

グラウンドアンカーの耐震対策に関する研究

山本彰¹・鳥井原誠¹

¹正会員 工修 (株)大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

本論文は、グラウンドアンカー頭部に皿ばねを設置した場合の耐震効果を検証するため実施した斜面の振動台実験およびFEMによるシミュレーション解析結果について述べている。実験はアンカー頭部に皿ばねを設置しない場合と皿ばねを設置した場合について行った。その結果、以下の結論を得た。1)アンカー緊張力は加振時に大きく変化する。2)皿ばねは加振時における緊張力の変化を抑制し、グラウンドアンカーの耐震性を向上させる効果がある。今回の実験では加振中における皿ばねありの場合の緊張力振幅は皿ばねなしの場合のその1/4~2/3であった。

Key Words : anchorage, coned disk spring, shaking table test, steep slope, working load

1. はじめに

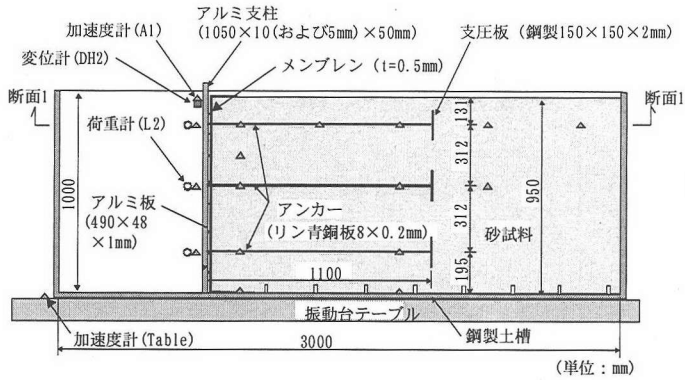
従来、グラウンドアンカー（以下、アンカーと言う）は仮設対策として用いられてきたが、防食技術の向上に伴い、二十年前ごろから永久仕様のアンカーに対する基準化^{1), 2), 3)}が各機関でなされてきた。それに伴い、数多くのアンカー工法が開発され、切土法面においてもアンカーを永久対策として採用することが多くなってきている。しかし、アンカーを打設した斜面の地震時における挙動や地震動がアンカーに与える影響についての研究は少なく、特にアンカーを対象とした耐震対策に関する技術開発はほとんどなされていないのが現状である。

アンカーを打設した斜面の地震時の挙動に関する研究としては、増田らの研究^{4), 5)}がある。増田らはアンカーを設置した模型斜面について遠心載荷装置による加振実験を実施している。その結果、アンカーを設置した場合にはアンカーを設置しない場合に比べて斜面上端部での加速度の増幅が抑制される。また、斜面上端部に設置されたアンカーには地震時に大きな緊張力増加を生じ、加振終了後緊張力は初期緊張力に比べて減少するという結果を得ている。一方、門間ら⁶⁾は伊豆において地震時におけるアンカーを打設した斜面の計測を実施しており、小規模な地震ではあるが地震時における緊張力の計測に成功している。この計測結果によれば、斜面上部における斜面法線方向の加速度は2~3倍に増幅される、アンカー緊張力は斜面上部に配置したアンカーほど大きな荷重増加を生じるという結果を得ている。また、沖村ら⁸⁾は兵庫県南部地震で被災した傾斜基盤層上の斜面について種々の対策工を

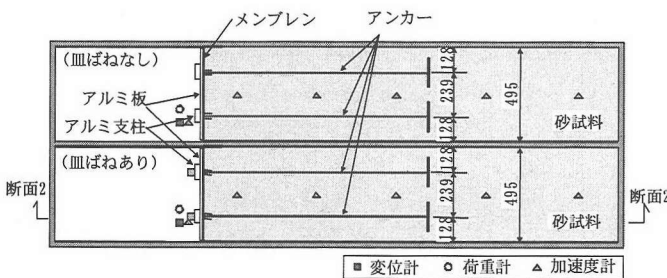
設置した場合の地震応答解析を実施している。その結果、アンカーは地震時における斜面の応答変位やせん断ひずみの増加を抑制する効果が大きく、大規模な崩壊に対して効果的である。また、地震動に伴ってアンカーには大きな緊張力が作用するという解析結果を得ている。さらに、兵庫県南部地震に対する斜面の被害調査では、斜面に打設されたアンカーの頭部の損傷が確認されている⁹⁾。これらのことから、アンカーを打設した斜面の地震時における安定性を考える上で、地震動がアンカーに与える影響の把握およびアンカーの耐震対策は極めて重要と考えられる。

この地震時におけるアンカー緊張力の増加は、地震動にともなう生じるアンカー定着部（頭部）とアンカー一体の間の地盤の相対変位に起因すると考えられる。著者らはアンカー頭部に皿ばねを設置して、その緊張力を保持する技術（緊張力保持技術）を提案している⁹⁾。この技術は地盤変位に伴うアンカー緊張力の変化を防止する効果を有していることから、地震時におけるアンカーの耐震対策としても効果的であると考えられる。

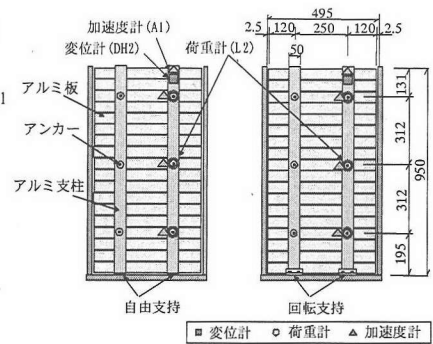
そこで、この論文では、アンカー頭部に設置した皿ばねの耐震効果を検証するため模型斜面の振動台実験を実施した。振動台実験ではアンカー頭部に皿ばねを設置した場合と皿ばねを設置しない場合について行った。また、アンカー頭部への皿ばねの設置が斜面の応力やひずみ状態に与える影響を把握するため、実験結果に対するFEMによるシミュレーション解析を併せて実施している。



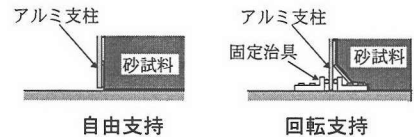
(a) 側面図 (断面2-2)



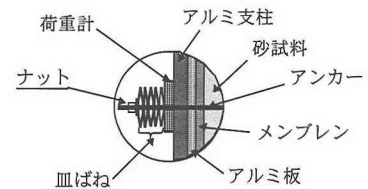
(b) 平面図 (断面1-1)



(c) 正面図 (法面工)



(d) アルミ支柱下端部の支持条件



(e) 皿ばねの設置状況

図-1 振動台実験の概要

2. 実験方法

(1) 模型斜面

図-1はアンカーを設置した模型斜面の振動台実験の概要を示しており、実験に用いた土槽は長さ300cm、高さ100cm、幅100cmの鋼製土槽である。実験は図中に示しているように土槽中央にアクリル板による仕切りを設けて、皿ばねを設置した場合(皿ばねあり)と皿ばねを設置しない場合(皿ばねなし)の実験を同時に行った。なお、模型は幾何学的スケールの相似率 λ を1/15とし、概ね1G場の相似則を満足するよう実験に使用する法面工、アンカー、皿ばねの寸法と材質を選定した。

模型斜面の作成に当たっては、まず土槽内に法面工を設置した後、各種センサー、アンカーを配置しながら空中落下法で法面工の前面側と背面側に高さが増えるように砂試料を投入し、層厚10cm毎にパイプレータで締めて相対密度が80%になるよう地盤を作成した。その後、法面工前面側の砂を除去し、砂の排除高さがアンカーの設置位置に達した段階で皿ばねを設置するとともに、アンカーに初期緊張力90N(プロ

トタイプでは約300kNに相当する)を与えた。

法面工としては厚さ10cm程度のモルタル吹付け工を想定し、厚さ0.5mmのメンブレンに幅48mm、長さ490mm、板厚1.0mmのアルミ板を張付けた材料を用いるとともに、鉛直方向には40cm(幅)×20cm(厚さ)の鉄筋コンクリート製の梁を想定して長さ1050mm、厚さ10mm(および5mm)、幅50mmの2本のアルミ支柱を設置した。アルミ支柱の下端部は回転支持(回転自由、水平方向拘束)と自由支持(回転自由、水平方向自由)の2つの構造とした。

