

土 木 研 究 所 資 料

遠心力載荷装置を用いた実験の 現状と将来

平成7年3月

建設省土木研究所

Copyright © (1995) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全文又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

遠心力載荷装置を用いた実験の 現状と将来

企画部	地下開発研究官		川島	一彦
道路部	トンネル研究室	主任研究員	真下	英人
材料施工部	施工研究室	室長	苗村	正三
		主任研究員	小川	伸吉
			梅本	健児
構造橋梁部	基礎研究室	主任研究員	木村	嘉富
地震防災部	振動研究室	主任研究員	二宮	嘉朗
			東	拓生
		部外研究員	仙頭	紀明
	動土質研究室	室長	松尾	修
		主任研究員	古関	潤一
		研究員	堤	達也

要 旨

平成6年度に土木研究所内に組織された遠心載荷実験装置勉強会において、新しい装置の導入に関する知識のストックを図るとともに、中長期的な展望のとりまとめを目的に検討を行った。本報告書は、その結果をとりまとめたものであり、土木研究所に求められる遠心力載荷装置としていくつかのオプションを提示した。

キーワード：遠心力載荷装置、勉強会、将来展望

第1章 検討の目的及び内容	1
第2章 遠心模型実験手法に関する世界の動向	2
2.1 遠心模型実験の必要性	2
2.2 遠心模型実験の原理	2
2.3 実験装置の構造	4
2.4 実験装置の現状と動向	7
2.5 利用分野、実験手法の現状と動向	10
第3章 土木研究所における遠心模型実験を用いた研究の現状	15
3.1 動土質研究室における研究状況	15
3.1.1 研究項目	15
3.1.2 ジオテキスタイル補強盛土の安定性	15
3.1.3 盛土のある地盤の液状化時の挙動	16
3.1.4 液状化による地中構造物の浮上がり	19
3.1.5 液状化対策工の効果	20
3.1.6 フィルダムの地震時安定性	21
3.1.7 地震時土圧	23
3.1.8 今後の課題	23
3.2 トンネル研究室における研究状況	25
3.2.1 研究項目	25
3.2.2 トンネル坑口対策工法の効果	25
3.2.3 シールドトンネルに作用する荷重	26
3.2.4 トンネル切羽の安定性	28
3.3 施工研究室における研究状況	30
3.3.1 研究項目	30
3.3.2 実験方法	30
3.3.3 実験結果	31
3.4 基礎研究室における研究状況	34
3.4.1 研究項目	34
3.4.2 直接基礎の支持力に関する遠心模型実験	34
3.4.3 関連する研究	36
3.4.4 基礎構造物に関する遠心模型実験	39
3.4.5 実験上の課題	40

第4章 ユニークな遠心力载荷実験装置の開発の可能性に関する検討	41
4.1 本体	41
4.1.1 特徴となり得る項目	41
4.1.2 既往の技術	41
4.1.3 新技術の導入可能性	42
4.2 水圧・油圧供給装置	43
4.2.1 油圧供給装置	43
4.2.2 水供給装置	43
4.3 模型地盤作成装置	44
4.3.1 用途	44
4.3.2 既往の技術	44
4.3.3 仕様(案)	45
4.4 模型地盤の加振装置	46
4.4.1 特徴となり得る項目	46
4.4.2 既往の技術	46
4.4.3 新技術の導入可能性	46
4.5 模型構造の水平方向牽引装置	47
4.5.1 実験の目的	47
4.5.2 実験概要	47
4.5.3 仕様(案)	47
4.6 トンネル模型掘削装置	48
4.7 画像解析装置	49
4.7.1 画像解析装置に必要とされる性能	49
4.7.2 画像解析装置の設置(案)	49
4.8 土中変位等の計測技術	52
4.8.1 地盤中の挙動	52
4.8.2 構造物の挙動・圧力等	54
4.9 地盤強度の計測技術	55
4.9.1 コーン貫入試験	55
4.9.2 ベーン試験	56
4.9.3 ねじりせん断試験	56
4.9.4 地盤の変形係数の測定	57
4.10 メンテナンス低減を可能とする技術	59
4.10.1 軸受け機構	59
4.10.2 ロータリージョイント	59
4.10.3 メンテナンスのための不稼働日数の低減	59

第5章 土木研究所に求められる遠心力载荷実験装置	61
5.1 装置本体の特徴	61
5.1.1 装置規模	61
5.1.2 特徴とすべき技術	61
5.2 付帯装置の特徴	62
第6章 まとめ	63
付録Ⅰ 勉強会開催経過	65
Ⅱ 議事録	67
Ⅲ 竹中技術研究所大型遠心力载荷装置の概要	88

第1章 検討の目的及び内容

遠心力載荷装置は、地盤系を中心とする各分野において相似則を満足させながら模型実験を行う際の有力な実験手法として、広く使われつつある。現在、米国工兵隊水路試験所においても世界最新鋭の遠心力載荷装置が建設されつつあるが、この中では、地盤関係のみならず、海岸、舗装、環境等の分野に対する適用が考えられている。

土木研究所においても現在2台の装置を保有しているが、世界各国や我が国の最近の新施設に比較すると性能が一代古いものとなりつつある。また、現有の施設は各研究部にまたがって有効に活用されているため、常に使用中の状況であり、十分な実験期間をとれない状況にある。

このような状況を考慮し、将来の新規施設要求の可能性を検討するための準備段階として、土木研究所内で勉強会を組織し、以下の項目について検討を行った。

- (1) 遠心模型実験手法に関する世界の動向
- (2) 土木研究所における遠心模型実験を用いた研究の現状
- (3) ユニークな遠心力載荷実験装置の開発の可能性に関する検討
- (4) 土木研究所に求められる遠心力載荷実験装置

その結果、土木研究所に求められる装置は、表-1.1に示すように有効回転半径4mおよび7mの2つのタイプに集約された。

本報告書は、平成6年7月から12月までに計6回開催した勉強会における検討結果をとりまとめたものである。

表-1.1 装置仕様

有効回転半径 (m)	4	7
土槽内体積 (ℓ)	150	400
負荷質量 (ton)	1	2.5
最大遠心加速度 (G)	200	200
搭載容量 (G・ton)	200	500
測定点数 (チャノ初)	50	100
加振容量 (tonf)	50	125

第2章 遠心模型実験手法に関する世界の動向

2.1 遠心模型実験の必要性

土の力学的特性は、土自身の自重に起因する拘束圧の影響を大きく受ける。縮尺模型を用いた通常の重力場における実験では、原地盤と同じような応力状態を再現することは難しい。実物大の模型を用いれば、実際と同じ応力状態が当然得られるが、きわめて大規模な実験となるため、パラメトリックに数多くの実験を実施することは困難である。また、軟弱地盤の圧密沈下問題のように、実際の現象が数年～数十年のオーダーできわめてゆっくりと進行する場合には、時間的な制約も大きくなる。さらに、地震時の問題では、模型を振動台に載せて加振することが行われるが、実物大の模型を用いた振動台実験を実施することは、模型の規模がよほど小さくない限り不可能である。

模型地盤に遠心加速度を作用させて自重を増加させた状態で実験を行う遠心模型実験では、小さな模型内で実物大に相当する応力状態を再現することができる。また、圧密・浸透現象や、動的な現象が進行する時間が実際よりも短縮される。さらに、10年ほど前からは、遠心加速度を作用させて状態で加振実験を行うことも可能となった。これらの理由により、遠心模型実験が土質工学の分野で近年盛んに利用されるようになってきた¹⁾。重力場における実物大の模型実験との対比をまとめて表-2.1に示す。

表-2.1 重力場における実物大の模型実験と遠心模型実験の対比

項 目	重力場における実物大の模型実験	遠心模型実験
模 型 規 模	実物大	縮尺模型
所 要 時 間	軟弱基盤の圧密沈下問題では数年～数十年のオーダー	圧密・浸透現象は模型縮尺の2乗、動的な現象は縮尺に比例して短縮
地震時の挙動	再現はほとんど不可能	再現可能

2.2 遠心模型実験の原理

実際と同じ材料を用いて作成した縮尺 $1/N$ の模型において、材料の自重に起因する応力状態をプロトタイプ（重力場における実物大の模型）と同一にするためには、模型に N G（Gは重力加速度）の遠心加速度を作用させる必要がある。例えば図-2.1に示すように、10Gの遠心加速度を作用させた場合には、厚さ10mのプロトタイプ地盤と同じ応力状態を厚さ1mの模型で再現することができる。なお、図中に示したように、動的な加振を行う場合にも、各部の慣性力に起因する応力状態をプロトタイプと同一にするために、加振加速度を重力下のN倍とする必要がある。

遠心模型実験における相似則^{1) 2) 3)}をまとめて表-2.2に示す。実際と同じ材料で、同一の応力状態であるから、生じるひずみも同一となる。なお、時間の縮尺は対象とする現象によって異なり、圧密・浸透

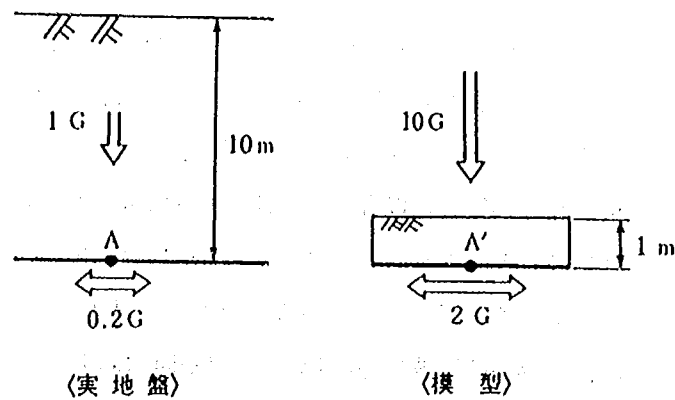


図-2.1 遠心模型実験の原理

表-2.2 遠心模型実験における相似則

項 目	実 物	模 型
密度	1	1
長さ	1	$1/N$
加速度		
(遠心加速度)	1	N
(加振加速度)	1	N
質量	1	$1/N^3$
力	1	$1/N^2$
応力	1	1
ひずみ	1	1
時間		
(動的現象)	1	$1/N$
(浸透現象)	1	$1/N^2$

現象はプロトタイプの N^2 倍の速さで、動的な現象は N 倍の速さで進行する。前者は浸透方程式より導かれ、後者は運動方程式より導かれたものである。例えば、圧密の終了までに1年かかるものは、縮尺 $1/10$ の遠心模型では、 $10/(10^2)$ 年=約4日で再現できる。また、実際の地震動の卓越振動数が2Hz、継続時間が30秒である場合には、縮尺 $1/10$ の遠心模型では加振波形の卓越振動数を20Hz、継続時間を3秒に短縮する必要がある。さらに、砂地盤の液状化問題のように、圧密・浸透現象と動的な現象が連成する場合には、何らかの方法で両者の時間の縮尺を一致させる必要があるが、一般には、間隙流体として水よりも粘性の高いシリコンオイルなどを用いて地盤の見かけの透水係数を $1/N$ に低下させることにより、圧密・浸透現象の時間の縮尺をプロトタイプの N 倍とすることが行われている。

なお、実際と同じ材料を用いて縮尺 $1/N$ の模型を作成することは、土粒子の大きさに着目した場合、実際の N 倍の大きさの土粒子を用いて模型を作成していることを意味する。例えば、平均粒径1mmの砂を用いて作成した模型地盤に10Gの遠心加速度を作用させて実験を行った場合、プロトタイプの地盤の平均

粒径は10mmとなり、もはや「砂地盤」とは呼べなくなる。厳密には、実際の $1/N$ の粒径で応力～ひずみ関係が同一の材料が存在すれば、そちらを利用したほうが望ましいが、上記の例において平均粒径が0.1mmで粒度分布が全く相似な砂があったとしても、粒子形状や破碎性などの微妙な相違により応力～ひずみ関係が同一とはならないため、現実問題としては不可能である。一般に、地盤が連続体としての挙動を示している限りは、このような粒径の違いの影響を考慮する必要はないが、例えば砂地盤の支持力試験におけるすべり面のように不連続な部分が生じる場合には、遠心模型実験の結果が実際（重力場で同じ材料を用いて実物大の実験を行った結果）とは異なってしまうことが知られている。これは、不連続部分での力学的な挙動が粒径の影響を受けるためと考えられている。ただし、粘土の場合には、すべり面の生じる斜面安定問題などにおいても粒径の違いの影響は遠心模型実験結果には現れておらず、これは、粒径が十分に小さく、また、砂とは破壊メカニズムが異なっているためと考えられている。さらに、ロックフィル材のような大粒径の材料に対しては、遠心模型実験ではその $1/N$ の粒径の材料を用いることが可能になるが、この場合でも、先に述べた粒子形状や破碎性などの条件が実物とは異なっていることに留意する必要がある。

2.3 実験装置の構造

実験装置の例として、土木研究所が1987年に導入した動的遠心力载荷実験装置の概要を図-2.2に、仕様を表-2.3に示す⁴⁾。実験装置の模式図は図-2.3のようになり、回転腕の先端に試料容器を吊り下げて、これらを一定速度で回転させることにより試料容器内の実験模型に遠心加速度を作用させる。

実験装置の構造としては、図-3のように回転腕を用いるビーム型のほかに、図-2.4¹⁾のようなドラム型のものもあるが、静止時に模型に作用する重力加速度の方向と回転時に模型に作用する遠心加速度の方向が異なる短所があるため、最近の大型の実験装置では全てビーム型が用いられている。また、試料容器の支持方法としては、図-2.3に示したように直接吊り下げる方式よりも図-2.5⁹⁾のようにプラットフォーム上に試料容器を搭載する方式のほうが試料容器の交換等が柔軟に行えるため、ほとんどの大型装置ではプラットフォーム方式が採用されている。さらに、図-2.3では試料容器の長手方向が回転方向と一致しているが、この場合には実際の水平地盤に相当する模型地盤としてその位置での回転半径に応じた曲面状の地盤を作成する必要があるため、プラットフォームの広い大型装置では試料容器の長手方向を回転方向に対して垂直にして、回転半径の影響を小さくすることが行われている。なお、回転半径の影響として、このような模型形状の問題に加えて、遠心加速度が深度方向に不均一になる問題もあるが、回転半径の大きい大型装置ではこれらの影響を比較的小さく抑えることができる。

実験模型には変位計、水圧計、土圧計、ひずみゲージなどのセンサーが設置され、電気的な計測・制御信号はスリッピングを介して伝達される。また、実験模型に水を補給したり、あるいは動力源として空気圧、流体圧を供給するために、ロータリージョイントが用いられる。さらに、回転に同調させたストロボとカメラを用いて試料容器側面の状態を撮影したり、高速度カメラまたはVTRを用いて加振時の模型の状況を連続的に撮影することが行われる。

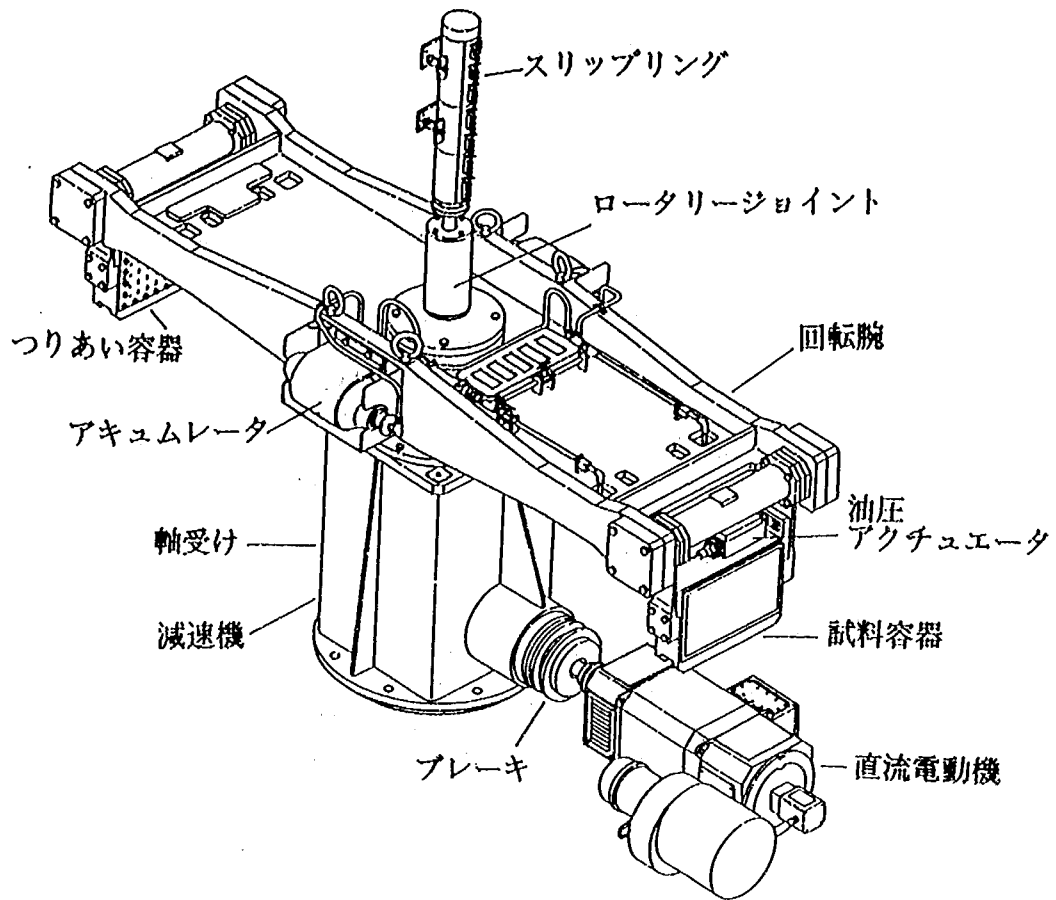


図-2.2 土木研究所の動的遠心力载荷実験装置の概要

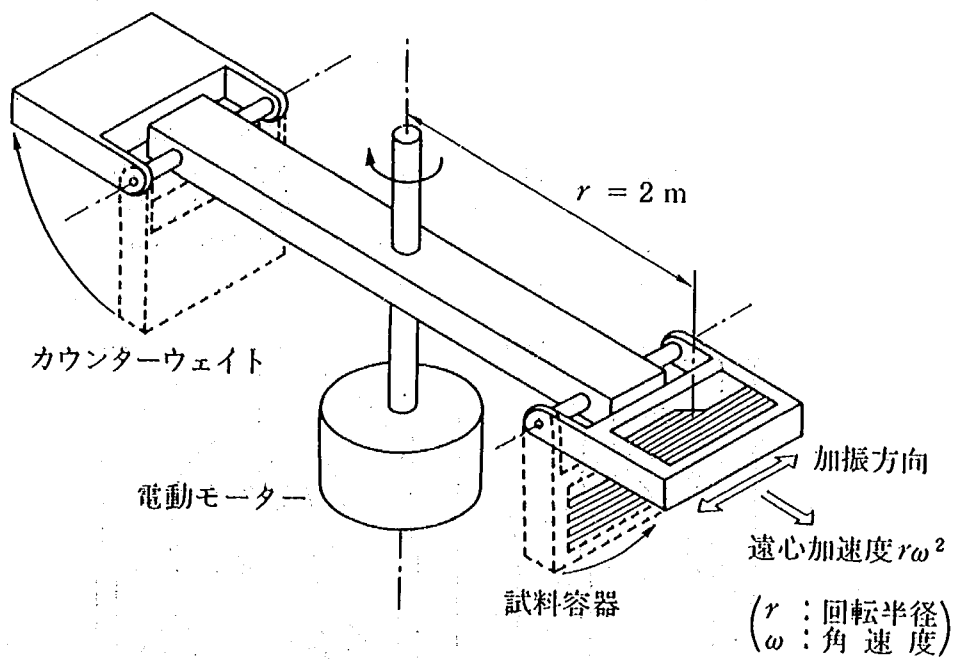
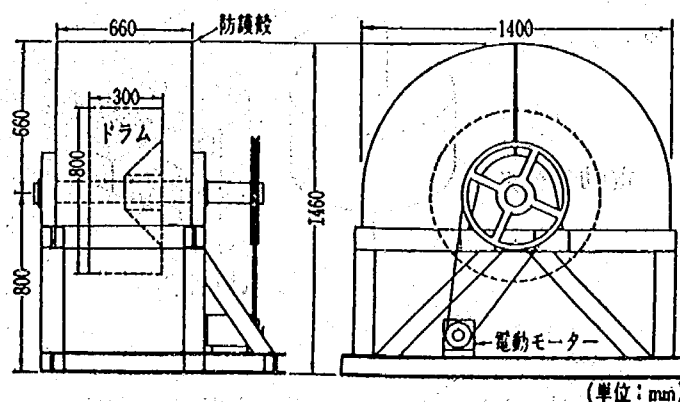


図-2.3 遠心力载荷実験装置の模式図

表－2.3 土木研究所の動的遠心力载荷実験装置の仕様

有効回転半径	2 m
最大遠心加速度	200 g (動的加振時は50 g)
最大回転速度	300rpm (動的加振時は150rpm)
直流電動機出力	75kw
最大加振力	±2,000kgf
最大加振加速度	±20 g (負荷100kgfのとき)
加振周波数	50～400Hz
加振波形	正弦波, 不規則波
試料容器内寸 (長さ×高さ×奥行) または(直径×高さ)	①500×300×100mm ②800×300×100mm ③φ300×300mm
試料容器自重	①83kgf ②125kgf ③190kgf
最大模型重量	①30kgf ②48kgf ③42kgf
計測用スリップリング	64極
ロータリージョイント	4口

注) 平成5年度の改造により, 内寸800×300×200 mmの試料容器(容器自重157kgf, 最大模型重量 96kgf)を90 gの遠心加速度下で加振する機能(最大加振力±3,800kgf, 最大加振加速度±12 g)が追加された。



図－2.4 ドラム型遠心力载荷実験装置の例¹⁾

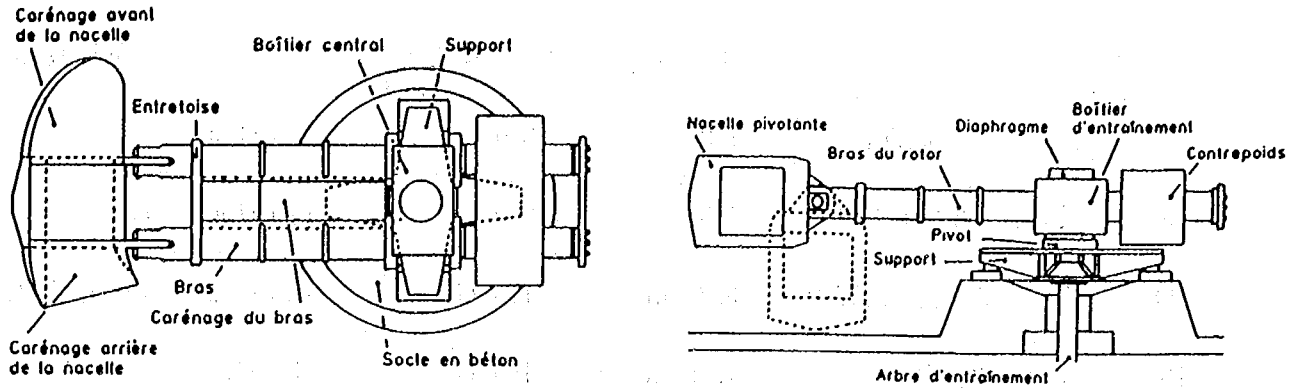


図-2.5 プラットホームのある遠心力载荷実験装置の例⁹⁾

2.4 実験装置の現状と動向

1984年の時点における各国の遠心力载荷実験装置の導入状況が、文献5)に詳細にまとめられている。その後建設されたものも含めて、主要な遠心力载荷実験装置を表-2.4及び表-2.5に示す。日本には20台前後の装置があり、同程度の台数を保有する米国と並んで世界的にも突出した存在となっている。特に、日本では民間の研究機関の保有台数が多いことが特徴的である。

近年導入された実験装置に見られる傾向を以下に示す。

(1) 有効回転半径

有効回転半径は2～3m程度の「中型」、及び5m以上の「大型」の2通りに大別される。大型の装置は、国内では竹中技術研究所が1台保有し、国外には米国（建設中を含む）及び中国に各3台、カナダ、英国、フランス、オランダに各1台の計10台が存在する。

(2) 遠心加速度

最大遠心加速度は200G程度のものが圧倒的に多い。ただし、実際の実験は100G以下で実施されることが多い。また、最近では、回転バランスの調整が回転中に行える機能を持つ装置の導入例が増えている。

(3) 容量

搭載質量と遠心加速度の積として算定される容量は、大型の装置では500～1000G・ton程度、中型の装置では数十～100G・ton程度である。全般的には、搭載可能な試料容器が大型化する傾向が見られる。なお、最大搭載質量は、大型の装置では2ton程度、中型の装置では1ton程度のものが多い。

最近導入されつつある新しい技術としては以下のようなものがある。

- ・ 光ファイバーを利用したスリップリング（ディジタル信号の転送）
- ・ 高精度VTR及び画像解析装置
- ・ 大出力の加振装置

表-2.4 日本における主要な遠心力载荷実験装置

完成年度	機 関	有効回転半径	最大遠心加速度	容 量	動的加振機能
1961	建設省土木研究所	1.25 m	360 G	40 G・ton	なし
1975	農水省九州農業試験場	1.3 m	200 G	14 G・ton	なし
1980	運輸省港湾技術研究所	3.8 m	113 G	312 G・ton	1987年頃増設
1981	東京工業大学	1.25 m	150 G	38 G・ton	1987年頃増設
1983	大阪市立大学	2.55 m	200 G	40 G・ton	なし
1984	東洋建設	2.2 m	250 G	75 G・ton	1989年頃増設
1986	中央大学	3.05 m	180 G	100 G・ton	1989年頃増設
1987	建設省土木研究所	2.0 m	200 G	20 G・ton	あり
1988	京都大学防災研究所	2.5 m	200 G	24 G・ton	あり
1988	労働省産業安全研究所	2.0 m	200 G	100 G・ton	あり
1990	鹿島建設	3.0 m	200 G	100 G・ton	あり
1990	大成建設	2.5 m	200 G	20 G・ton	あり
1991	清水建設	3.35 m	200 G		あり
1992	日建設計	3.0 m	200 G	100 G・ton	あり
1993	防衛庁技術研究本部	2.0 m	100 G	15 G・ton	
1994	竹中技術研究所	6.5 m	200 G	500 G・ton	あり
1994	北海道開発庁	2.5 m	200 G	60 G・ton	なし
	宇都宮大学	1.18 m	120 G		
	水産庁水産工学研究所	3.0 m	150 G	150 G・ton	

