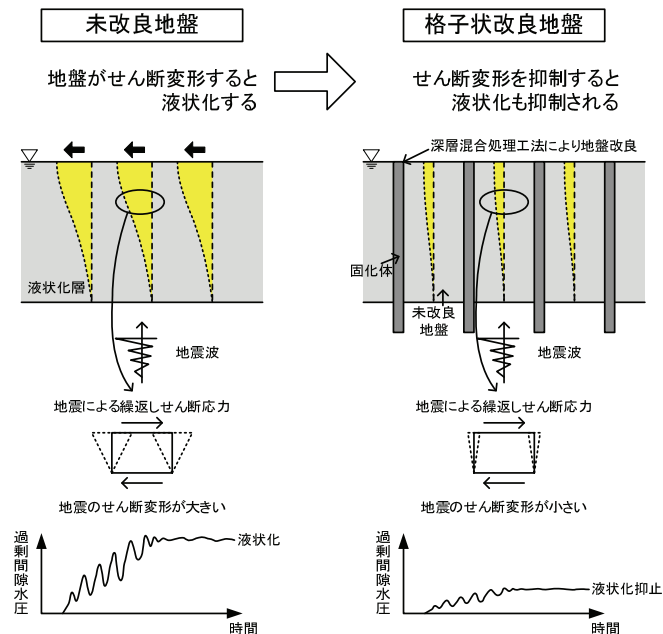


図-2 格子状改良の液状化抑制メカニズム

(2) 模型実験の方針

格子状改良の設計では格子内の地盤の液状化は許容せず、過剰間隙水圧の抑制効果が認められる格子間隔 L と改良深さ H の比 L/H が0.8以下(例えば⁷⁾)になるように設定される場合が多い。空港舗装を対象として、耐震性能評価項目⁹⁾のうち舗装の勾配だけを考えると、過剰間隙水圧の発生を許容しても舗装の不等沈下を抑え、規定勾配を満たすことができれば、格子状改良においては格子間隔を広く設定することも可能と考えられる。また、高压噴射攪拌工法を用いることで、既設構造物直下で土被りが薄い地盤に適用することも考えられるが、土被りが薄いほど、前述のような格子状改良された地盤における固化体と格子内の未改良地盤との変位差が直上の舗装構造へ与える影響は大きくなるものと考えられる。

本研究では土被りが薄く、地下水位が高い砂地盤において、格子間隔が広い格子状改良を適用した断面を対象とする。格子間隔は、 $L/H=2$ の広い格子間隔(以後、広い間隔と称する)、 $L/H=0.8$ の基本的な間隔(以後、基本間隔を称する)と設定した。格子状改良と未対策の断面を比較することで、対策効果と舗装表面の変形について確認した。

舗装の材料であるアスファルト合材は粘弾性材料である。地震の間の短時間での繰返し载荷や地震後の地盤の残留変形に追隨した変形を表現可能な、アスファルト合材と代替可能な模型材料は分かっていない。そのため、本研究では実物舗装と同じく密粒アスファルトやアスファルト安定処理(最大粒径30mm)を転圧してアスファルト舗装模型を製作した。また、この模型が設置可能な大型振動台を用いて実験を行った。

3. 実験内容

(1) 模型断面

実験は2つのシリーズについて行った。1つ目の実験シリーズは、広い間隔で格子状改良を行い、対象構造物である舗装を囲むことで、過剰間隙水圧を許容し、変位抑制効果を期待した場合の舗装の変形を確認するものである(以後、シリーズAと称する)。2つ目の実験シリーズは、対象構造物の延長距離が長く、舗装の周りだけではなく舗装直下にも固化体が設置される場合を想定し、格子間隔が広がることで発生する直下地盤における変位差(固化体～格子内未改良地盤)が舗装表面に与える影響を確認するものである(以後、シリーズBと称する)。

図-3に各シリーズの模型寸法と計測センサーの配置図を示す。実験は大型水中振動台に設置した高さ1.5m、幅4.0m、奥行き2.8mの鋼製剛土槽を用いて行った。土槽に中仕切り板を設置することで、奥行き方向を2分割(1断面1.4m)し、2断面の同時加振によって異なる断面を比較した。シリーズAでは、未対策断面(ケースA1)と広い間隔の格子状改良断面(ケースA2)の2断面とした。シリーズBでは、広い間隔の格子状改良断面(ケースB1)と、1つの断面において基本間隔の格子状改良断面(ケースB2)と未対策断面(ケースB3)を合わせた断面の2断面とした。

