

新遠心模型実験装置 (NIIS-Mark II Centrifuge) の開発

伊藤和也* , 玉手 聡* , 豊澤康男* , 堀井宣幸*

Development of NIIS-Mark II Centrifuge

by Kazuya ITOH* , Satoshi TAMATE* , Yasuo TOYOSAWA* , and Noriyuki HORII*

Abstract;

In 1988, Centrifuge called Mark-I was established into the National Institute of Industrial Safety with an effective radius of 2.3 m. Since then, NIIS has conducted many centrifuge tests to investigate the failure mechanism which are mainly related to the labor accidents. The results of fundamental and practical research projects have been applied and reflected to some safety guidelines given out by several construction safety groups.

In 2003, NIIS started to reconstruct its Mark-I centrifuge and it was completed in 2004. A new centrifuge "Mark-II" was named for this reconstructed centrifuge. This medium sized centrifuge is believed to be one of the most effective and multi-functional type of centrifuge in the world.

This paper presents the detailed outline on the structural and mechanical design of NIIS Mark-II centrifuge along with its performances. As in other centrifuge, it also has a main shaft, a drive unit, two arms, two swinging platforms, a signal and power supply interface and a control box. But unlike in other centrifuge, its arms (forms) are asymmetric, which is its special feature. One side of the arm is provided with a bridge plate where the swinging platform which could be fixed to its inner end plate when required by using a pair of hydraulic suspension jacks when the platform is lifted up. This type of system is called "Touch-down system". This facilitates the simulation of strong earthquake motions and mounting of shaking table on to the platform. Other side of the arm is not provided with the bridge plate and hence no end plate. In order to balance this portion (weight of the end plate) in this side of the arm while the swinging platform is moved up, two counter-weights are overhung on the two sides of this arm. This platform is used for non-shaking or static tests. In this type of middle size centrifuge, where bridge plate is not provided in one of its arm, longer radius and larger platform could be obtained. In addition, it makes the working on the platform easier and more efficient.

1. はじめに

独立行政法人産業安全研究所では、1988(昭和63)年に遠心模型実験装置を導入し、地盤に起因する労働災害の防止に係わる研究に活用している。また、遠心模型実験装置は、労働災害の発生メカニズムや防止に資する実験以外に、行政等からの依頼による特定の労働災害事例の発生原因や発生メカニズムの解明を目的とした再現実験にも用いられてきた。これらの成果は、産業安全研究所研究報告、産業安全研究所特別研究報告、ならびに国内外の会議・論文集等に発表されており、労働災害の発生原因の特定ならびに、その後の防止対策の技術的裏付けに大きな貢献をしている。

遠心模型実験手法は、導入から数年経過した1990年代前半から様々な技術革新により、実験手法に大きな変化が現れた。具体的には、遠心力場で使用可能な様々な載荷試験装置の開発や、その装置の制御技術の急速な発展によって、それらを有効に活用した実際の施工過程の再現実験等が可能となったことが挙げられる。さらに、計測技術についても小型・高精度化し、多チャンネルでの同時計測が可能となった¹⁾。一方、旧遠心模型実験装置(以下、Mark-1)は、上述のような各種試験装置の制御システムを多く搭載することにより設置スペースが過密状態となり、制御システムの搭載位置を中心軸付近から離れた位置に設置せざるを得ない状態となった。そのため、最大遠心加速度を70G程度に制限した運転を行わなければならなくなり、取り組むべき幾つかの課題に対して少なからず影響が出てきた。そこで、平成15年度より旧装置Mark-1を更新し、新遠心模型実験装置(以下、Mark-2)の開発を行った。新装置Mark-2はMark-1のピットを利用し、装置機械部分の製造・据え付け、ならびに周辺機器をMark-1から移設・整備を行うことにより、2004(平成16)

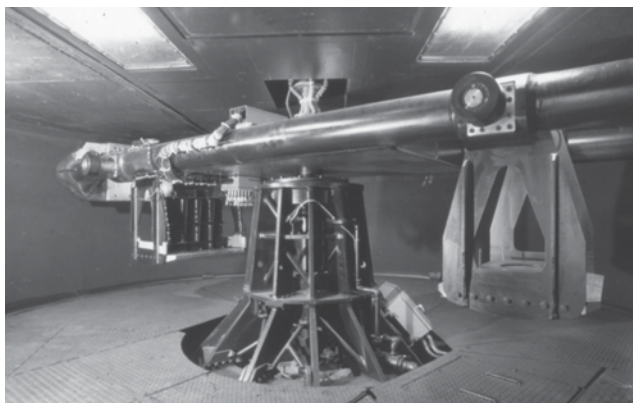


Photo 1 NIIS Mark I Centrifuge (since 1988).
旧遠心模型実験装置(1988年導入直後)

年2月に完成した。新装置Mark-2は、有効半径が2.3mと中規模の装置にも関わらず、有効半径が5m以上の大型装置並みの搭載スペースを確保し、過去15年間の運用経験に基づいた数多くの安全面や機能面に関する改良、そして最新の技術を取り入れて製作された。したがって、本装置は国内外の遠心模型実験装置の中でも使い勝手の良い装置の一つであると自負している。

本報告では、旧装置Mark-1での研究実績および、新装置Mark-2の導入の際に行った様々な検討事項について紹介し、新装置の基本的諸元ならびに周辺機器について述べる。

2. 旧遠心模型実験装置の運転状況および研究実績

2.1 運転実績

旧遠心模型実験装置(NIIS Mark-1 Centrifuge, Photo 1, Fig. 2)は、1988(昭和63)年に労働省産業安全研究所(現、独立行政法人産業安全研究所)建設安全実験棟の実験施設として導入され、2004(平成15)年10月に解体されるまで約15年間にわたり、数多くの研究に対して活用されてきた。導入後の数年間は、装置の初期不具合等の修正・整備、耐G仕様の計測器や模型地盤作成用の機器の開発・整備のほか、模型地盤作成のための粘土地盤の自重圧密実験や遠心加速度単調増加による斜面の崩壊実験等の遠心模型実験の基礎的技術の蓄積に注力していた。そのため、実務的な実験が軌道に乗り始めたのは、1990(平成2)年前後であった。その後のMark-1の稼働率は、ほぼ100%に近い状況となっていた。

2.2 研究実績

Table 1はMark-1導入以来、これまで遠心模型実験装置を利用して実施された研究分野を示したものである。研究分野としては、掘削工事中の土砂崩壊や支持地盤の不安定性による移動式クレーンの転倒など、労働災害に係わる地盤工学的な諸問題を、主な研究対象としてきた。例えば、「溝掘削工事中における土砂崩壊災害の防止に関する研究」²⁾(1991(平成3)年～1993(平成5)年)では、溝掘削工事中に発生した災害事例から崩壊形態や被災箇所などについて分類を行っている。その中で遠心模型実験は、災害事例で得られた崩壊形状がどのような場合に発生するのかを把握する目的で使用されており、パラメーターを変化させた実験から、崩壊の前兆現象から崩壊に至るまでの

Table 1 Research performance using NIIS Mark-1 Centrifuge.
遠心模型実験を用いた研究実績

研究対象	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03
掘削時の安定問題			5)				3)					6)				
土石流問題														7)		
土圧問題								8) ~ 10)					11), 12)		13), 14)	
基礎の支持力問題							15) ~ 16)						17) ~ 19)		20)	
地震時の安定問題								21)						22)		23)
盛土の安定問題										25)						24)
斜面安定問題		26)									27)					

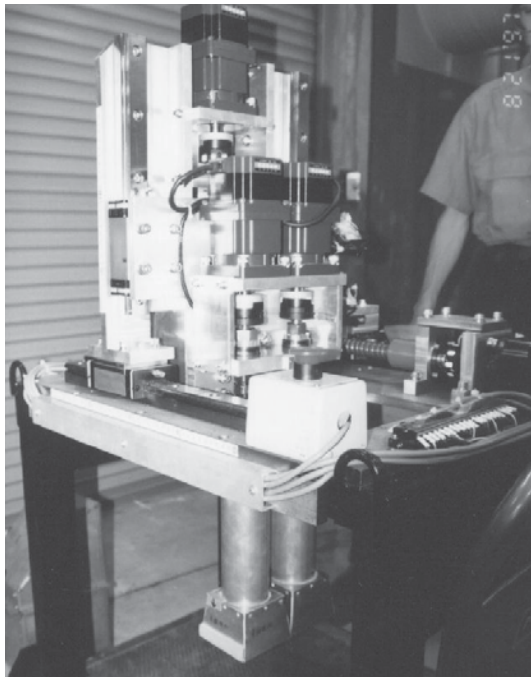


Photo 2 In-flight excavator.
遠心場掘削装置

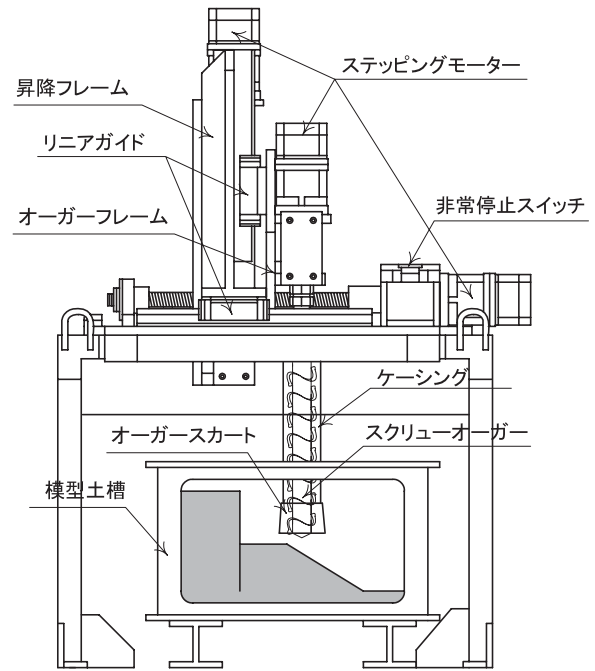
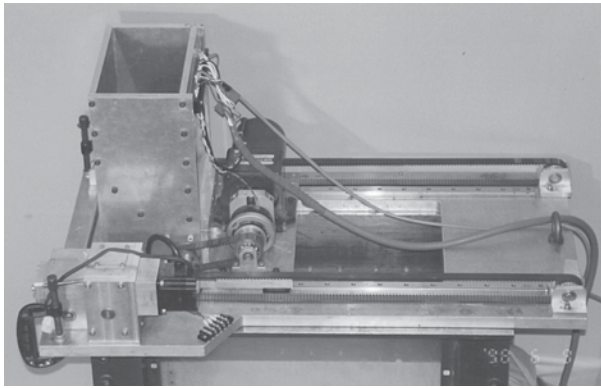