注) 空欄は不明であることを示す。

表-2.5 日本以外における主要な遠心力载荷実験装置

国	機 関	有効回転半径	最大遠心加速度	容 量	備 考
米 国	工兵隊水路試験所	6.5 m	350 G	1144 G・ton	建設中
米 国	California大学Davis校	9.2 m 1.0 m	300 G 100 G	1080 G・ton 10 G・ton	加振装置あり
米 国	Colorado大学Boulder校	5.5 m	200 G	440 G・ton	加振装置あり
米 国	Rensselaer工科大学	3.0 m	200 G	100 G・ton	加振装置あり
カ ナ ダ	Center for Cold Ocean Resources Engineering	5.5 m	200 G	220 G・ton	
英 国	Cambridge大学	5.0 m	125 G	(不 明)	加振装置あり
英 国	Manchester大学	3.2 m	120 G	384 G・ton	
英 国	UMIST	1.5 m	150 G	100 G・ton	
英 国	City大学	1.8 m	200 G	40 G・ton	
フランス	LCPC	5.5 m	200 G	100 G・ton	
ド イ ツ	Ruhr大学Bochum校	4.1 m 1.8 m	250 G 200 G	500 G・ton 40 G・ton	
イタリア	ISMES	2.0 m	600 G	240 G・ton	
オランダ	Delft Geotechnics	6.4 m 1.5 m	400 G 300 G	1650 G・ton 10 G・ton	真空利用
オーストラリア	Western Australia大学	1.8 m	200 G	40 G・ton	
シンガポール	Singapore大学	2.0 m	200 G	40 G・ton	
中 国	Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute	10.8 m	> 90 G	216 G・ton	
中 国	Nanjing Hydraulic Research Institute	5.0 m	200 G	400 G・ton	
中 国	Inst. of Water Conservancy & Hydroelectric Power Research	5.0 m	300 G	450 G・ton	
中 国	Tsinghua大学	2.0 m	250 G	50 G・ton	
台 湾	National Central大学	3.0 m	200 G	100 G・ton	

2.5 利用分野、実験手法の現状と動向

地盤工学における遠心模型実験の利用に関する国際会議は、1984年に東京⁶⁾、英国のマンチェスター⁷⁾、米国のデビス⁸⁾でたて続けに開かれた。その後、国際土質基礎工学会の賛助のもとで設立された技術委員会の主催により、1988年にCENTRIFUGE88⁹⁾が第1回としてフランスのパリで、第2回が1991年に米国のボールダーでCENTRIFUGE91¹⁰⁾として、第3回が1994年8月31日よりシンガポールでCENTRIFUGE94¹¹⁾として開催された。論文数は会議毎に増えつつあり、1984年の東京の会議では18編だったものが、最近のCENTRIFUGE94では128編まで増加した。

このほかに、1993年に米国のデビスで開催された液状化の各種解析手法の適用性を比較検討するシンポジウム¹²⁾において、数多くの動的遠心模型実験結果がブラインドテストとして報告された。

従来の論文内容は、以下の16分野に大別することができる。

- (1) 実験装置の導入
- (2) 実験原理（相似則の妥当性等に関するもの）
- (3) 新分野（(4)以降の各分野以外のもので、具体的には地質学、地球物理学、極寒地の地盤挙動）
- (4) 調査及び測定（模型地盤の物性・状態の評価・計測手法に関するもの）
- (5) 掘削及び山留め
- (6) トンネル
- (7) 地震
- (8) 動的問題（地震動以外の波浪・機械振動・交通荷重等による動的挙動と爆破・衝突などによる瞬時挙動）
- (9) 地盤環境（地盤を媒体とした汚染物質の拡散や移動）
- (10) 深い基礎（主として杭基礎と地盤の相互作用）
- (11) 浅い基礎（主として直接基礎と地盤の相互作用）
- (12) 盛土及びダム（盛土の基礎地盤も含む）
- (13) 斜面（盛土以外の自然斜面・切土）
- (14) 圧密及び膨潤
- (15) アンカー
- (16) 地下構造物（地下埋設パイプなど）

1984年の東京及びマンチェスターでの会議と、CENTRIFUGE88, 91, 94の各国際会議における論文を上記の各分野に分類した場合の論文数の動向を図2.6及び2.7に示す。各分野の論文数の推移は以下のように分類される。

- ・増加傾向にあり、論文数も多いもの：(7), (8), (9), (10), (12)
- ・論文数は少ないが、増加傾向にあるもの：(5), (6), (13)
- ・論文数があまり変わらないもの：(2), (3), (4), (11), (15), (16)
- ・論文数が減少傾向にあるもの：(1), (14)

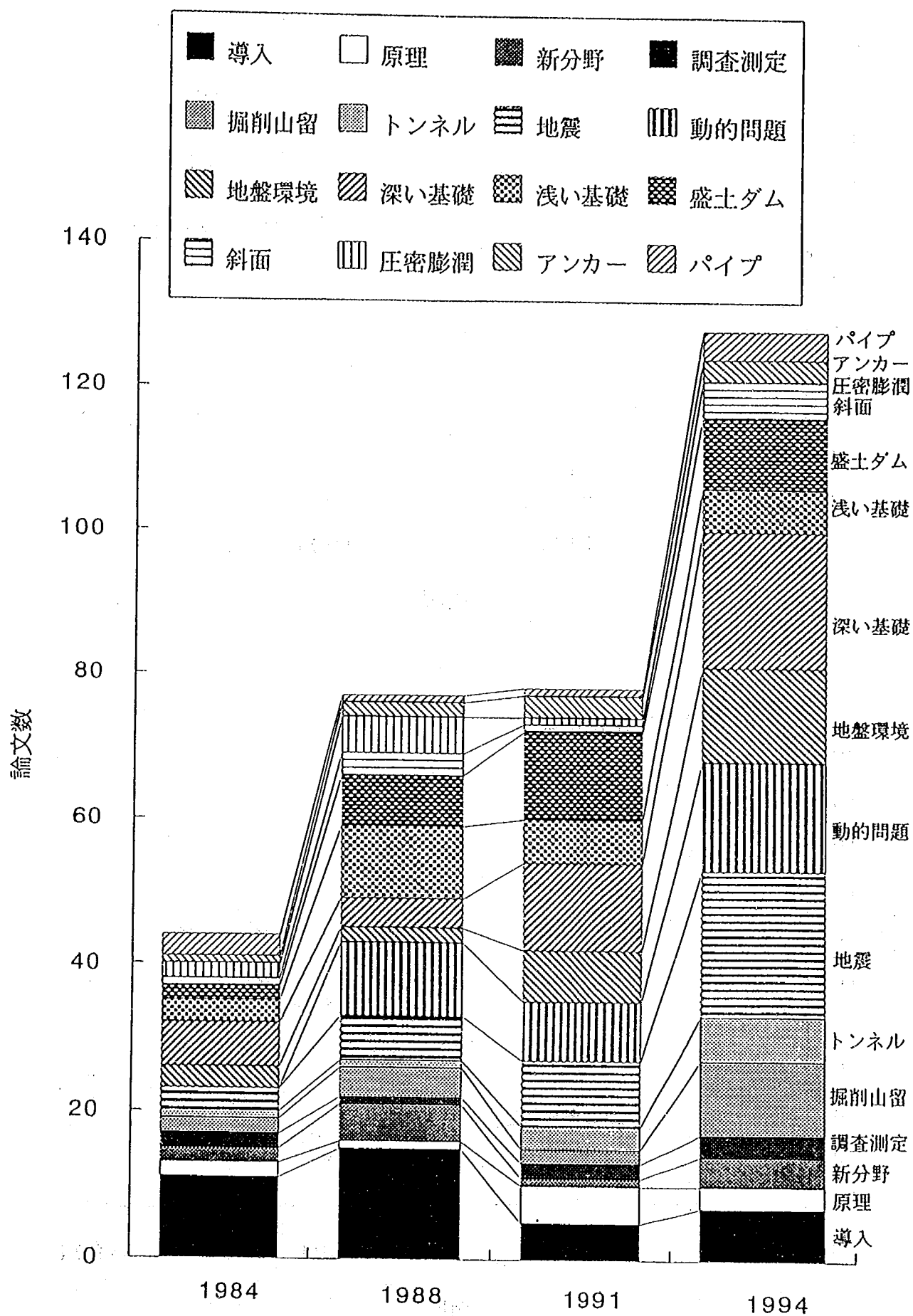


図-2.6 国際会議における論文数の動向

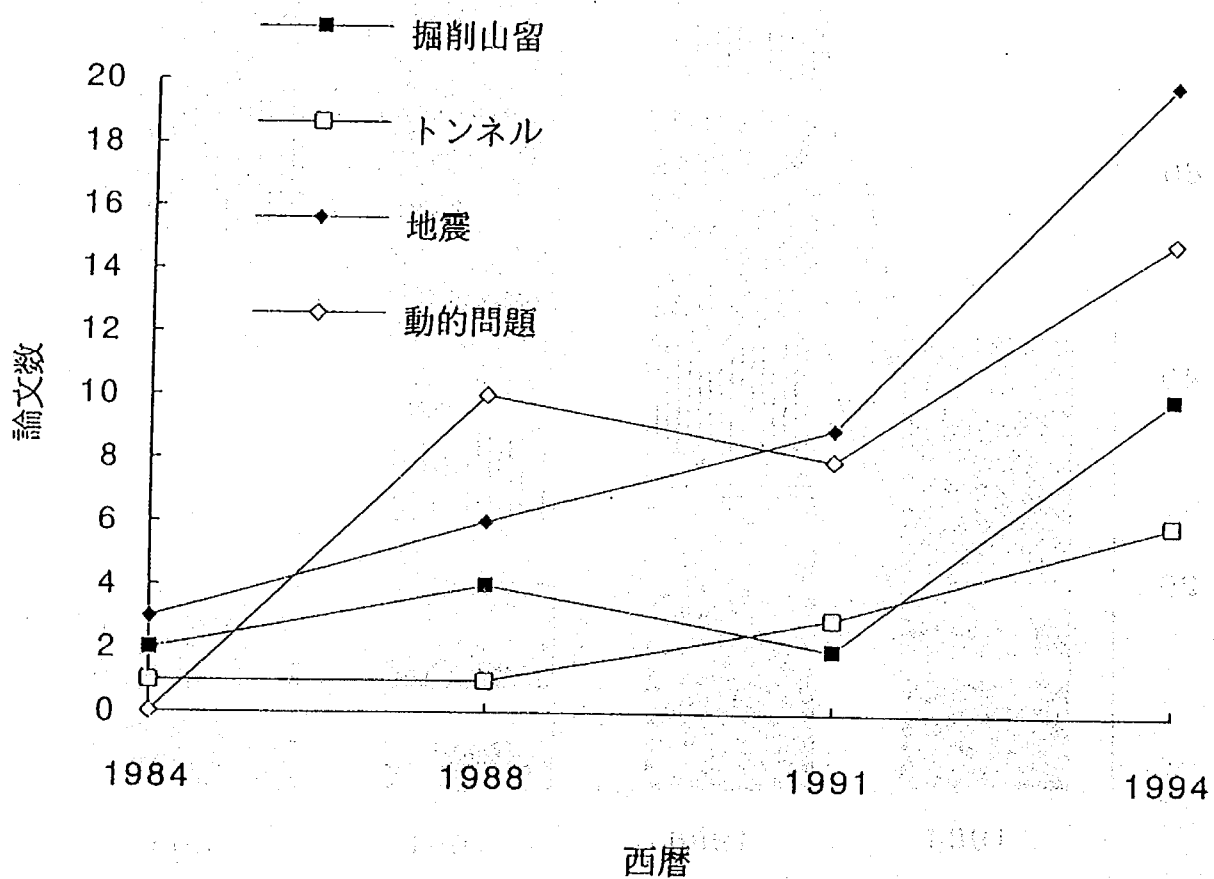
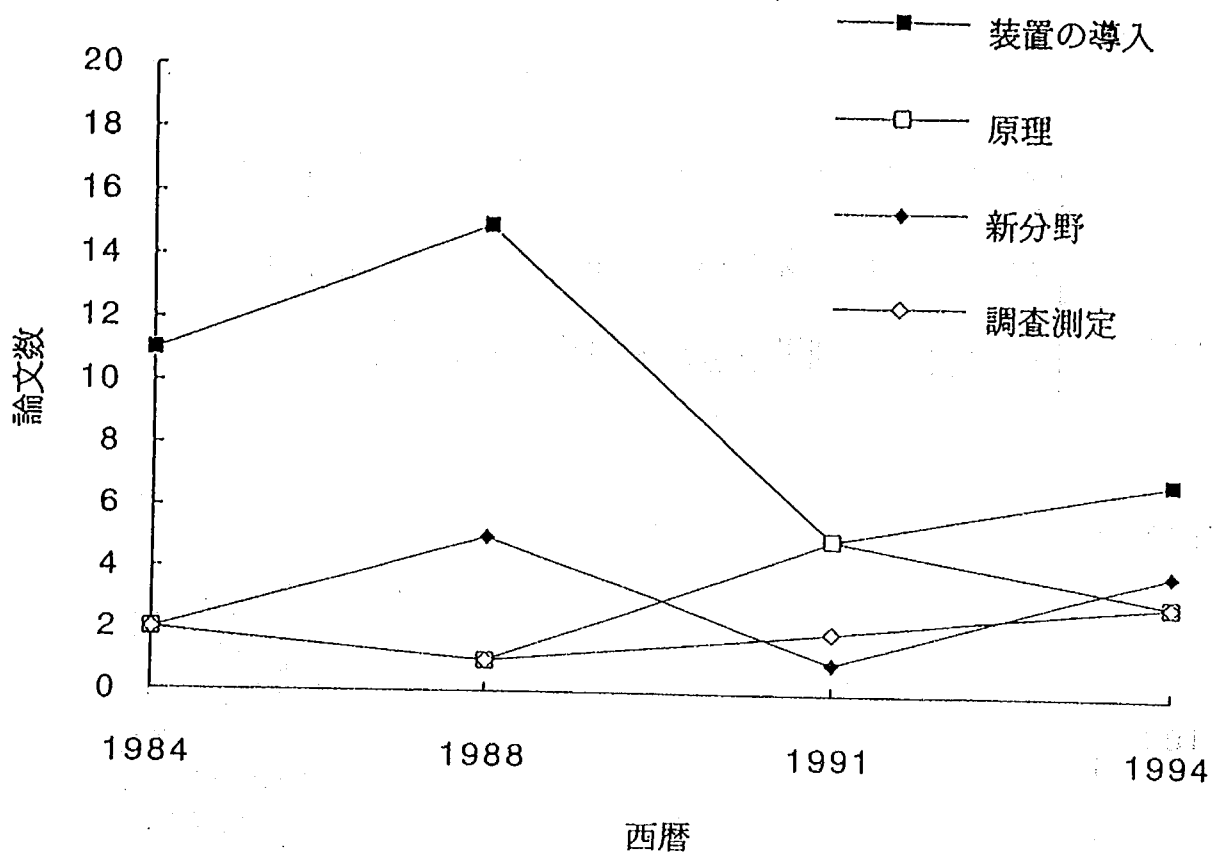


図-2.7 各研究分野の論文数の推移

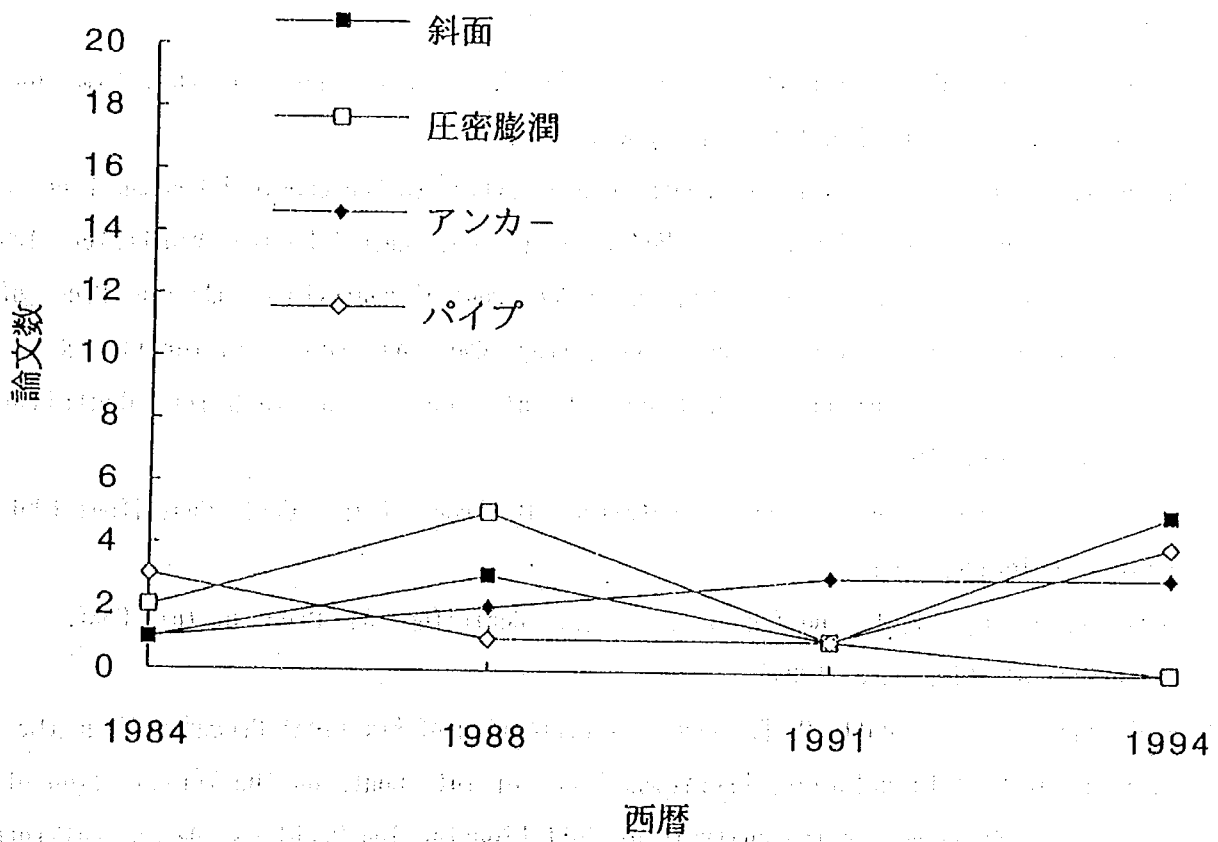
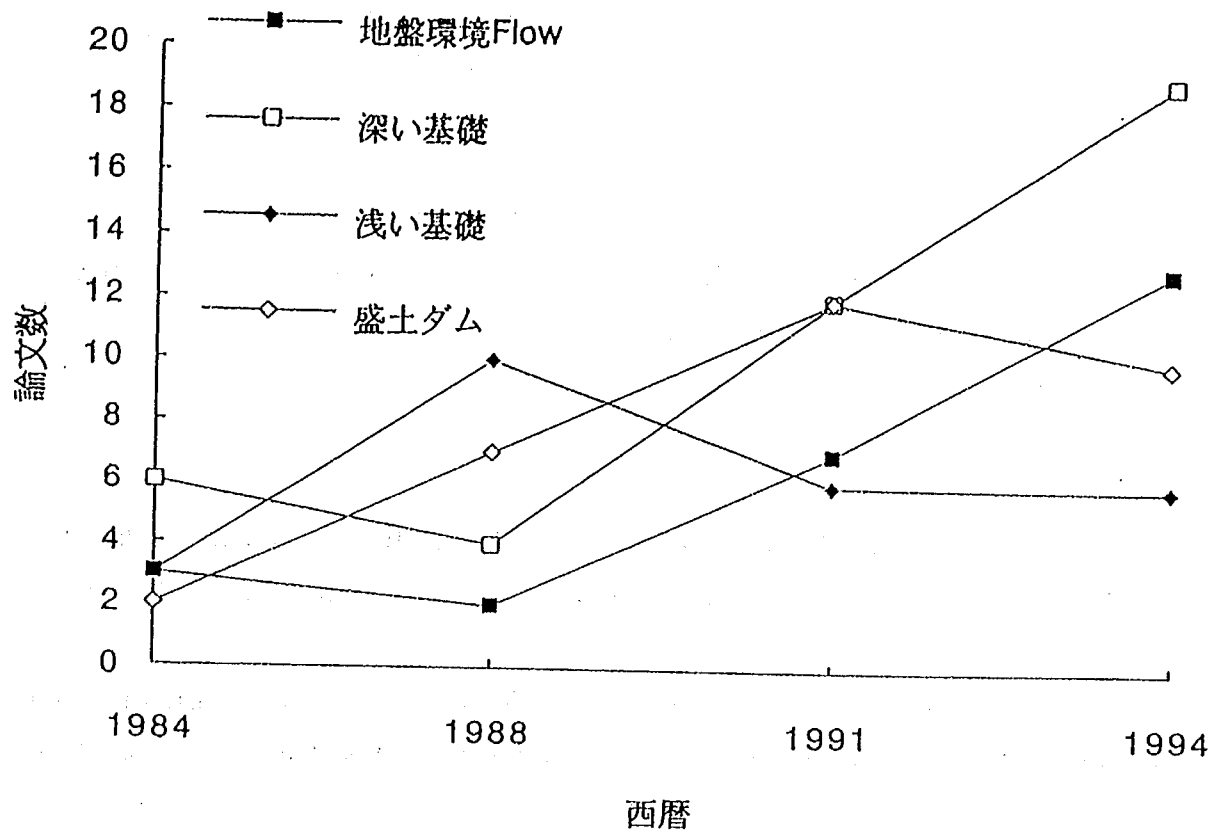


図-2.7 (つづき)

以上より、遠心模型実験の利用分野として、掘削問題全般 [(5), (6)], 動的問題全般 [(7), (8)], 地盤環境問題 [(9)], 杭基礎と地盤の相互作用 [(10)], 斜面問題全般 [(12), (13)] が今後注目されるものと判断される。

なお、新しい実験手法としては、以下の技術の開発が進められている。

- ・遠心場での盛土、掘削、地盤改良工事、原位置試験（コーン貫入試験、ベーンせん断試験など）の再現
- ・実際の地盤条件に近い互層地盤、過圧密地盤などの作成
- ・センサーの小型化、高精度化

参考文献

- 1) 木村孟ほか：講座 遠心模型実験，土と基礎，Vol. 35, No. 11, 1987. ～ Vol. 36, No. 9, 1988.
- 2) 香川崇章：土構造物の模型振動実験における相似則，土木学会論文報告集，第275号，pp. 69-77, 1978.
- 3) Scott, R. F.: Summary of Specialty Session 7-Modeling, Proc. of Geotechnical Engineering Division Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, pp. 1417-1424, 1978.
- 4) 古賀泰之，谷口栄一，古関潤一，森下義：新しく導入した動的遠心模型実験装置，土木技術資料，Vol. 30, No. 5, pp. 50-54, 1988.
- 5) Craig, W. H., James, R. G. and Schofield, A. N. (eds.): Centrifuges in Soil Mechanics, Balkema, 1988.
- 6) Kimura, T. (ed.): Geotechnical Centrifuge Model Testing, Proc. of Int. Sym. on Geotechnical Centrifuge Model Testing, Tokyo, 1984.
- 7) Craig, W. H. (ed.): Application of Centrifuge Modelling to Geotechnical Design, Proc. of Sym. on the Application of Centrifuge Modelling to Geotechnical Design, Manchester, 1984.
- 8) University of California: Recent Advances in Geotechnical centrifuge Modeling, Proc. of Sym. on Recent Advances in Geotechnical Centrifuge Modeling, Davis, California, 1984.
- 9) Corte, J. F. (ed.): Centrifuge 88, Proc. of Int. Conf. on Geotechnical Centrifuge Modelling, Paris, 1988.
- 10) Ko, H. Y. and McLean, F. G. (eds.): Centrifuge 91, Proc. of Int. Conf. Centrifuge 1991, Boulder, Colorado, 1991.
- 11) Leung, C. F., Lee, F. H. and Tan, T. S. (eds.): Centrifuge 94, Proc. of Int. Conf. Centrifuge 94, Singapore, 1994.
- 12) Arulanandan, K. and Scott, R. F. (eds.): Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Proc. of Int. Conf. on the Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Davis, California, 1993.