(2) 模型縮尺

基本的な舗装構造および地盤の断面は既往の研究¹⁰⁾を参考にした。土槽の長さが4mであるため、未対策断面と広い間隔の格子状改良の断面で違いが現れるように、

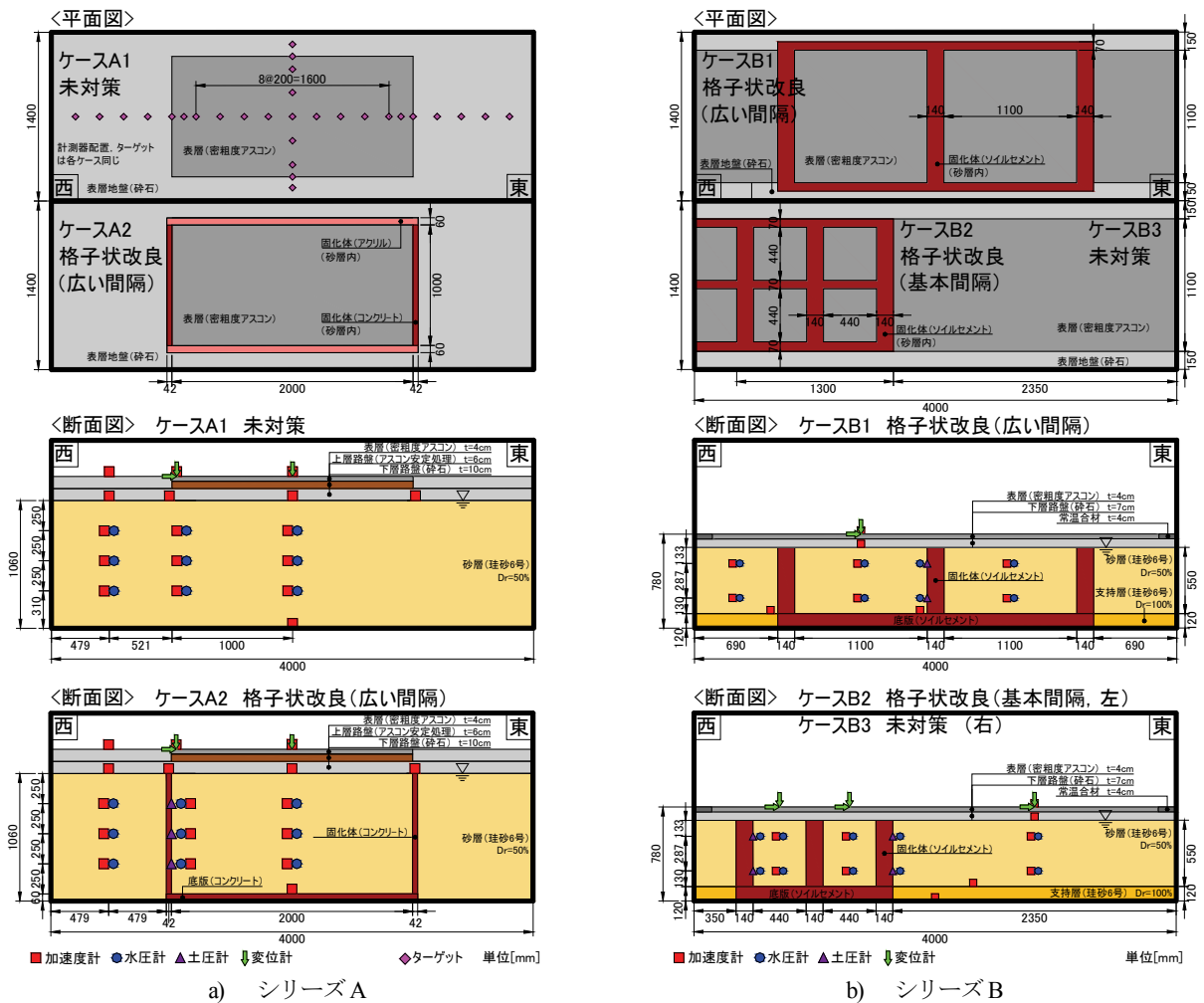


図3 模型寸法と計測センサーの配置

シリーズAでは改良幅2m ($L/H=2$)，縮尺比 λ は7.5（実物スケール／模型スケール）として，模型寸法と固化体の材質を決定した．実物スケールに換算すると舗装幅および格子間隔は15m，液状化を想定した砂層の厚さは7.5mである．

シリーズBでは，舗装直下に固化体が設置できるように縮尺比をシリーズAより大きく設定し，15とした． L/H はケースB1で2，ケースB2で0.8とした．実物スケールに換算すると格子間隔は16.5m（ケースB1）と6.6m（ケースB2），液状化を想定した砂層の厚さは8.25mである

相似則は井合により提案されている1g場における相似則¹¹⁾を適用した．この相似則は地盤を2層系飽和材料（間隙水と土粒子骨格）と仮定した時の支配方程式に基づいて導き出されたものである．本相似則において，飽和地盤の密度の相似比を1，地盤ひずみの相似比を $\lambda^{0.5}$ と仮定することで得られる相似則を適用した．表-1に各パラメータの相似則と模型縮尺比を示す．以後，特に断りが無い場合は，実験結果等の物理量は模型スケールの値とする．

表-1 相似則と模型縮尺比

パラメータ	実物／モデル	縮尺比	
		シリーズA	シリーズB
長さ	λ	7.50	15.00
密度	1	1.00	1.00
時間	$\lambda^{0.75}$	4.53	7.62
変位	$\lambda^{1.5}$	20.54	58.09
加速度	1	1.00	1.00
剛性	$\lambda^{0.5}$	2.74	3.87

(3) 模型製作

a) アスファルト舗装

アスファルト舗装の長さは，シリーズAでは2m，シリーズBでは4mとした．シリーズBでは，アスファルト舗装の幅が土槽幅と同じになるため，土槽幅より20cm程度短く製作し，土槽内に設置後，模型と土槽側壁の間に常温合材を敷設した．なお，アスファルト舗装は模型地盤上では十分な転圧ができないこと，また，密度調整して製作した砂層の密度が変わってしまうことから，別途プラントにてアスファルト合材を転圧して製作し，クレ