Fig. 1 Layout of In-flight excavator.
遠心場掘削装置

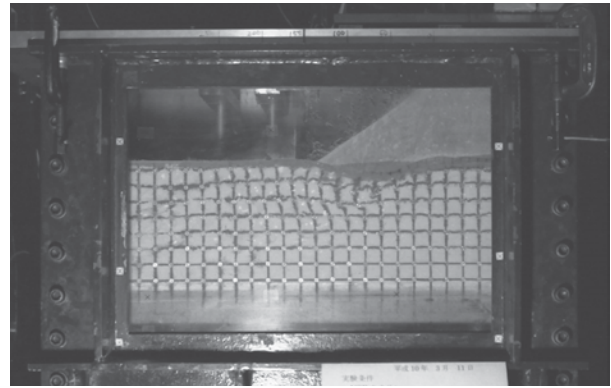
崩壊現象を解明している。この研究成果は、厚生労働省の通達³⁾に反映され、土止め先行工法⁴⁾の基礎データとして用いられており、労働災害防止のための技術的な裏付けとなっている。その他、今後労働災害が発生する可能性がある分野についても、調査・研究を行っており、遠心模型実験装置を利用した実験の範囲は多岐に渡っている

また、実験装置の開発も積極的に行っている。Photo 2, Fig. 1は大規模な土留め掘削工事現場での倒壊災害のメカニズムを解明するために開発した遠心場

掘削装置である。比較的硬い過圧密粘土などをスクリーオーガーにより掘削・排土するシステムは、世界でも初めての試みである⁹⁾。また、Photo 3は盛土築造の過程を遠心場にて再現する遠心場盛土築造装置²⁵⁾である。遠心模型実験装置にて盛土築造を再現する装置は、東京工業大学²⁸⁾をはじめ、港湾技術研究所²⁹⁾、シンガポール国立大学³⁰⁾といった研究機関で開発されている。当研究所で開発した装置は、これらとは一線を画した機構を有しており、回転溝を流出口に設けて、その回転溝の回転数を制御することで流量を調整す



(1) Photograph of In-flight sand sprinkler.
遠心場盛土築造装置全景



(2) Constructed embankment using In-flight sand sprinkler.
遠心場盛土築造装置を使用した実験結果

Photo 3 In-flight sand sprinkler.
遠心場盛土築造装置

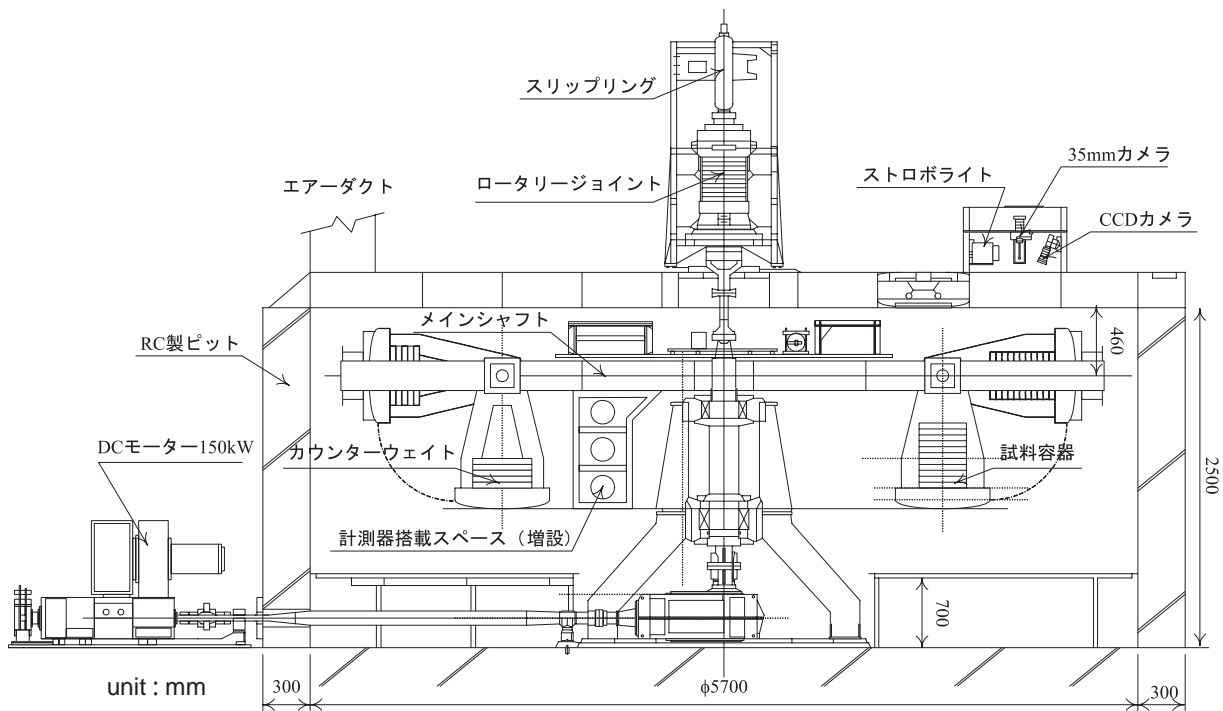


Fig. 2 Layout of NIIS Mark-I Centrifuge.
旧遠心模型実験装置概略図

るとともに、多種多様な盛土をコンピューター制御にて自動化施工することが可能である。なお、これらの研究成果については、文献^(3), 5) - 27)に詳細に述べられているので参照されたい。

2.3 旧遠心模型実験装置の後期に発生した問題点

Fig. 2はMark-1の概略図である。装置本体は鉄筋コンクリート製の地下ピット(内径5.7m、深さ2.5m)内部に設置されていた。駆動部は地下ピット外部にある直

流モーターから駆動軸を介して下部から駆動する型式となっており、駆動軸をカバーする目的と空損を少なくする目的で、遠心ピット内は地下階より高さ70cmほどかさ上げをする形状となっていた(Photo 4)。このような遠心ピット内において、計測アンプと制御装置はビーム上部のスペースに設置していた。しかし、ビーム上部のスペースは天井まで40cm程度であり、これら搭載装置のスペースは年々不足していった。そのため、2001(平成13)年に制御システムを搭載するスペースを軸付近から約1.0m離れた位置に増設した



Photo 4 Entrance and exit door.
遠心ピット内入口

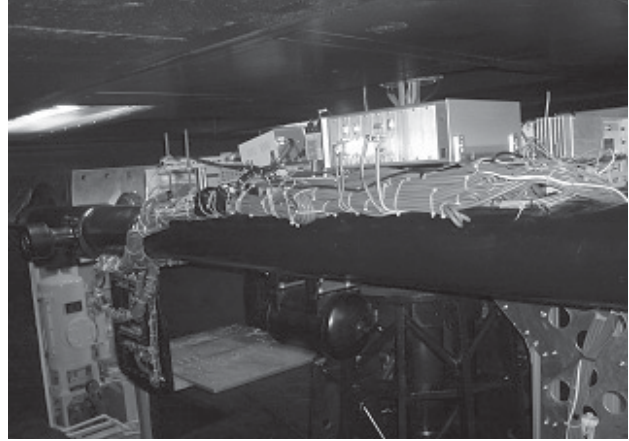


Photo 5 Control device on the Rotating arms and the extended frame.
回転アーム上の制御装置と増設した計測器搭載フレーム

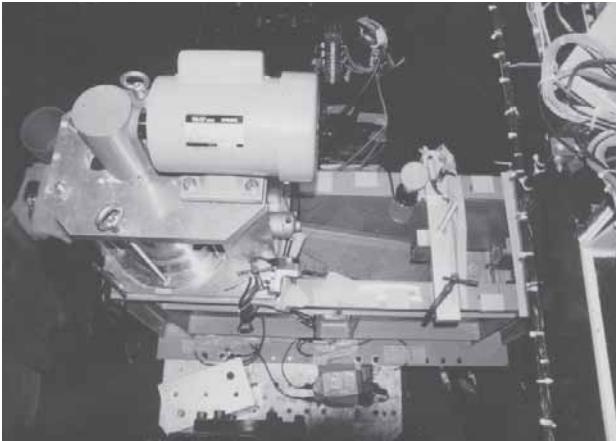


Photo 6 Debris flow simulator carried on platform.
プラットフォームに搭載されている土石流流下装置

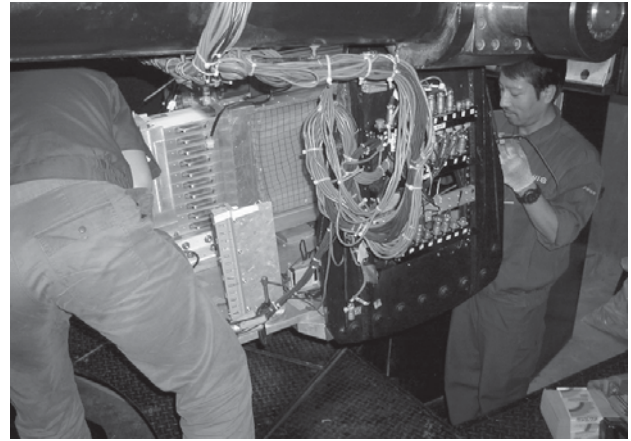


Photo 7 Movable earth support equipment carried on platform.
プラットフォームに搭載されている遠心場可動土留め装置