第3章 土木研究所における遠心模型実験を用いた研究の現状

3.1 動土質研究室における研究状況

3.1.1 研究項目

動土質研究室では、遠心模型実験により以下の研究を実施してきた。

- ・ジオテキスタイル補強盛土の安定性
- ・盛土のある地盤の液状化時の挙動
- ・液状化による地中構造物の浮上がり
- ・液状化対策工の効果
- ・フィルダムの地震時安定性
- ・地震時土圧

3.1.2 ジオテキスタイル補強盛土の安定性¹⁾

実験模型を図-3.1.1に示す。盛土も地盤も豊浦砂を相対密度が約90%になるように締め固め、模型B及びCでは厚さ0.22mmの不織布を用いて盛土を補強した。50Gまたは100Gの遠心加速度を作用させた状態で、盛土の天端に鉛直荷重を載荷した。

載荷荷重と沈下量の関係を図-3.1.2に示す。補強した盛土のほうが最大荷重が大きくなり、また、盛土の変形が大きい領域における荷重も大きくなった。

模型の前面に貼り付けたメンブレンに描いたメッシュの変位分布の例を図-3.1.3に、これより算定した主ひずみ分布を図-3.1.4に示す。明確なすべり線が生じていることがわかる。

実験模型を対象に、ジオテキスタイルに働く引張力を考慮してすべり安定計算を行った結果を図-3.1.5に示す。荷重がピークになるときのすべり安全率は約0.9となり、実験結果とよく対応した。

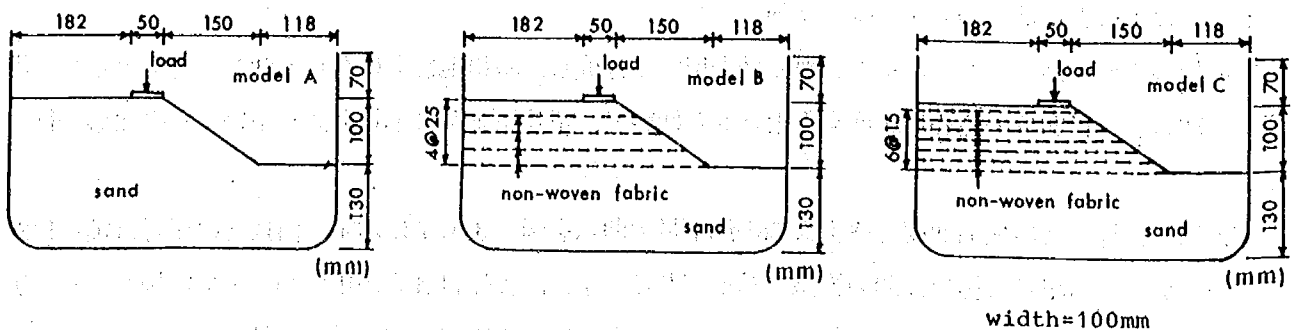


図-3.1.1 ジオテキスタイル補強盛土の実験模型

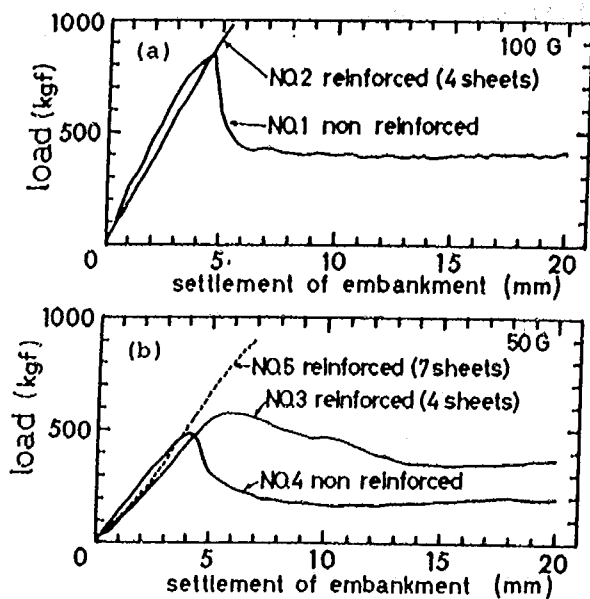


図-3.1.2 載荷荷重と沈下量の関係

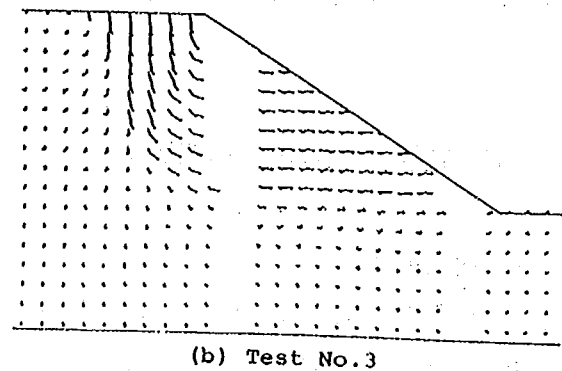


図-3.1.3 変位分布の例

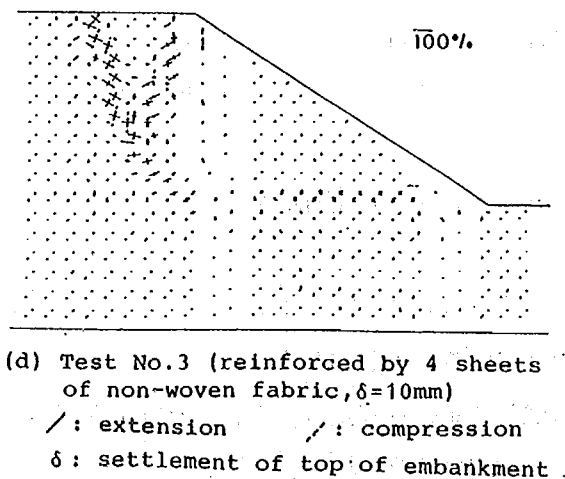


図-3.1.4 主ひずみ分布の例

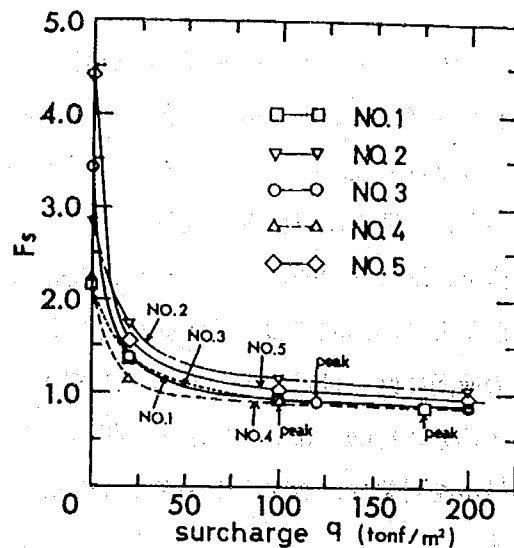


図-3.1.5 すべり安定計算結果

3.1.3 盛土のある地盤の液状化時の挙動^{2) 3) 4) 5) 6) 7)}

実験模型の例を図-3.1.6に示す。豊浦砂を用いて作成した飽和地盤上にクレイサンドを盛土として設置し、30Gまたは50Gの遠心加速度を作用させた状態で、正弦波または不規則波を用いて水平加振を行った。

重力場に換算した加振加速度と盛土天端の沈下量の関係を図-3.1.7に示す。白抜きの記号は縮尺1/30の模型、黒塗りの記号は縮尺1/50の模型の結果である。また、実験は計5か年にわたって実施したが、実施した時期によって記号の形(○△□)を変えて示した。実験の実施時期によって結果に違いが見られるものの、全般的には縮尺1/50の模型のほうが沈下量が大きめとなった。

縮尺1/50の模型において、模型の奥行きを変えた場合の加振加速度と盛土天端の沈下量の関係を図-3.

1.8に示す。土槽の前・背面と模型間の摩擦の影響を考慮すると、一般には奥行きが小さくなるほど変形量が小さくなることが予想されるが、実験結果は逆の傾向を示した。ただし、前・背面にテフロン板を貼り付けて摩擦を軽減したケースでは沈下量が大きくなっており、摩擦の影響について今後も検討を継続する必要がある。

実験模型を対象に全応力法に基づく有限要素解析を行い、加振後の変形量を算定した結果の例を、対応する実験結果とあわせて図-3.1.9に示す。また、盛土の沈下量の解析値と実験値の比較を図-3.1.10に示す。地盤の変形状況がほぼ一致し、盛土の沈下量の解析値と実験値の比は1:0.5~1程度であった。

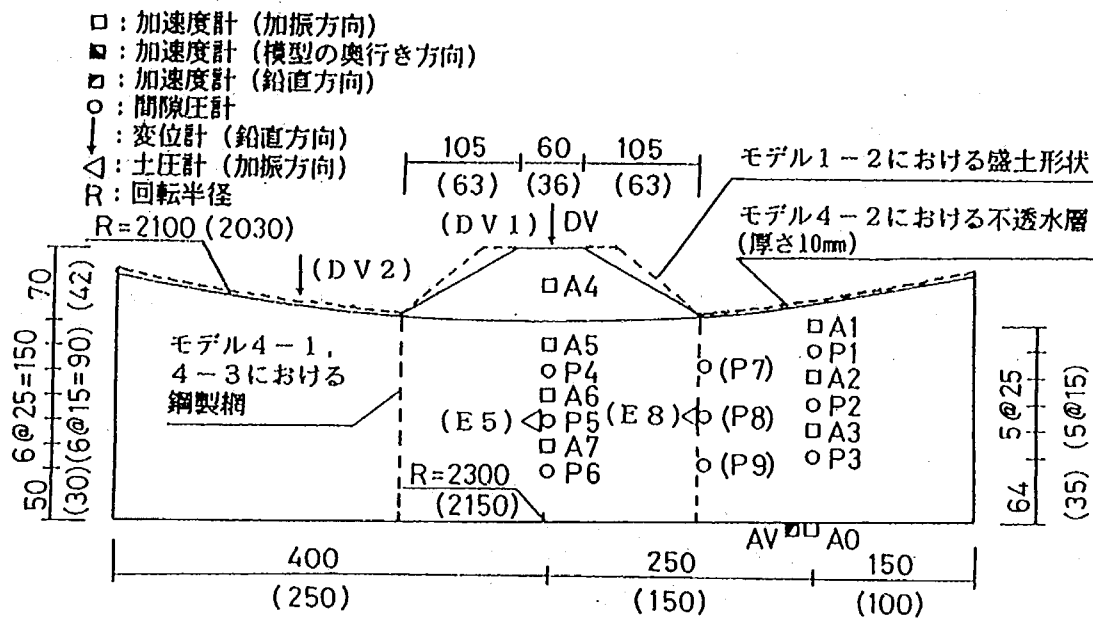


図-3.1.6 盛土のある地盤の実験模型の例

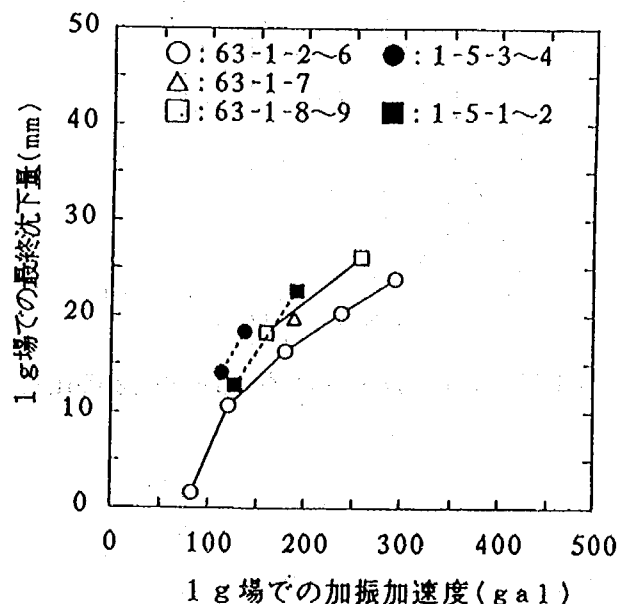


図-3.1.7 加振加速度と盛土天端の沈下量の関係 (縮尺の影響)

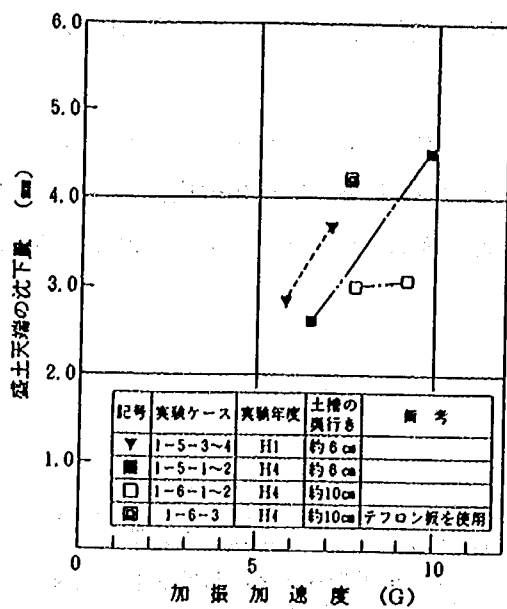


図-3.1.8 加振加速度と盛土天端の沈下量の関係
(模型の奥行きの影響)

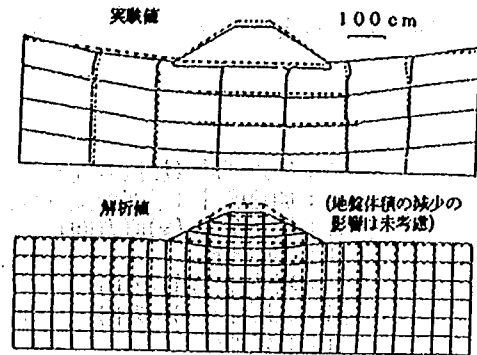


図-3.1.9 地盤と盛土の変形状況の例

記号	モデル	加振波形
○	63-1	60Hz, 正弦波20波
●	2-1	100Hz, 正弦波5波
▲	2-1	高周波不規則波
■	2-1	低周波不規則波

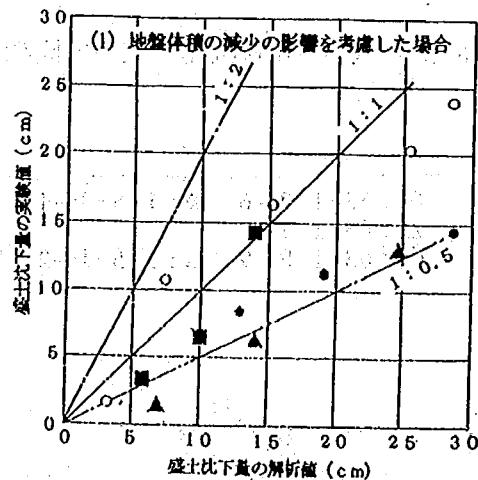


図-3.1.10 盛土の沈下量の解析値と実験値の比較

3.1.4 液状化による地中構造物の浮上がり^{8) 9)}

実験模型を図-3.1.11に示す。長さ4m、深さ1mの模型地盤を用いて実施した振動台実験と同じ条件で縮尺1/20の遠心模型実験（地盤の長さ20cm、深さ5cm）を実施し、結果を比較した。豊浦砂を用いて作成した飽和地盤中にアクリル製の箱を共同溝模型として埋設し、正弦波を用いて水平加振を行った。

重力下に換算した加振加速度と最大過剰間隙圧の関係を図-3.1.12に、加振加速度と共同溝模型の加振毎の最終浮上がり量の関係を図-3.1.13に示す。全般的に、振動台実験よりも遠心模型実験のほうが過剰間隙圧が大きかったが、振動台実験のP30を除くと水平地盤部よりも共同溝模型底部の地盤のほうが過剰間隙圧が小さい点は定性的に一致した。浮上がり量も、遠心模型実験のほうが若干大きかった。

このほかに、実規模の共同溝を想定した縮尺1/50の遠心模型実験（地盤の長さ80cm、深さ20cm：重力下の長さ40m、深さ10mに相当）も実施した。

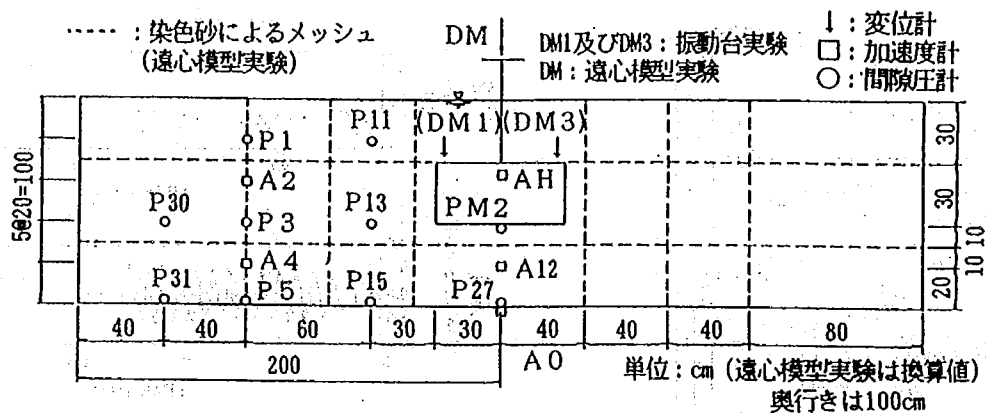


図-3.1.11 液状化による地中構造物の浮上がりに関する実験模型

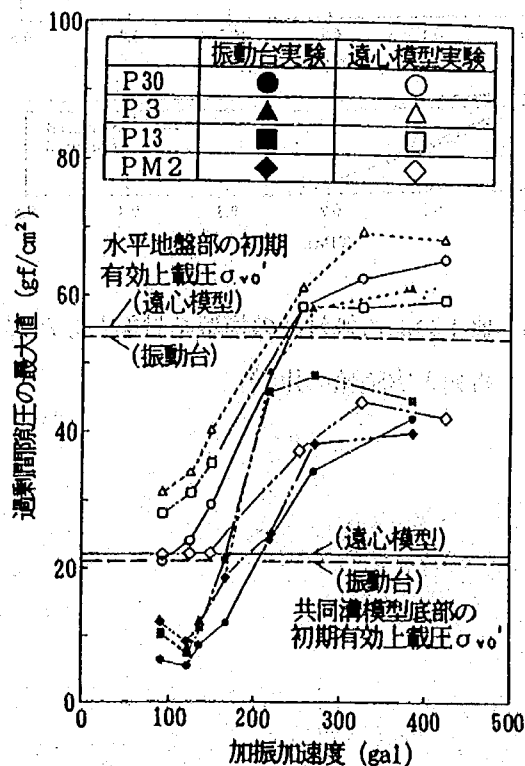


図-3.1.12 加振加速度と最大過剰間隙圧の関係

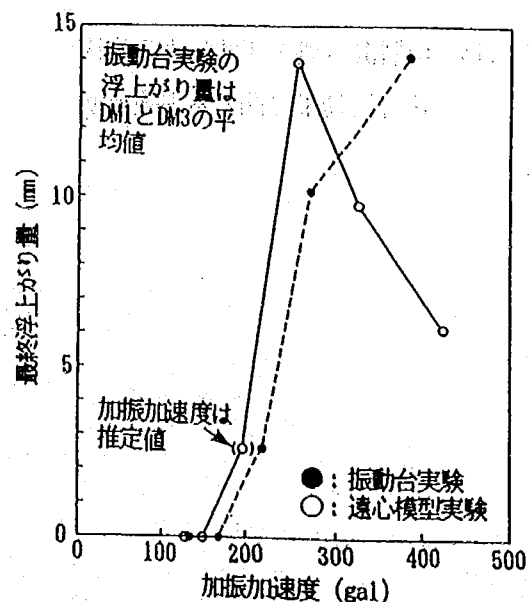


図-3.1.13 加振加速度と最終浮上がり量の関係

3.1.5 液状化対策工の効果^{10) 11) 12) 13)}

深層混合処理工法による液状化対策効果に関する実験模型を図-3.1.14に示す。深層混合処理工法による改良部分を想定したモルタル製のブロックを盛土または半地下構造物模型のある飽和砂地盤中に設置して、30Gの遠心加速度を作用させた状態で正弦波による水平加振を行った。

盛土のある無対策の実験模型を対象に有効応力法に基づく有限要素解析を行い、加振中の過剰間隙圧、応答加速度、盛土沈下量を算定した結果と実験値の比較を図-3.1.15に示す。盛土の応答加速度が徐々に増幅する点、盛土直下の地盤(P1)で負の過剰間隙圧が生じる点、盛土の沈下がほぼ一定速度で進行する点などが一致した。

このほかに、盛土及び杭基礎構造物の基礎地盤に対して締固め工法による液状化対策を実施した場合の効果に関する縮尺1/50の遠心模型実験も実施した。実験模型を図-3.1.16に示す。

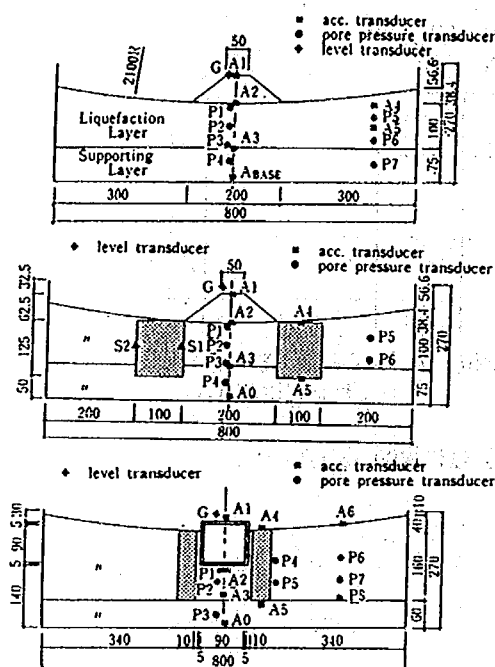


図-3.1.14 深層混合処理工法による液状化対策効果に関する実験模型

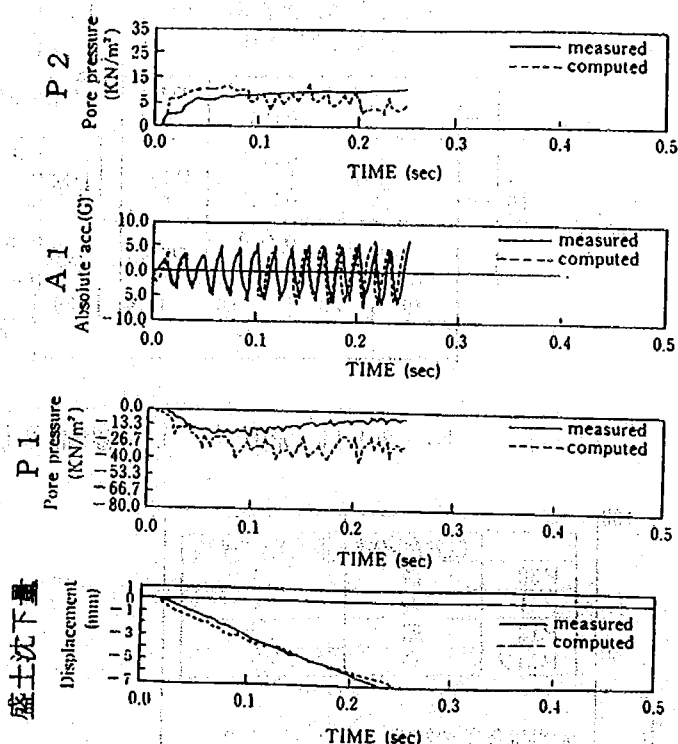
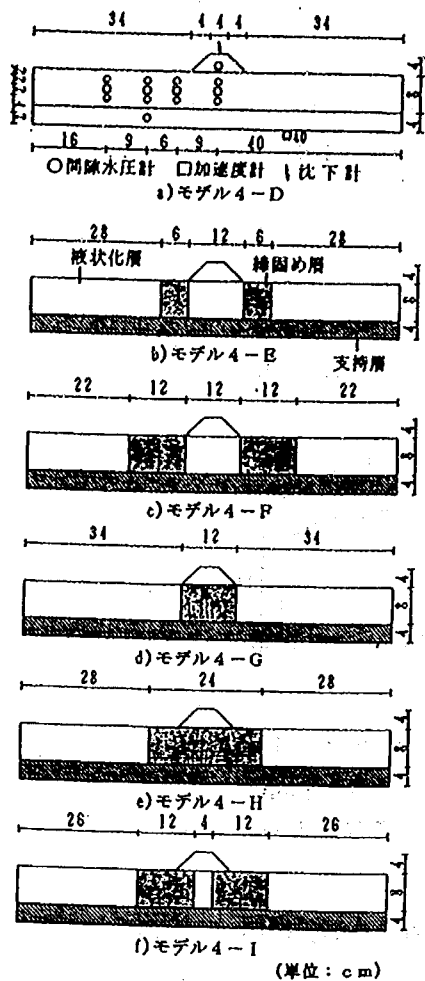
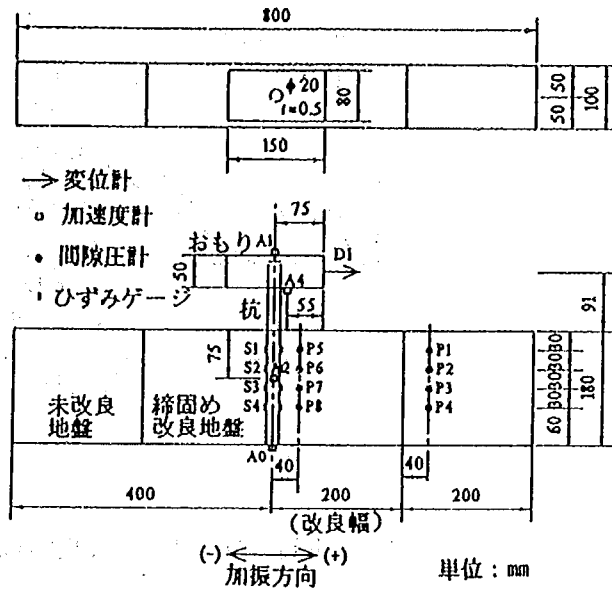


図-3.1.15 盛土のある無対策の模型を対象とした解析値と実験値の比較



(1) 盛土を対象とした実験



(2) 杭基礎を対象とした実験

図-3.1.16 締固め工法による液状化対策効果に関する実験模型

3.1.6 フィルダムの地震時安定性

実験模型の例を図-3.1.17に示す。粒径2~4.76mmの河床砂れきを用いてフィルダム模型を作成し、一部のケースでは図に示したようなコア部を設けた。30Gまたは10Gの遠心加速度を作用させた状態で正弦波による水平加振を行い、のり勾配の影響、コア材の種類の影響、ダムの片側または両側を湛水させた場合の影響などを調べた。

加振後の模型の変形状況の例を図-3.1.18に示す。破壊モードは全てのケースにおいて表層すべりが卓越した。また、Newmarkの方法により表層すべり量を算定したところ、実験値とある程度一致する結果が得られた。

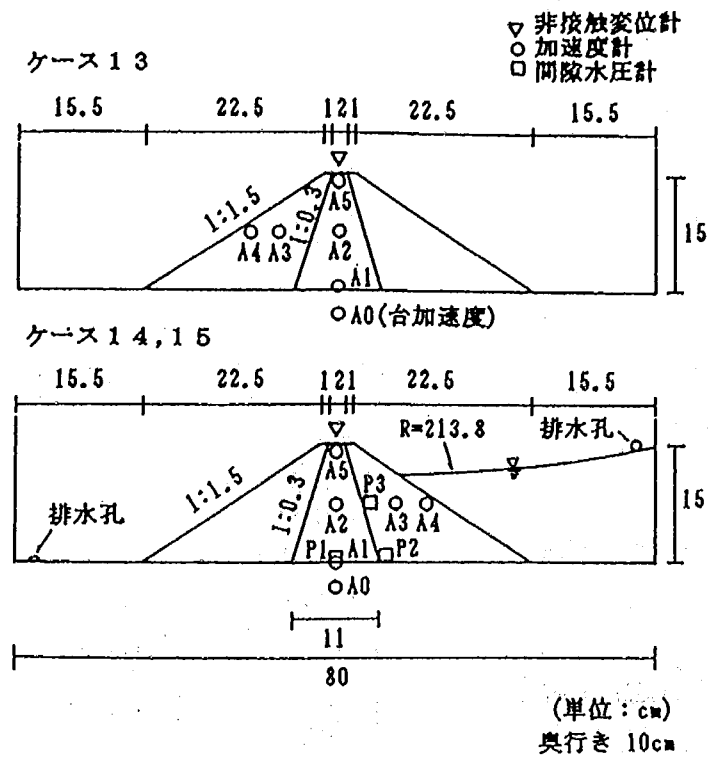


図-3.1.17 フィルダムの地震時安定性に関する実験模型

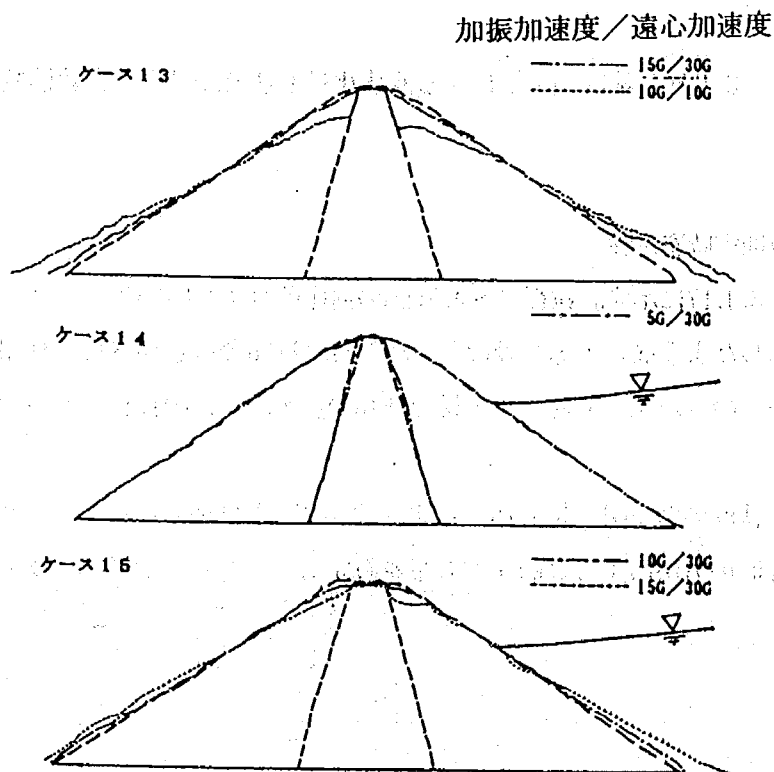


図-3.1.18 加振後の変形状況の例

3.1.7 地震時土圧

実験模型を図-3.1.19に示す。豊浦砂を用いて作成した乾燥または飽和地盤中に鋼板製の半地下構造物模型を設置した。50Gの遠心加速度を作用させた状態で、正弦波と不規則波を用いた水平加振を行った。