表-2 アスファルトの物性値

試料名	密度 ρ	圧縮強度 σ_c
	g/cm ³	N/mm ²
シリーズ A	2.349	1.488
シリーズ B	2.379	1.381
既往の模型実験*	2.327	1.280
現場実験*	表層・基層	2.308
	上層路盤	2.308
供用中の空港誘導路のコア*	2.492	3.590

*文献10)より



a) 舗装の転圧時



b) 加振前

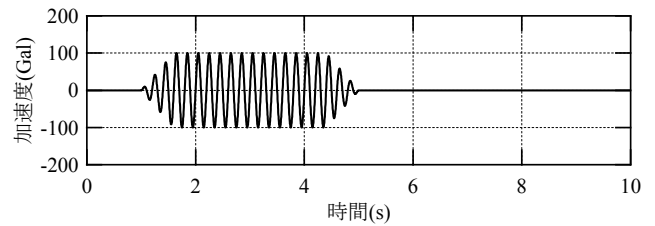
写真-2 模型の製作状況 (シリーズ A)

ーンで吊って模型地盤上に設置した。

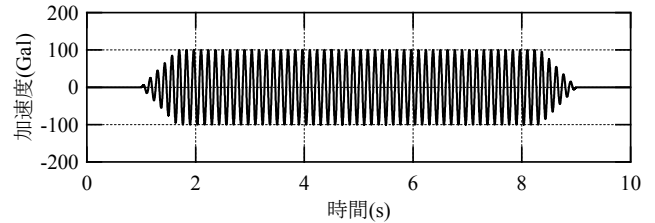
実験で用いるアスファルト舗装の物性を確認するため、コアを作成しコンクリートの静弾性係数試験 (JIS A 1149:2010) に準じた試験を行った。表-2に密度および圧縮強度を示す。実物大の現場実験や供用中の空港舗装のコアと比較すると、実験のアスファルト舗装の圧縮強度は半分以下となっている。

b) 砂層・路盤

液状化を想定した砂層は、飯豊珪砂6号 ($\rho_{\max}=1.706$, $\rho_{\min}=1.417\text{g/cm}^3$) を空中落下法により相対密度50%を目標



a) シリーズ A



b) シリーズ B

図-4 入力加速度の基本波形

に製作した。砂の投入量から求めた完成模型の相対密度は位置によりややばらつきはあるが、平均値はシリーズ Aでは47%, シリーズBでは50%であった。

砂層の上に路盤 (単粒碎石6号) を敷設し、表面が平坦になるよう敷き均した後、その上に別途転圧したアスファルト舗装を設置した。転圧時のアスファルト舗装および加振前の模型の状況を写真-2に示す。なお、地下水位は砂層上端とし、アスファルト舗装模型を設置後、水道水を注入することで地盤の間隙を満たした。

c) 固化体

シリーズAでは、固化体 (実物の壁厚1m相当) の剛性に関する相似則を満足するよう、加振直交方向の面外壁は厚さ42mmのコンクリート板、加振平行方向の面内壁は厚さ60mmの亚克力板を組み合わせで製作した。

シリーズBでは面外壁が舗装直下に設置されるため、舗装の変形には面外壁の厚さが影響するものと考えられた。そのため、実物で壁厚2.1mを想定し、縮尺比より模型の壁厚を14cmとした。面内壁は、シリーズA同様に固化体の剛性に関する相似則を満足するよう固化体の壁厚を7cmとした。それゆえ面外壁は、相似則を考慮した模型の曲げ剛性に対して2倍となった。なお、シリーズBの固化体はソイルセメントで製作した。

いずれのシリーズにおいても、支持層への着底を再現するためにコンクリート製の底板を設置し、固化体は砂層製作前に設置した。

(4) 加振条件

図-4に実験で用いた入力加速度の基本波形を示す。シリーズAは5Hz20波の正弦波、シリーズBは7.5Hz60波の正弦波を用い、加速度振幅を段階的に増加させた段階加振を行った。本稿では、シリーズAは4ステップの加振実