(Photo 5)。この増設により制御システムに大きな遠心加速度が付与されてしまうため、最大遠心加速度は70G程度に制限した状態で運転しなければならなくなった。一方研究対象については、社会的ニーズや行政的ニーズに応じて複雑化したため、プラットフォーム(900mm x 700mm)を超えるような大型土槽を用いなければ現象を把握することが出来ない土石流流下装置(Photo 6)や多くの制御システムの導入により高度化したため大型化してしまった遠心場可動土留め装置(Photo 7)^{(3), (4)}など、Mark-1の性能には限界が見られるようになってきた。

3. 新遠心模型実験装置(Mark-2)の導入

3.1 新遠心模型実験装置Mark-2の発想

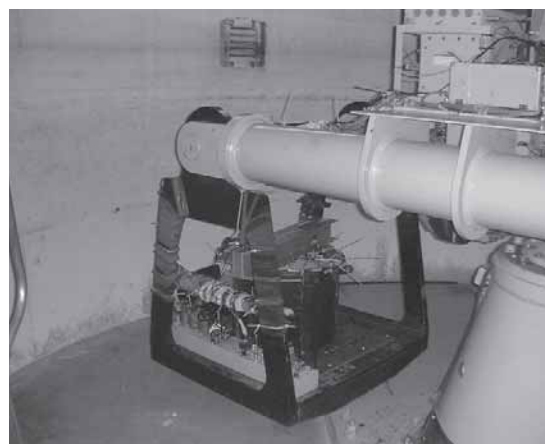
新装置Mark-2導入のための検討は、2003(平成15)

年から開始された。Mark-2の基本的なレイアウト、主電動機の規模および種類、潤滑方式、計測システムなどについて、限られた予算の中で実験が効率的に行えることに対象を絞り検討を進めた。検討の過程では、これまでの当研究所における運転や実績の他に、既往の文献や同規模の遠心模型実験装置を所有している他の研究機関での運転実績についても調査を行った。調査の結果、既往の文献と同様に当研究所でも100G以上での運転実績は、耐G用計測アンプが搭載されていない初期の頃または、メンテナンス時のみで、ほとんどの実験は100G以下にて行われていた。特にシステムの高度化に伴い、最大遠心加速度を大きくするより搭載面積を拡大の方が実験遂行の観点から利便性が高いと思われた。そこで、Mark-2の更新では、最大遠心加速度の性能を200Gから100Gに減少させ、搭載面積の拡大を図ることとした。

近年、遠心模型実験装置を導入した研究機関の幾



(1) With back-plate type.
バックプレート有り (産業安全研究所)



(2) Without back-plate type.
バックプレート無し (東京工業大学)

Photo 8 Class of beam type geotechnical centrifuge apparatus.
ビーム型遠心模型実験装置の種類



Photo 9 Relation between back plate and workers.
バックプレートと作業者の関係



Photo 10 Centrifuge produced by Actidyn.
(Nikken Sekkei Nakase Geotechnical Institute)
Actidyn社の遠心模型実験装置
(日建設計中瀬土質研究所)

つかは、静的用実験と動的用実験のプラットホームを専用化させて、実験の効率を高めている^{31)・32)}。Mark-2も同様の発想により、プラットホームを専用化させた。一般的に、ビーム型遠心模型実験装置はバックプレート(振り上がったプラットホームを着座させるための支持部材)の有無により形式が大別される。バックプレートを有する場合、遠心力による水平荷重をバックプレートに着座させることにより回転アームに分担させることでプラットホームや軸受への集中荷重を回避することができる(例えば、産業安全研究所NIIS Mark-1 Centrifuge, Photo 8(1))。一方、バックプレートが無い場合、遠心力による水平荷重をプラットホームや軸受にて負担しなければならない(例えば、東京工業大学 Tokyo Tech Mark-3 Centrifuge, Photo 8(2))。さらにプラットホームが加振実験の際に共振し、波形制御が困

難となる構造的問題が指摘されており、バックプレートが無い形式は、概して動的実験には不向きだと言われている³³⁾。一方、バックプレートを有する形式は、着座によりプラットホームの支持剛性が増加するため、加振実験には有効である。しかし、バックプレートには作業スペースの減少とともに不自然な体勢(Photo 9)による作業環境を生み出すため、実験の作業性を低下させる問題がある。そこで、バックプレートは実験精度上必要な動的実験側のみに設置し、静的実験側はバックプレートが無い形状とした、“非対称ビーム構造”を採用した。左右の形状が非対称の遠心模型実験装置としては、片側を移動可変のカウンターウエイトとしたActidyn社製の遠心模型実験装置³⁴⁾(Photo 10)があるが、本装置のように左右にプラットホームがあり、その形状が非対称の遠心模型実験装置は世界で初の

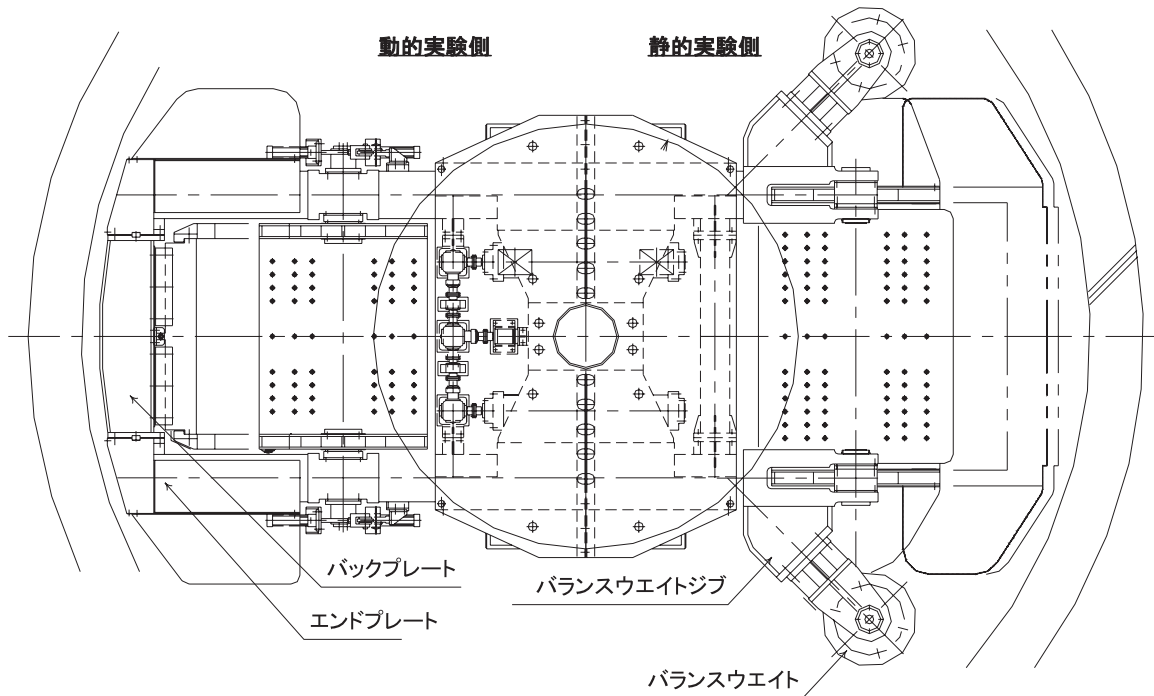


Fig. 3 Draft figure of newly un-symmetry form centrifuge.
左右非対称型遠心模型実験装置の検討図

試みである。

左右非対称な形状を有する遠心模型実験装置であるため、回転時におけるバランス量を検討した。その結果、回転アームの重心がバックプレートを有する動的実験側に偏るため、全体的に動的実験側に重心が大きく偏る問題が判明した。この問題を解決するために静的側の回転アームから半径方向に突出した箇所バランスウエイトを取り付けた。検討図をFig. 3に示す。動的実験用プラットフォーム側の2本のビームはバックプレートにより結合されているため、ビームは拡がることはない。しかしながら、静的実験側にはバックプレートが無く、さらにバランスウエイトによってビームが拡がる方向に荷重が作用するため、特にバランスウエイトジブとビームの接合部には応力が集中する可能性が考えられた。そこで、構造各部での応力集中等を詳細に検討するため、有限要素解析を行った。この解析結果に基づいて、高応力部の把握を行い、最終的な構造形状を決定した。

3.2 有限要素法による応力解析

Mark-2を設計するにあたり、左右非対称型遠心模型実験装置の構造部材に働く応力を有限要素法により解析した。解析は以下の過程で実施した。

第一次案：第一次案としてFig. 4のような形状を考え、メッシュを作成した。プラットフォーム・搭載品およびバランスウエイトの質量をそれぞれの位置に負荷し、

変形および応力状態を確認した。Fig. 5は変形拡大図ならびに最大主応力コンターを示したものである。突出したバランスウエイトジブが拡がる方向に変形している様子が分かる。また、バランスウエイトジブの接合部と2本のビームを接合するフレーム(ブリッジフレーム)端部に許容応力度を超える高い応力(735MPa)が確認された。そのため、第一次案の形状では製作を行うことは難しく、応力集中を発生させないような形状となるよう再設計を行う必要性が出てきた。

第二次案：第一次案ではバランスウエイトジブはプラットフォームを支持する鋼製フレームに接合され、ブリッジフレームは回転アームである中空鋼に接合されていた。2本の回転アームが拡がることを抑えるために使用しているブリッジフレームには常に引張力が働いている。さらにバランスウエイトの荷重により鋼製フレーム全体がビームを拡げる方向に荷重を働かせるために両者の根本部分に高い応力が発生したものと考えられる。そこで、第二次案ではFig. 6に示すように鋼製フレームにバランスウエイトジブだけでなくブリッジフレームも接合することで、剛性を高め、変形を抑制するように配慮した。また、第二次案の解析の際には、プラットフォーム形状についてもモデル化を行い、第一次案よりも詳細な応力解析を行った。変形拡大図ならびに最大主応力コンター図をFig. 7に示す。先ほどの第一次案と比較しても接合部の変形は抑制されており、最大主応力も許容応力度値以下に低減したため、第二次案の形状で製作を行うこととした。