乾燥砂の実験模型を対象に線形の動的応答解析を行って得られた側壁の曲げモーメントの解析値と実験値の比較を図-3.1.20に示す。最も深い位置では両者は比較的良好に一致したが、浅い位置では実験値のほうが大きかった。解析手法及び解析条件の検討を今後も継続する必要がある。

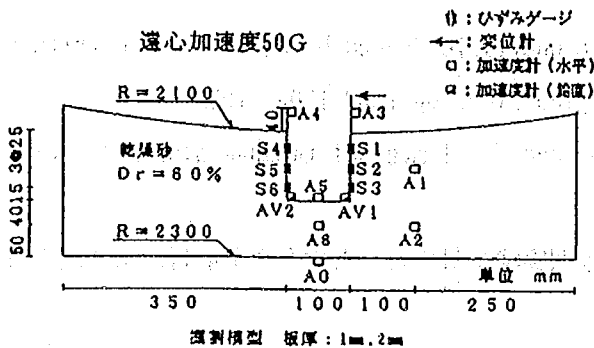


図-3.1.19 地震時土圧に関する実験模型

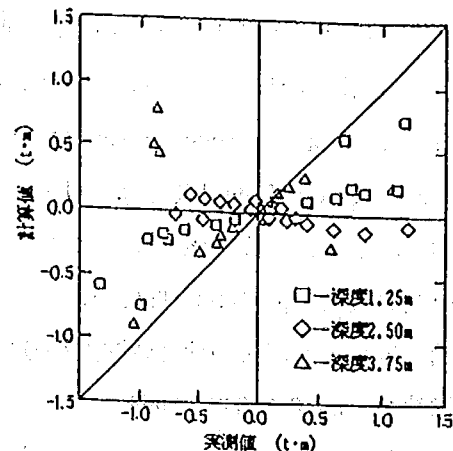


図-3.1.20 側壁の曲げモーメントの解析値と実験値の比較

3.1.8 今後の課題

- ・ 試料容器の前、背面と模型間の摩擦、及び試料容器側面の変位拘束の影響の検討
 - 試料容器の奥行き、及び長さを大きくする必要がある。また、せん断土槽を導入する必要がある。
- ・ 互層地盤、複合地盤の地震時挙動の検討
 - 遠心場において地盤の作成、あるいは地盤改良の再現ができる装置を開発するとともに、実験装置本体にこれが搭載できるようにする必要がある。
- ・ 地中構造物の縦断方向、及び橋台の地震時挙動の検討
 - 3次元的な模型が作成できる試料容器とする必要がある。また、測定点数も増やす必要がある。
- ・ 実験の可視化
 - 高精度のVTR装置、画像処理装置を導入する必要がある。
- ・ 実験の再現性、及び実験能率の向上
 - 地盤の作成方法（砂撒き、飽和作業など）の自動化を図るとともに、作成した地盤の物性を簡易的に測定する方法（例えばせん断波速度の測定）を確立する必要がある。

参考文献

- 1) Taniguchi, et al.: Centrifuge Model Tests on Geotextile Reinforced Embankments, Proc. of 8th Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.499-502, 1987.
- 2) 古賀泰之ほか：盛土のある地盤の挙動に関する実験的検討，土木研究所資料，第3264号，1994.
- 3) 古賀泰之ほか：飽和砂地盤と盛土の地震時挙動に関する動的遠心模型実験，土と基礎，Vol.40, No.5, pp.17-22, 1992.
- 4) 古賀泰之ほか：飽和砂地盤と盛土の地震時挙動に関する動的遠心模型実験，土木技術資料，Vol.35, No.5, pp.38-43, 1993.
- 5) Koga, Y. et al.: Model Tests of Embankments on Liquefiable Ground Using Dynamic Centrifuge, Proc. of 10th World Conference on Earthquake Engineering, pp.1299-1304, 1992.
- 6) Koseki, J. et al.: Liquefaction of Sandy Ground and Settlement of Embankments; Proc. of Int. Conf. Centrifuge 1994, pp.215-220, 1994.
- 7) 古関潤一，松尾修：液状化性地盤上盛土の動的遠心模型実験を対象とした永久変形解析，第29回土質工学研究発表会，pp.1053-1056, 1994.
- 8) 古関潤一ほか：共同溝の地震時浮上がりに関する遠心模型実験及び振動台実験，土木学会第49回年次学術講演会，pp.608-609, 1994.
- 9) Koseki, J. et al.: Model Tests and Analyses on Uplift of Underground Structures during Earthquakes, Proc. of Int. Workshop on Remedial Treatment of Liquefiable Soils, 1994.
- 10) 建設省土木研究所ほか：耐震地盤改良工法に関する共同研究報告書（その5），共同研究報告書第52号，1991.
- 11) Koga, Y. et al.: Applicability of the Dynamic Centrifuge Model Test Method in Developing Countermeasures against Soil Liquefaction, Proc. of International Conf. Centrifuge 1991, pp.431-438, 1991.
- 12) 島津多賀夫ほか：締固め工法により補強した盛土の耐震性について，第28回土質工学研究発表会，pp.1207-1210, 1993.
- 13) 古関潤一ほか：杭基礎構造物の液状化対策に関する検討（その2），第29回土質工学研究発表会，pp.963-966, 1994.

3.2 トンネル研究室における研究状況

3.2.1 研究項目

トンネル研究室ではこれまでトンネル坑口対策工法の効果、シールドトンネルに作用する荷重の大きさ、トンネル切羽の安定性等を明らかにすることを目的とした遠心力載荷模型実験を実施してきており、代表的な模型実験の実施例を以下に示す。

3.2.2 トンネル坑口対策工法の効果¹⁾

実験の概要：トンネル坑口対策として周辺地盤に地表面から打設されるロックボルトの補強効果を明らかにすることを目的として、トンネル掘削にともなう周辺地盤の挙動をロックボルトが打設された場合とロックボルトがない場合について調べた。

トンネル掘削は地盤中にトンネルに相当するゴムチューブを埋設して、ゴムチューブの水を排出することによりシミュレートした。(図-3.2.1 参照)

試料容器の大きさ：高さ40cm×幅50cm×奥行き12.8cm

地盤の材料：豊浦標準砂(気乾状態)

遠心加速度：80 g

計測項目：トンネルの変形量(排出されるゴムチューブの水量から換算)、地盤の変位(地盤中に埋め込まれた標点の動きを写真撮影し、デジタイザーにより読み取る)

装置の特色：トンネル掘削をシミュレートする方法としてゴムチューブ内の水を排出することを考え、具体的にはゴムチューブの先端に電磁弁を設置して遠心力載荷中に電氣的信号を送ることにより電磁弁を作動させ水の排出を行った。

実験結果：図-3.2.2は、実験から得られた変位量を用いて算出したトンネル掘削時におけるトンネル周辺のひずみ分布をロックボルトがある場合と無い場合について示したものである。斜面下にトンネルを掘削をした場合には、トンネル側壁から山側に向かう滑り面が発生してトンネルには偏土圧が発生すること、ロックボルトの効果は地表面に垂直あるいは水平に打設した場合に滑り面の発生を抑制する効果があること等が確認された。

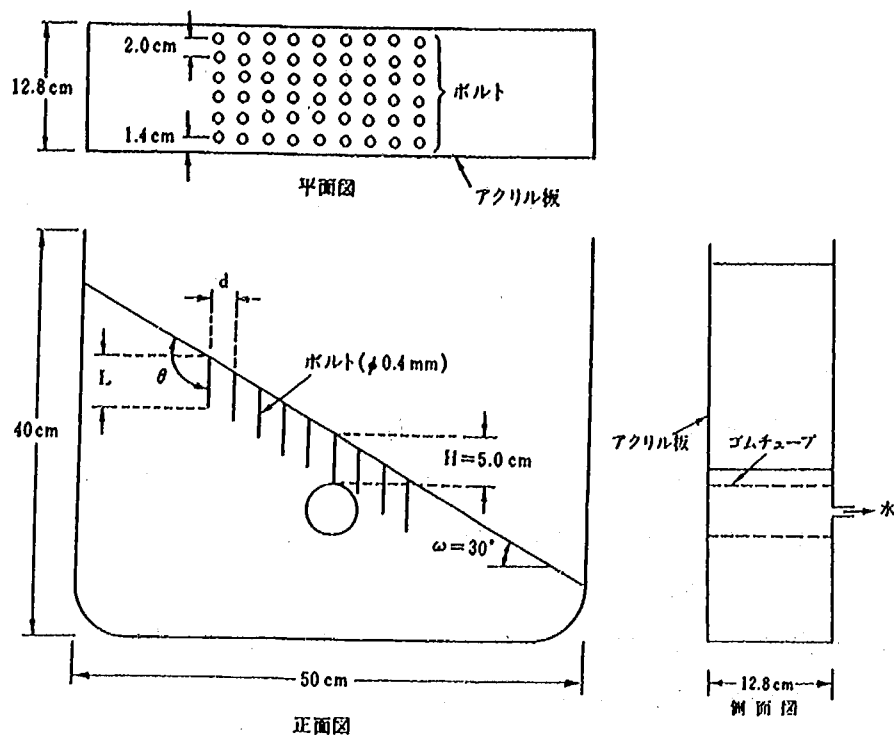


図-3.2.1 トンネル坑口対策工法の効果の模型実験装置

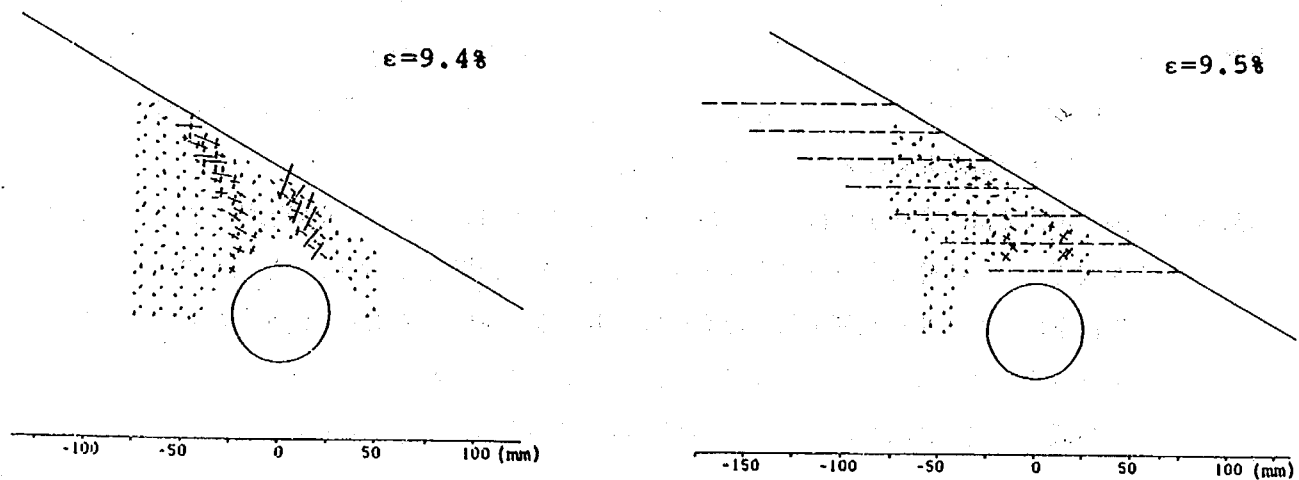


図-3.2.2 トンネル周辺地盤のひずみ分布

3.2.3 シールドトンネルに作用する荷重²⁾

実験の概要：水底下の粘性土地盤に建設されるシールドトンネルの設計に必要な作用荷重の大きさを明らかにすることを目的として、ロードセルの埋め込まれたシールドトンネル模型を用いた実験を行い、シールドトンネルに作用する荷重を計測した。

シールドトンネルに作用する荷重の発生に大きな影響を及ぼすテールボイドはトンネル模型を覆うトンネルカバーを引き抜くことにより発生させた。(図-3.2.3 参照)

試料容器の大きさ：高さ40cm×幅50cm×奥行き10.0cm

地盤の材料：粘性土（東京湾海底から採取されたスラリーを遠心力により自重圧密して作成）

遠心加速度：80g

計測項目：自重圧密時の地表面の変位（差動トランス型変位計），シールドトンネルに作用する荷重（ひずみゲージ式のロードセル）

装置の特色：テールボイドを発生させる方法としてトンネルカバーを引き抜く方法を考え，具体的には遠心力载荷中に油圧ジャッキを作動させることにより対処した。

実験結果：図-3.2.4は，トンネルクラウンに作用する荷重と土被り比（土被り／トンネル直径）との関係を示したものである。

土被りが直径の2倍程度までの浅い深度に建設される場合には，トンネルクラウンにはほぼ全応力に相当する荷重が作用すること，トンネル側壁に作用する荷重は側壁の位置における全応力の0.84～0.95の範囲にあること等が明らかとなった。

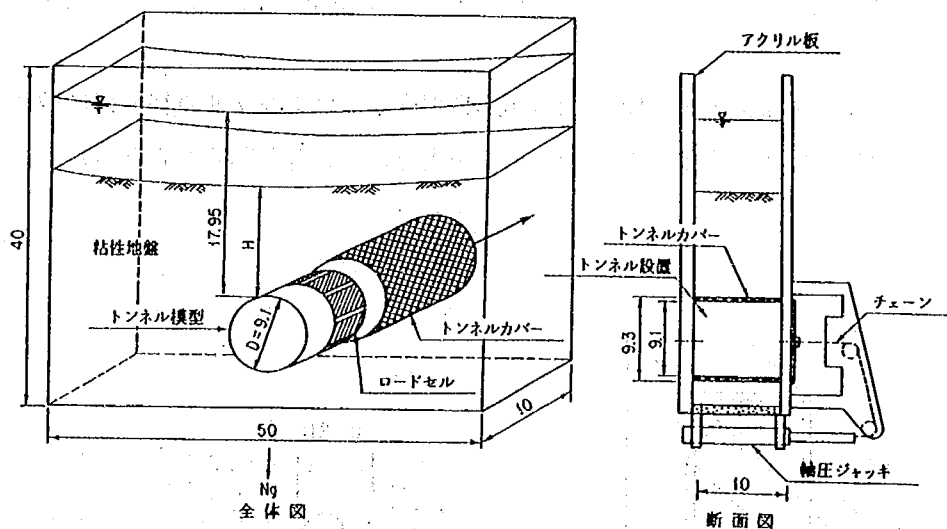


図3.2.3 シールドトンネルの模型実験装置

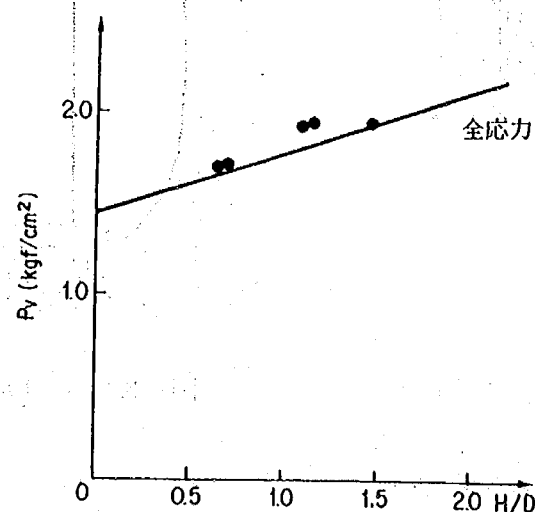


図3.2.4 シールドトンネルのクラウンに作用する荷重

3.2.4 トンネル切羽の安定性

実験の概要：山岳工法によりトンネルを掘削する場合のトンネル切羽の崩壊メカニズムおよび切羽が崩壊するときの指標を明らかにすることを目的に、強度が異なる3種類の地盤に対してトンネル掘削模型実験を行い、切羽周辺の地盤の挙動を調べた。

トンネルの掘削方法は、予め地盤内に埋め込んでおいた半円形の筒を引き抜くことによりシミュレートした。（図-3.2.5 参照）

試料容器の大きさ：高さ40cm×幅50cm×奥行き14cm

地盤の材料：豊浦標準砂（湿潤状態），トンネル現場から採取した砂（湿潤状態）

遠心加速度：30～80g

計測項目：切羽周辺地盤の土圧（ひずみゲージ式の土圧計），地盤の挙動（色砂の動きを写真により観察）

装置の特色：トンネルの掘削方法として円筒を引き抜く方法を考え、具体的には遠心力载荷中に電動モーターを作動させることにより対処した。

実験結果：図-3.2.6は、実験において観察された典型的な切羽の崩壊パターンの概観図を示したものである。

トンネル切羽の崩壊は切羽より前方 $0.3D$ 程度（ D はトンネル直径）の領域に発生すること、切羽の安定には地盤の粘着力の影響が大きいこと等が明らかとなった。

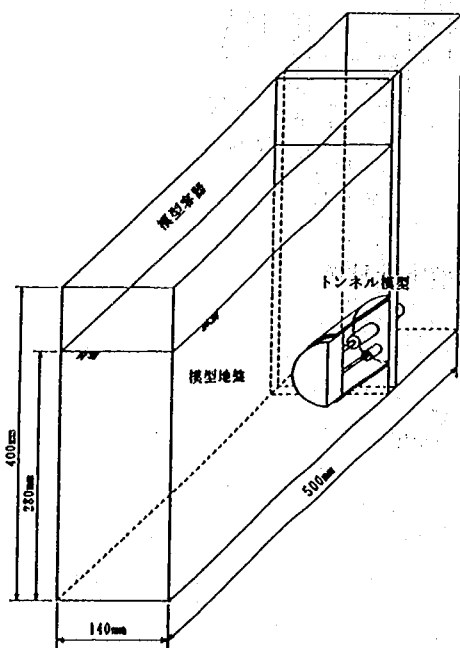


図-3.2.5 切羽の安定の模型実験装置

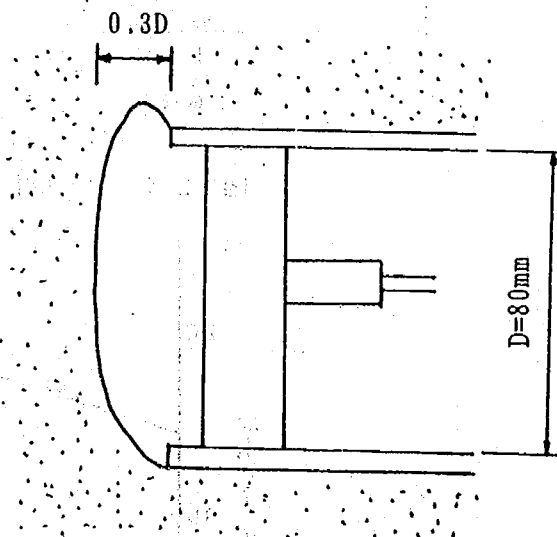


図-3.2.6 切羽の崩壊パターン

参考文献

- 1) 真下英人, 石村利明: 斜面下トンネルにおける縫地ボルト効果に関する模型実験, 第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 229-233, 1988.
- 2) 真下英人ほか: 粘性地盤におけるシールドトンネルの作用荷重に関する遠心力載荷実験, 土木学会第44回年次学術講演会, pp. 108-109, 1989.

3.3 施工研究室における研究状況

3.3.1 研究項目

施工研究室では、「深層混合処理工法による地盤の変形抑止工の設計施工法に関する試験調査」において、軟弱地盤上に盛土を載荷した場合の改良体の配置方法と側方流動の抑止効果についての知見を得るため、遠心力載荷実験を実施している。

本研究では、深層混合処理工法の各改良形式の中でも、陸上工事に広く用いられている経済的な杭式改良形式について、改良列数、改良位置、改良率等の配置方法を変えた遠心力載荷実験を実施することにより、側方流動現象を把握し、改良体変位量の簡易な予測方法、及び盛土による周辺地盤の変状（水平変位及び沈下）の抑止工法としての深層混合処理工法を用いる場合の設計施工法を提案することを目的としている。

3.3.2 実験方法

実験模型を図-3.3.1に、改良体配置形状例を図-3.3.2に示す。

(1) 軟弱地盤の作成

スラリー状の試料土（有明粘性土）を試料容器（土槽）に投入し、重力場（1G場）において26時間予備圧密（圧密応力 0.075kgf/cm^2 ）を行った後、給水により水位を一定に保ちつつ80Gの遠心力場で42時間遠心自重圧密（圧密応力 0.075kgf/cm^2 ）を実施し、軟弱地盤模型を作成する。

(2) 改良地盤の作成

軟弱地盤作成後、地盤変形を観測するためのターゲットを格子状に模型地盤の側面に設置するとともに、模擬改良体（固化土、真鍮パイプ、プラスチックパイプ $\phi=12.0\text{mm}$ ）を所定の位置に挿入し改良地盤を作成する。

(3) 実験の実施

改良地盤作成後、遠心力場において盛土材（砂）を段階的に載荷し、改良体の土圧、ひずみの計測を実施する。また、載荷段階毎に撮影した写真から地盤の変形、改良体の変位を読み取る。

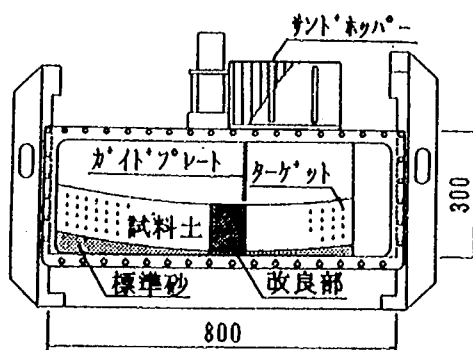


図-3.3.1 実験模型

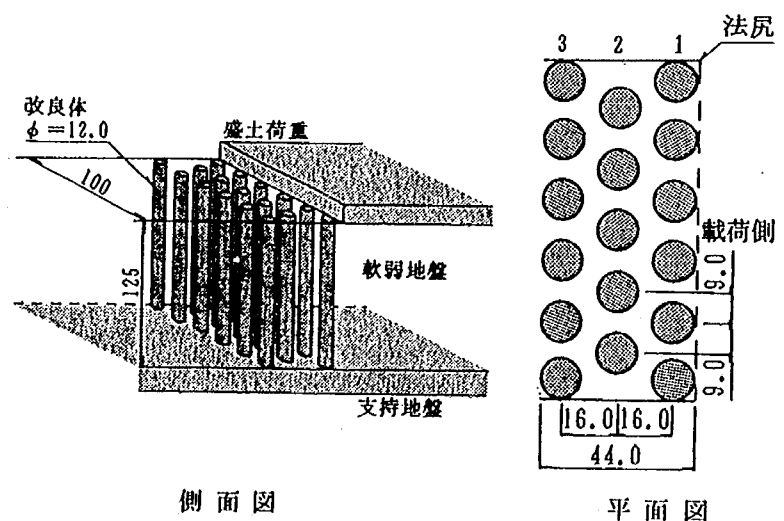


図-3.3.2 改良体配置形状例

3.3.3 実験結果

遠心自重圧密により作成された地盤物性例を図-3.3.3~3.3.6に示す。遠心力載荷実験の結果、図-3.3.7に示すように、未改良地盤において明確な円弧すべりが確認できる。

改良地盤の変形状況、改良体変位量、側方土圧分布をそれぞれ図-3.3.8、図-3.3.9、図-3.3.10に示す。改良地盤では、改良体による地盤の変形抑止効果が確認できる。改良体は各列で同様の挙動を示し、改良地盤が一体となって変形しているものと考えられる。また、各列の側方土圧の分布形状は、深さ方向に増加傾向を示しており、載荷側1列目では下部付近で増加量は小さくなっている。