アンカーとしては厚さ0.2mm、幅8mmの銅板を用いており、両端部には全ねじボルトをろう付けしている。また、アンカー体部には引抜けによる変位を生じないように厚さ2.0mmの正方形(150×150mm)の鉄板を支圧板として設置しており、アンカー頭部はナット締めできる構造となっている。実験に用いた砂試料は0.85mmのふるいで調整したケイ砂であり、その物理的性質は土粒子の密度 2.567t/m^3 、粗砂分5.8%、細砂分93.5%、シルト分0.7%、最大・最小乾燥密度 1.530t/m^3 、 1.252t/m^3 である。

(2) 計測

図-1には振動台実験時における各種計測用センサーの配置も併せて示しており、実験では法面工や地盤内の加速度、アンカーの緊張力、法面工の変位を計測した。

(3) 実験方法および実験ケース

表-1は実験ケースを示している。実験ではCase3を基本ケースとして、皿ばねの特性 (h/s) (h:有効高さ (h=H-s), H:全高, s:板厚), アルミ支柱の曲げ剛性 (厚さ), 支柱下端部の支持条件を変化させた。図-2は実験に用いた皿ばねの断面形状を示しており、表-2と図-3は実験に用いた皿ばねの仕様と特性曲線を示している。実験に当たっては皿ばねを図-1(e)に示すように凸面が交互になるよう10枚 (直列に10枚) 設置した。なお、皿ばねIを直列に10枚設置した場合の仕様は10枚の相似則を考慮してプロトタイプの皿ばねの仕様に換算すると、ばね鋼 (SK5) からなる外径300mm, 内径140mm, 高さ23.2mm, 板厚9.7mmの皿ばねを2枚重ね (並列に2枚) で、凸面が交互になるように組 (直列に4枚) 設置した場合に相当する。

実験時の入力波は周波数5Hzのsin波であり、実験は加速度振幅を500galまで段階的に増加させる段階荷重によって行った。各荷重段階での波数は20波であり、荷重に当たっては各荷重段階で加振前のアンカー緊張力が90Nになるよう再緊張している。図-4は実験に用いた加速度振幅300galの入力波形を示している。

(4) 皿ばねを設置したアンカーのばね特性について

アンカー tendon をばね定数 k_a , 皿ばねをばね定数 $k_s(u)$ と表すと、皿ばねを設置したアンカー全体のばね定数 $k(u)$ は式(1)で表される⁹⁾。

$$\frac{1}{k(u)} = \frac{1}{k_a} + \frac{1}{k_s(u)} \quad (1)$$

このため、皿ばねを設置したアンカーの地震時における緊張力の変化量はアンカーのばね定数 (引張剛性) と皿ばねのばね定数 (特性曲線) に依存することになる。そこで、今回の実験で用いた模型アンカーおよび皿ばねのばね定数が皿ばねを設置した模型アンカー全体のばね定数に与える影響について検討する。

図-3の皿ばねを直列に10枚設置した場合の荷重85~95Nにおける平均的なばね定数は皿ばねIで $k_s(u) = 4.35\text{N/mm}$ であり、模型実験で用いたアンカーのばね定数 k_a は模型アンカーの自由長を $L=1000\text{mm}$, 断面積 $A=0.2 \times 8.0=1.6\text{mm}^2$, 弾性係数 $E=102900\text{N/mm}^2$ とすると、式(2)で与えられる。

表-1 実験ケース

実験ケース	皿ばね		支柱	
	No.	特性(h/s)	厚さ(mm)	下端部の支持条件
Case1	I	1.40	10	自由
Case2		1.40	5	回転
Case3		1.40	10	回転
Case4	II	1.25	10	回転
Case5	III	1.20	10	回転

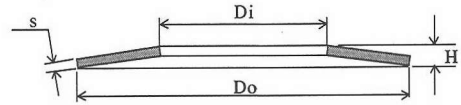


図-2 皿ばねの形状

表-2 皿ばねの仕様

皿ばね No.	実験ケース	皿ばねの仕様				
		外形 (mm)	内径 (mm)	板厚 s (mm)	高さ H (mm)	h/s
I	1,2,3	11.990	6.010	0.305	0.732	1.40
II	4	13.689	6.017	0.350	0.788	1.25
III	5	13.688	6.018	0.350	0.770	1.20

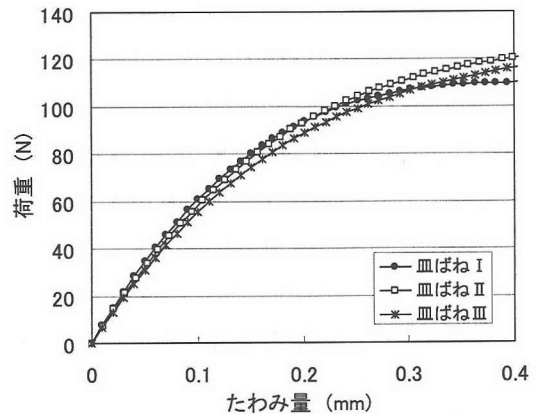


図-3 皿ばねの荷重-たわみ曲線 (特性曲線)

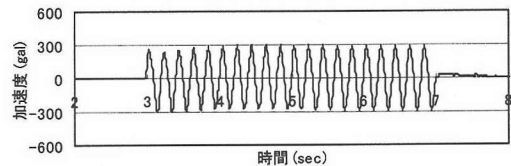
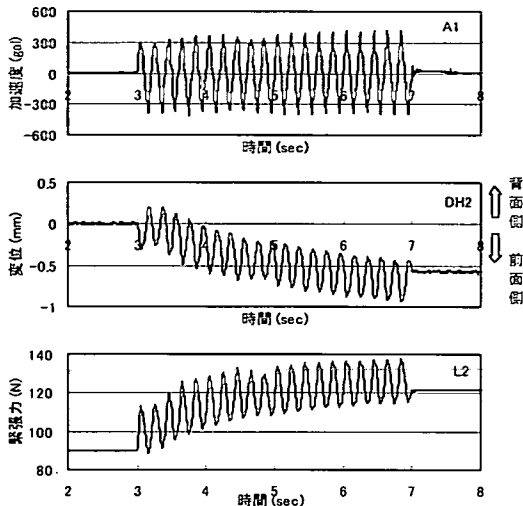


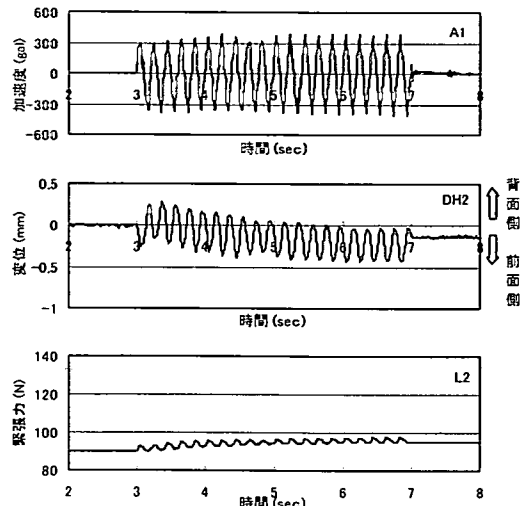
図-4 加速度振幅300galの入力波形

$$k_a = \frac{EA}{L} = \frac{102900 \times 1.6}{1000} = 157.74\text{N/mm} \quad (2)$$

これらの値を式(1)に代入すると、模型アンカーと皿ばねIの組合せによる全体のばね定数は $k(u) = 4.23\text{N/mm}$ となり、皿ばねI単独のそれに近い値となる。したがって、皿ばねを設置した模型アンカー全体のばね定数は主に皿ばねのばね定数によって支配されることから、模型アンカーの引張剛性が全体のばね定