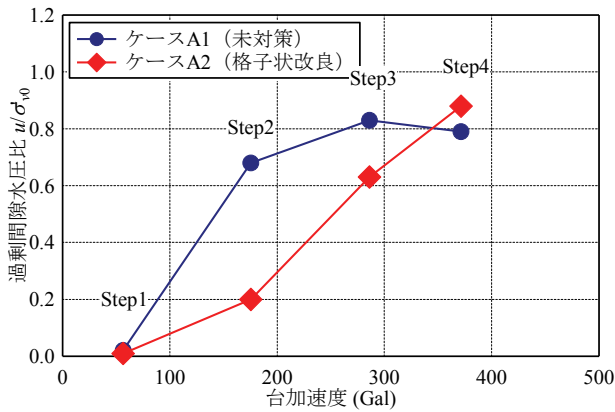


図-5 台加速度と過剰間隙水圧比の関係

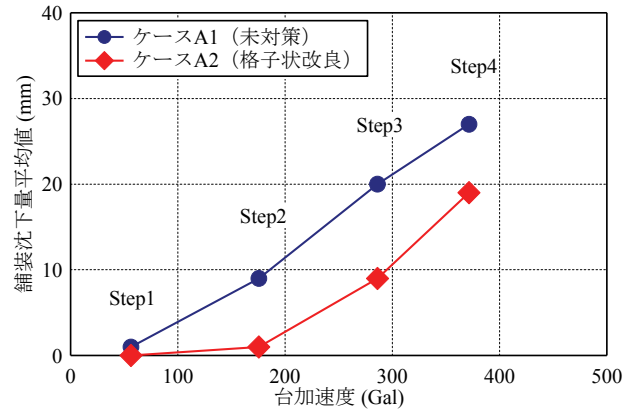


図-7 台加速度と舗装の沈下量の関係

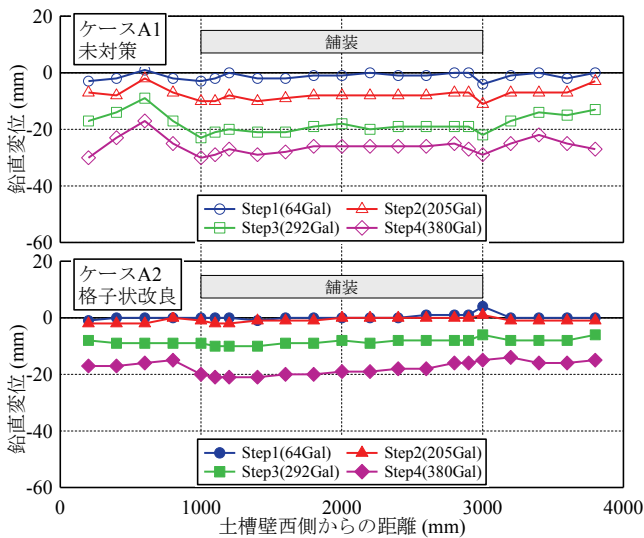


図-6 舗装の鉛直変位分布

験（振動台上で計測された各ステップの最大加速度は56, 176, 286および371Gal）の結果，シリーズBは6ステップの加振実験（53, 201, 297, 494, 754および1078Gal）のうちStep2（201Gal）およびStep3（297Gal）の結果について述べる。

4. 実験結果

(1) シリーズA：舗装外周の改良

a) 過剰間隙水圧

図-5に振動台上で計測した最大加速度（以後、台加速度と称す）と砂層中心位置の過剰間隙水圧比の関係を示す。過剰間隙水圧比は計測した過剰間隙水圧を、密度と層厚から求めた加振前の有効上載圧で除した値である。未対策の場合（ケースA1），入力加速度176Galで過剰間隙水圧は0.7近くまで上昇した。一方，格子状改良の場合（ケースA2），過剰間隙水圧比は0.2程度となり，過

剰間隙水圧抑制効果が確認できた。格子状改良においても，286Galになると過剰間隙水圧比は0.6程度まで上昇し，371Galでは液状化したと考えられる。

b) 舗装表面の沈下

図-6に加振ステップ毎にターゲット位置で計測した舗装および路盤表面の鉛直変位分布を示す。入力加速度が大きくなるとともに舗装は沈下するが，格子状改良の場合（ケースA2），Step2（176Gal）まではほとんど沈下せず，舗装の沈下抑制効果が明確に現れた。286Gal以上になると，格子状改良においても沈下量は大きくなった。未対策（ケースA1）の場合，舗装が大きく沈下すると舗装直下の地盤が側方へ押し出されるため格子外部の地盤は相対的に隆起し，舗装との変位差は大きくなった。一方，格子状改良（ケースB2）では，固化体が舗装直下の地盤の側方への変位を防ぐため，舗装と格子外部の地盤との変位差は小さくなった。

図-7に台加速度と舗装の沈下量の関係を示す。舗装の沈下量は，複数のターゲット位置において計測した舗装表面の沈下量の平均値であり，各加振ステップの累積値である。先の入力加速度と過剰間隙水圧比の関係と対応して，過剰間隙水圧比の上昇とともに舗装の沈下量は大きくなった。加振終了時を比較すれば，格子状改良（ケースA2）の方が未対策よりも沈下量は小さくなったが，Step3やStep4の増分値は未対策と同程度となった。過剰間隙水圧が大きく上昇したステップでは，固化体の有無や加速度の大小に関わらず，舗装は大きく沈下した。

c) 舗装表面の勾配

図-8に実物スケールに換算した舗装表面の勾配を示す。ターゲット計測点40cm毎に，2点間の鉛直相対変位から求めた。鉛直変位はスタッフによりミリ単位で計測し，2点間の鉛直相対変位1mmは実物換算すると勾配0.7%に相当する。それゆえ，計測精度を考慮すると耐震設計の限界値1.5%（レベル2地震時に対する滑走路横断方向の設計限界値⁹⁾）との単純比較は難しいが，格子状改良（ケースA2）の方が勾配は小さく，舗装端部を除けば