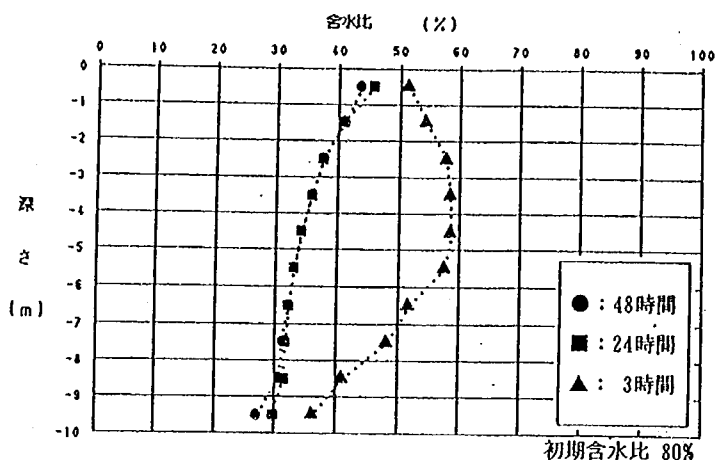


図-3.3.3 遠心自重圧密時間の比較

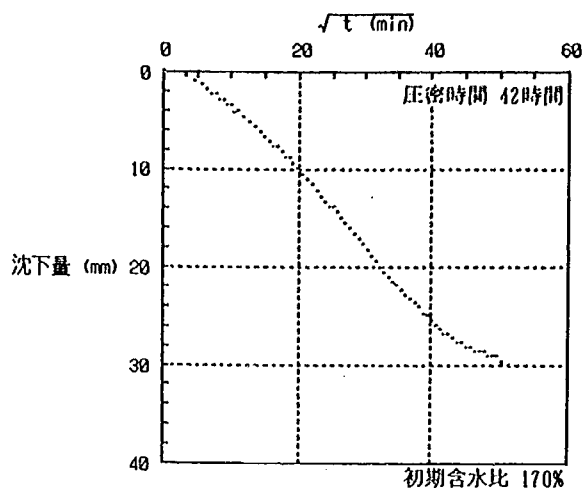


図-3.3.4 遠心自重圧密沈下量

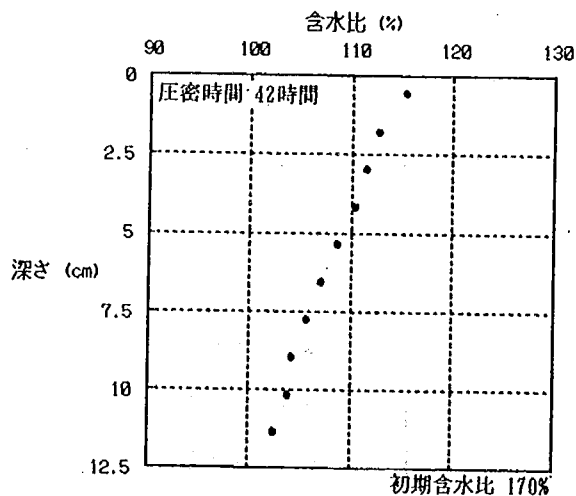


図-3.3.5 遠心自重圧密後の含水比

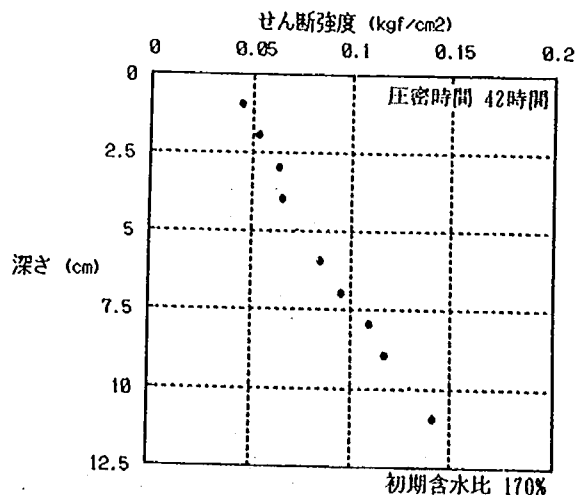


図-3.3.6 遠心自重圧密後のせん断強度

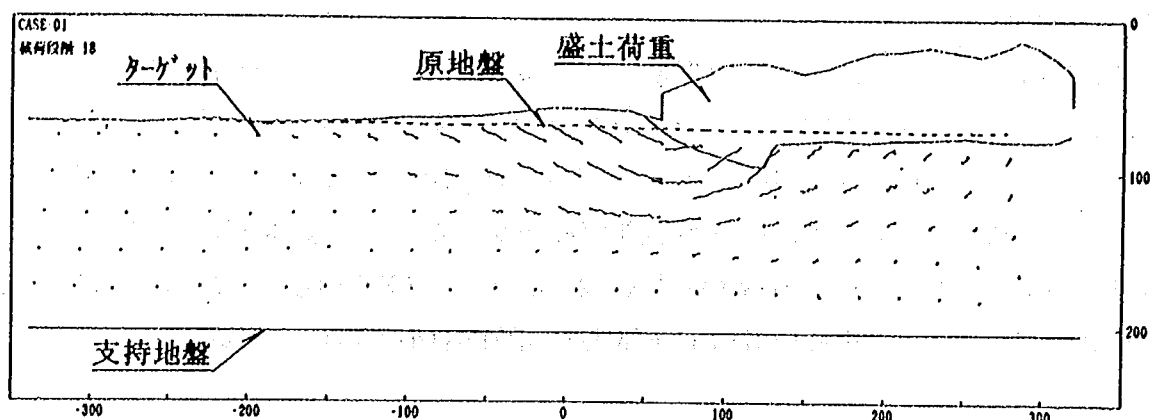


図-3.3.7 未改良地盤変形図

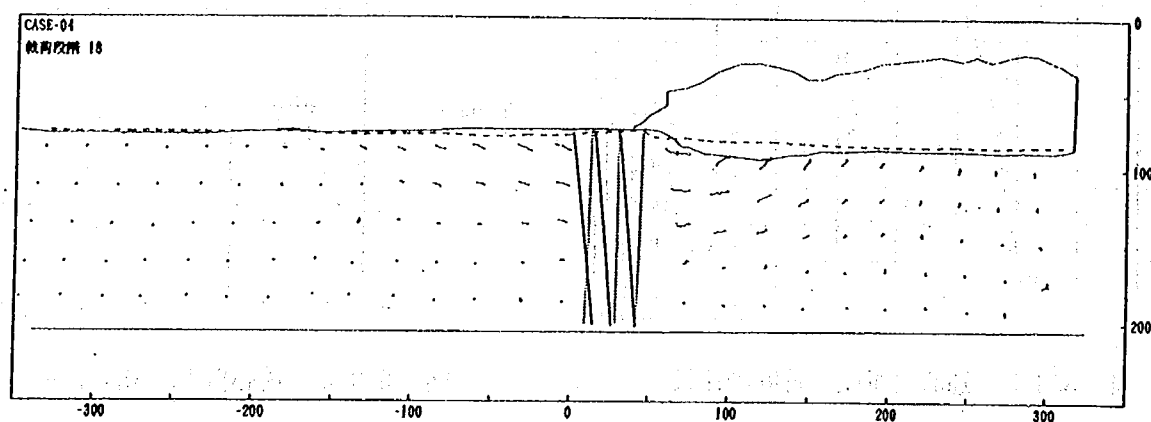


図-3.3.8 改良地盤変形図

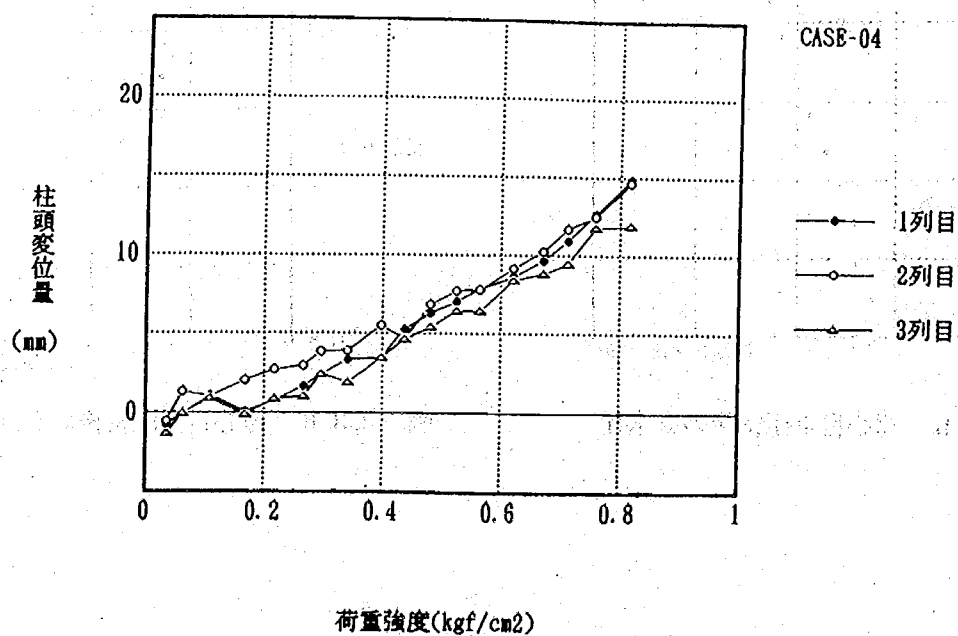
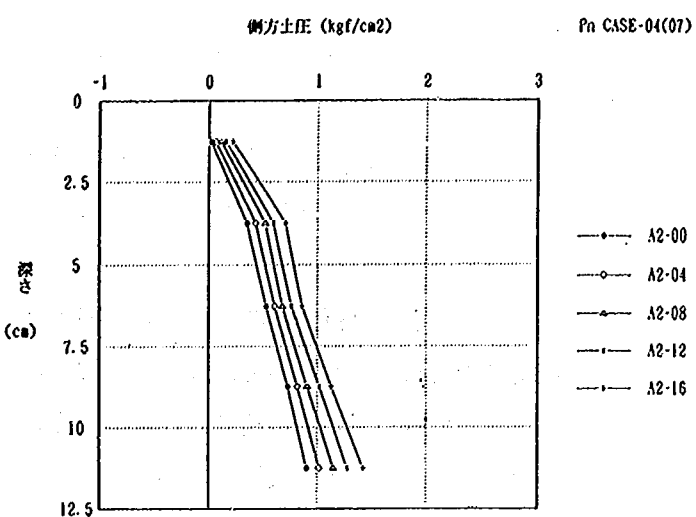
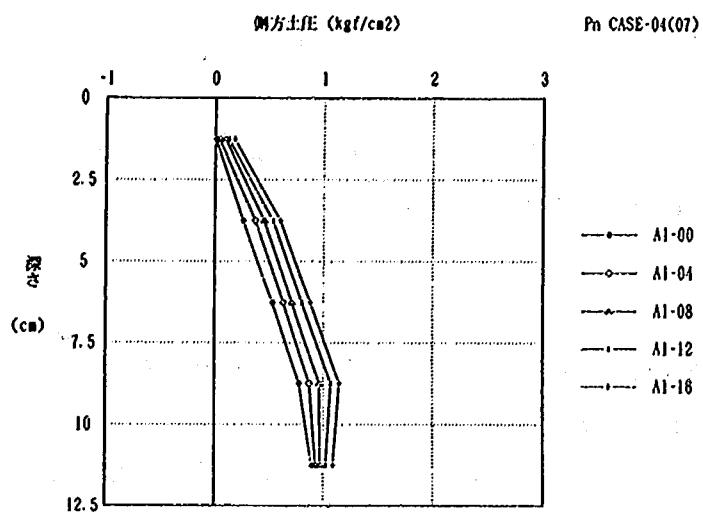


図-3.3.9 改良体変位量図

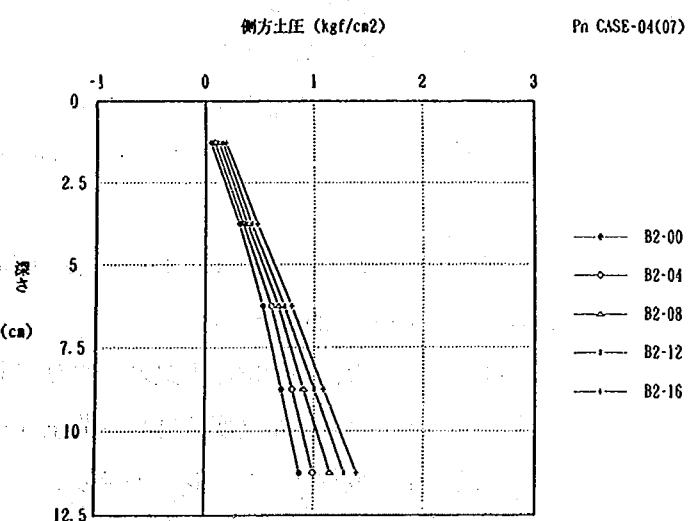
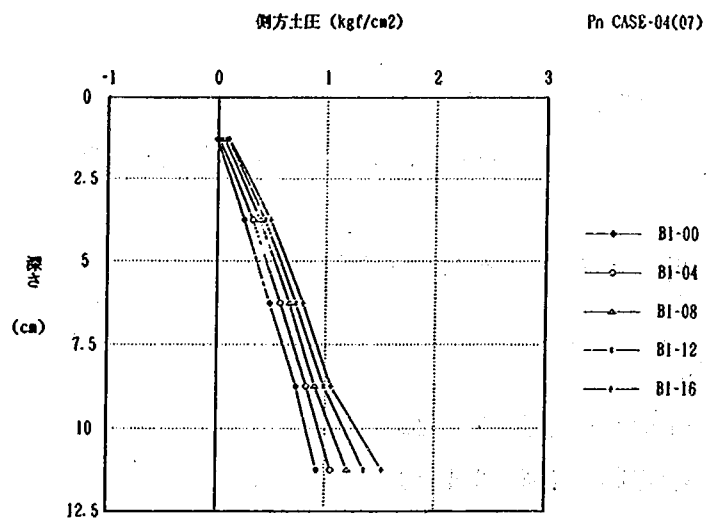
載荷側

非載荷側

1 列目



2 列目



3 列目

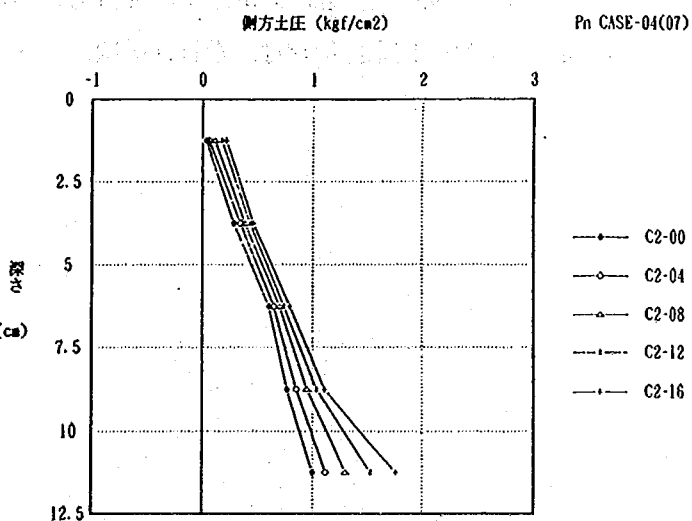
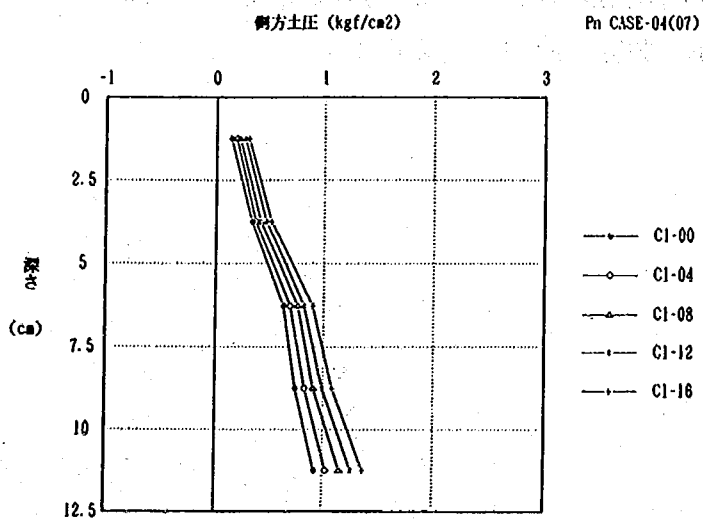


図-3.3.10 側方土圧図

3.4 基礎研究室における研究状況

3.4.1 研究項目

基礎研究室では、「直接基礎の支持力」に関し、乾燥砂およびセメント改良砂を用いて遠心力模型実験を行っている。

なお、支持力推定法については、「遠心力模型実験」のみならず、「重力場での大型模型実験」およびこれらの実験結果をシミュレートできる「数値解析」により、検討を行っている。

3.4.2 直接基礎の支持力に関する遠心模型実験¹⁾

直接基礎の支持力における寸法効果を把握することを目的として、作成した地盤上にフーチング模型を設置し、上方に取り付けた載荷装置により、変位制御により載荷する。

遠心力載荷装置は、土質共同実験棟内の装置（図-3.4.1 参照）を使用した。資料容器の寸法は幅50cm、深さ30cm、奥行き10cmである。

地盤材料は次の2種類とした。

- ① 豊浦標準砂（気中落下）
- ② セメント改良豊浦標準砂（練り混ぜ後、高温養生）

地盤と壁面との間の摩擦を除去するため、壁面にシリコングリスを塗布し、メンブレンを貼り付けている。

基礎模型は、模型幅1, 2, 3, 4 cmとし、底面にサンドペーパーを貼り付ける。

遠心加速度は1 G~125 Gとした。

計測項目およびその結果の例は下記のとおりである。

- ① フーチング沈下量（変位計）～荷重（ロードセル）（図-3.4.2）
- ② 地盤中の変位（メンブレンのメッシュの写真撮影）（図-3.4.3）

また、地盤中の変位をもとに、ひずみを求めることができる（図-3.4.4）

これらの実験に基づき、直接基礎の支持力における寸法効果（図-3.4.5）が明かとなっている。この原因としては、拘束圧依存性、進行性破壊、ピーク後の強度低下などが考えられる。

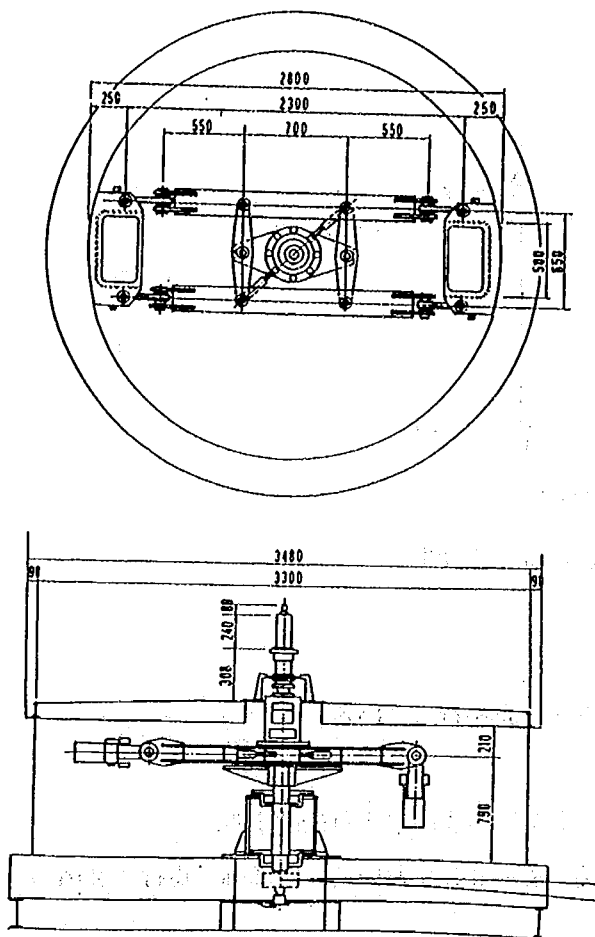


図-3.4.1 遠心力载荷装置

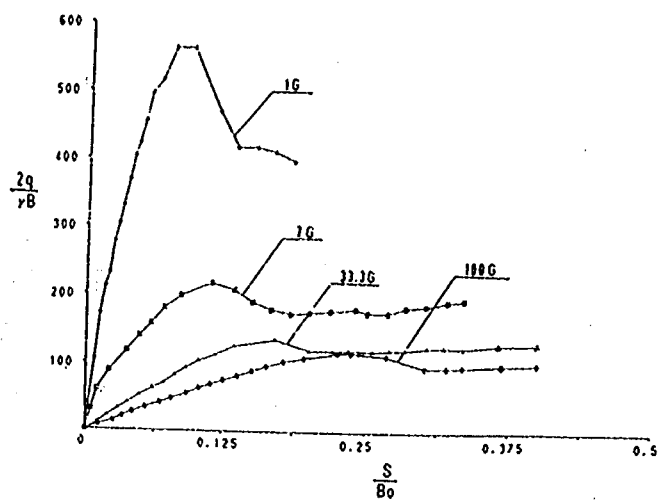


図-3.4.2 荷重～沈下量曲線¹⁾

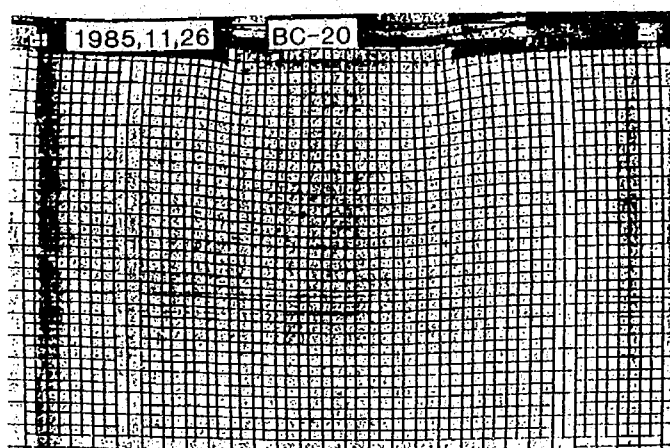


図-3.4.3 地盤の変形¹⁾

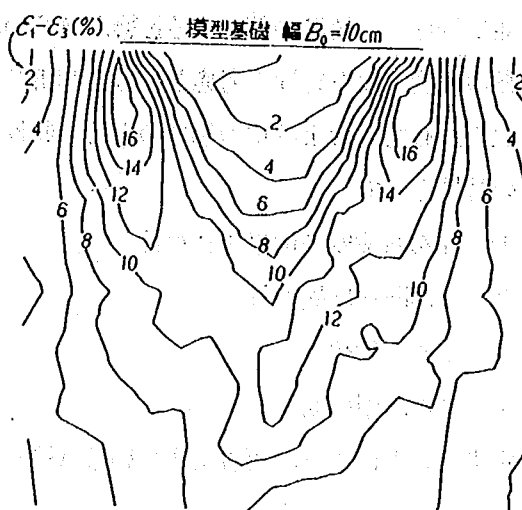


図-3.4.4 地盤のせん断ひずみ¹⁾

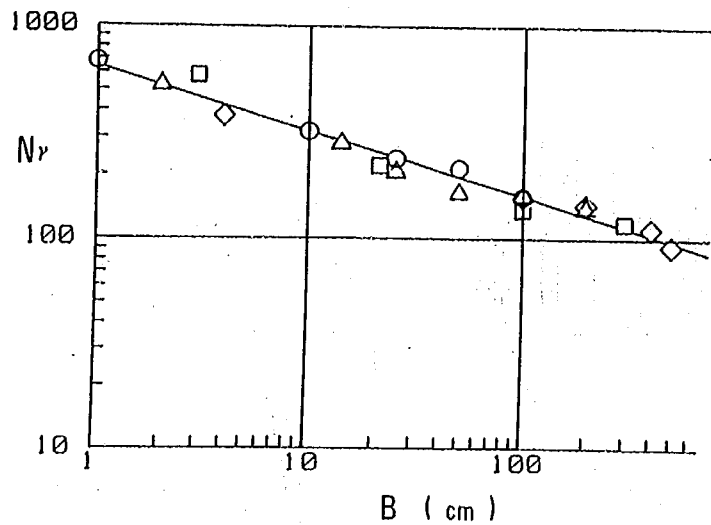


図-3.4.5 支持力計数における寸法効果¹⁾

3.4.3 関連する研究

3.4.2に示した遠心力模型実験に関連して、下記のような研究を行っている。

(1) 重力場での大型模型実験¹⁾

遠心模型実験により確認された、支持力の寸法効果を大型模型実験により確認する。

大型二次元土槽（幅7m×深さ4m×奥行き2m、図-3.4.6）において、幅50cm×奥行き2mのフーチングを用い実験を行った。

この実験結果を遠心場と比較した（図-3.4.7～図-3.4.9）。載荷初期のすべり線が発生していない段階では遠心場と一致しているが、ピーク強度は遠心場より小さくなっている。この原因は、すべり線の発生過程で、粒径の差による影響があらわれたためと考えられる。

(2) 地盤の強度・変形特性を考慮した数値解析²⁾

上記の遠心力場および重力場での支持力特性を数値解析によりシミュレートした。解析にあたって、地盤の特性として、

- ① せん断強度の拘束圧依存性
- ② せん断強度異方性
- ③ ひずみ軟化
- ④ せん断層の幅

を考慮することにより、再現できている（図-3.4.10、図-3.4.11）。

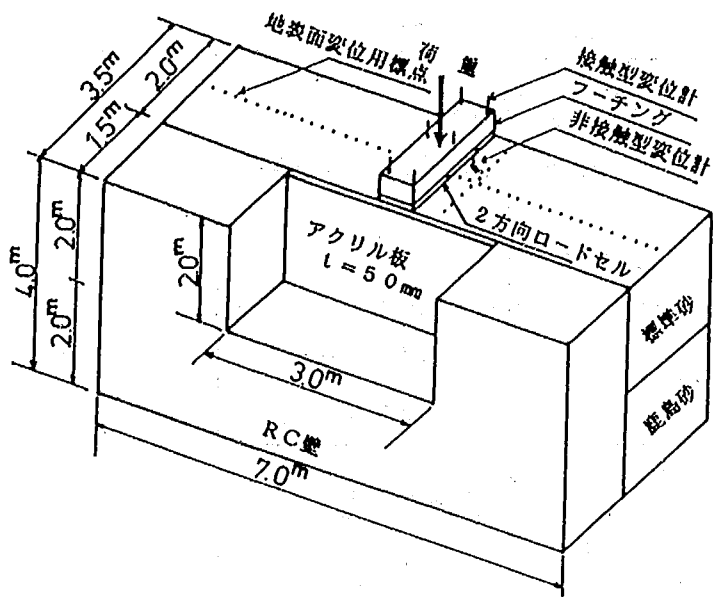


図-3.4.6 大型二次元土槽¹⁾

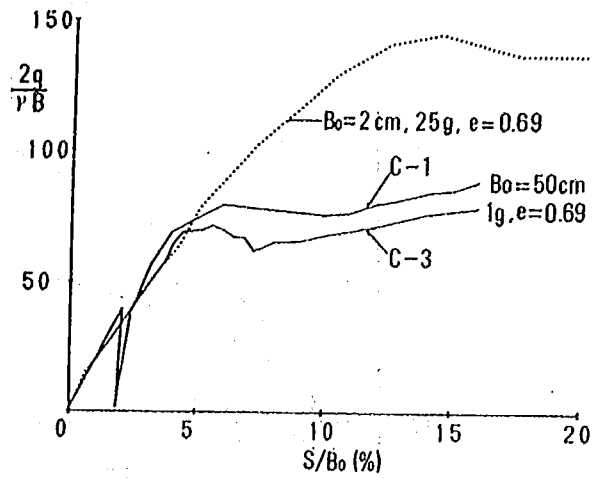


図-3.4.7 遠心模型と重力場の比較¹⁾

(荷重～沈下量曲線)