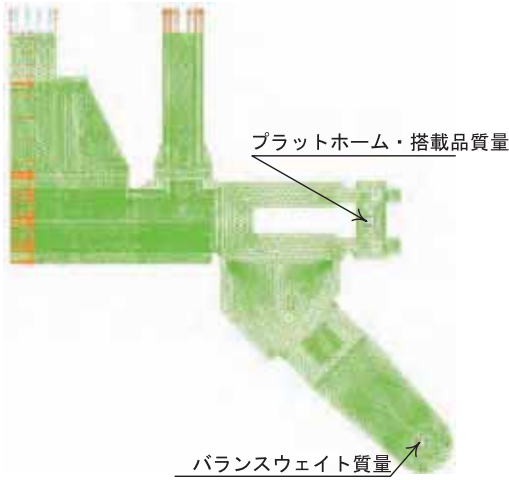


Fig. 4 Finite element mesh of static platform in the 1st trial.
静的載荷側の有限要素解析に使用したメッシュ(一次案)

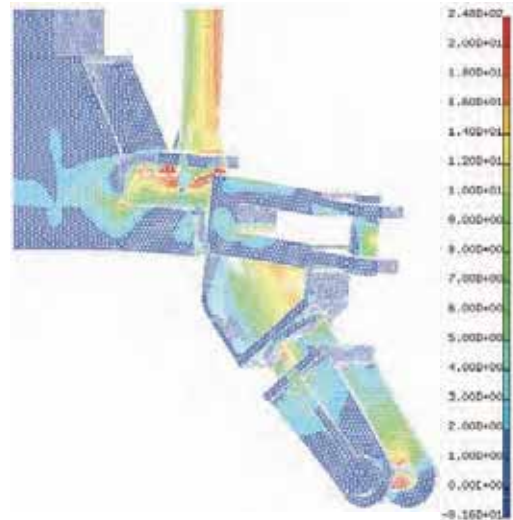


Fig. 5 Deformation and stress contour in the 1st trial.
一次案での変形拡大図および最大主応力コンター図

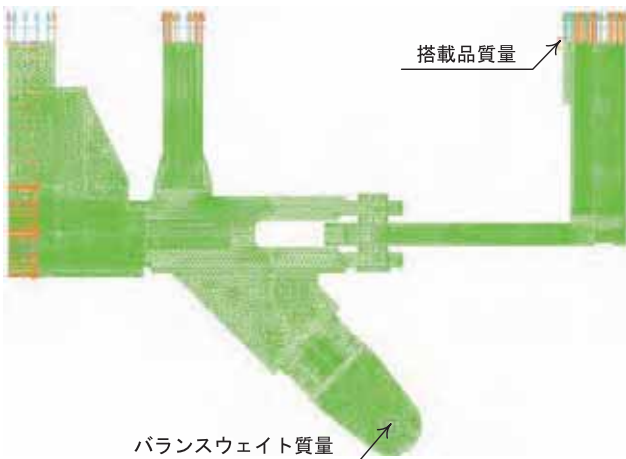


Fig. 6 Finite element mesh of static platform in the 2nd trial.
静的載荷側の有限要素解析に使用したメッシュ(二次案)



Fig. 7 Deformation and stress contour in the 2nd trial.
二次案での変形拡大図および最大主応力コンター図



Fig. 8 Finite element mesh of dynamic platform.
動的実験側の有限要素解析に使用したメッシュ



Fig. 9 Deformation and stress contour.
動的実験側の変形拡大図および最大主応力コンター図

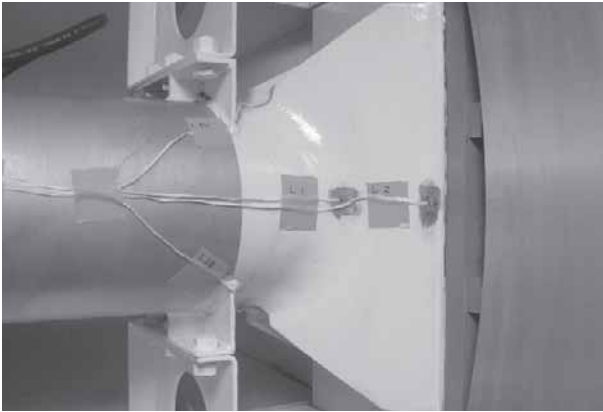


Photo 11 Situation of strain measurement using strain gages.
ひずみゲージによるひずみ測定状況

なお、動的载荷側の構造は、過去に多くの設計・製作実績があるが、Fig. 8のような形状として有限要素解析を行い検討した。Fig. 9に、解析から得られた変形拡大図ならびに最大主応力コンター図を示す。設計された形状で行った応力解析にて許容値を超える高応力部がなかったため、この形状で製作を行った。

最終的に、設置後における試運転の際に、溶接部等の弱部にひずみゲージを貼り付けて(Photo 11)計測を行った。実測結果と解析結果を比較すると、Table-2のようになり、実測値は解析値よりも小さいことを確認した。

3.3 旧遠心装置の撤去ならびに新装置の設置工事

工事はTable 3の日程で行われた。まず、ピット上床版を取り外し、旧遠心装置を撤去した(Photo 12)。

今回の改修では、駆動軸および中心部分を400mm掘り下げる基礎改修工事を行い(Photo 13)、モーター駆動軸をフローア下に収納した。これによりピット内フ

Table 2 Typical stresses at weak points.
応力集中部の応力の計算結果と実測結果

	測定部位	FEM 計算応力 MPa	実測 結果 MPa	許容 応力 MPa
静的 実験 側	アーム接続部	147.0	132.3	長期 215.6
	円柱バランス ウエイト取付根元部	147.0	44.1	
	プラットフォーム 底部	166.6	63.7	
動的 実験 側	アーム接続部	156.8	129.4	
	アームと着座デッキ のフィレット部	218.5	215.6	

ロアーがフラットになり、フローアへのアクセス性が向上した。また、ピット出入口の扉も大型化して作業性を高めた(Photo 14)。

ピット上床版は中央部を鋼製として取り外し可能な構造としている。このピット上床版に上部軸受けを設置することで、遠心回転時の水平荷重をピット上床版が分担する構造となっている。また、ピット上床版には、自動開閉扉が設けられており、クレーンによる試料容器の搬入出が可能となっている(Photo 15)。さらに、空気循環機能として、ピット上床版端部と軸中心部のピット内デッキには通気口が設けられており、ダクトを介して室外と繋がっている。遠心模型実験装置を回転すると、中心軸付近の気圧は下がり、外周付近の気圧は上昇する。そこで、この気圧差を利用して外気を軸中心部のピット内デッキより取り入れ、ピット上床版端部より排気させる自然循環機能を備えることで、ピット内の温度上昇を最小限に抑えた。

Table 3 Work schedule.
工事日程

	2003					2004		
	8	9	10	11	12	1	2	3
設計	←————→							
製作			←————→			→————→		
塗装					⇔			⇔
現地工事				⇔				
解体工事				⇔				
基礎工事			←————→			→————→		
据付工事						→————→		
試運転・調整								⇔



Photo 12 Dismantle NIIS Mark-1 Centrifuge.
旧遠心模型実験装置の撤去

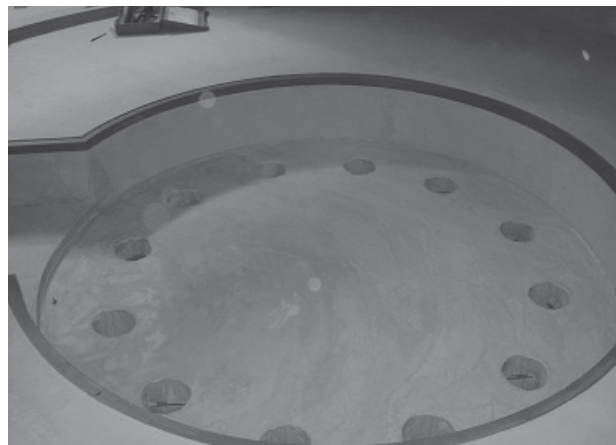


Photo 13 Base repair work.
基礎改修工事



Photo 14 Entrance and exit door in Mark-2 Centrifuge.
ピット出入口扉

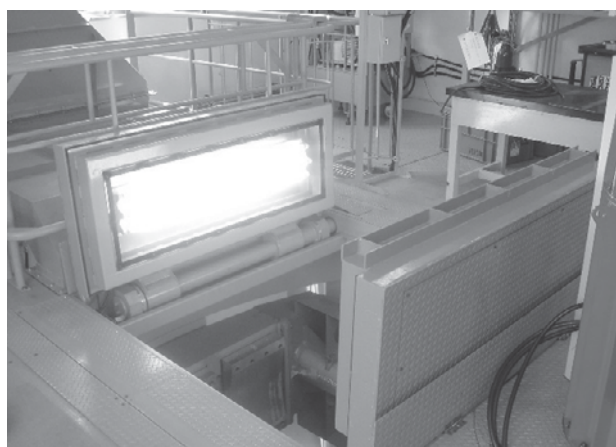


Photo 15 Door carrying container in only.
試料容器搬入出用の開閉扉

3.4 装置本体

新遠心装置Mark-2の写真をPhoto 16, レイアウトをFig. 12に示す。前述の通り, 装置本体は最大遠心加速度の仕様を200Gから100Gに減少させた。一方, プラットホームの面積は, Mark-1の1.7倍(動的実験側)~2.6倍(静的実験側)に拡大した。Table 4に新遠心模型実験装置の主要な諸元を示す。Fig. 13は世界の主要な遠心模型実験装置³⁵⁾のプラットホーム面積と有効半径について示したものである。Mark-2のプラットホーム面積は, 同一有効半径を有する他機関の装置に比べて大きく, 特に静的実験側のプラットホーム面積は, 有効半径5m級の大型遠心模型実験装置とほぼ同等である。

装置の回転部分は, Fig. 12に示す中心軸, 回転アーム, 回転アームに懸架される一対のプラットホームより構成されている。遠心模型実験装置の中心軸の外観をFig. 14に示す。最大直径0.5m, 長さ19.55mの鍛