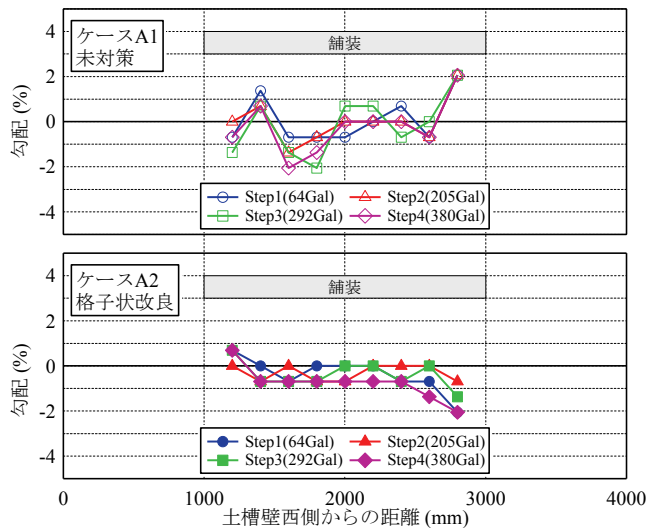


図-8 舗装の勾配

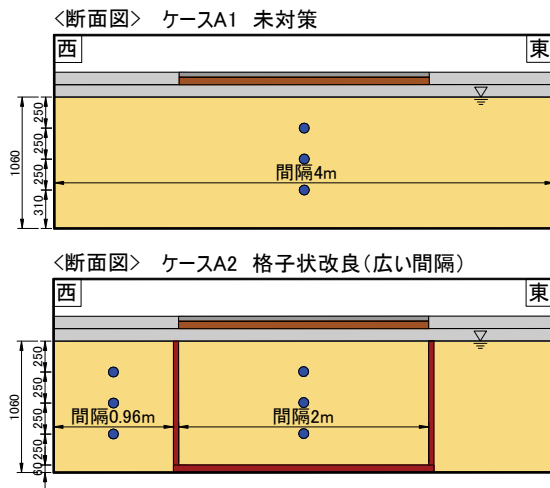


図-9 格子間隔の設定

1.5%以内となっている。また、沈下量が大きくなっても、固化体の存在によって舗装が大きいたわむことなく、一様に沈下した。

d) 格子間隔と液状化の程度

実務では、例えば、格子間隔 L と液状化層厚 H の比 L/H や、格子間隔 L と地表面からの深度 d の比 L/d より、液状化を抑制可能な格子間隔を設定する^(例えば7)12)。 L/d を用いた格子間隔の設定方法は、液状化層厚が薄くなると極端に格子間隔が狭くなるといった不合理な結果になるとして提案された¹²⁾方法である。

ここでは、本実験条件である格子状改良直上に舗装構造や表層地盤を有する断面における格子間隔設定方法の適用性を確認する目的で、 L/H と L/d について整理した。なお、シリーズAでは格子間隔を変えた検討は行っていないため、図-9に示すように広い格子間隔 $L=2\text{m}$ （ケースA2）に加えて、ケースA1を格子間隔 $L=4\text{m}$ 、ケースA2の固化体と土槽側壁の間を格子間隔 0.96m とした。

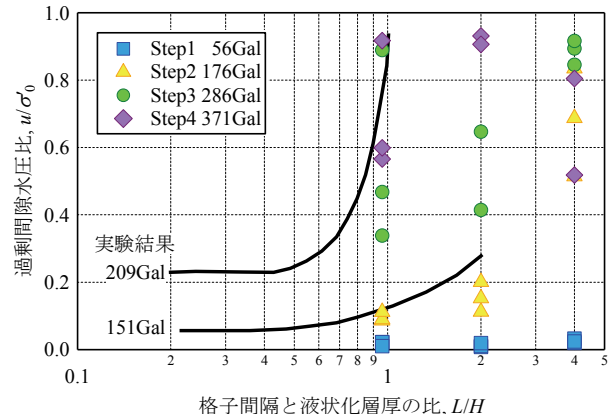


図-10 過剰間隙水圧比と L/H の関係（文献6）に加筆

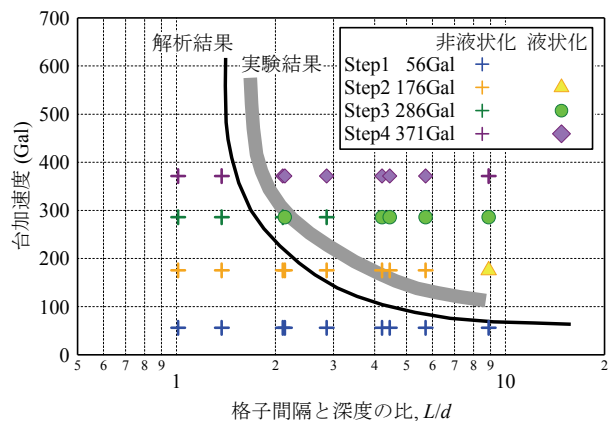
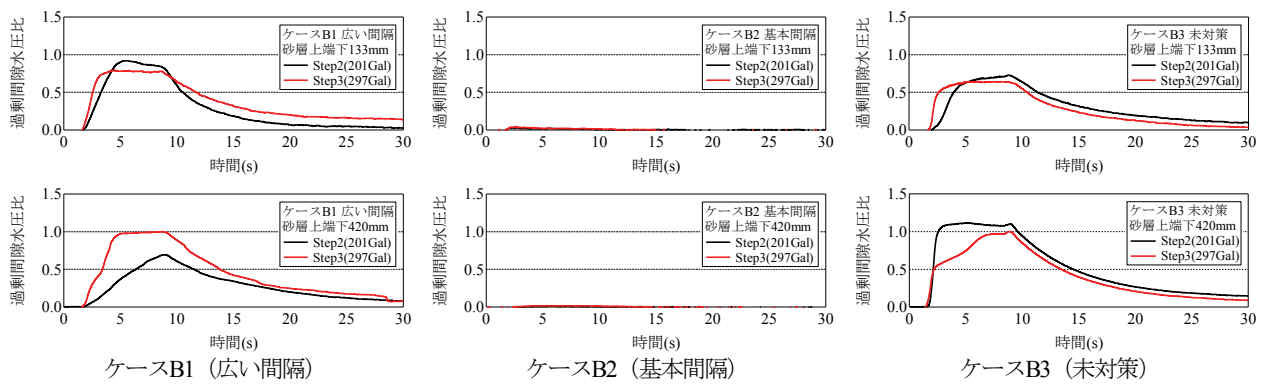