(a) 皿ばねなし



(b) 皿ばねあり

図-5 加振時の応答波形 (Case3, 300gal)

数に与える影響は少ないと考えられる。たとえば、模型アンカーのばね定数を1/2 (ばね定数 $k_a=78.87\text{N/mm}$)と2倍 (ばね定数 315.48N/mm)にした場合の全体のばね定数はそれぞれ $k(u)=4.12\text{N/mm}$, $k(u)=4.29\text{N/mm}$ である。これに対して、皿ばねIを皿ばねIII (ばね定数 4.80N/mm)に変更した場合の全体のばね定数は $k(u)=4.66\text{N/mm}$ であり、皿ばねの種類の違いによる影響は模型アンカーのばね定数の違いによる影響に比べて大きく、全体のばね定数はいずれも概ね皿ばね単独のそれに近い値となっている。

これらの検討結果および実験に用いた模型アンカーや皿ばねの仕様はIC場での相似則を考慮して選定していることから、皿ばねを設置したプロトタイプアンカーにおいても皿ばねを含むアンカー全体のばね特性は概ね皿ばねのばね特性に依存すると推定される。

3. 実験結果

(1) 応答波形

図-5は入力加速度300galにおける法面工頭部での応答加速度と応答変位、および中段アンカーの緊張力の応答波形を示している。これらの図から、法面工頭部における応答加速度はいずれも大きく増幅される傾向が見られるものの、皿ばねの有無による影響はほとんど見られない。一方、応答変位波形はいずれも加振に伴って前面側に大きく変位する傾向を示しており、皿ばねありの変位振幅や残留変位は皿ばねなしのそれに比べて小さくなっている。さらに、緊張力の応答波形

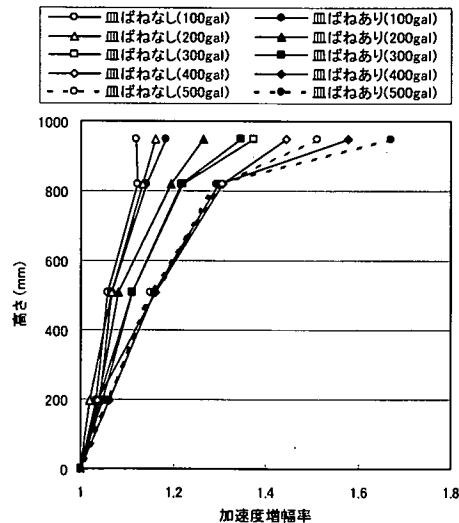


図-6 加速度の増幅率の比較 (Case3)

に着目すると、皿ばねありの場合の振幅、および加振前に対する加振後の残留緊張力の変化はいずれも皿ばねなしの場合のそれに比べて非常に小さくなっている。

(2) 応答加速度

図-6はCase3における振動台テーブル上の応答加速度に対する法面工での加速度の増幅率を示している。この図から、皿ばねの有無に関わらず、加速度の増幅率は高い位置ほど大きくなる傾向を示している。また、入力加速度100gal, 200galでの皿ばねありの加速

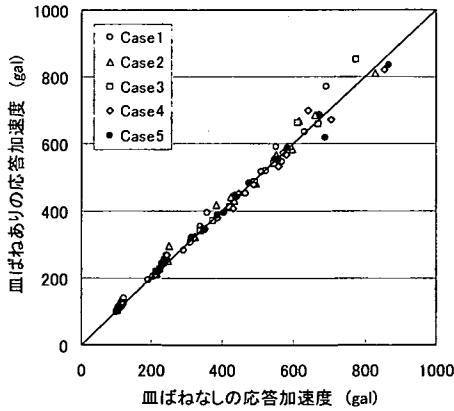


図-7 法面工における応答加速度の比較

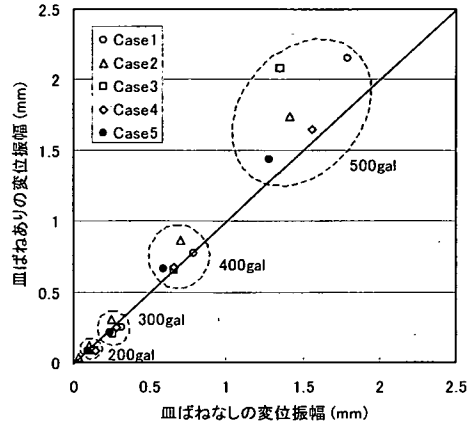


図-8 変位振幅の比較 (法面工頭端部)

度の増幅率は皿ばねなしのそれに比べて大きくなっている。しかし、入力加速度300gal以上では法面工頭端部でやや差異が認められるものの、アンカーを設置した部分での加速度の増幅率は皿ばねの有無に関わらず同様な分布を示している。

そこで、図-7は各実験ケースについて、法面工の同一高さで計測した最大の応答加速度を比較したものである。この図から、いずれの実験ケースにおいても法面工の同一高さでの応答加速度はほぼ等しくなっており、皿ばねの特性、アルミ支柱の曲げ剛性(厚さ)、支柱下端部の支持条件の違いが図-7に示す皿ばねの有無による応答加速度の関係に与える影響はほとんど見られない。

これらの結果から、アンカー頭部への皿ばね設置の有無が応答加速度に与える影響は小さいと考えられる。

(3) 応答変位

図-8は各実験ケースで得られた法面工頭端部の変位振幅を比較したものである。この図から、入力加速度が300gal以下の場合、皿ばねの有無による影響はあまり見られないが、入力加速度の増加および変位振幅の増加に伴って皿ばねありの振幅は皿ばねなしのそれよりも大きくなる傾向が見られる。図-6においても、皿ばねありの場合の法面工頭端部での加速度の増幅率は皿ばねなしの場合のそれに比べて大きくなっており、図-6と図-8は整合する結果となっている。また、図-8から、各実験ケースにおける皿ばねありと皿ばねなしの変位振幅はほぼ比例する傾向を示しており、実験ケース毎の差異は明確には見られない。

図-9は各実験ケースの法面工の累積残留変位分布を示している。この図から、入力加速度100gal、200galでは両者の分布形状は概ね一致しており、皿ば

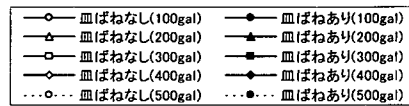


図-9 累積残留変位分布の比較 (Case3)

ねの有無による顕著な差異は見られない。しかし、入力加速度が300galを超えると、皿ばねありの場合には法面工の中間部分において前面側にせり出すような変形を示しているのに対し、皿ばねなしの場合には法面工の高い位置で累積残留変位が大きくなる分布形状を示している。図-5において、皿ばねありの法面工頭部の残留変位が皿ばねなしのそれに比べて小さくなっているのはこの変形モードの違いによると考えられる。

これらの結果から、皿ばねの有無は法面工の変形モードに影響を与えようと考えられる。

(4) 緊張力

a) 応答波形

図-10はCase3の入力加速度300galにおける緊張力の応答波形を示している。これらの図から、アンカー緊

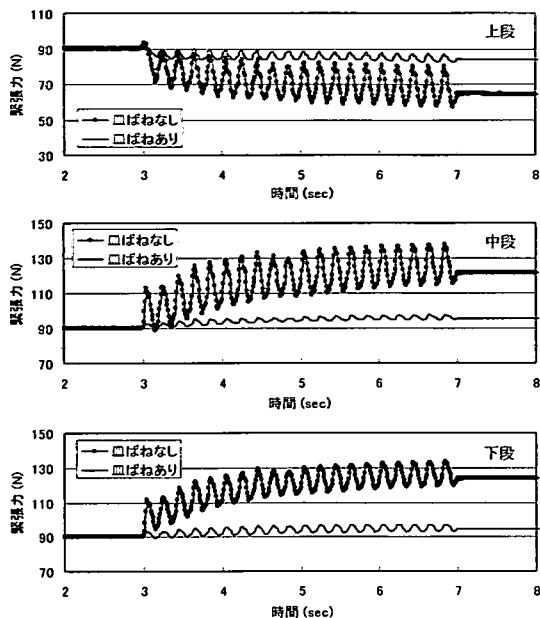


図-10 アンカー緊張力の経時変化の比較 (Case3, 300gal)