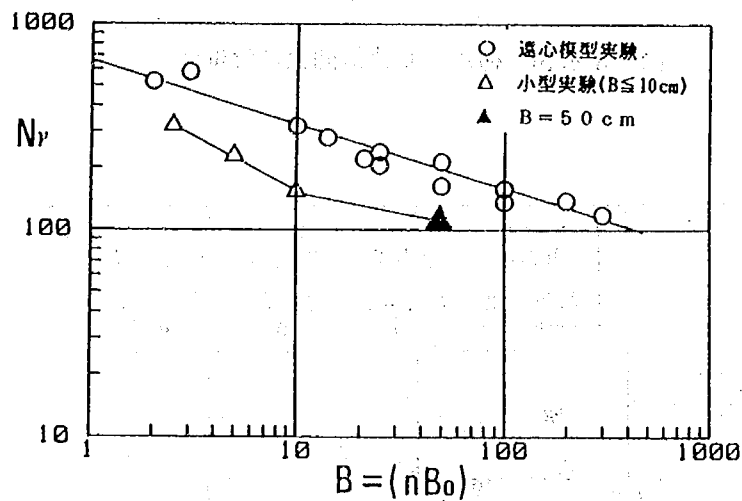


図-3.4.8 支持力計数における寸法効果¹⁾

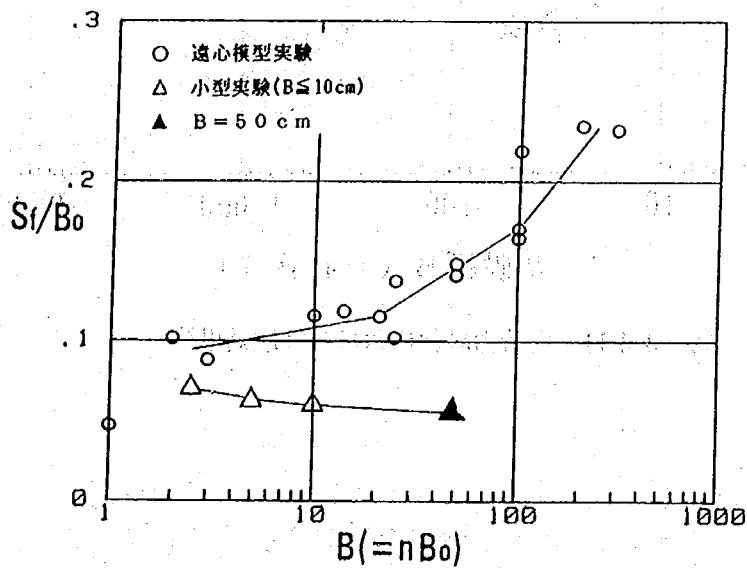


図-3.4.9 沈下特性における寸法効果¹⁾

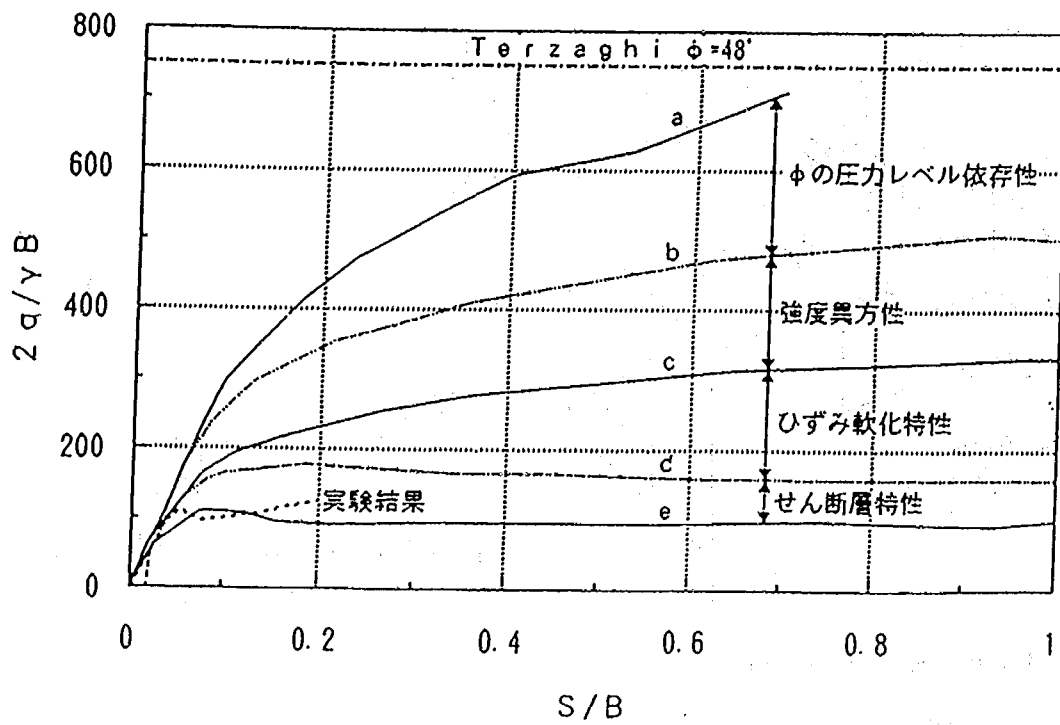


図-3.4.10 荷重～変位量曲線の解析²⁾

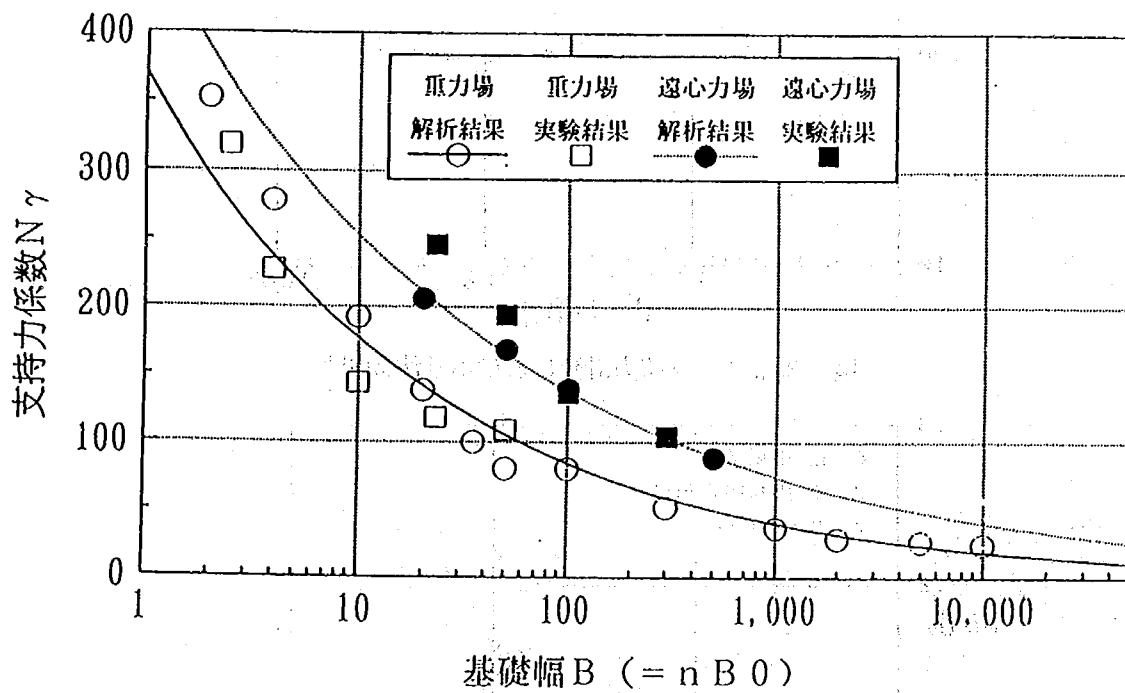


図-3.4.11 支持力計数における寸法効果²⁾

3.4.4 基礎構造物に関連する遠心模型実験

基礎研究室以外が行った基礎構造物に関連する遠心力模型実験のうち、いくつかの例を示す。

① 不攪乱地盤の支持力

砂地盤については、凍結サンプリングを行い、ダイヤモンドカッターにより切断して、模型地盤を作成している。

過圧密粘性土は、ブロック状に整形し、資料容器との隙間に石膏を注入している。

② 杭基礎の支持力・水平抵抗 (図-3.4.12, 図-3.4.13)

杭の模型としてはアルミ、アクリル、ステンレス、ピアノ線・モルタル (場所打ち杭) が使用されている。

③ 側方流動を受ける杭基礎 (図-3.4.14)

④ 砂地盤の受働土圧 (図-3.4.15)

⑤ 砂地盤における泥水掘削 (図-3.4.16)

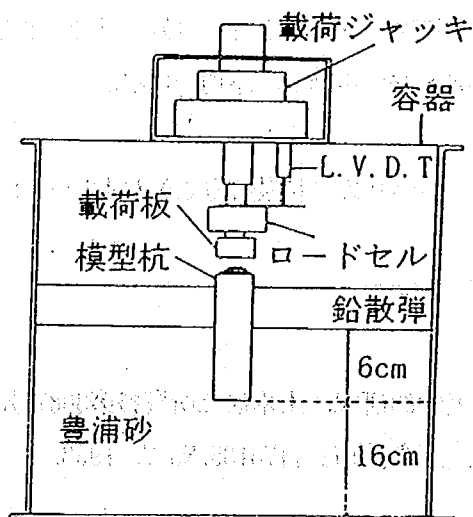


図-3.4.12 杭の支持力実験

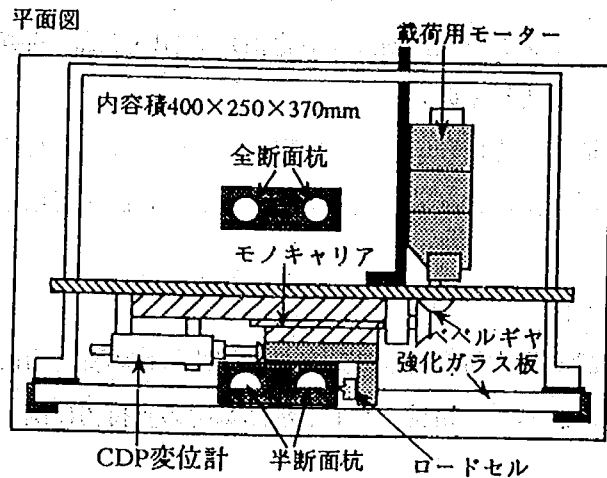


図-3.4.13 杭基礎の水平抵抗実験

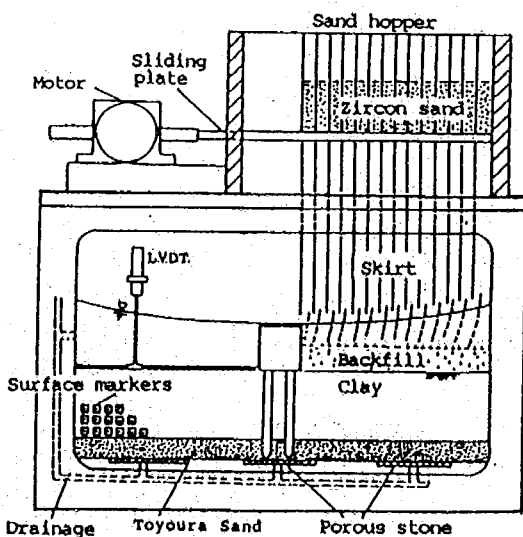
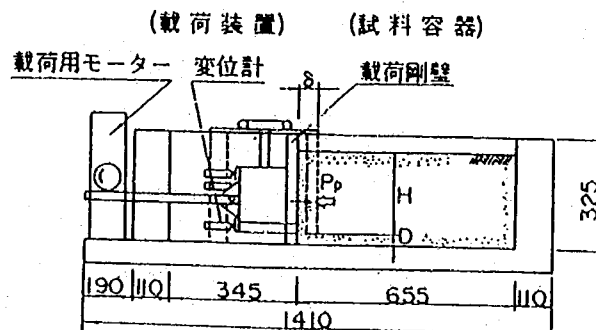


図-3.4.14 側方流動を受ける杭基礎の実験



単位 (mm)

図-3.4.15 砂地盤の受働土圧に関する実験

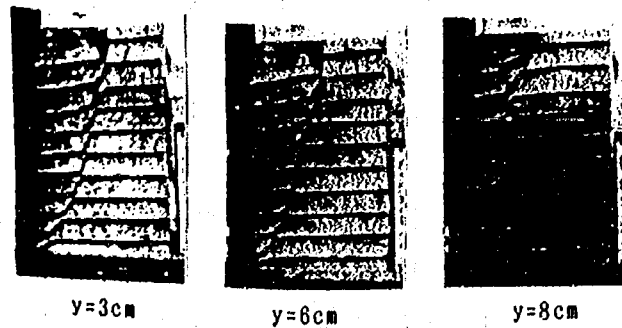


図-3.4.16 砂地盤における泥水掘削に関する模型実験

3.4.5 実験上の課題

構造物基礎に関する遠心力模型実験を行うにあたっては、次の課題がある。

① 実験地盤の作成

砂地盤については、気中落下により作成できるが、実際の基礎の支持層となる良好な地盤の作成は困難。セメント改良地盤（不飽和）においては、間隙中の水が下方へ移動し、不均一地盤。

② 基礎模型の設置

直接基礎においては、模型を地盤面に設置すればよいが、深い基礎（杭基礎など）においては、基礎の設置法および施工法による差などの評価が困難となる。

参考文献

- 1)建設省土木研究所基礎研究室：剛体基礎の支持力に関する実験的研究，土木研究所資料第3087号，1992.
- 2)岡原，木村，知見，井上：剛体基礎の支持力に関する解析，土木技術資料Vol35, No. 7, 1993.

第4章 ユニークな遠心力载荷実験装置の開発の可能性に関する検討

4.1 本体

4.1.1 特徴となり得る項目

遠心力载荷実験装置の本体に関して、ユニークな特徴となり得る項目として以下の3点が考えられる。

(1) 回転効率の向上

装置本体の規模を大きくすると、加速・減速時の慣性モーメントが増加するだけでなく、等速回転時の風損抵抗と軸受け部の摩擦抵抗も増加するため、駆動装置やその電源部も大規模なものとする必要がある。また、これによって消費電力も増加する。何らかの技術により回転効率を向上させることができれば、装置の導入費用、運転費用、維持（メンテナンス）費用の削減が可能となる。

(2) 搭載能力の拡大

長大橋梁の基礎のような大規模な構造物、あるいはダムのような3次元的な構造物をモデル化すると、模型の重量が増加する。また、トンネル掘削など複雑な現象を遠心場で再現すると、模型以外の付帯装置の重量も増加する。さらに、粘性土の地盤模型を遠心圧密により作成する場合、一度に複数の土槽を搭載することができれば、実験の効率化が図れる。これらにより、新装置の導入にあたっては、搭載能力はできるだけ大きなものとしておく必要がある。

(3) 耐久性の向上

実験装置の耐久性を向上させることは、どのような装置にも必要とされる基本的な事項である。特に遠心力载荷実験装置では、装置の一部に何らかの異常が発生すると、回転のアンバランスなどが生じて他の部分にもその影響が波及しやすく、場合によっては重大な事故にも結びつく恐れがあるため、装置の安全性を高めるうえでも、できるだけ本体の耐久性を向上させる必要がある。

4.1.2 既往の技術

(1)に関し、近年導入された多くの大型装置では、スイングアームの部分にカバーを取り付けて、風損抵抗を減少させている。また、オランダの Delft Geotechnics では、風損抵抗を減少させるために回転部の格納ピット全体を真空状態とする試みを行っているが、真空を保つために必要な装置の導入・維持費用まで考慮した場合に、どの程度の回転効率の向上が得られるのかは不明である。

(2)に関し、ドラム型（図2.4参照）の装置は、同一規模の装置における搭載能力で比較した場合にはビーム型の装置よりも効率的であるが、静止時の模型に作用する重力の影響が排除できないという本質的な問題点をあわせ持つ。

(3)に関しては、特筆すべき技術はないものの、新しく製作された装置では、各部の材料、構造、あるいは加工精度、表面処理などのそれぞれの面において、過去の経験に基づいた改良や、他の分野で開発された技術の応用が行われている。

4.1.3 新技術の導入可能性

(1)に関する新技術として、超伝導モーターの利用が考えられる。回転部分が完全に浮上するような構造とすれば、(3)に関しても軸受け部分の耐久性が格段に向上することが期待できる。また、(2)に関しては、複数の回転アームの先端にそれぞれ土槽を搭載する新形式の構造が考えられる。

これらの技術を導入した場合のイメージ図を図-4.1.1に示す。実現の可能性については、今後十分に検討を行う必要がある。なお、想定される問題点としては、以下の2点が挙げられる。

- ・超伝導モーターが発生する磁場が電気計測へ及ぼす影響
- ・複数アームとした場合の回転バランスの制御方法

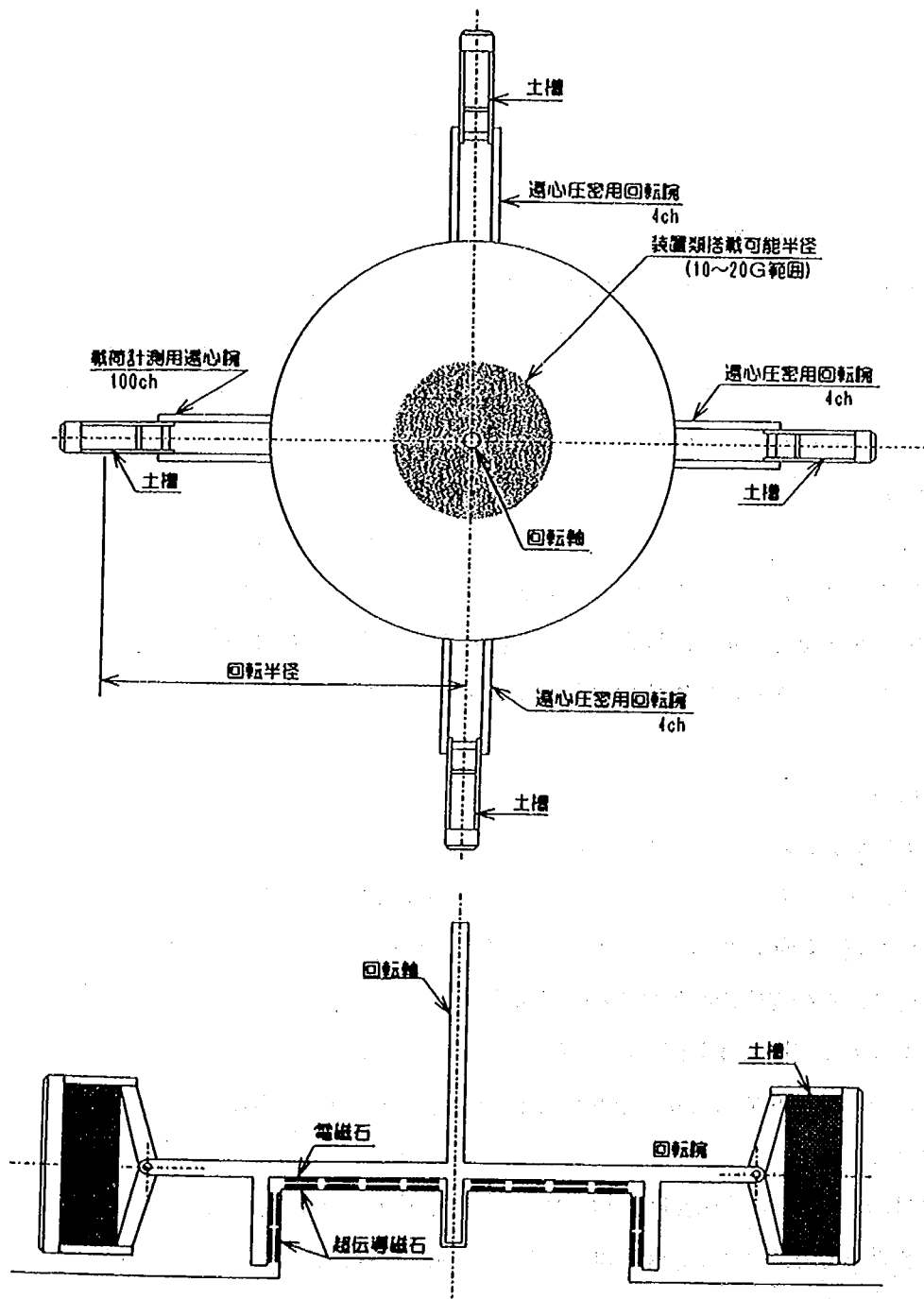


図-4.1.1 超伝導モーターを利用した4土槽搭載装置のイメージ図

4.2 油圧・水供給装置

4.2.1 油圧供給装置

ロータリージョイントを経由させて非回転場から回転場に油圧を供給する方式では、供給油圧の圧力が小さい（1 kgf/cm²程度）ため、土槽部の各種アクチュエータの能力も限定されたものとなる。大きな油圧を得るための方式としては、油圧供給装置本体を回転腕上に載せ、電源および制御信号だけを非回転場から回転場に伝達して、回転場内で発生させた油圧を土槽部の各種アクチュエータに供給する方式が考えられる。回転腕上搭載型の油圧供給方式のイメージを図-4.2.1に示す。なお、この式では回転場内でクローズした油圧供給方式となり、メンテナンスの低減にも寄与するものと考えられる。

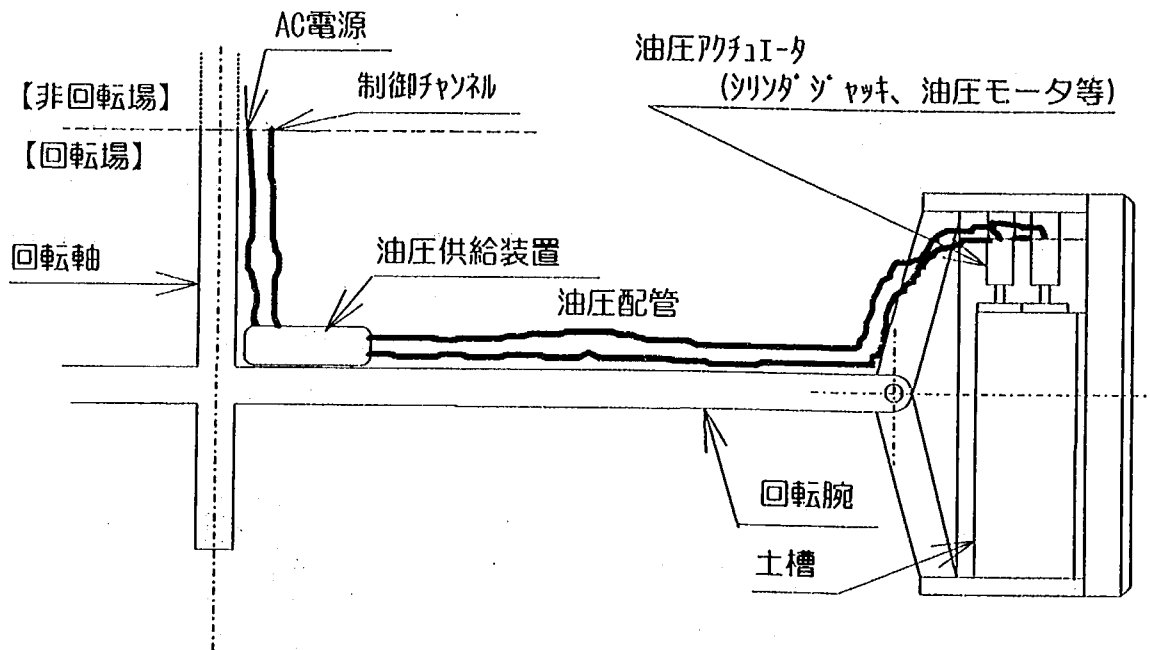


図-4.2.1 回転腕上搭載型の油圧供給方式のイメージ

4.2.2 水供給装置

ロータリージョイントを経由させて非回転場から回転場に水を供給する方式では、水に含まれる不純物の析出と回転に伴う摩擦熱のため、焼け付き等の異常が生じやすくトラブルの原因となる。このようなトラブルを避けるためには4.2.1で述べた油圧供給装置と同様に水供給装置本体を回転腕上に載せる方式とすることが考えられる。

4.3 模型地盤作成装置

4.3.1 用途

砂撒き装置を水平方向に移動させながら遠心場で液体中に砂を散布し、水平飽和砂地盤を直接作成するものである。数種類の砂を順に散布することにより、あるいは砂の散布速度等を変化させて堆積時の密度を変えることにより、水平成層状の互層砂地盤が作成できるようにする。

この方法は、重力場における振動台実験では数多くの実績のある地盤作成法であるが、遠心場での利用例は現時点では報告されていない。従来は、重力場で乾燥砂地盤の底部より間隙流体を注入して飽和砂地盤を作成し、これを遠心場で圧密することが行われていたが、粘性の高い間隙流体を用いたり、細粒分を含む砂質土を用いた場合には、透水速度が低下するために飽和に要する時間が著しく長くなるという問題があった。

4.3.2 既往の技術

あらかじめ作成しておいた地盤上に、遠心場で盛土を築造する装置（サンドホッパー）は既に開発されており、土木研究所内では施工研究室が保有している。オランダのDelft Geotechnicsの装置を図4.3.1¹⁾に示す。この装置は、コンピューターで独立に制御できる1,118個のセルから構成されており、軟弱地盤上への盛土の段階施工の研究などに利用されている。ただし、水平地盤を作成するうえでは、砂撒き装置を水平方向に移動させる方式のほうが、層厚の制御が容易に行えることが予想される。

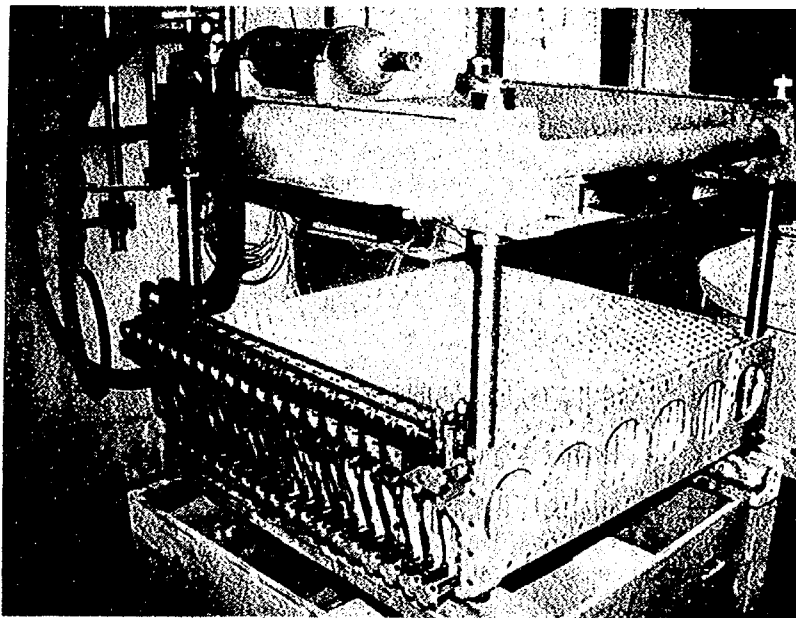


図-4.3.1 Delft Geotechnicsのサンドホッパー¹⁾

4.3.3 仕様（案）

図-4.3.2に示すように、重力場における実験で使用している砂撒き装置を自動化して土槽の上部に設置する。互層地盤を作成する場合には、回転を一旦止めて異なる地盤材料を砂撒き装置に供給する。技術的な問題点も特に見あたらず、必ずしも「ユニーク」な機能とはいえないが、実験の効率は格段に向上することが期待される。

主な仕様を以下に示す。

- ・最大遠心加速度：100G程度
- ・砂撒き装置の移動速度と砂の散布量を数段階に変えられるようにする。
- ・砂の落下高さが一定となるように砂撒き高さを自動調整する機能を持たせる。

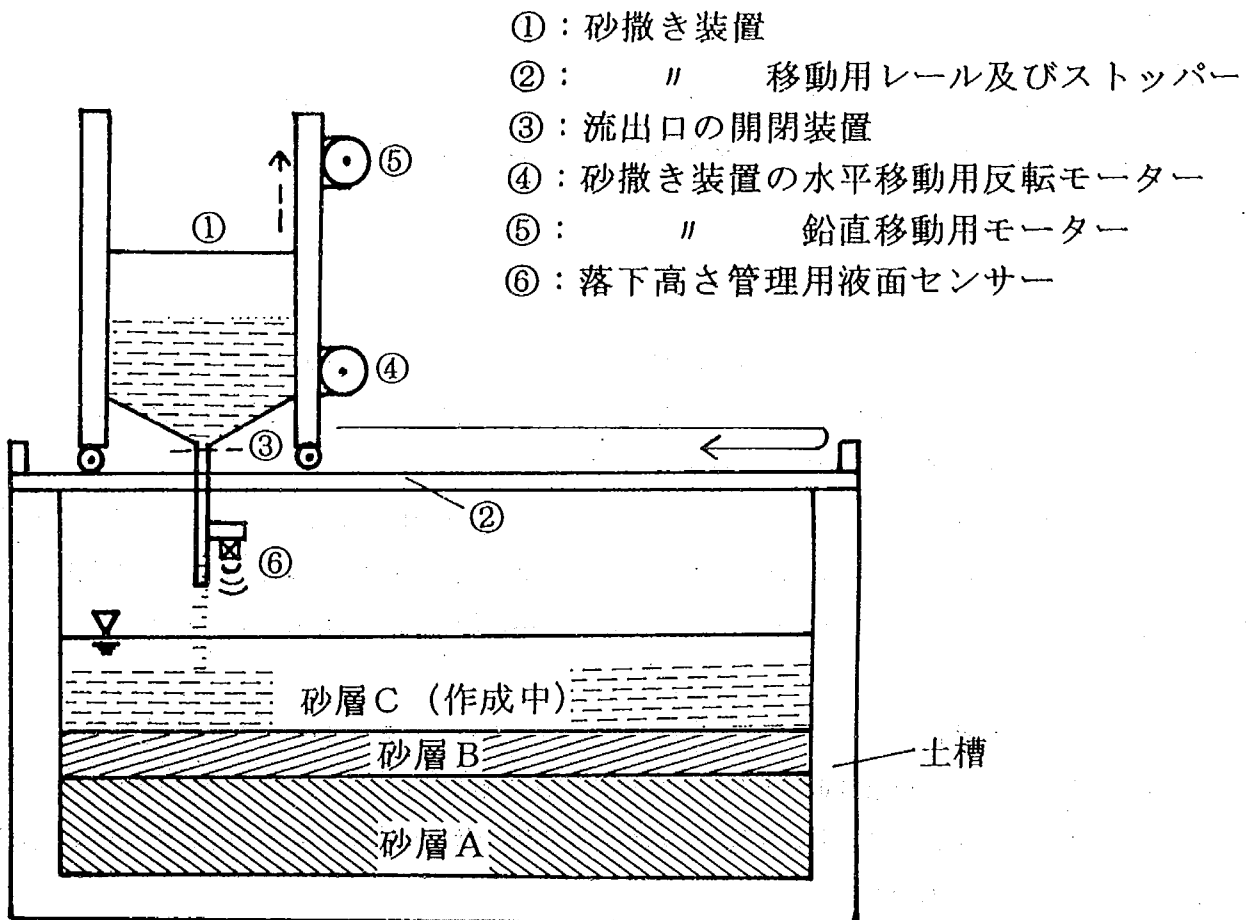


図-4.3.2 模型地盤作成装置のイメージ図

参考文献

- 1) Delft Geotechnics: The Development of a Sand Hopper, Centrifuge '92 INFO Special, p.3, 1993.