造鋼であり, 回転中に生じるアンバランス荷重(常時アンバランス70kN, 異常時アンバランス490kN)に対して十分な強度が与えられている。また, 中心軸の上下部は軸受にて支持されている。旧遠心装置Mark-1では下部軸受のみで支持していたが, 今回の改修では上部軸受にてラジアル荷重(半径方向の荷重)の一部を受け持つことで, 遠心装置の安定性を向上させている。

回転アームは, 有限要素解析(3.2章)による検討に基づいて, Fig. 13に示す2柱式ビーム, 動的側のブリッジプレート, 静的側のカウンターバランス, そして補強部材により構成される構造とした。計測器搭載スペース(Fig. 13)は遠心加速度の影響が少ない中心軸付近に設けた。このスペースには, データー計測用耐Gアンプ, 無線LANシステム, CCDカメラアンプ, 遠心場加振装置制御ボックス, 高速度カメラ装置, そしてパーソナルコンピューターなどが搭載されている。

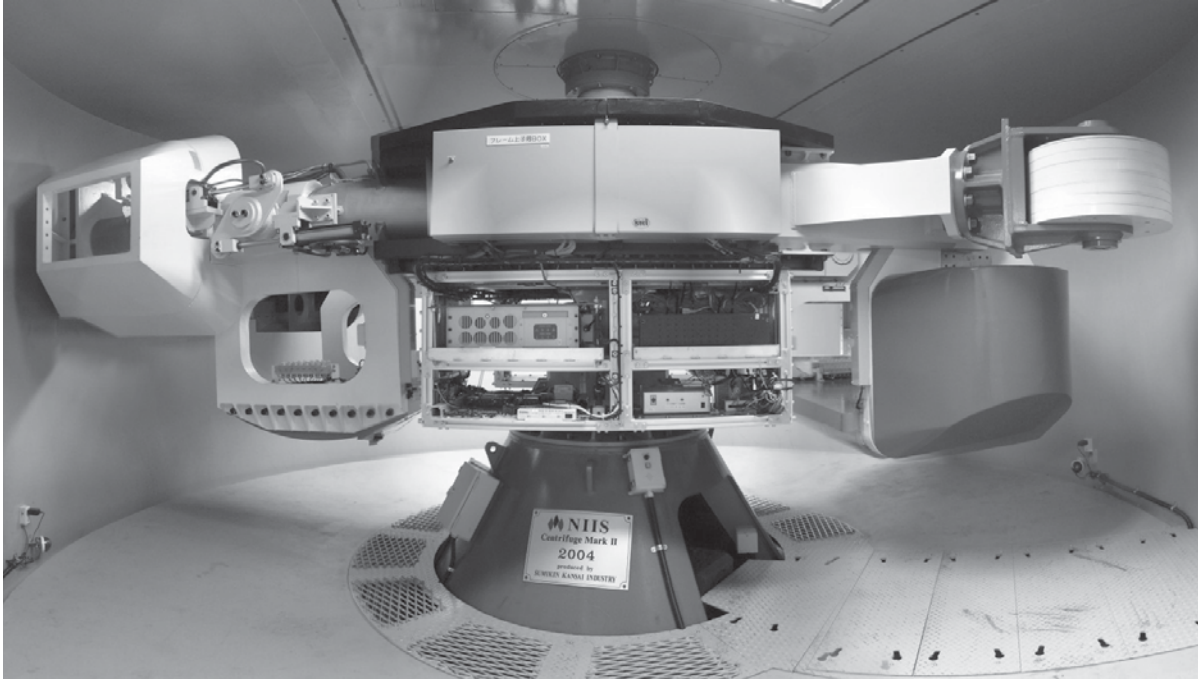


Photo 16 NIIS Mark-2 Centrifuge.
新遠心模型実験装置 (NIIS Mark-2 Centrifuge)

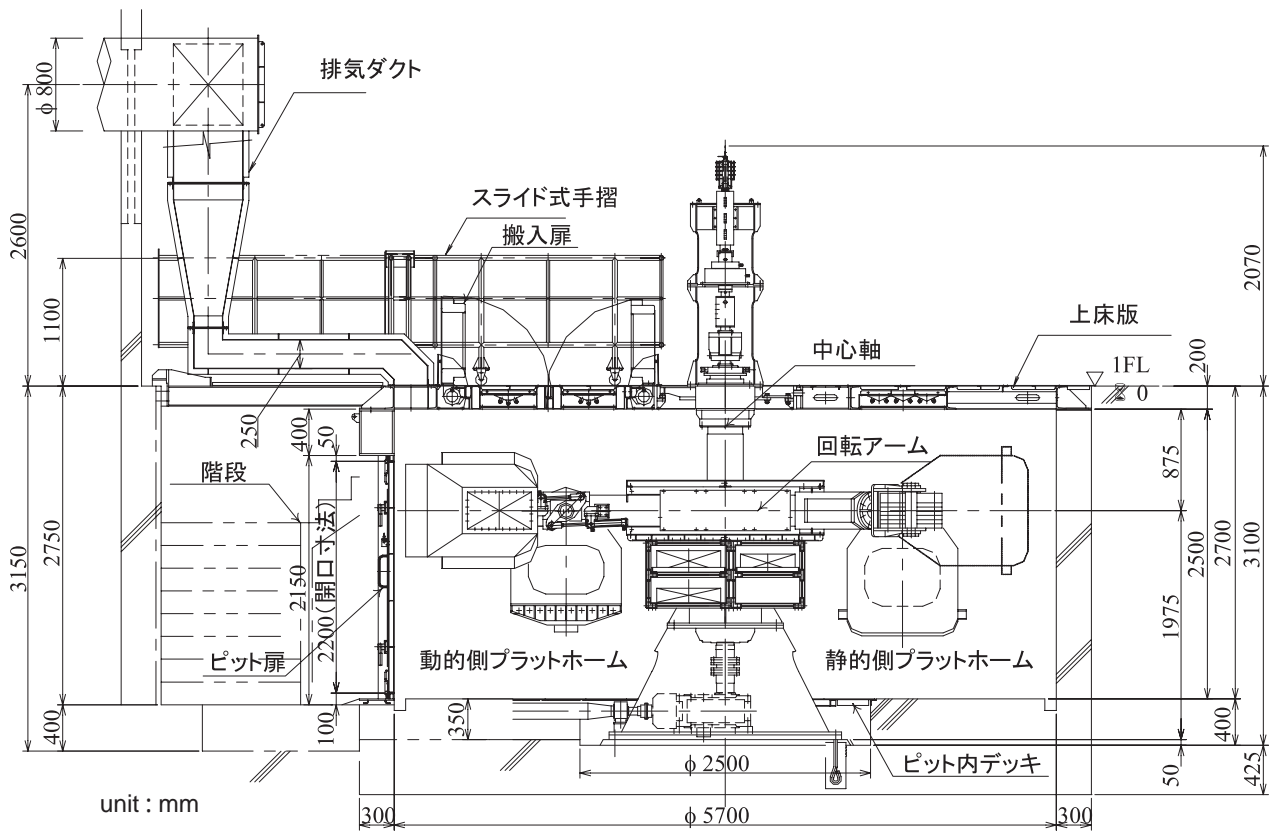


Fig. 10 Layout of the NIIS Mark-2 Centrifuge.
新遠心模型実験装置のレイアウト

Table 4 The major specifications of the centrifuge machine.
遠心模型実験装置の主要諸元

(1)装置本体		
項目		内容
回転半径	動的側	2.20 m
	静的側	2.38 m
最大遠心加速度	動的側	50 G(143rpm)
	静的側	100 G(194rpm)
搭載質量	動的側	1000 kg
	静的側	500 kg
遠心場能力	動的側	50 G-ton
	静的側	50 G-ton
主電動機	電力容量	直流 90 kW
	電圧	440 V
減速機	潤滑方式	オイルバス潤滑

(2)周辺機器			
項目			内容
ロータリージョイント	油圧	圧力	21.0 MPa
		ポート数	2 ポート
	空圧	圧力	0.7 MPa
		ポート数	1 ポート
スリップリング	動力用	極数	2 極
		許容電流	AC100V、30A
スリップリング	制御用	極数	17 極
		許容電流	AC100V、1A

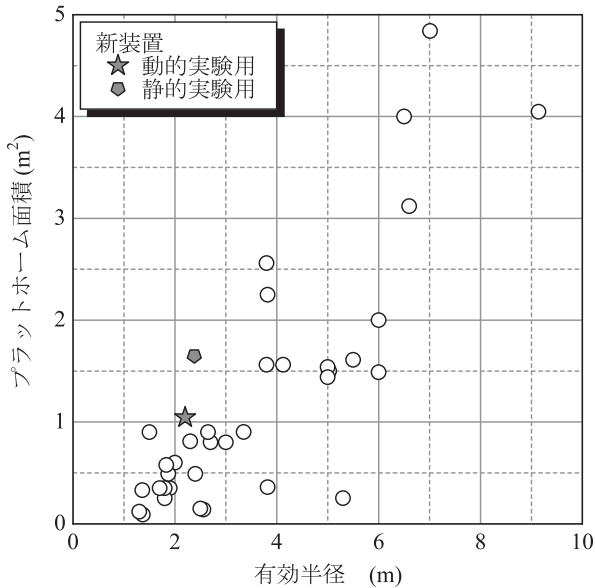


Fig. 11 Effective radius vs. platform area .
世界の遠心模型実験装置との比較 (有効半径とプラットフォーム面積の関係)

それぞれのプラットフォームには、多数のネジ穴を等間隔に設け、多種多様な試料容器、制御装置を取り付けることができる。また、データ計測用コネクタ、電源(AC100V, DC24V)用端子、空圧/水圧取り出し口、そしてCCDカメラコネクタがプラットフォーム上に適宜設置されており、実験を容易に行えるように配慮されている。

動的実験用プラットフォームは、油圧シリンダーの操作により後部のバックプレートと任意の振り上げ角度で着座ができる³⁶⁾(Photo 18)。Mark-1では、トーションバー着座方式を採用しており、プラットフォームの振り上げ角度は搭載物の重心位置に左右される問題を有していた。特に、当研究所の遠心用加振装置(振動台)は