張力はアンカーの設置高さや皿ばねの有無に係わらず加振に伴って大きく変化しているが、緊張力の振幅はいずれも皿ばねなしの場合に比べ、皿ばねありの方が小さくなっている。また、加振前に対する加振後の残留緊張力の変化に着目すると、皿ばねありの場合の上段アンカーの緊張力の低下量、および中段アンカーと下段アンカーの緊張力の増加量は、皿ばねなしの場合のそれに比べて明らかに小さくなっている。

b) 緊張力の振幅

図-11はCase3における緊張力の振幅分布を示している。この図から、各段の緊張力振幅を比較すると、皿ばねの有無に関わらず中段アンカーの振幅は上段と下段アンカーのそれに比べて大きくなっている。また、いずれの高さにおいても皿ばねありの振幅は皿ばねなしのそれに比べて小さくなっている。そこで、図-12は各実験ケースについて、同一高さに設置したアンカーの緊張力振幅を比較したものである。この図から、皿ばねありの緊張力振幅は皿ばねなしのそれに比べて小さくなる傾向を示している。この傾向は緊張力振幅が大きくなるほど顕著となっており、実験ケースに係わらず皿ばねありの緊張力振幅は皿ばねなしのその1/4~2/3程度となっている。これらのことから、皿ばねは地震時における緊張力の振幅を抑制する上で、極めて有効であるといえる。

c) 加振後の残留緊張力

図-13は加振後における残留緊張力の分布を示して

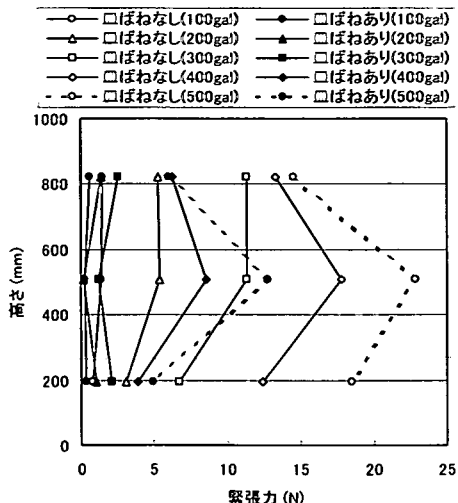


図-11 緊張力振幅の分布図 (Case3)

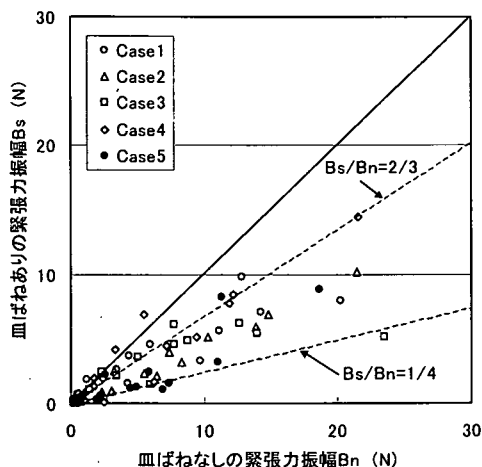


図-12 緊張力振幅の比較図

いる。この図から、上段アンカーの残留緊張力は加振前の緊張力(90N)に比べていずれも低下しており、入力加速度が大きくなるほど残留緊張力の低下量は大きくなる傾向が見られる。また、その低下量は皿ばねなしの場合に比べ、皿ばねありの方が小さくなっている。一方、中段アンカーと下段アンカーの残留緊張力はいずれも加振前の緊張力に比べて増加する傾向を示している。また、その増加量は皿ばねなしの場合に比べ、皿ばねありの方が非常に小さくなっている。これらの結果から、皿ばねは加振に伴う残留緊張力の増加を抑制するだけでなく、加振に伴う残留緊張力の低下を防止する効果のあることが分かる。

さらに、図-9および図-13から、上段アンカーと中段アンカーについて皿ばねの有無で比較すると、上段アンカーでは皿ばねなしに比べて皿ばねありの方が残

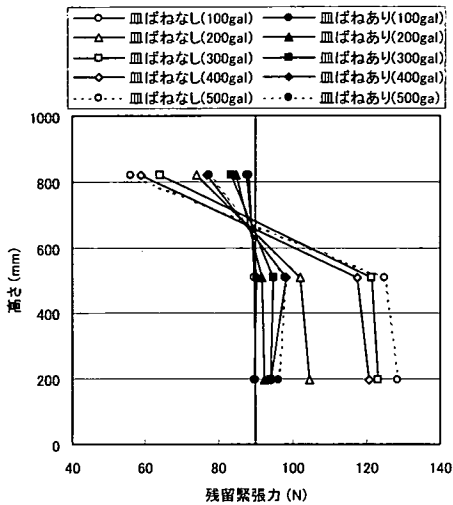


図-13 残留緊張力分布図 (Case3)

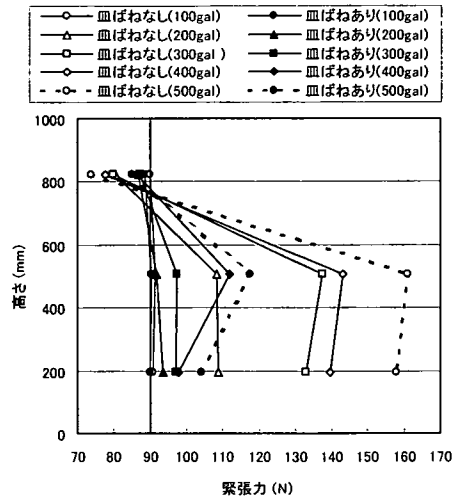


図-14 最大緊張力分布図 (Case3)

表-3 テンドン許容引張力

	テンドン極限荷重 (T_{us})に対して	テンドン降伏荷重 (T_{ys})に対して
常時	$0.60T_{us} (= \frac{1}{1.67} T_{us})$	$0.75T_{ys} (= \frac{1}{1.33} T_{ys})$
地震時	$0.75T_{us} (= \frac{1}{1.33} T_{us})$	$0.90T_{ys} (= \frac{1}{1.11} T_{ys})$

留緊張力は大きく、累積残留変位は小さくなっている。一方、中段アンカーでは皿ばねなしに比べて皿ばねありの方が残留緊張力は小さく、累積残留変位は大きくなっており、皿ばねの有無が残留緊張力および累積残留変位に与える影響は上段アンカーと中段アンカーで異なる傾向を示している。そこで、皿ばねの設置の有無がアンカー緊張力、法面工の変位および変形モードに与える影響について以下に考察する。

法面工の変位は法面工と支圧板の相対変位、および支圧板の変位の和であり、アンカー緊張力の変化は前者に伴って生じる。つまり、法面工と支圧板の相対変位が伸張側に変位すると緊張力は増加し、圧縮側に変位すると緊張力は低下する。皿ばねはこのような法面工と支圧板の相対変位を吸収して緊張力が変化することを抑制すると考えられる。すなわち、中段アンカーのように緊張力が増加する場合には皿ばねが圧縮側に變形して法面工と支圧板の相対的な伸び変位を吸収し、アンカー緊張力の増加を抑制する。このため、アンカー緊張力が増加する場合、皿ばねを設置したアンカーでは法面工と支圧板の相対的な伸び変位をある程度許容することになることから、皿ばねなし場合に比べて緊張力の増加は抑制されるが、法面工の前面側への変形が大きくなる可能性がある。

逆に、上段アンカーのように緊張力が低下する場合には皿ばねが伸張側に變形して法面工と支圧板の相対的な圧縮変位を皿ばねが吸収し、緊張力を保持することになる。このため、皿ばねを設置したアンカーでは法面工と支圧板間の圧縮方向の相対変位が大きくなる(皿ばねなしの場合に比べて締め付ける方向の変位が大きくなる)ことから、皿ばねなしの場合に比べて緊張