4.4 模型地盤の加振装置

4.4.1 特徴となり得る項目

地震動を対象とした遠心場での模型地盤の加振は、非常に大きな加速度レベル（数G～数十G）と非常に高い加振周波数（数十Hz～数百Hz）で行う必要がある（動的な現象の相似則については表2.2参照）。また、加振装置自体が遠心加速度に耐えられるような構造とする必要もある。このような加振装置に関して、ユニークな特徴となり得る項目として以下の2点が考えられる。

(1) 加振能力の拡大

従来よりも大規模な構造物模型（具体例は4.1.1参照）を搭載した場合、その重量の増加にあわせて加振力を拡大する必要が生じる。また、既存の加振装置では、比較的広範囲な周波数成分を含む実地震動を再現する面でも加振能力が不足しており、加振周波数の制御範囲も拡大する必要がある。

(2) 加振負荷の低減

同じ模型重量、加振力のもとでは、軽量の土槽を用いたほうが大きな加振加速度が得られる。また、可動部と固定部の間の摩擦抵抗を低減すると、加振効率が向上し、加振波形の制御精度も向上することが期待される。

4.4.2 既往の技術

(1)に関し、近年導入された多くの加振装置は、油圧アクチュエーターを電磁サーボで制御する方式を採用しており、加振力は最大で数tonfのオーダーである。また、中央大学では、比較的高い周波数で大きな出力の得られる圧電素子を利用した加振装置を導入した。

(2)に関しては、土槽を軽量化するために材料としてアルミニウムを用いた例があるが、アルミニウムは剛性が比較的小さい点に留意する必要がある。また、摩擦抵抗の低減に関しては、高圧の気体を利用して土槽を浮上させた状態で加振を行うアイデアがあったが、実用化のレベルには到達していない。

4.4.3 新技術の導入可能性

(1)に関する新技術として、複数の油圧アクチュエーターの並列利用が考えられる。この技術は、重力場で用いられる振動台にすでに数多く導入されているが、遠心場で数十tonfオーダーの加振力が得られれば、性能自体が「ユニーク」なものとなる。

(2)の土槽の軽量化に関しては、チタンなどの軽量高剛性材料の利用が考えられる。また、(2)の摩擦抵抗の低減に関しては、超電導磁石を利用して土槽を浮上させることが考えられる。

なお、想定される問題点として、以下の3点が挙げられる。

- ・超電導磁石が発生する磁場が電気計測へ及ぼす影響
- ・浮上方式で水平加振する場合の鉛直動・ロッキング動の制御方法
- ・軽量高剛性材料の加工性

4.5 模型構造の水平方向牽引装置

4.5.1 実験の目的

液状化地盤中の杭基礎の地盤反力を検討する場合、1 G場での実験においては地盤の相似則を合わせることが難しく、実大規模の実験は大規模な土槽を使うなど、実験にかかる費用・労力は莫大なものとなる。しかし遠心場では土槽作成が容易でかつ、相似則をあわせることが可能である。

ここでは耐震設計上重要な液状化時の地盤の反力等について、遠心载荷装置を使って実験を行う。

4.5.2 実験概要

実験地盤を加振し杭頭水平牽引実験を行うことにより、液状化地盤の地盤反力を評価する。実験装置は図-4.5.1に示すように土槽内の地盤が完全液状化した直後に土槽上端フレーム上にセットされた反転リニアモーターによって杭頭部を牽引する。荷重は杭とモーターの間に設けられたロードセルによって測定する。杭頭変位はワイヤーの移動量を変位計で測定する。

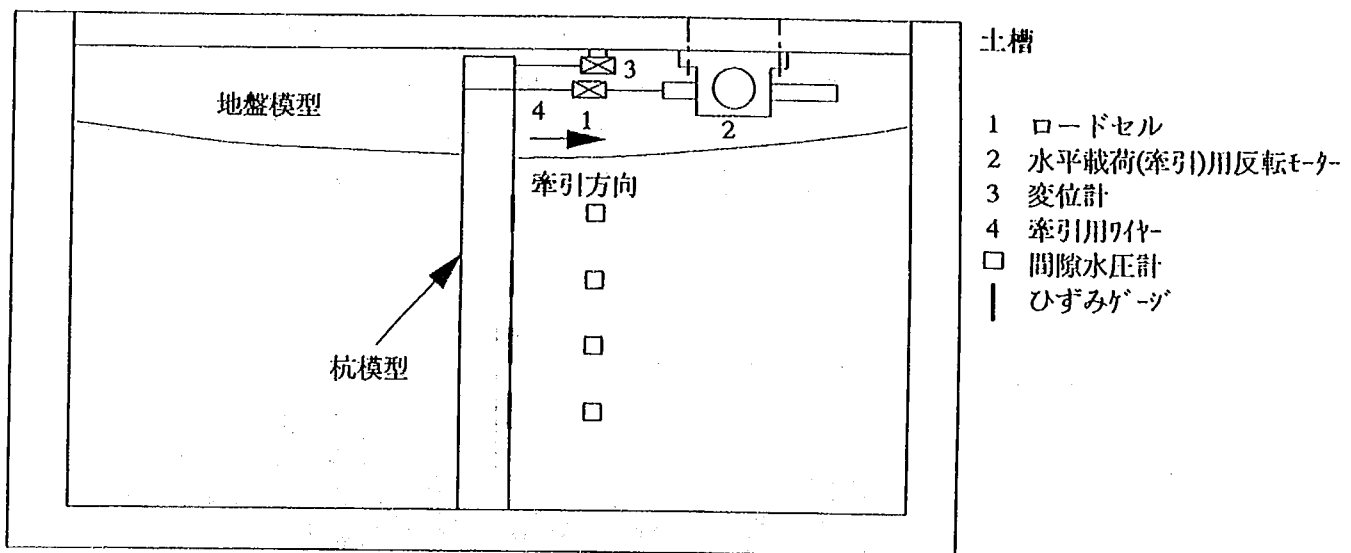


図-4.5.1 遠心力場での杭の水平载荷（牽引）実験の概要

4.5.3 仕様（案）

最大遠心加速度は50G程度必要である。反転リニアモーターの制御は変位制御で行うものとし、ロードセル容量は200kgf程度、モーターの最大トルクは500kgf程度とする。

4.6 トンネル掘削装置

従来の遠心力载荷装置を使用したトンネルの模型実験におけるトンネル掘削は、液体または気体を詰め込んだゴムチューブを地盤内に埋め込み、遠心载荷中にゴムチューブ内の液体または気体を排出することによりゴムチューブを収縮させる方法、トンネル断面の形状を有する筒状の剛体を地盤内に埋め込み、遠心载荷中に剛体を油圧ジャッキなどにより引き抜く方法などによりシミュレートされてきた。

実物と全く同じ応力履歴を模型地盤で再現するためには遠心力場において実物と同様のトンネル掘削を行うことが望ましいが、トンネル掘削を実際に行うための装置はある程度の大きさを有するため、掘削装置を設置する実験土槽もある程度の大きさが必要となる。今後、遠心力载荷装置の規模を大きくすることにより搭載可能な実験土槽を大きくすることができれば、実際にトンネルを掘削するシステムの導入は可能となる。

図-4.6.1は、遠心力载荷中に実際にトンネル掘削が可能となる装置の概念図を示したものである。トンネル掘削装置は、カッターおよびスクリーコンベアから構成され、トンネルの掘削は装置の先端に設置したカッターを回転させることにより実施し、ずり処理はスクリーコンベアを回転させることにより土槽内を搬送した後、真空ポンプにより吸い挙げて土槽外に搬出する構造となっている。また、トンネル掘削装置全体は、油圧ジャッキ等により推力を与えることにより推進される。

トンネル掘削装置の細部については今後の詳細な検討を要するが、遠心力場における実際のトンネル掘削は上記のような構造を有するトンネル掘削装置により可能になるものと考えられる。

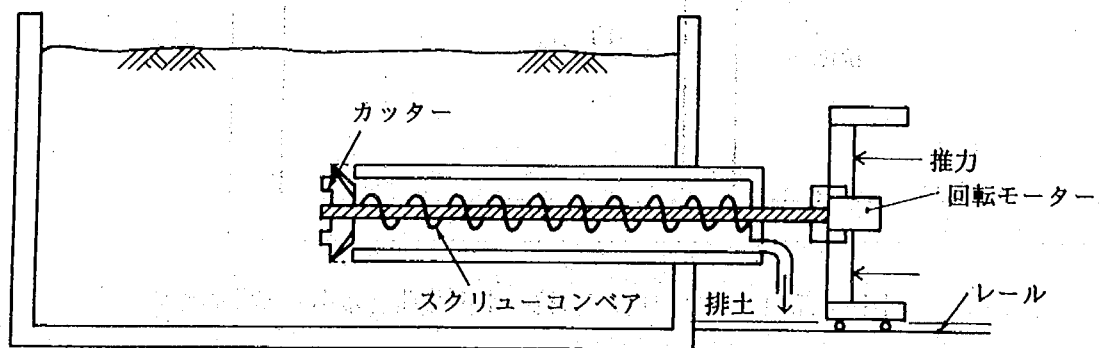


図-4.6.1 トンネル掘削模型実験装置

4.7 画像解析装置

4.7.1 画像解析装置に必要とされる性能

遠心载荷実験は、模型の相似則を考慮して動的载荷波形の時間軸を圧縮する等、現象が高速となっている。そのため、画像解析を行う場合に画像の収録時間間隔（シャッター間隔）を高速にし、露出時間を短くすることが望まれる。露出時間を短くするために、ストロボ等を用いて光量を増やすとともに、またストロボ照射のタイミングとビデオカメラのシャッターを高速で同期させる必要がある。これらの条件を一般のビデオカメラ、ストロボで実現することは困難であるため、高速ビデオカメラ、高速ストロボ及びこれらを同期する装置などを導入する必要がある。

また、カメラ、ストロボを、プラットフォームに直接設置するためには高耐圧のものが必要である。現状の高速カメラでは、衝撃的な加速度に対して30Gまで耐えられることが確認されているが、それ以上の連続的な重力に耐えられる高速カメラはまだ開発されていない。そのため、50G・100Gといった試験を行う場合は、高速カメラを遠心力があまりかからない遠心载荷装置の腕の付け根に設置するとともに、反射鏡を腕の先端部の土槽に設置して撮影する必要がある。

さらに、複数のカメラをプラットフォームに設置するのは困難であるため、広い範囲を撮影する場合には、マーカーが小さくなるため、カメラ、ビデオデッキ、画像解析装置の分解能を上げる必要がある。振動実験施設に設置されている画像解析装置の分解能は512×512画素であるため、所要の解像度を得るための撮影範囲はかなり制限される。それに対して、現在市販されているハイビジョン専用画像解析装置は、分解能が通常のビデオ専用のものと比較して約4倍（2048×2048ドット）であり、所要の解像度でかなり広い範囲を撮影できる。しかし、ハイビジョン専用カメラは高耐圧のもの、シャッター間隔が高速なもの、小型のものはまだ開発途上であり、現状では遠心载荷装置への適用は困難である。

4.7.2 画像解析装置の設置（案）

(1) 現状での設置（案）

4.7.1で必要とされる条件を考慮して、現状で可能な高速カメラ、ストロボ等の遠心载荷装置への設置方法を提案する。図-4.7.1に遠心载荷装置へのカメラ、ストロボの設置方法、表-4.7.1に現状で実現可能な諸元を示す。

カメラの耐圧が衝撃に対して30G程度であることから、遠心力があまりかからない遠心载荷装置の腕の付け根に設置し、反射鏡を用いて土槽内の様子を撮影することになる。この場合カメラと反射鏡のぶれ等に注意する必要がある。カメラのシャッター間隔は、現在最速で1/20,000,000秒のものがある（核融合反応や金属結晶破壊等の撮影に用いられる）が、非常に高価であるし、対象とする問題が地震等であれば、1/2,000秒程度で十分であると思われる。

なお、カメラのシャッター速度の高速化にともなって露出不足となるため、ストロボ等の導入が必要となる。ストロボも耐圧が30G程度であることから、プラットフォームには設置せず、遠心载荷装置の外部にいくつか配置し、高速カメラのシャッターと遠心载荷装置の回転を同期させる。このためには、同期させるための特殊な制御装置が必要となる。

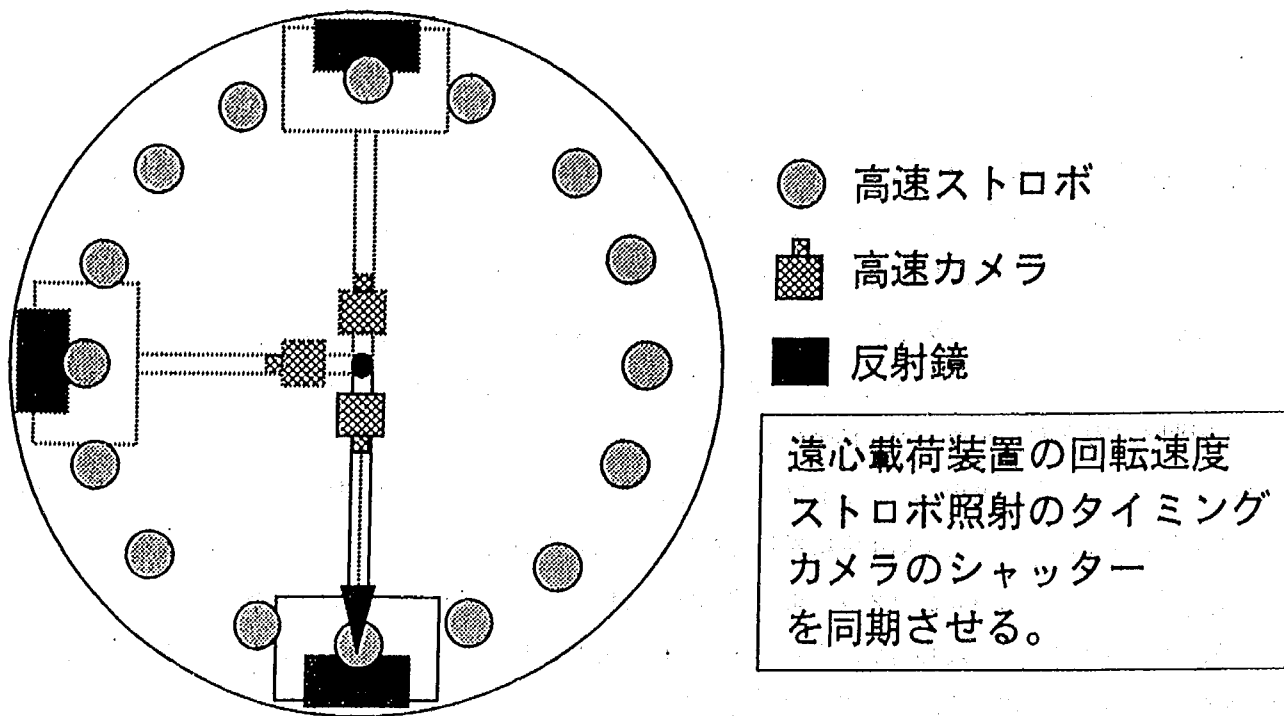


図-4.7.1 遠心载荷装置への高速カメラ、ストロボの設置方法

表-4.7.1 現在望み得る画像収録・解析装置の諸元

必要機器	項 目	必 要 な 諸 元
ビデオカメラ	耐圧	衝撃で30G~50G 来年度から宇宙開発関係 (NASA) で高耐圧テスト開始 (株式会社 NAC)
	シャッター間隔	1/500秒~1/2,000秒
	露出時間	1/500秒~1/10,000秒
	撮影画素数	580×434画素 (シャッター間隔1/500秒のとき)
ストロボ	耐圧	高速カメラと同様
	照射間隔	1/2,000秒以上
画像解析装置	画素数	512×512
	輝度レベル	8ビット
	デジタル化時間間隔	1/2,000秒以上

上述のように撮影された映像から、対象物の移動等を計測する画像解析装置については、分解能が非常に重要であるが、通常のビデオカメラおよび高速カメラでは512×512画素程度である。また、カメラを複数設置することが困難であるため、対象とする模型の画像解析したい部分のみを拡大して撮影し、解析を行う必要がある。そのため画像解析範囲制約が大きい。

(2) 将来望まれる設置（案）

上述したように、現在実現可能な画像収録・解析は、カメラおよびストロボの耐圧、画像解析の分解能の点で限界がある。ここでは、将来、高速、高耐圧のハイビジョンカメラ、高耐圧のストロボ等が実用化された場合の適用方法について示す。

画像収録解析装置の望ましい諸元を表－4.7.2に示す。高速カメラ・ストロボの耐圧が大きい場合、直接プラットフォームに設置できるため、反射鏡を設置する必要がなく、撮影のブレは抑えやすい。また、ハイビジョン等により高精度な画像の収録・解析が可能となれば、土槽全体を単独のカメラで精度よく解析が行えよう。

表－4.7.2 望ましい画像収録・解析装置の諸元

必要機器	項 目	必 要 な 諸 元
ビデオカメラ	耐圧	200G以上
	シャッター間隔	1/500秒～1/2,000秒
	露出時間	1/500秒～1/10,000秒
ストロボ	耐圧	200G以上
	照射間隔	1/2,000秒以上
画像解析装置	画素数	ハイビジョン対応：2048×2048 現状でもこの分解能は可能 (株式会社 ネクサス)
	輝度レベル	8～32ビット
	デジタル化時間間隔	1/2,000秒以上

4.8 土中変位等の計測技術

遠心力载荷装置により、地盤の挙動あるいは、地盤と構造物の相互作用に関する模型実験を行う際に、土中の挙動をいかに把握するかということは重要な項目である。

既往の文献を基に、土中計測についてまとめる。

4.8.1 地盤中の挙動

(1) 地盤中の変位

地盤中の変位を測定する方法として、次の方法がある。

- | | |
|--------------------------|------------------------------|
| ① アクリル面にターゲット設置 | 写真撮影により把握 (図-4.8.1, 図-4.8.2) |
| ② " 素麺設置 | " (図-4.8.3) |
| ③ " 色砂 | " |
| ④ " メッシュ付きメンブレン | " |
| ⑤ 地盤中にターゲット設置 | X線撮影により把握。 |
| ⑥ " 色砂 (素麺) | 実験後掘削し、観察 |

なお、写真撮影により把握した変位を基に、地盤中のひずみに変換できる。

しかしながら、これらの方法はデータの整理などに時間を要するため、他分野での計器を含め検討する必要がある。その一つとして、地盤中に微小発信装置をうめこみ、位置を計測する方法が考えられる。

(2) 地盤中の間隙水圧 (図-4.8.4)

① 間隙水圧計

(3) 地盤中の応力

現状では困難である。

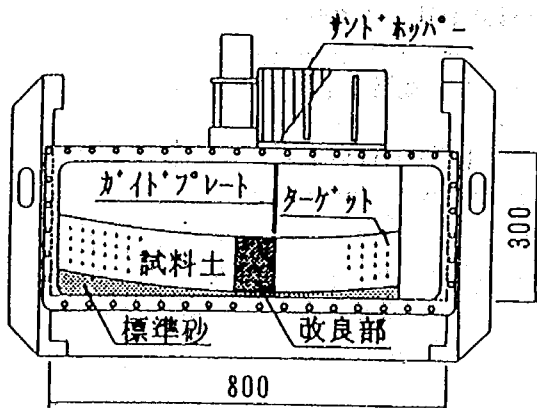


図-4.8.1 ターゲットによる計測

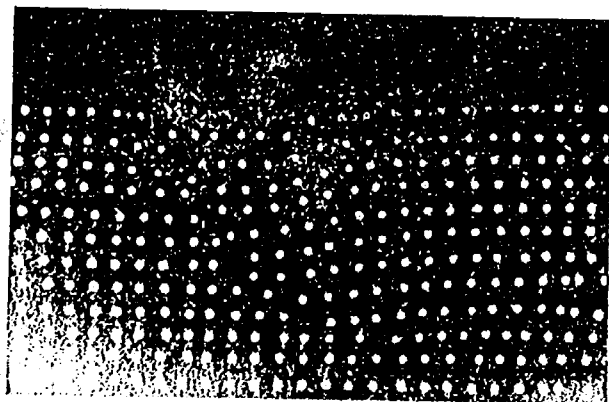


図-4.8.2 模型地盤のX線写真

4.8.2 構造物の挙動・圧力等

(1) 構造物の挙動

①地上部の変位計

②アクリル面に構造物を設置し、写真撮影

Ex. 半円形の杭模型

(2) 構造物への土圧、水压等

①模型中に土圧計、水压計形を設置し、計測

課題：土圧計により測定することの問題

②分割ロードセル（面的に設置）（図-4.8.5、図-4.8.6）

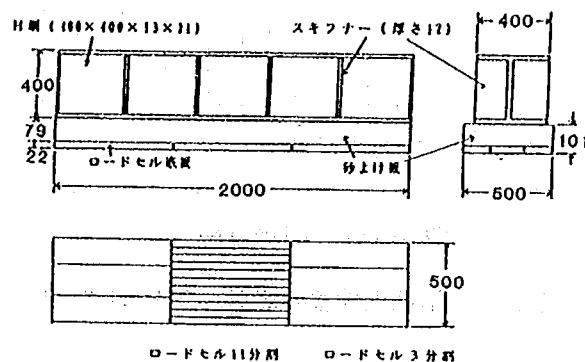


図-4.8.5 フーチング¹⁾

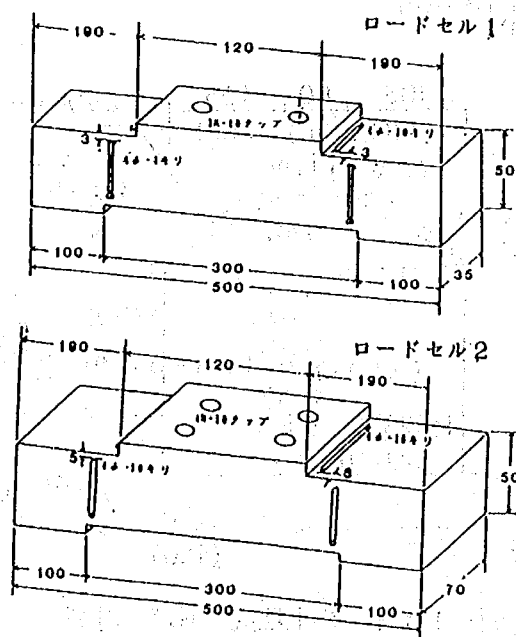


図-4.8.6 2方向ロードセル¹⁾

参考文献

1)建設省土木研究所基礎研究室：剛体基礎の支持力に関する実験的研究，土木研究所資料第3087号，1992.