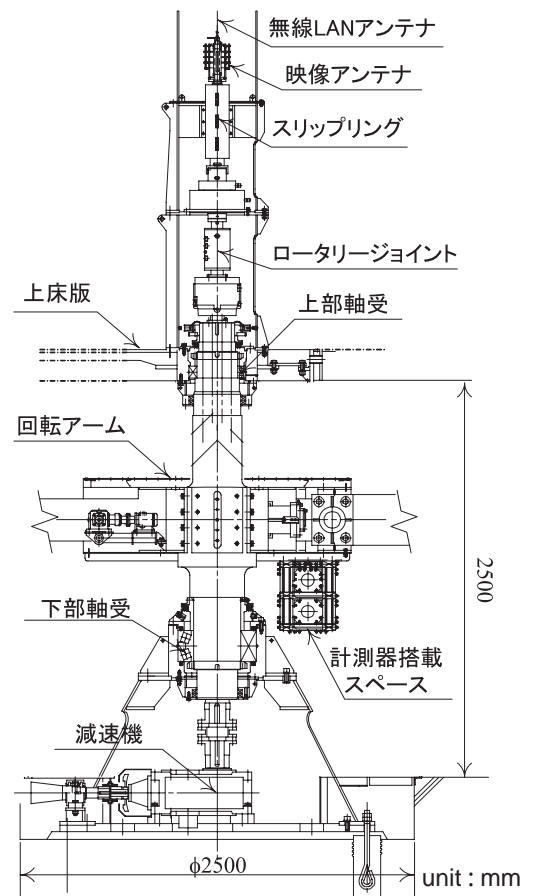
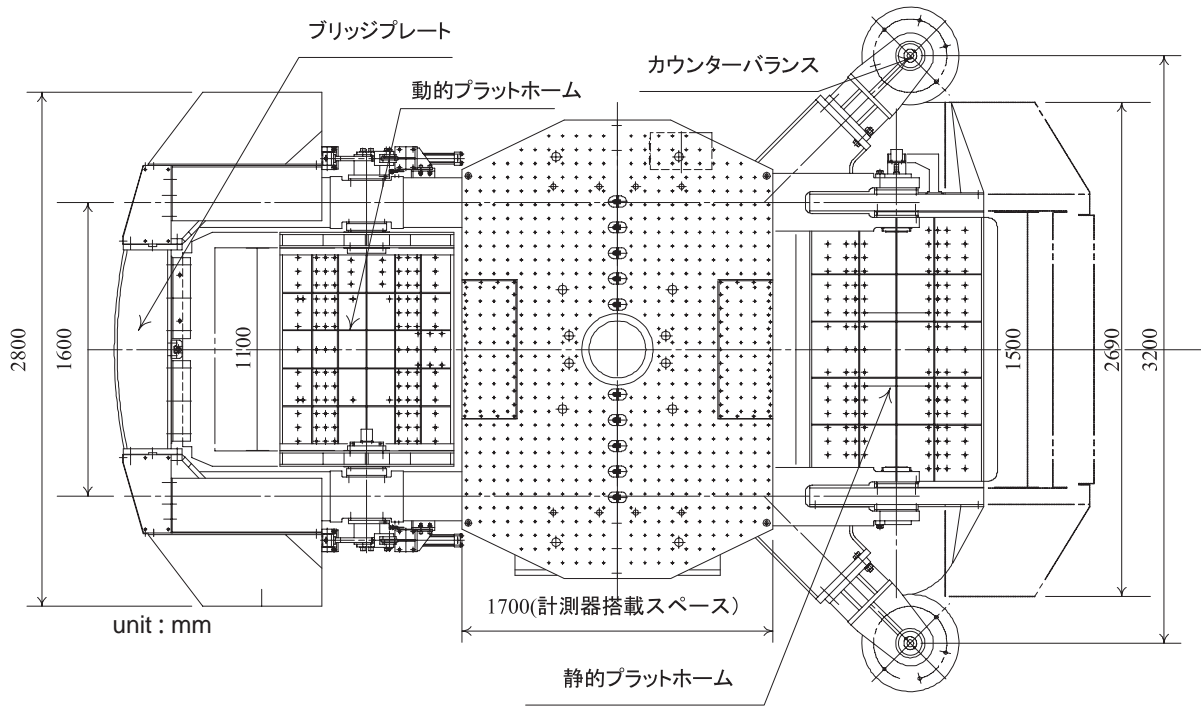
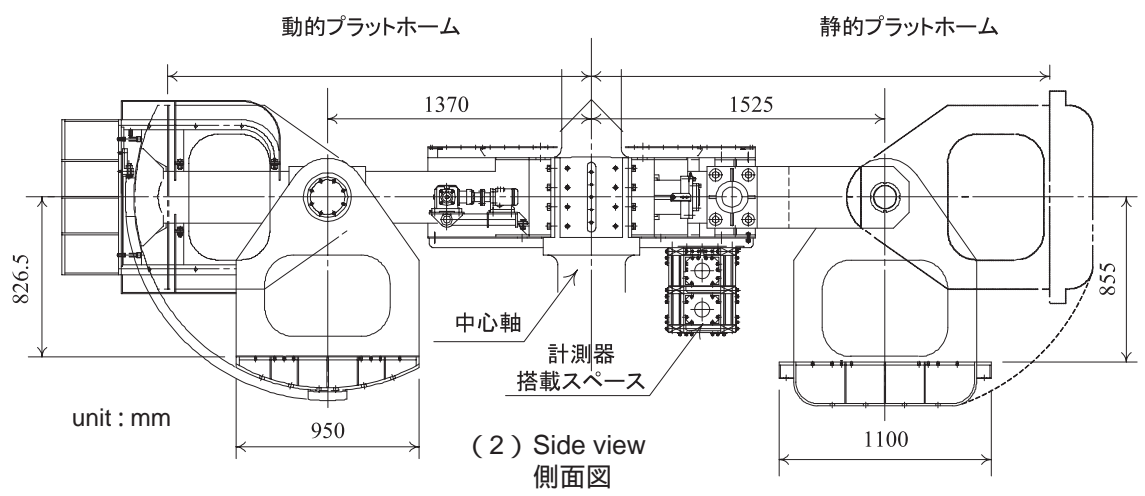


Fig. 12 Structure of rotating axis.
中心軸の構造

重量があるアキュムレーターが片側に寄っているために、重心位置が大きすぎていた。また、振動台のテーブルの中心はプラットフォームの中心軸よりずれていた。そのため、砂地盤の液化化実験のように設置精度を要求される実験を行う場合には構造上解決しなければならない問題であった。そこで、Mark-2では振動



(1) Plane view
平面図



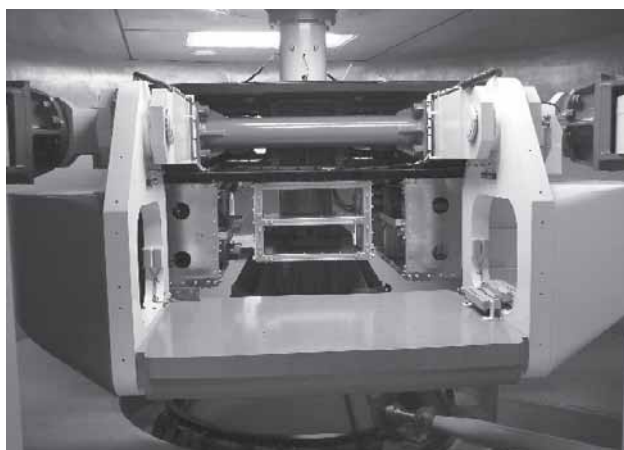
(2) Side view
側面図

Fig.13 Rotating arms.
回転アーム

台の中心をプラットホームの中心軸と一致させ、任意角度で強制的に着座できる油圧式強制着座方式を採用することにより、再現性および精度が高い実験を行うことが可能となった。

Mark-2は、90kWの直流電動機によって駆動される。この電動機は、フレーム重量が2倍以上となっているにもかかわらず、Mark-1のそれと比較すると容量が60kW減少している。これは、主に最大加速度の仕様を200Gから100Gに低下させたためである。

Mark-2の軸受部分の潤滑には、グリース充填方式を採用した。一般的に、強制油循環方式は、軸受部のPV値(P:ベアリングに作用する圧力、V:ベアリングの回転速度)が大きい場合に採用される。Mark-1の場合、その軸受部分の潤滑方式は、強制油循環方式を採用していた。しかし、Mark-2では最大遠心加速度を100GとしたためPV値は小さくなった。そこで、停電時のバックアップシステム用のポンプや配管設備が不要なグリース充填方式の採用が可能となった。



(1) Static platform.
静的実験側



(2) Dynamic platform.
動的実験側

Photo 17 Platform.
プラットフォーム

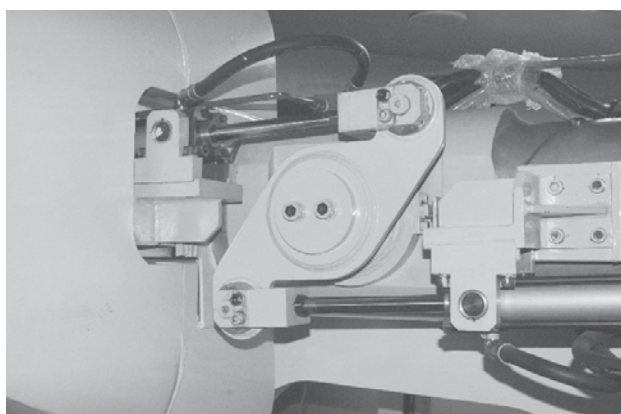


Photo 18 Touch-down system.
油圧式強制着座方式

3.6 周辺機器

(1) データ計測システム

各種周辺機器の制御室と遠心模型実験装置間のデータ伝送方式をFig. 14に示す。Mark-2の実験用データの計測システムは、無線LANによる伝送方式を採用した。遠心模型実験装置中心軸付近に搭載された耐G用計測(動ひずみ/電圧)アンプからA/Dコンバーター、GP-IBを介して無線LANにより外部にデータを取り出す。従来のスリップリングを利用した計測システムでは、スリップリングの接触等で発生していたノイズの影響が少なからずあったが、無線LANを利用することでこれらの影響を排除することが可能となった。