力の低下は抑制されるが、法面工は背面側へ引き込まれるような変形を生じることになると考えられる。

これらのことから、図-9の加振に伴う変形モードの差異は皿ばねの効果に伴うアンカー緊張力の変化の違いによるものと考えられる。

d) 最大緊張力

図-14はCase3における各載荷ステップでの最大緊張力分布を示している。この図から、皿ばねなしの入力加速度500galにおける最大緊張力は161Nであり、初期緊張力の1.78倍となっている。一方、皿ばねありの最大緊張力は118Nであり、初期緊張力の1.31倍となっている。

地盤工学会基準¹⁾によると、永久アンカーの設計は常時および地震時に対して表-3の許容引張力を定めている。アンカーを斜面の安定対策工として用いる場合、初期緊張力は設計アンカー力以下とするのが一般的であり、設計アンカー力は表-3のテンドン許容引張力以下にする必要がある。そこで、実験で与えた初期緊張力(90N)が設計アンカー力および表-3の常時におけるテンドンの許容引張力に等しい場合を想定すると、緊張力が150N(テンドンの許容引張力の1.67倍)を超えた段階でテendonは極限荷重に達することになり、120N(テンドンの許容引張力の1.33倍)を超える

と降伏することになる。したがって、図-14において皿ばねなしの場合には300gal以上で中段アンカーと下段アンカーのテンドンが降伏し、入力加速度500galで極限荷重に達する可能性があるといえる。一方、皿ばねを設置した場合にはテンドンが降伏荷重や極限荷重に達することはない。

これらの実験結果から、皿ばねの有無が地震時における斜面の応答加速度に与える影響は少ないと考えられる。

一方、皿ばねの有無が法面工の変位に与える影響は地震時および地震後にアンカー緊張力が増加するか、あるいは減少するかによって異なる。すなわち、緊張力が増加する場合には、アンカー頭部に皿ばねを設置することによって緊張力の増加は抑制されるが、法面工の前面側への変位が大きくなる可能性がある。逆に緊張力が減少する場合には皿ばねを設置することによって緊張力の低下は抑制されるが、法面工は背面側へ引き込まれるような変位を生じることになると考えられる。このため、地震時および地震後における法面工の変形モードが皿ばねの有無で差異を生じることになると考えられる。

また、緊張力は皿ばねなしの場合には加振にともなって大きな緊張力振幅を生じるとともに、加振後の残留緊張力が加振前に比べて大きく変化する。これに対して、皿ばねありの場合には加振に伴う緊張力振幅、および加振後における残留緊張力の変化が抑制される。このため、アンカー頭部に設置した皿ばねは地震時におけるアンカー緊張力の増加を抑制し、アンカー頭部法面工、アンカー定着部、アンカーテンドン、アンカー一体等の損傷を防止するのに効果的であるといえる。また、皿ばねは初期緊張力に対する地震後の残留緊張力の変化を抑制することから、アンカーは頭部に皿ばねを設置することによって、地震後においても地震前と同様なアンカー緊張力を保持することができると考えられる。これらのことから、アンカー頭部に設置した皿ばねはアンカーの耐震対策として極めて有効であるといえる。

4. シミュレーション解析

アンカー頭部に設置した皿ばねの耐震効果については3.において実験的に検証できた。そこで、次に皿ばねを設置した場合の斜面内部の応力やひずみ状態に与える影響を検討するため、実験結果 (Case3, sin波, 300gal) に対するFEMシミュレーション解析を実施した。

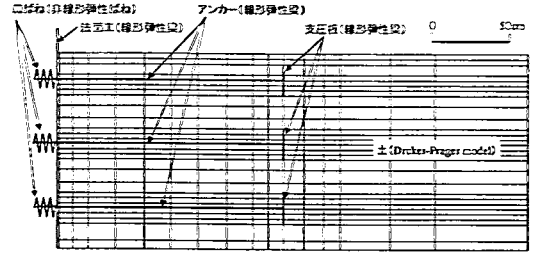


図-15 メッシュ図

表-4 解析定数一覧

土 (Drucker-Prager model)	乾燥密度	(t/m^3)	1.497
	弾性係数 E_0	(kN/m^2)	5.52×10^4
	ポアソン比 ν		0.321
	ϕ	($^\circ$)	49.1
	α		0.331
法面工 (線形弾性梁)	密度	(t/m^3)	2.690
	弾性係数 E	(kN/m^2)	7.056×10^7
	せん断弾性係数 G	(kN/m^2)	2.646×10^7
アンカー (線形弾性梁)	密度	(t/m^3)	8.930
	弾性係数 E	(kN/m^2)	1.029×10^8
	せん断弾性係数 G	(kN/m^2)	3.840×10^7
支圧板 (線形弾性梁)	密度	(t/m^3)	7.860
	弾性係数 E	(kN/m^2)	2.107×10^8
	せん断弾性係数 G	(kN/m^2)	8.134×10^7
皿ばね (非線形弾性ばね)			図-16

(1) 解析モデル

図-15は解析に用いたメッシュ図を示しており、解析は二次元弾塑性解析によって行った。解析では地盤材料をDrucker-Prager modelで、アンカー、法面工および支圧板を線形弾性梁で、皿ばねを非線形弾性ばねによってモデル化した。また、アンカーは法面工、ばね要素および支圧板部分とのみで剛結し、法面工および支圧板は地盤と全面剛結している。

解析に用いたDrucker-Prager modelの降伏関数は式(3)で与えられる¹⁰⁾。

$$f(\sigma_{ij}, \kappa) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - \kappa \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 - \sin \phi)} \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{\sqrt{3}(1 - \sin \phi)}{(3 - \sin \phi)} \sigma_c^0 \quad (5)$$

ここに、 I_1 , J_2 は応力の第1, 第2不偏量, κ は硬化パラメータ, ϕ は内部摩擦角である。また、 σ_c^0 は相

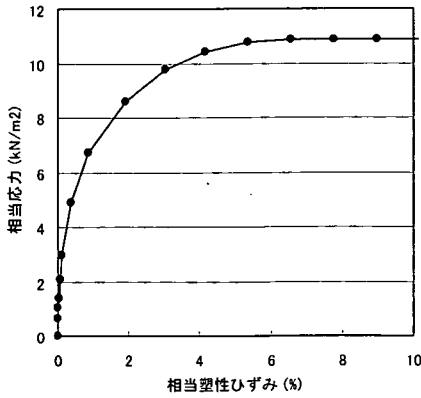


図-16 相当応力と相当塑性ひずみの関係

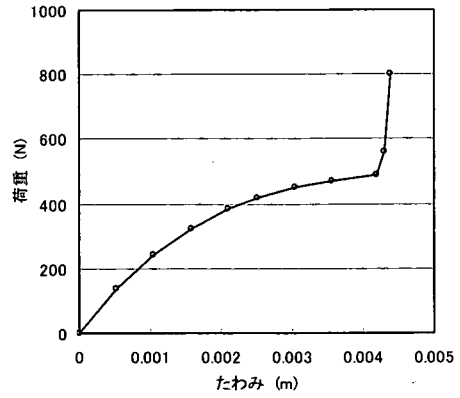


図-17 解析に用いた皿ばねの荷重～たわみ曲線

当応力であり、図-16に示している相当塑性ひずみとの関係で与えられる。なお、相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}^p$ は式(6)によって与えられる。

$$\bar{\epsilon}^p = \int d\bar{\epsilon}^p \quad (6)$$

ここに、 $d\bar{\epsilon}^p$ は相当塑性ひずみ増分であり、塑性ひずみ増分 $d\epsilon_{ij}^p$ を用いて式(7)で与えられる。

$$d\bar{\epsilon}^p = \left(\frac{2}{3} d\epsilon_{ij}^p d\epsilon_{ij}^p \right)^{1/2} \quad (7)$$