図-11 台加速度と L/d の関係（文献12）に加筆

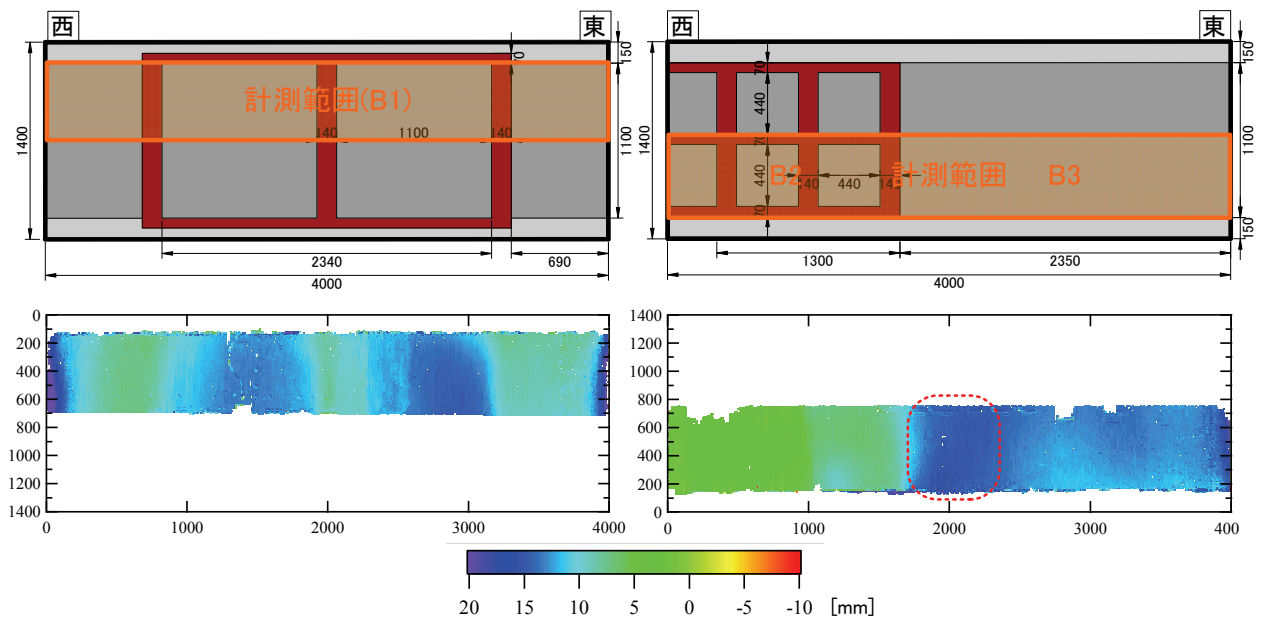
過剰間隙水圧比と L/H の関係を図-10に示す。図中の実線は遠心実験の結果の近似曲線⁶⁾である。また、本実験では一つの格子間隔の断面において深さ方向に3個水圧計を設置したため、同一の L/H にプロットが3点ある。本実験の L/H や台加速度は、比較した遠心実験よりも大きい条件となっている。全体的に L/H が大きくなると、過剰間隙水圧が上昇する右肩上がりの関係は、本実験でも再現できている。しかし、本実験結果のうち176Galと286Galの結果は、それぞれ遠心実験の151Galと209Galの近似曲線より下側に位置し、本実験の方が過剰間隙水圧は上昇しにくい結果となった。遠心実験の結果（図中の灰色実線）は、 L/H が1以上となると209Gal以上で過剰間隙水圧比が1になることを示しているが、本実験では286Galにおいても砂層全域で過剰間隙水圧が1程度になることはなかった。

台加速度と L/d の関係を図-11に示す。なお、深度 d は舗装表面からの深度として整理した。また、砂層の最大過剰間隙水圧比（図-5参照）を見ると、0.8程度で頭打ちとなり、液状化が発生していると考えられるため、ここでは最大過剰間隙水圧比が0.8以上で液状化と判定した（文献12）では0.9以上）。本実験結果の液状化と非液状化の境界は、遠心実験（図中の灰色実線）とおおよそ一致した結果となった。格子状改良直上に舗装構造や表層



(上段：上部計測位置，下段：下部計測位置)

図-12 過剰間隙水圧比の時刻歴 (Step2：201Gal, Step3：297Gal)



(左：ケースB1，右：ケースB2・B3)

図-13 レーザースキャナーで計測した沈下量の色塗りコンター図 (Step3 終了時)