一方、装置の安全管理システムに利用する計測器のデータ等については、従来の計測用スリップリングを流用している。

(2) 映像システム

従来の接触型スリップリングを経由したアナログ画

像の伝送では、しばしばノイズが発生する問題が見られた。当研究所では、この問題を解決するために回転体用リング型信号伝送装置を平成10年(1998年)に開発・実用化した(Photo 19)。このシステムは、遠心模型実験装置内に搭載されているCCDカメラからの映像出力を電波に変換して送信するものであり、接触型スリップリングを経由しないため、従来発生していたノイズを大きく減少することが可能となった。このシステムはMark-1から流用し、Mark-2にも採用されている。

(3) スリップリング

遠心場で電動モーター等を駆動して载荷や電磁弁等の開閉を行うために、動力用スリップリング2極(AC3相100V, 30A)および制御用スリップリング44極(AC3相100V, 1A)を中心軸上部に設置している(Photo 20, Fig. 14)。装置の回転アーム上にはトランスとスイッチが設けられ、AC100VとDC24Vを供給することが出来る。また電気供給は中心軸付近に設置されたリレーボックスにより合計32系統の操作(ON/OFF)を行うことが可能である。これにより、数多くの载荷装置を制御することができる。また、制御用スリップリングは4極毎にまとめられ、10チャンネルの制御信号通信に利用されている。

(4) ロータリージョイント

遠心場に油圧、水圧そして空圧を供給するために、中心軸上部にロータリージョイントを設置している(Photo 20, Fig. 14)。ロータリージョイントは、油圧用2ポート、水/空圧用2ポート、空圧用1ポートの合計5ポートを設置している。各機器の主要な性能をTable 4(2)に示す。

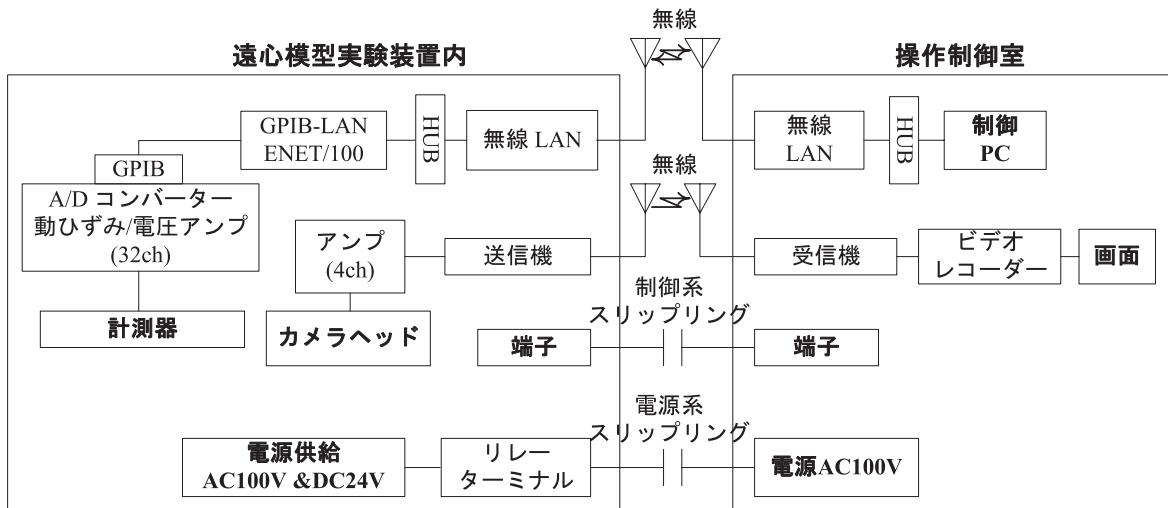


Fig. 14 Control and data acquisition flow.
周辺機器システムフロー

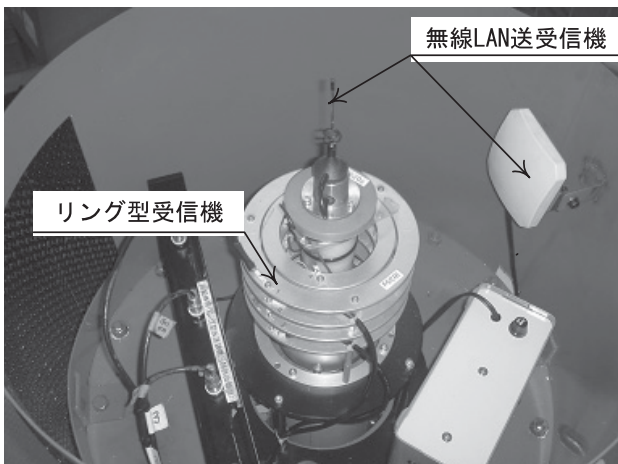


Photo 19 Wireless LAN adapter and wireless antenna for CCD cameras.
回転体用リング型信号伝送装置と無線LAN送受信機



Photo 20 Slip ring and Rotary joints.
スリップリングとロータリージョイント

3.7 安全対策

遠心模型実験装置を用いた研究に際して、装置の運転、維持・管理のためだけに専門の機械技術者が常駐する研究機関は少ない。当研究所でも地盤工学の研究者である著者らが、装置の運転や維持・管理を行いながら実験を行っている。そのため、装置の制御や安全管理機器は、機械系統や電気系統に十分な知識を持っていない者でも対応できる程度に充実していることが望ましい。Mark-1でも、同様の思想に基づいて安全対策を行ってきたが、Mark-2ではさらに先進的な安全システムを採用した。Fig. 15は運転操作室内にある安全制御装置である。装置各部、潤滑

設備、配管系統、上部・下部軸受などの装置の主要箇所を設置された各種計測器(加速度計、温度計、荷重計)により運転中の挙動を常時記録し、閾値を超えると警報が鳴り、それと同時にモニターには障害箇所が表示される。また、これらの運転記録は、異常発生時にはフロッピーディスクに自動的に記録され、このデータを解析することにより異常原因の早期解明およびその後の対策に活用できるようになっている。

4. 今後の展望

これまで遠心模型実験装置を用いて、地盤に起因する労働災害の防止に関する研究を実施し、労働災害発生原因の特定ならびに、労働災害防止対策の妥

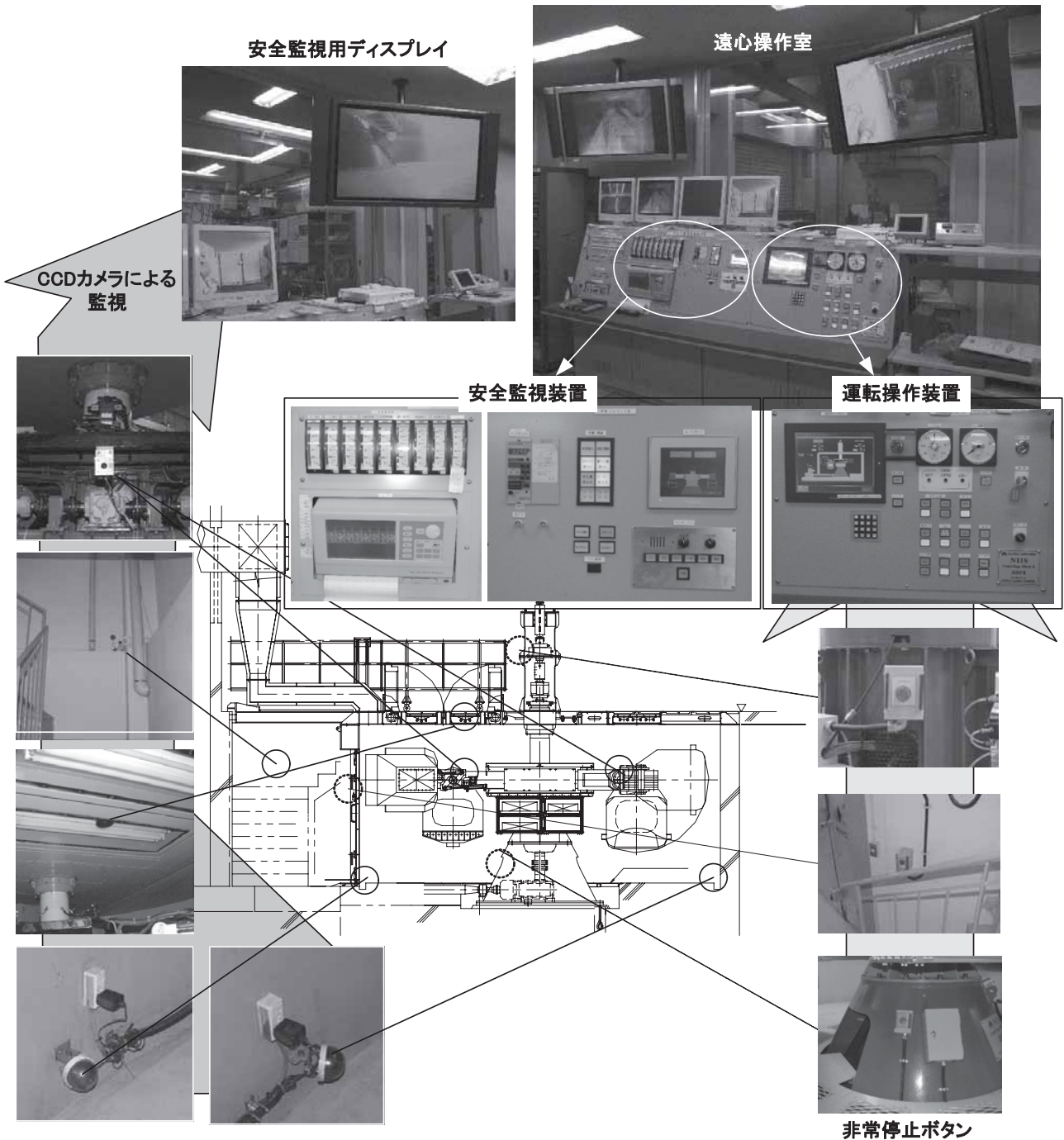


Fig. 15 The safety components of the NIIS Mark-2 Centrifuge.
操作室および安全監視システム

当性・適用性の確認を行ってきた。

今回開発した新遠心模型実験装置は、作業環境を向上させるため“非対称ビーム構造”を採用した。その過程では、FEM解析を行い構造体の応力分布を明らかにし、それらの結果を構造設計にも反映させた。その結果、有効半径が2.3mと遠心模型実験装置の中では中規模であるにも関わらず、有効半径5m以上の大型装置並みの搭載スペースを有し、大型実験や各