表-4は解析に用いた解析定数を示しており、解析定数は室内要素試験結果に基づいて設定した。なお、弾性係数は地盤内の鉛直応力の影響を考慮し、各深度毎に式(8)で得られる値を用いた。

$$\sigma_v = \rho g Z \quad (8)$$

$$E = E_0 \sqrt{\frac{\sigma_v}{\sigma_c}} \quad (9)$$

ここに、 Z は地表面からの深さ、 g は重力加速度である。また、 E_0 は三軸圧縮試験で得られた拘束圧 σ_c^0 における弾性係数であり、解析では弾性係数 E_0 として $\sigma_c^0=0.1\text{MPa}$ 、軸ひずみ 10^{-3} における割線弾性係数を用いた。

さらに、解析では単位奥行き当たりの法面工、アンカーおよび支圧板の断面積や断面二次モーメントが実験時のそれと等しくなるように設定した。図-17は解析に用いた皿ばねの荷重とたわみの関係を示しており、実験時と単位奥行き当たりのばね剛性が等しくなるよう解析に用いる荷重とたわみの関係を与えた。なお、図-17においてたわみ0.004mを超えた付近で急激に荷重が増加しているのは皿ばねのたわみがその有効高さ h にほぼ等しくなったためであり、解析に当たっ

てはこの特性についても考慮した。

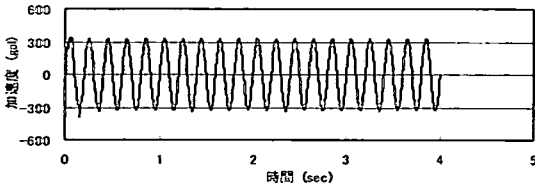
応答解析に当たってはまず、アンカー緊張力を変化させた自重解析を行い、自重解析後の各段のアンカー緊張力が実験時と同じ364N(実験時の90Nに相当する)で釣り合った段階を初期状態とし、次に所定の入力波を底部より与えた。地盤背面の境界条件としては、水平方向を拘束し、鉛直方向を自由とした。解析はCase3、入力加速度300galのケースについて行った。

(2) 解析結果

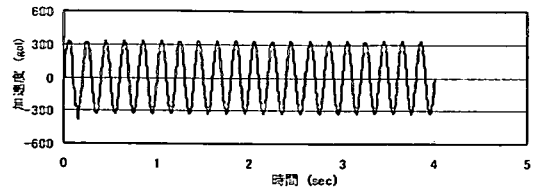
a) 応答波形

図-18、図-19は解析で得られた法面工頭部的における加速度と変位の応答波形を示している。これらの図から、応答加速度は皿ばねの有無に関わらず、ほぼ同様な波形を示しており、図-5に示した実験時の応答加速度波形とほぼ同様な結果となっている。一方、応答変位はいずれも加振直後に残留変位を生じ、その後残留変位の増加は見られない。また、皿ばねありの変位振幅や残留変位はいずれも皿ばねなしの場合に比べて大きくなっており、変位振幅は実験結果と対応しているものの、残留変位については実験結果と異なる結果となっている。

図-20は解析で得られたアンカー緊張力の応答波形を示している。これらの結果から、皿ばねなしの上段アンカーは加振に伴って緊張力が低下しているのに対し、皿ばねありの場合にはほとんど低下していない。一方、中段アンカーと下段アンカーについては、皿ばねなしの場合に比べて皿ばねありの方が緊張力の増加量が小さくなっている。また、緊張力振幅はいずれのアンカーとも皿ばねなしの場合に比べ、皿ばねありの方が小さくなっている。これらの結果は図-10に示した実験結果ともよく対応しており、皿ばねは加振中に

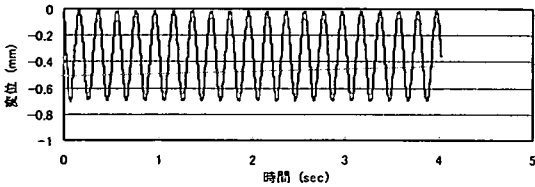


(a) 皿ばねなし

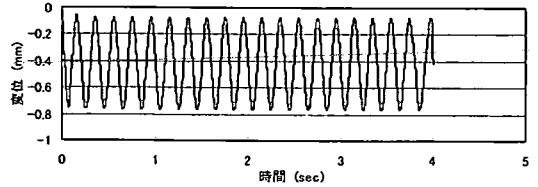


(b) 皿ばねあり

図-18 解析で得られた応答加速度波形 (Case3, 300gal, 法面工頭)



(a) 皿ばねなし



(b) 皿ばねあり

図-19 解析で得られた応答変位波形 (Case3, 300gal, 法面工頭)

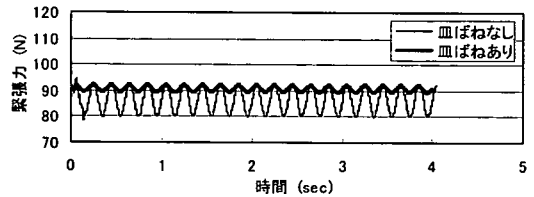
おける緊張力振幅を抑制するとともに、加振後における残留緊張力の変化を抑制する効果のあることが解析結果からもよく理解できる。

b) 加速度分布

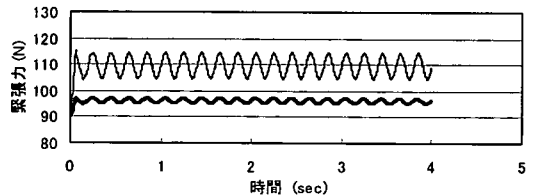
図-21は法面工頭部の加速度が最大となる時刻における加速度分布を示している。この図から、皿ばねありの320galを超える範囲は皿ばねなしのそれに比べて範囲が広く、300galを超える範囲は皿ばねありの方が逆に狭くなっている。これは皿ばねなしの場合にはアンカーを設置した領域の拘束効果が大きく、アンカーを設置した領域が一体となって挙動するためと考えられる。一方、皿ばねありの場合にはアンカー頭部に皿ばねを設置しているために、アンカー頭部で法面工の変位をある程度許容することになることから、アンカーを設置している領域内での拘束効果が皿ばねなしの場合に比べて低くなるためと考えられる。

c) 変位分布

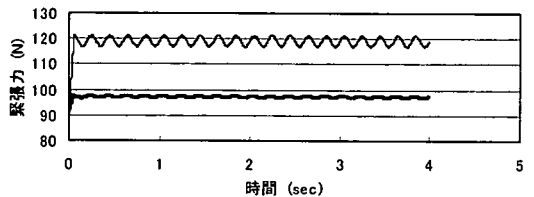
図-22は法面工頭部の前面側への変位が最大となる時刻における変位分布を示しており、図中には法面工頭部、上段アンカーの位置および中段アンカーの位置での変位を数値で示している。この図から、皿ばねありの場合の変形は皿ばねなしの場合の変形に比べ、やや大きくなっている。これは図-20において、皿ばねなしの中段および下段のアンカー緊張力が皿ばねありのそれに比べ大きくなっていることから、皿ばねなしの場合にはアンカーの締付け効果によって、支圧板と法面工の間の相対変位が抑制されるためと考えられる。また、変形モードに着目すると、皿ばねなしの場合には法面工の高い位置ほど変位が大きく、皿ばねありの場合には中段アンカーの位置での変位が最も大きく



(a) 上段アンカー



(b) 中段アンカー



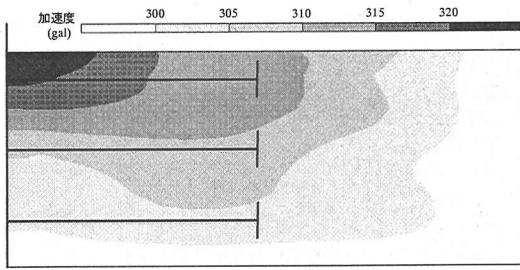
(c) 下段アンカー

図-20 解析で得られた緊張力の応答波形 (Case3, 300gal)