地盤が存在する本実験条件において、格子間隔と土被り厚の比 L/d を用いて格子間隔を設定する方法の適用性が示された。

(2) シリーズB：舗装外周・直下の改良

a) 過剰間隙水圧

図-12に各ケースの砂層における過剰間隙水圧比の時刻歴図を示す。過剰間隙水圧比は計測した過剰間隙水圧を、密度と層厚から算出した有効上載圧で除した値である。図中の上段は、路盤下端（地下水位）より133mm、下段は420mm下に位置する計測位置の結果である。過剰間隙水圧の上昇程度は、計測位置やステップによって違いは見られるが、広い間隔の場合（ケースB1），過剰間隙水圧比が1近くまで上昇し、未対策（ケースB3）と同様に液状化したと考えられる。一方、基本間隔の場合、

過剰間隙水圧比は0付近の値を示しており、過剰間隙水圧の抑制効果が確認できた。

b) 舗装表面の沈下

図-6に示したように鉛直座標を20cm間隔の計測点にてスタッフを用いてミリ単位で計測した場合、計測精度が低く、舗装の3次元的な形状の確認が難しかった。そこで、シリーズBでは加振後にアーム型3次元レーザースキャナー（FARO Edge 2.7m¹³）を用いて舗装表面の形状を計測した。図-13にレーザースキャナーで計測した形状より求めた、Step3加振終了時の沈下量の色塗りコンター図を示す。なお、時間の制約で舗装の半分程度の範囲を計測した。

ケースB1では格子内の未改良地盤直上の舗装が沈下し、固化体直上との間で明瞭な不陸が現れた。格子内の沈下は舗装直下の砂層と路盤の沈下によるものであり、

固化体は沈下しないので固化体直上の舗装の沈下は、緩詰め路盤の地震動による体積収縮と格子内の未改良地盤の沈下に舗装が引き込まれて路盤が変形したことが理由と考えられる。また、固化体と土槽側壁の間の沈下量が格子内よりも小さい結果は、両者の間隔が1mと格子間隔2mより狭いため、砂層の過剰間隙水圧の発生量が小さく、過剰間隙水圧の消散による沈下量が小さかったことが理由である。

ケースB2では、ケースB1で見られたような固化体と未改良地盤の間に明瞭な不陸は現れなかった。格子状改良により格子内の未改良地盤の過剰間隙水圧の発生を抑制し、未改良地盤の沈下が小さくなるため、直上の舗装の変形も小さくなる改良効果が確認できた。ただし、ケースB2の固化体のうち未改良側の舗装は、舗装が連続した未改良断面（ケースB3）の沈下に引き込まれるように沈下が発生した。

ケースB3は断面の中央よりもケースB2の固化体近傍（図-13のケースB3破線囲い内）で沈下量が大きくなった。これは、地震時に固化体と砂層の振動特性の違いにより、固化体近傍の砂層でせん断変形が大きくなり、ダイレイタンスによる体積ひずみが大きくなったためと考えられる。また、建屋近傍の埋戻し地盤の沈下被害で見られた主働すべりに起因する沈下¹⁴⁾も理由として考えられる。固化体から離れたケースB3中心部と同程度の地震動による繰返しせん断に、固化体近傍では固化体との相互作用が加わり、未改良断面（ケースB3）では中心部より固化体近傍で沈下が大きくなったと考えられる。

舗装端部においても沈下量が大きくなり、前述の固化体近傍で沈下が大きくなる現象が剛土槽近傍でも発生した。また、舗装端部は常温合材を敷設しているため、常温合材部分が弱部となり、沈下が局所的に発生したと考えられる。

前述のように仙台空港誘導路における被災事例（写真-1、図-1参照）では、広い範囲にわたり舗装が沈下した所や、狭い範囲で局所的に舗装が沈下した所があった。このような被害は、液状化した地盤の沈下により、結果的に地下構造物直上部との高さに違いが現れただけではなく、本実験で見られたような相互作用が舗装直下地盤と地下構造物の間で発生し、地下構造物近傍において沈下が大きくなった可能性を示唆する結果が得られた。

5. おわりに

本研究では、アスファルト舗装直下地盤に対して格子状改良を適用する際に想定される、広い格子間隔の設定や、土被りが薄く地下水位が高い砂地盤への施工の際に課題となる舗装の変形を確認する目的で、アスファルト

合材を用いた模型振動実験を行った。考察の結果、次のような結論が得られた。

- 格子間隔が広い格子状改良を用いた場合、入力加速度が小さければ、未改良地盤内の過剰間隙水圧や舗装の沈下の発生を抑制する改良効果が見られたが、入力加速度が大きくなると、過剰間隙水圧の上昇により液状化が発生し、舗装の沈下量は未対策と同程度となった。沈下量は未対策同程度となっても、舗装表面の傾斜は小さく抑えられ、たわみは大きくならず様に沈下することが分かった。
- 未対策または格子間隔が広い格子状改良の場合、砂層の過剰間隙水圧の消散に伴う沈下に追従して舗装は変形した。舗装直下に固化体が存在すれば、固化体と格子内の未改良地盤で沈下量の差があるため、直上の舗装表面に不陸となって現れた。
- 格子間隔が基本間隔の場合、格子内未改良地盤は液状化しないため舗装の変形は小さくなり、改良効果が確認できた。
- 基本間隔の未改良断面側の格子直上では不陸が見られた。舗装が連続した未改良断面の沈下に引き込まれたことに加えて、緩詰め砂層直上であるため十分に締固められなかった路盤が変形したことも原因と考えられる。
- 固化体近傍で舗装の沈下量が大きくなった。液状化した砂層の過剰間隙水圧の消散による沈下だけではなく、固化体近傍では相互作用により局所的に沈下が大きくなったと考えられる。仙台空港平行誘導路において、舗装直下地盤と地下構造物との相互作用により、地下構造物近傍において舗装の沈下が大きくなった可能性を示唆する結果を得た。
- 格子状改良地盤直上に舗装構造や表層地盤が存在する本実験条件においても、入力加速度と格子間隔 L と深度 d の比 L/d の関係は、上部工に構造物がない既往の遠心実験と整合した結果を得た。