種制御機器の使用による高度な実験を行うことが可能となった。また、過去10数年間にわたる運用経験に基づく安全化と高機能化が図られるとともに、最新技術の採用による高度化が成された。今後とも本装置を活用し、地盤に関連する労働災害の防止に資する研究について積極的に取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 竹村次朗:「講座 遠心模型実験 - 実験技術と実務への適用 - 1. 講座をはじめに於いて」,土と基礎, Vol. 52, No. 10, pp.35-36, 2004.
- 2) 豊澤康男,堀井宣幸,玉手聡:「遠心模型実験による掘削溝の変形・崩壊特性の解明」産業安全研究所特別研究報告, SRR-No.14, pp.41-55, 1995.
- 3) 厚生労働省労働基準局:「土止め先行工法に関するガイドラインの策定について」,厚生労働省通達(基発第1217001号), 2003.
- 4) 建設業災害防止協会:「土止め先行工法に関するガイドラインとその解説」, 202 p, 2002.
- 5) 堀井宣幸,玉手聡,豊澤康男:「遠心力荷重装置を用いた飽和粘性土模型地盤の崩壊時の変形挙動」,産業安全研究所研究報告, RR-92, pp.63-74, 1993.
- 6) 豊澤康男,堀井宣幸,玉手聡,山田知裕,羽上田裕章:「エア封入袋体による地盤崩壊防止効果の遠心模型実験による検討」,産業安全研究所研究報告, RR-00, pp.67-76, 2001.
- 7) 堀井宣幸,豊澤康男,玉手聡,橋爪秀夫:「土石流の流下特性に関する実験的研究」,産業安全研究所特別研究報告, SRR-No. 25, pp.17-24, 2002.
- 8) 豊澤康男,堀井宣幸,玉手聡:「遠心模型実験による鋼矢板式土止めの崩壊挙動の解明」,産業安全研究所研究報告, RR-94, pp.53-63, 1995.
- 9) 豊澤康男,堀井宣幸,玉手聡:「遠心模型実験における一段式アンカー土止めの掘削に伴う変形・崩壊挙動」,産業安全研究所研究報告, RR-97, pp.35-46, 1998.
- 10) 豊澤康男,堀井宣幸,玉手聡, H.G.Allersma:「遠心模型実験による控え矢板を有する土止めの崩壊メカニズムの検討」,産業安全研究所研究報告, RR-99, pp.101-108, 2000.
- 11) 豊澤康男,堀井宣幸,玉手聡,衛藤誠,佐藤光雄,江口充,藤田範夫:「鋼矢板控え壁を有する自立式土留工の安定性 砂地盤を対象として」,産業安全研究所研究報告, RR-2002, pp.29-39, 2002.
- 12) 豊澤康男,藤田範夫,佐藤光雄,宿利幸広,衛藤誠:「鋼矢板控え壁を有する自立式土留工の安定性 軟弱地盤を対象として」,産業安全研究所研究報告, RR-2003, pp.53-64, 2003.
- 13) 豊澤康男,伊藤和也, S・B・タムラカル:「遠心場可動土留め装置を用いた壁面土圧の発生機構に関する研究」,産業安全研究所報告, NIIS-RR-2004, pp.23-40, 2005.
- 14) 豊澤康男,市川貴之,末政直晃,三田地利之,伊藤和也:「遠心場可動土留め装置を用いた壁面土圧の発生機構に関する基礎的研究」,土木学会論文集, No.806/ , pp. 129-141, 2005.
- 15) 玉手聡,堀井宣幸,豊澤康男,末政直晃,片田敏行,高野裕亮:「支持地盤の不安定性が移動式クレーンの転倒に及ぼす影響」,土木学会論文集, No.596, pp.163-174, 1998.
- 16) 玉手聡,堀井宣幸,豊澤康男,末政直晃,片田敏行:「地盤破壊によるアウトリガーのめり込みが移動式クレーンの転倒に及ぼす影響」,産業安全研究所研究報告, RR-98, pp.17-29, 1999.
- 17) 玉手聡,堀井宣幸,豊澤康男,末政直晃,片田敏行:「支持地盤のめり込み破壊による移動式クレーン転倒メカニズムの実験的解析」,安全工学, Vol.40, No.3, pp.178-186, 2001.
- 18) 玉手聡,末政直晃,片田敏行:「支持地盤の脆性的破壊沈下による移動式クレーンの転倒危険性」,土木学会論文集, No.729/III-62, pp.131-144, 2003.
- 19) 玉手聡:「移動式クレーンの転倒に及ぼす支持地盤の破壊沈下特性に関する実験的研究」,産業安全研究所研究報告, RR-2001, pp.9-20, 2002.
- 20) 豊澤康男,三田地利之,楊俊傑,伊藤和也, Tamrakar S. B.:「建設機械荷重作用下における掘削溝法面の安定性に関する研究」,土木学会論文集, No.806/ , pp. 79-91, 2005.
- 21) 片田敏行,末政直晃,佐藤恭孝,長野正:「液状化に対する杭基礎の補強法」,日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.10, 第3分冊, pp. 3325-3328, 1998.
- 22) 玉手聡,豊澤康男,末政直晃,片田敏行,平野秀司:「地中構造物と地盤の動的な相互作用による地盤反力特性に関する研究」,産業安全研究所研究報告, RR-2003, pp.41-52, 2004.
- 23) 玉手聡,東畑郁生,本多剛:「地盤流動による港湾岸壁および河川堤防の被害軽減技術に関する実験的研究」,産業安全研究所研究報告, RR-2004, pp.53-70, 2005.
- 24) Itoh, K., Suemasa, N., Tamate, S., Toyosawa, Y., Horii, N., Katada, T., Hirano, S., and Arai, F.:「Dynamic Loading Tests Of Tower Crane with the Pile-Foundation in Soft Clay」, 13WECC, 2004.
- 25) 堀井宣幸,豊澤康男,玉手聡,橋爪秀夫,大河内保彦:「深層混合処理法により改良された複合地盤の盛土荷重に対する安定性」,産業安全研究所研究報告, RR-97, pp.27-34, 1998.

- 26) 豊澤康男, 玉手聡:「ジオグリッドで補強した盛土斜面の安定性」, 産業安全研究所研究報告, RR-91, pp.59-68, 1991.
- 27) 田村幸彦, 堀井宣幸, 豊澤康男, 駒延勝弘, 館山勝:「大径補強体を用いた仮土留め補強の遠心模型実験 補強材力と矢板土圧について」, 平成10年度 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.53, No.B, pp.712-713, 1998.
- 28) Kimura, T., Nakase, A., Kusakabe, O., Saitoh, K., and Ohta, A.: “ Geotechnical centrifuge model tests at the Tokyo Institute of Technology, ” Technical Report, No. 30, Tokyo Institute of Technology, pp. 7-33, 1982.
- 29) Terashi, M., and Kitazume, M.: “ Behaviour of fabric reinforced clay ground under an embankment, ” Proc. Int. Conf. on Centrifuge Modelling-Centrifuge 88, Balkema, Paris, pp.243-252, 1988.
- 30) Leung, C. F., Khoo, E., and Toh, A. C.: “ Displacement of gravity caisson resting on sand key, ” Proc. Int. Conf. on Centrifuge Modelling - Centrifuge 94, Balkema, pp.829-834, 1994.
- 31) Matsuda, T., and Higuchi, S. : Development of the large geotechnical centrifuge and shaking table of Obayashi, Physical Modelling in Geotechnics ICPMG '02, pp. 63-68, 2002.
- 32) <http://www.kajima.co.jp/tech/katri/leaf/pdf/2002-37.pdf>
- 33) 吉迫和生, 内藤幸雄, 本田満彦:「遠心模型実験装置高剛性バスケットの動特性」, 鹿島技術研究所年報, 第46号, Page215-216, 1998.
- 34) <http://www.actidyn.com/>
- 35) International Conference CENTRIFUGE 98(Kimura, Kusakabe and Takemura (eds)): CD-ROM Library on Geotechnical Centrifuge, <http://www.geotech.cv.titech.ac.jp/cen-98/Library/>
- 36) 北詰昌樹:「新遠心模型実験装置の開発と研究への適用」, 港湾技研資料, No.812, 37p, 1995.
- 37) Nagura, K., Tanaka, M., Kawasaki, K., and Higuchi, Y.: Development of an earthquake simulation for the TAISEI centrifuge. Proc. Int. Conf. on Centrifuge Modelling-Centrifuge 94, Balkema, Singapore, 151-156, 1994.

(平成18年2月2日受理)

新遠心模型実験装置（NIIS-Mark II Centrifuge）の 開発と研究への適用

伊藤和也，豊澤康男，玉手聡，堀井宣幸

独立行政法人産業安全研究所では，1988（昭和63）年に遠心模型実験装置Mark-1を導入し，地盤に起因する労働災害の防止に係わる研究に活用している。しかし，制御システムの高度化や対象分野の拡大等によりMark-1の性能には限界が見られるようになってきた。そこで，平成15年度よりMark-1を更新し，新遠心模型実験装置Mark-2の開発を行った。Mark-2はMark-1のピットを流用し，2005（平成16）年2月に完成した。Mark-2は，有効半径が2.3mと中規模の装置にも関わらず，有効半径が5m以上の大型装置並みの搭載スペースを確保しており，国内外の遠心模型実験装置の中でも使い勝手の良い装置の一つであると自負している。

本報告では，旧装置Mark-1での研究実績，および新装置Mark-2の導入の経緯，基本的な諸元，そして周辺機器について述べる。

（図15，表4，写真20，参考文献37）