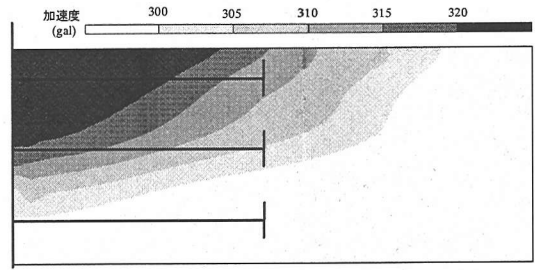
なっており、実験時の変形モードと対応する結果となっている。

d) 塑性ひずみ分布

図-23は加振後における塑性ひずみの水平方向成分の分布を示している。法尻付近に発生している比較的大きな塑性ひずみの領域は皿ばねなしの場合に比べ、

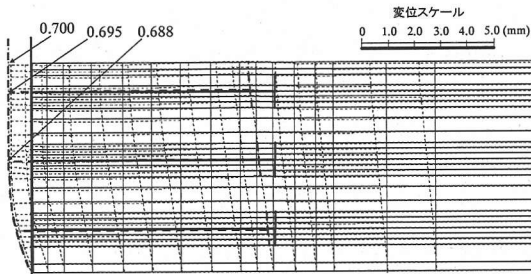


(a) 皿ばねなし

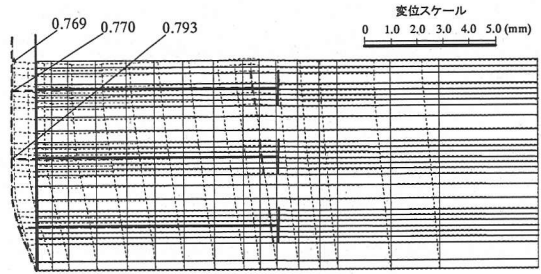


(b) 皿ばねあり

図-21 解析で得られた加速度分布図 (Case3, 300gal)

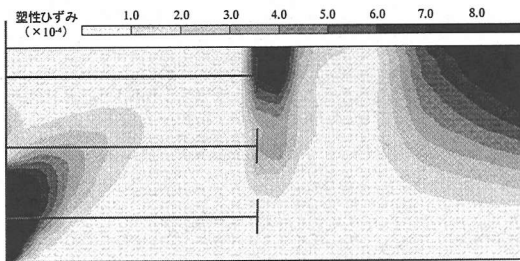


(a) 皿ばねなし

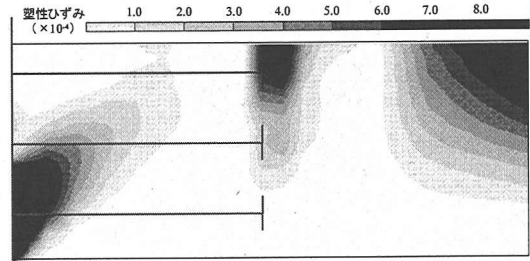


(b) 皿ばねあり

図-22 解析で得られた水平変位図 (Case3, 300gal)



(a) 皿ばねなし



(b) 皿ばねあり

図-23 解析で得られた塑性ひずみの水平方向成分の分布図 (Case3, 300gal)

皿ばねありの方がやや広がっているものの、両者はほぼ同様な分布を示している。しかし、発生している塑性ひずみは $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 程度であり、図-16のグラフにおける土のピーク強度時のひずみに比べると非常に小さな値となっている。これらのことから、皿ばねの設置が地震時における斜面のひずみ状態に与える影響は少ないと考えられる。また、やや大きな塑性ひずみが上段アンカーから中段アンカーの支圧板の背面地盤において生じているが、これは図-22からも分かるように加振にともなって支圧板が前面側に変位するためである。

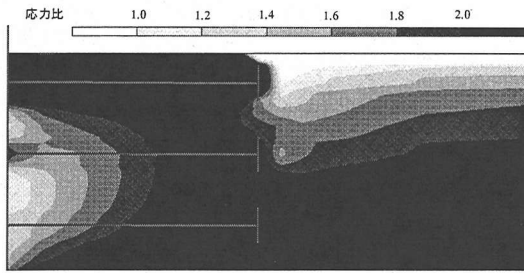
e) 応力比分布

図-24~26は加振前、法面工頭部の前面側への変位

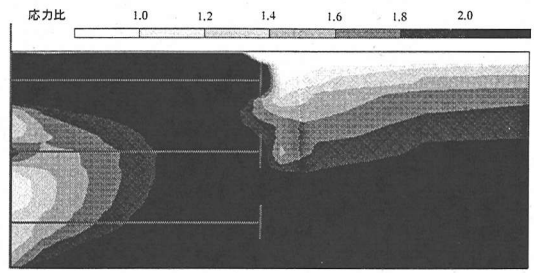
が最大となる時刻、残留時における式(10)で定義した応力比 f_s の分布を示している。

$$f_s = \frac{\sigma_1}{\sqrt{J_2}} \quad (10)$$

これらの図から、加振前および残留時の応力比は皿ばねの有無に係わらず同様な分布形状を示している。一方、図-20では残留緊張力が皿ばねの有無で大きく異なっており、これらのことから皿ばねの設置の有無が残留時の地盤の応力状態に与える影響は、それが残留緊張力に与える影響に比べて小さいと言える。また、加振前および残留時とも法面工付近で応力比の小さい領域が見られるものの、両者の分布形状は加振の

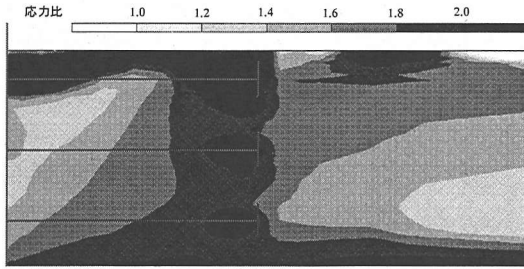


(a) 皿ばねなし

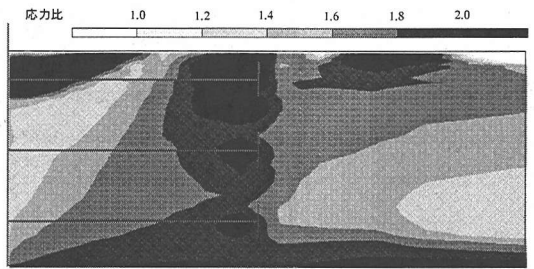


(b) 皿ばねあり

図-24 加振前の応力比分布図 (Case3, 300gal)

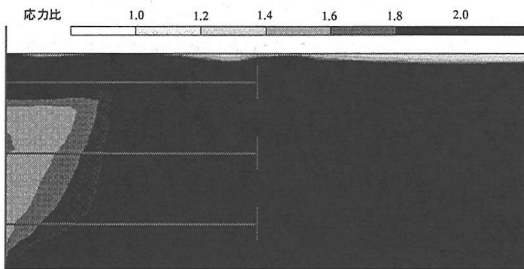


(a) 皿ばねなし

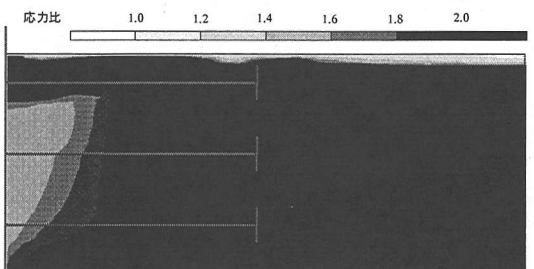


(b) 皿ばねあり

図-25 法面工頭部の前面側への変位が最大となる時刻の応力比分布図 (Case3, 300gal)



(a) 皿ばねなし



(b) 皿ばねあり

図-26 残留時における応力比分布図 (Case3, 300gal)

影響により異なるものとなっている。

一方、法面工頭部の前面側への変位が最大となる時刻における応力比は皿ばねの有無に関わらず、1.0～1.2の応力比の領域が法尻付近から上段に向かって45度程度の角度で生じている。ただし、アンカーを設置した領域内における応力比の低い部分は皿ばねなしの場合に比べて皿ばねありの方がやや広くなる傾向が見られる。この傾向は鉛直応力の小さい地表面部分で顕著となっているものの、中段アンカー付近以深では皿ばねの有無による差異は小さくなっている。これらの結果から、皿ばねの有無は加振時において応力状態にやや影響を与えるものの、加振前後を含めその影響は少ないと考えられる。また、アンカー支圧板の前面側