本実験は、地下水位が高く、液状化層が浅く、路盤直下の路床までが液状化する条件であったため、舗装直下地盤で発生した変状が、舗装表面に不陸として現れやすい危険側を想定した条件であった。舗装の変形に対する路盤厚、液状化層上の非液状化層厚、液状化層厚および細粒分含有率等の地盤条件の影響程度について、今後の検討課題である。

謝辞：株式会社竹中工務店 金田一広博士、本多剛博士、株式会社竹中土木 小西一生氏には実験遂行に関して、ご助言頂いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 小濱英司，大矢陽介，菅野高弘，諸星一信：東北地

- 方太平洋沖地震による仙台空港の液状化被害，地盤工学会誌，Vol.61，No.3，pp.28-29，2013.
- 2) 坪川将丈，水上純一，畑伊織，前川亮太：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震による仙台空港の舗装に関する被害報告，国土技術政策総合研究所資料，No.680，20pp.，2012.
 - 3) 諸星一信，鈴木昭宏，工藤英輝，鈴木亮彦，安藤滋郎，田中隼矢：仙台空港における耐震化工事の施工管理と改良効果について ～その 1～，第 47 回地盤工学研究発表会講演集，pp.1545-1546，2012.
 - 4) 四戸秀次：仙台空港耐震化地盤改良工事について，第 9 回空港技術報告会，5 pp.，2008.
 - 5) 菅野高弘，中澤博志，初山幸治，舘下和行，仁田尾洋，鈴木亮彦：X-jet（クロスジェット）工法を用いた格子状改良による滑走路直下での液状化対策効果，第 8 回空港技術報告会，事例発表⑨，9pp.，2007.
 - 6) 古賀泰之，松尾修，榎田実，伊藤浩二，鈴木吉夫：深層混合処理工法による砂地盤の液状化対策に関する模型振動実験（その 2），第 23 回土質工学研究発表会，pp.1019-1020，1988.
 - 7) 建設省土木研究所：液状化対策工法設計・施工マニュアル（案），共同研究報告書，第 186 号，478pp.，1999.
 - 8) 高橋英紀，森川嘉之，津國正一，吉田誠，深田久：液状化対策としての格子状固化処理工法の改良深さ低減に関する研究，港湾空港技術研究所報告，第 51 巻，第 2 号，39pp.，2012.
 - 9) 国土交通省航空局，国土交通省国土技術政策総合研究所監修，港湾空港建設技術サービスセンター編集：空港土木施設耐震設計要領及び設計例，2011.
 - 10) 山田和弘，中澤博志，菅野高弘，藤井照久：アスファルト舗装直下における液状化地盤の支持力に関する基礎的実験，第 31 回土木学会地震工学研究発表会講演論文集，論文番号 2-145，2011.
 - 11) lai, S.: Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field, *Report of the Port and Harbor Research Institute*, Vol. 27, No. 3, pp. 3-24, 1988.
 - 12) 高橋英紀，山脇秀仁，北詰昌樹，石橋伸司：深層混合処理工法による液状化抑制効果の検討及び改良深度を縮減した新しい格子配置の提案，港湾空港技術研究所報告，第 45 巻第 2 号，pp.135-167，2006.
 - 13) FARO Technologies Inc.: FaroArm, <http://www.faroasia.com/products/faroarm/jp/>, 2013.9.
 - 14) 河井正，石丸真：原子力発電所建屋近傍埋戻し地盤の沈下メカニズムの解明（その 2）—遠心力模型実験ならびに FEM 地震応答解析による沈下量の検討—，電力中央研究所報告，N08029，20pp.，2009.

SHAKE TABLE TEST ON DEFORMATION CHARACTERISTIC OF ASPHALT PAVEMENT ABOVE GRID-TYPE IMPROVEMENT WITH WIDE GRID SPACING

Yousuke OHYA, Eiji KOHAMA, Takahiro SUGANO,
Masayuki IMAI, Kunio HIGASHINAKA and Yoshitaka SAEKI

Shake table tests of a large model in 1 g gravitational field were conducted to estimate deformation characteristic of asphalt pavement and effect of countermeasure by grid-type improvement with large grid spacing. As a result, although it was recognized that grid-type improvement with wide grid spacing has effect reducing the inclination of pavement, larger subsidence comparable with unimproved ground area occurred with larger input earthquake motion. In the case that there were wide grid spacing ground improved walls around and right under the pavement, displacement difference causing pavement surface deformation occurred between improved walls and non-improved ground.