では支圧板によって水平方向の応力が増加するため、応力比の非常に大きな領域が発生している。なお、背面側に応力比の低い領域が分布しているが、これは背面境界の水平方向を拘束したためである。

以上の解析結果から、アンカー頭部に皿ばねを設置することによって、加速度や変位はやや大きくなる傾向が見られる。また、塑性ひずみの発生する領域や応力比の比較的小さな領域はやや広くなる傾向が見られる。一方、皿ばねの有無は加振時における緊張力の振幅や残留緊張力に大きな影響を与えることが明らかとなった。これらのことから、皿ばねの設置は斜面の応力や塑性ひずみ状態にやや影響を与えるものの、その影響は緊張力に与える影響に比べて小さいと考えられ

る。これは、地盤の弾性係数がアンカーの弾性係数に比べて小さいことから、法面工と支圧板のわずかな相対変位の変化に対して、アンカー緊張力は大きく変化するが、地盤内部の応力の変化は小さくなるためである。

5. おわりに

本論文は、グラウンドアンカー工頭部に皿ばねを設置した場合の耐震性の効果を検証するため実施した斜面の振動台実験とFEMによるシミュレーション解析結果について検討した。

振動台実験で得られた結果は以下の通りである。

- (1)アンカー頭部への皿ばねの設置が応答加速度に与える影響は小さい。
- (2)皿ばねの有無は法面工の変形モードに影響を与える可能性があると考えられる。今回の実験では、皿ばねありの場合には法面工の中間部分が前面側にせり出すような変形を生じるのに対し、皿ばねなしの場合には法面工の高い位置で累積残留変位が大きくなる分布形状となった。
- (3)皿ばねを設置したアンカーでは、地震に伴う法面工と支圧板の相対変位を吸収することによって、アンカー緊張力が変化するのを抑制する。このため、地震時および地震後に緊張力が増加する場合には、アンカー頭部に皿ばねを設置することによって緊張力の増加は抑制されるが、法面工の前面側への変位が大きくなる可能性がある。逆に、緊張力が減少する場合には、皿ばねを設置することによって緊張力の低下は抑制されるが、法面工は背面側へ引き込まれるような変位を生じることになると考えられる。このため、地震時および地震後における法面工の変形モードが皿ばねの有無で差異を生じることになると考えられる。
- (4)アンカーは加振に伴って大きな緊張力振幅を生じるとともに、加振後の残留緊張力は加振前の緊張力に比べて大きく変化する。これらのことから、斜面上に打設したアンカーは大規模な地震に対して、過大な緊張力が発生し、アンカー定着部、アンカーテンドン、アンカー体等に大きな損傷を生じる可能性がある。また、アンカー緊張力は地震後、大きく低下するか、あるいは過大な緊張力が作用したままになる可能性が高い。
- (5)アンカー頭部に設置した皿ばねは加振に伴う緊張力の振幅を小さくする効果がある。今回の実験では皿ばねありの場合の緊張力の振幅は皿ばねなしの場合のその1/4~2/3であった。これらのこと

から、皿ばねは地震時に発生すると考えられる過大な緊張力の増加を抑制し、地震に伴うアンカーの損傷を防止する効果があると考えられる。

- (6)アンカー頭部に設置した皿ばねは加振に伴う残留緊張力の増加を抑制するだけでなく、残留緊張力の低下を防止する効果がある。したがって、アンカー頭部に設置した皿ばねは、地震後においても地震前と同程度の緊張力を保持するのに効果的である。

一方、FEMによるシミュレーション解析で得られた結果は以下の通りである。

- (7)模型実験に対するシミュレーション解析の結果、法面工の応答変位波形や残留変位は実験結果とやや異なるものの、法面工の変形モード、加速度の応答波形、応答変位振幅、アンカー緊張力の応答波形は概ね実験結果と整合する結果が得られ、皿ばねによるアンカーの耐震効果がシミュレーション解析においても概ね検証できた。特に、アンカー頭部に設置した皿ばねによる加振中の緊張力振幅の抑制効果や、加振後における緊張力の変化（増加および減少）の抑制効果が実験結果と同様に解析結果においても検証できた。
 - (8)アンカー頭部に皿ばねを設置することによって、大きな加速度の生じる範囲がやや拡大する、塑性ひずみの発生領域がやや広くなる、応力状態が変化するなどの影響が見られた。しかし、皿ばねの設置が加振中や加振後の応力状態や塑性ひずみ状態に与える影響は、それが加振中や加振後の緊張力の変化に与える影響に比べて小さいと考えられる。これは、地盤の弾性係数がアンカーの弾性係数に比べて小さいことから、法面工と支圧板のわずかな相対変位の変化に対して、アンカー緊張力は大きく変化するが、地盤内部の応力の変化は小さくなるためである。
- 本論文では、地盤材料として砂を用いた模型実験および模型実験結果に対するシミュレーション解析を実施し、皿ばねによるグラウンドアンカー工の耐震効果を検証した。しかし、模型実験ではアンカー体が引抜けけないことを前提条件として実施したことから、今後アンカー体の引抜け変位が地震時のアンカー緊張力や皿ばねの耐震効果に与える影響について検証する必要がある。また、地盤の地質や斜面の形状、およびグラウンドアンカー工の各部材の剛性などによって地震動がアンカー緊張力や斜面の変状等に与える影響は異なると考えられることから、今後これらの要因が地震時のアンカー緊張力や皿ばねの耐震効果および斜面の変状に与える影響について、実斜面を想定した検討が必要である。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤工学会基準 グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説（JGS4101-2000），2001.1.
- 2) 日本道路公団：グラウンドアンカー工設計指針，1993.11.
- 3) 日本建築学会：建築地盤アンカー設計施工指針・同解説，2001.1.
- 4) 増田隆明，藤井斉昭，山田浩，岡崎賢治：遠心模型によるアンカー擁壁の地震時安定性，土木学会第51回年次学術講演会Ⅲ，pp.444-445，1996.
- 5) 増田隆明，藤井斉昭，山田浩，岡崎賢治：遠心模型実験によるアンカー擁壁の地震時安定性，土木学会第52回年次学術講演会Ⅲ，pp.396-397，1997.
- 6) 門間敬一，千田容詞，小嶋伸一：アンカー工を施工した急傾斜地における地震時挙動の計測結果，土木技術資料，Vol.42，No.9，pp.58-61，2000.
- 7) 沖村孝，山本彰，村上考司，鳥井原誠：傾斜基盤層上の斜面の地震応答解析，土木学会論文集，No.638/Ⅲ-49，pp.143-154，1999.
- 8) 地盤工学会：地震時の斜面の不安定化メカニズムと設計法に関する研究委員会報告書，pp.73-87，1999.4.
- 9) 山本彰，鳥井原誠：アンカー緊張力保持技術に関する研究，土木学会論文集，No.694/Ⅲ-57，pp.141-151，2001.
- 10) Owen, D. R. J and HINTON, E. : Finite Elements in Plasticity Theory and Practice, Prentice-Hall, pp.215-270, 1986.

(2002.5.27受付)

AN EARTHQUAKE-PROOF TECHNIQUE FOR GROUND ANCHORAGES

Akira YAMAMOTO and Makoto TORIIHARA

This paper describes the results of shaking table model tests and FEM analyses of a slope with anchorage in order to verify the earthquake-proof effect of a coned disk spring on the anchor head. The model tests were carried out for the slope with and without a coned disk spring on the anchor head. The following conclusions were obtained. 1) The tensile force of the ground anchorage changes greatly with the shaking motions. 2) A coned disk spring on an anchor head greatly decreased the tensile force amplitudes during the shaking tests and also improved the earthquake resistance of the anchorage. In the tests, the tensile force amplitudes with a coned disk spring were one quarter to two thirds of the tensile force amplitude without a coned disk spring.