4.9 地盤強度の計測技術

従来の遠心力载荷模型実験における模型地盤の強度は、実験終了後の模型地盤に対するベーン試験などの原位置試験、あるいは模型地盤と同じ含水比、密度等を有する供試体に対する一面せん断試験、3軸圧縮試験などの要素試験から求められことが多い。

ここでは遠心力場にある模型地盤の強度を計測する試験方法として、1 gの重力場で実施されている原位置試験の中から機構的に遠心力载荷状態での実施が可能な試験として以下の試験の適用を考える。

4.9.1 コーン貫入試験

コーン貫入試験は、図-4.9.1に示すような先端がコーン状になったロッドを地盤中に押し込んで、その時の貫入抵抗を測定し、非排水強度を求める試験である。1 gの重力場においてこれまでに実施されたコーン貫入試験結果によれば、先端抵抗 q_c と非排水強度 c_u との関係は経験的に次式で与えられる¹⁾ことが明らかになっており、遠心力場においても実験データの蓄積を行って遠心力実験用のコーン貫入試験装置を用いた場合の貫入抵抗と非排水強度との関係式を見い出せば、非排水強度を得ることが可能となる。

$$q_c = 14 \sim 17 c_u$$

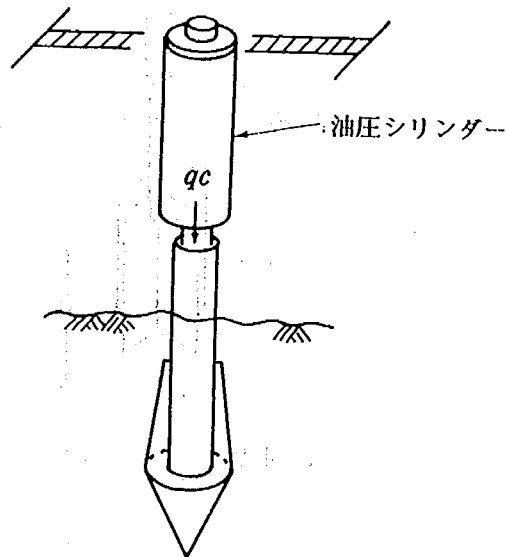


図-4.9.1 コーン貫入試験装置

4.9.2 ベーン試験

ベーン試験は、図-4.9.2に示すようなボーリングロッドの先端に十字型の羽根を付けたものを地盤中に押し込み、それを地上で回転させ、回転時の抵抗を測定しせん断強度を求める試験である。せん断強度 τ は破壊時に加えたモーメント M を用いて次式で与えられる。

$$\tau = \frac{2M}{\pi D^2 H (1 + D/3H)}$$

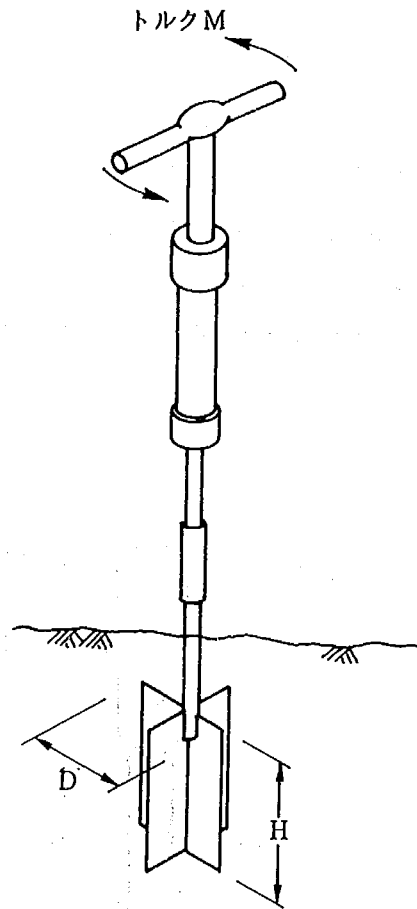


図-4.9.2 ベーン試験装置

4.9.3 ねじりせん断試験¹⁾

ねじりせん断試験は、図-4.9.3に示すような周辺部にリング状の穴のあいた円盤を水平地盤に設置して周辺部の穴を通して釘を打ち込み、円盤の外側と中央部の地盤を除去した後、円盤を回転させ、この時の応力と回転角を計測することによりせん断強度を求める試験である。せん断強度 τ は、破壊時に加えたモーメント M を用いて次式で与えられる。

$$\tau = \frac{3M}{2\pi (R^3 - r^3)}$$

また、本試験においては、一面せん断試験と同様にせん断面に垂直応力を作用させるため、破壊基準としてMohr-Coulombの破壊基準を用いた場合には粘着力 c 及び内部摩擦角 ϕ を地盤の強度定数として求めることが可能となる。

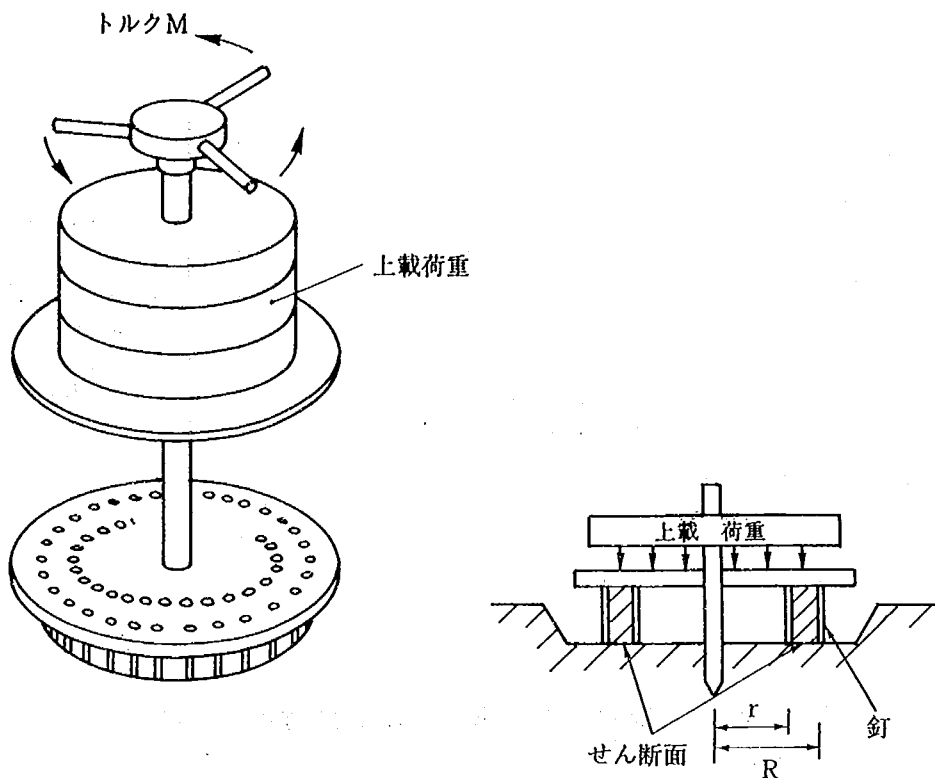


図-4.9.3 ねじりせん断試験装置

4.9.4 地盤の変形係数の測定

(1) 目的

1 G場の実験では相似則上、定量的な実地盤との対応を考えることは困難であるが、遠心載荷実験でせん断土層を用いると定量的な評価が可能となる。遠心載荷実験結果の実地盤への対応を考える場合、加振前の土質定数（密度、初期せん断変形係数 G_0 等）を求めておくことが必要となる。そこで、原位置試験で行われる板叩き法により、地表面にSH波を発生させ、S波速度 V_s (m/sec) を求め、初期せん断変形係数 G_0 (tonf/m²) を求める。

(2) 実験概要

土槽上端に固定したS波発生装置本体から板ばねに固定された重りを地盤上に設置したプレートに衝突させS波を発生させる。地盤内に埋設された加速度計で波形をピックアップし、深さと到達時間の関係からS波速度 (m/sec) を求める。この実験は、遠心載荷時において本実験（加振実験）の前に行うものとする。

(3) 仕様 (案)

重りをプレートに確実に衝突させるため本体に設置された高さセンサーと上下方向移動用モーターで圧密沈下による高さの変化を補正できるものとする。また時間の相似率は n (遠心加速度 $50G$ の場合, $1/50$) であるため, 加速度計のサンプリング周波数は 1000Hz 以上が必要となる。

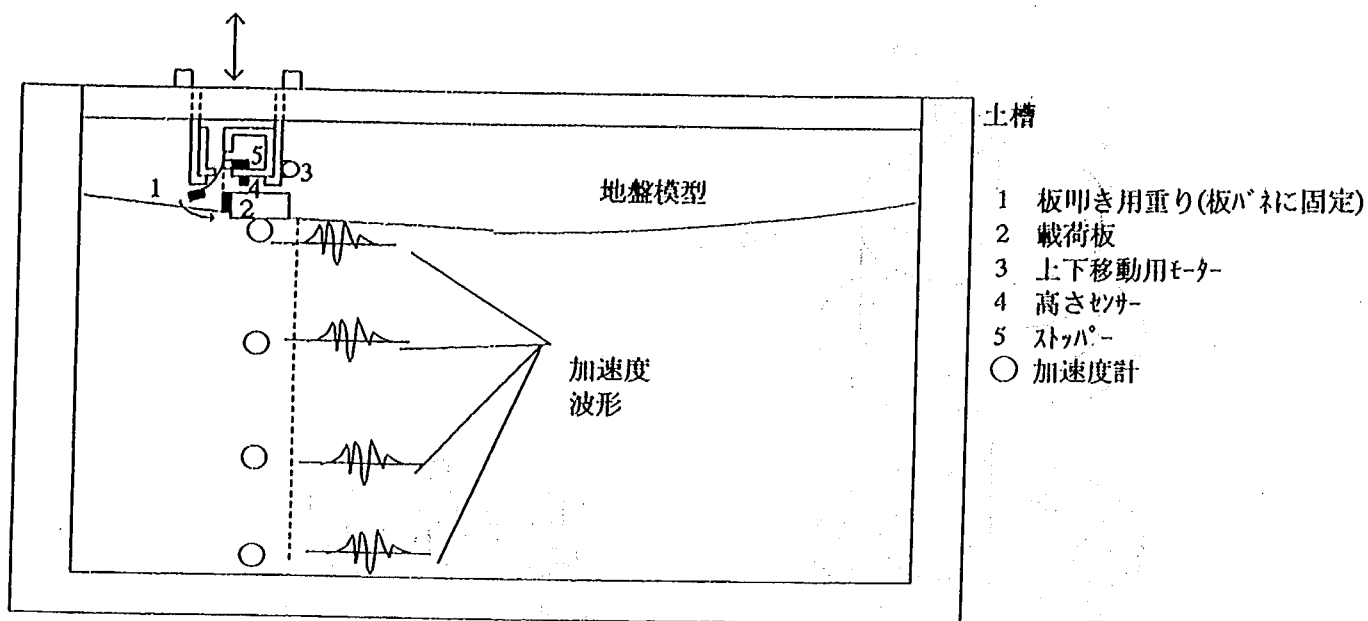


図-4.9.4 遠心力場での地盤のS波速度測定法の概要

参考文献

- 1) 土質工学会: 土の強さと地盤の破壊入門, p. 220, 1987.
- 2) 西田一彦, 田中誠一, 田中久丸, 辻本勝彦: 現場せん断試験の一方法, 第24回土質工学研究発表会, pp. 227-228, 1989.

4.10 メンテナンスの低減のための技術

4.10.1 軸受け機構

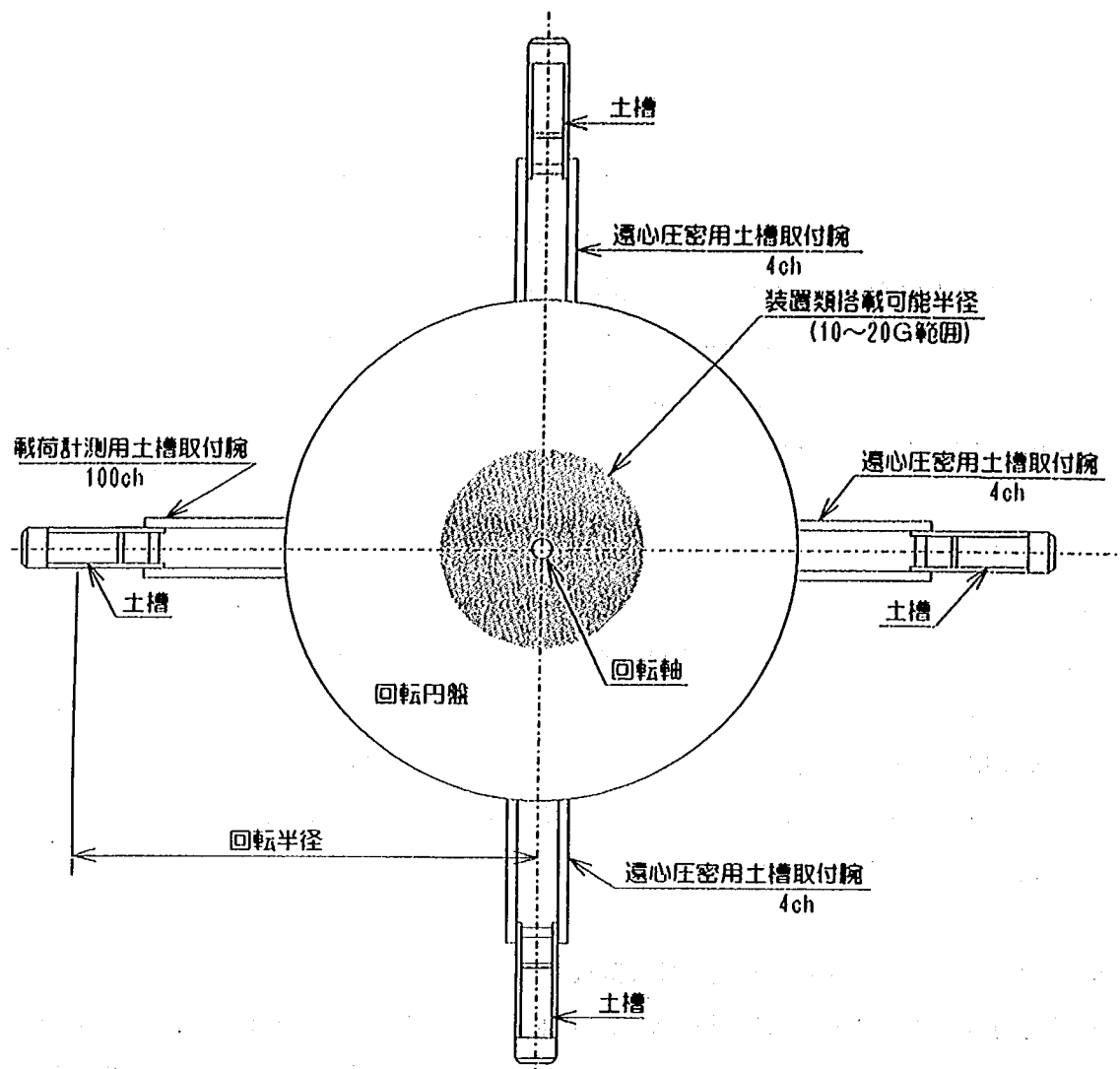
既存の遠心力载荷装置では、回転軸の支持を軸受けベアリングによって機械的に行っている。この軸受けベアリングは回転に伴う磨耗等によりトラブルの原因となりやすいため、メンテナンスにおいて最も注意を要する部分となる。このようなメンテナンスを低減するためには、回転運用時に回転部を非接触で支持するような機構が望まれる。非接触の支持機構としては磁気浮上方式が考えられる。磁気浮上型軸受け機構のイメージを図-4.10.1に示す（図-4.1.1と同一）。なお、この方式では回転部の構造が軸に結合されたアーム状のものではなく、円盤状となるが、円盤上面のスペースは回転場内で使用する各種付属装置の搭載スペースとして有効に利用できるものと考えられる。

4.10.2 ロータリージョイント

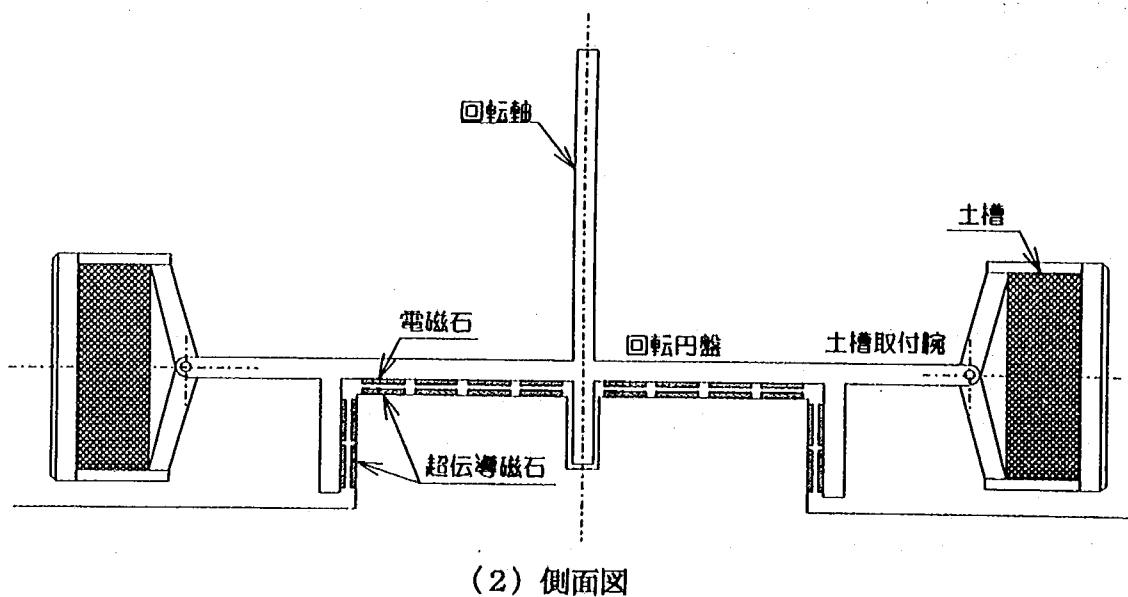
土槽部への油圧および水供給は、非回転場からロータリージョイントを経由して回転場に供給する構造となっている。このロータリージョイントは、水に含まれる不純物の析出および回転に伴う摩擦熱のため、焼け付き等の異常が生じやすくトラブルの原因となる。このようなトラブルを避けるためには供給水として常に蒸留水を用いるという方法もあるが、この方法では供給水の取り扱い等が面倒となる。このほかの方法としては、ロータリージョイントそのものを使用せず、4.2で述べたように回転腕上に油圧および水供給装置を載せる方法が考えられる。

4.10.3 メンテナンスのための不稼働日数の低減

既存の遠心力载荷装置では、装置駆動、制御・計測チャンネル等が単一もしくは限定された数の系統で構成されているため、ある系統に異常が生じた場合には、その修理等のために装置の稼働を休止しなければならないことがある。このような不稼働日数を低減するためには、ある系統に異常が生じても他の代替系統により正常な作動が可能となるシステムが望まれる。なお、異常箇所の修繕等で運用休止期間が必要なものについては集中的なメンテナンスの際に実施するようにする。



(1) 平面図 (4土槽同時圧密時)



(2) 側面図

図-4.10.1 磁気浮上型軸受け機構のイメージ

第5章 土木研究所に求められる遠心力載荷実験装置

5.1 装置本体の特徴

5.1.1 装置規模

表-5.1に示すように、装置規模について各研究室の要望を整理すると大きく2つに分類できる。1つは、有効回転半径4m、土槽内体積150リットル、搭載容量200G・ton程度の「中型」、もう1つは、有効回転半径7m、土槽内体積400リットル、搭載容量500G・ton程度の「大型」である。いずれも最大遠心加速度は200G程度、測定チャンネル数は50～100点程度である。後者は竹中技術研究所が所有する装置とほぼ同規模であり、日本では最大級となる。

なお、加振容量は、遠心加速度100Gのもとで500gal相当の加振を行うことを想定している。

表-5.1 土木研究所で必要とされる装置規模

有効回転半径 (m)	4			7		
土槽寸法 (cm) (長さ×高さ×奥行き)	100×50×30	150	せん断・箱	200×70×30	420	箱
内体積 (ℓ)	160×30×30	144	せん断・箱	80×50×80	320	箱
種類 (せん断箱形・箱形)	60×50×50	150	箱			
	100×30×50	150	せん断・箱			
	60×50×40	120	箱			
	100×60×30	180	箱			
	60×70×40	168	箱			
負荷質量 (ton)	1			2.5		
最大遠心加速度 (G)	200			200		
搭載容量 (G・ton)	200			500		
測定点数 (チャンネル)	50			100		
加振容量 (tonf)	50			125		

5.1.2 特徴とすべき技術

装置規模が大きくなるにつれてメンテナンス費用も増大する。したがって、①回転効率を向上させるためにスイングアームにカバーを取り付け風損抵抗を減少させる、②耐久性を向上させるために新型ベアリングを採用する、③回転中に回転バランスの調整を行える機能を付加する、等現時点で採用可能な技術は、極力導入すべきである。

この他にも、今後の新技術として、回転効率及び耐久性を向上させるために超電導モーターの利用や、搭載能力を拡大するために複数アームの設置等のアイデアが出されたが、これらの導入にあたっては今後さらに技術的な検討を行う必要がある。

5.2 付帯装置の特徴

装置の大型化に伴い搭載スペースや最大搭載質量が拡大することにより、模型地盤作成装置、模型構造の水平方向牽引装置、トンネル模型掘削装置、地盤強度の計測技術の導入が可能となる。

油圧・水供給装置はメンテナンスの低減にも寄与するが、これを設置するためには回転軸付近の回転アーム上にある程度のスペースが必要となる。したがって、装置本体の構造ともあわせて検討する必要がある。

模型地盤の加振装置としては、現時点では上記の装置規模に対応できるだけの能力を有するものが開発されていない。したがって、複数の油圧アクチュエーターの利用による加振力の拡大や、土槽の軽量化、超電導磁石の利用による加振負荷の低減が考えられるが、これらを導入するためには独自の開発努力が必要である。

画像解析装置は現時点でも設置可能であるが、高速カメラ及びストロボの耐圧性、画像解析の分解能に限界がある。精度を向上させるためには高耐圧性のハイビジョンカメラ、ストロボの開発が必要である。

土中変位等の計測技術の中では、地盤中にターゲットを設置しX線撮影をする方法と、微小発信装置を埋め込み位置を計測する方法が魅力的である。すでにX線撮影を行っているところはあるが、導入は可能であるが、回転中の変位を測定することは不可能である。微小発信装置については技術的な検討をする必要がある。

第6章 まとめ

平成6年度に土木研究所内に組織された勉強会において、新しい遠心力载荷装置の導入に関する知識のストックを図るとともに、中長期的な展望のとりまとめを目的に検討を行った。本報告書はその結果をとりまとめたものであるが、いくつかのオプションの提示にとどめており、実際に装置を導入するにあたってはさらに詳細について検討を続けていく必要がある。

付録Ⅰ 勉強会開催経過

第1回 平成6年7月26日(火)

第2回 平成6年9月9日(金)

第3回 平成6年10月7日(金)

第4回 平成6年11月17日(木)

第5回 平成6年12月6日(火)

第6回 平成6年12月19日(月)

遠心力載荷実験装置勉強会参加者名簿

所 属			氏 名	第1回	第2回	第3回	第4回	第5回	第6回	執 筆 担 当
顧問：田村正秀 次長				○	○	○	○	○	○	
研究調整官			中 岡 智 信			○				
企 画 部	地下開発研究官		川 島 一 彦	○	○		○	○	○	第1章, 第6章
"	トンネル計画官		堀 内 浩三郎							
"	ダム計画官		阿 部 徹	○						
"	施 設 課	課 長	染 谷 晃	○					○	
"	"	専 門 官	古 澤 正 紀	○				○		
"	"	機械設計係長	加 藤 貞 夫	○	○	○	○	○		
ダム部	フィルダム研究室	室 長	中 村 昭							
"	"	研 究 員	岩 下 友 也	○						
"	"	"	川 崎 将 生	○						
道路部	舗装研究室	室 長	中 村 俊 行							
"	"	研 究 員	木 村 慎		○	○	○			
"	トンネル研究室	主任研究員	真 下 英 人		○			○	○	3.2, 4.6, 4.9
"	"	研 究 員	石 村 利 明	○						
材料施工部	施 工 研 究 室	室 長	苗 村 正 三	○	○					
"	"	主任研究員	小 川 伸 吉		○			○	○	3.3, 4.2, 4.10
"	"		梅 本 健 児		○					
"	"	部外研究員	須 田 晃 夫	○	○					
構造橋梁部	基 礎 研 究 室	室 長	中 野 正 則							
"	"	主任研究員	木 村 嘉 富				○	○		3.4, 4.8
"	"		知 見 健 司	○						
地震防災部	部 長		古 賀 泰 之	○		○		○		
"	振 動 研 究 室	主任研究員	二 宮 嘉 朗		○		○		○	4.5, 4.7
"	"	研 究 員	本 田 利 器	○						
"	"		東 柘 生	○			○	○	○	
"	"	部外研究員	仙 頭 紀 明	○	○				○	
"	動土質研究室	室 長	松 尾 修	○	○	○	○	○	○	
"	"	主任研究員	古 関 潤 一	○	○	○	○	○	○	第2章, 3.1, 4.1, 4.3, 4.4 第5章, 付録
"	"	研 究 員	堤 達 也	○	○	○	○	○	○	

遠心力載荷実験装置勉強会（第1回）

議事録

1. 日 時 平成6年7月26日（火） 10:00～12:00
2. 場 所 617会議室
3. 出席者 田村次長
川島, 阿部, 染谷, 古澤, 加藤, 岩下, 川崎, 石村, 苗村, 須田, 知見, 古賀, 本田, 東
仙頭, 松尾, 古関, 堤
4. 議 題
 - (1) 勉強会の主旨
 - (2) 遠心模型実験手法の現状と動向
 - (3) 各研究室の研究状況
5. 配布資料
 - 1-1 遠心力載荷実験所内勉強会
 - 1-2 遠心模型実験手法の現状と動向
 - 1-3 動土質研究室における遠心模型実験を用いた研究の状況
6. 議事要旨
 - (1) 勉強会の主旨
川島地下開発研究官より, 資料1-1に基づいて勉強会の主旨と検討日程の説明があった。
・本勉強会では以下の項目について検討する。
 - 1) 遠心力載荷実験を用いて研究の進展が期待される研究分野
 - 2) 各国における遠心力載荷実験装置の現状と将来
 - 3) 世界的に見てユニークな遠心力載荷装置の開発可能性の検討
 - 4) 土木研究所に求められる遠心力載荷装置
 - ・勉強会は, 月に1回程度開催し, 平成6年末を目途に成果をとりまとめる。

- ・田村次長に顧問として参加して頂く。

田村次長より、本研究会の意義についてコメントを頂いた。

- ・平成5年度の補正予算では、工期、内容の詰めが十分ではなく、導入が見送られた経緯がある。
- ・知識のストックを図ると同時に、中長期的展望のとりまとめを目的として検討を行ってほしい。

(2) 遠心模型実験手法の現状と動向

古関研究員（動土質研究室）より、資料1-2に沿って報告が行われた。主要なポイントは以下の通りである。

- ・実験装置の近年の傾向として、最大遠心加速度は200G程度のままで、回転半径と試料容器の大型化が進んでいる。この理由として、大きな遠心力場で作動する加振装置が開発されていないこと、遠心加速度が大きくなりすぎると土粒子の粒径の効果が現れて相似則が成立しなくなる恐れのあることが挙げられる。
- ・新しい技術として、光スリップリング、高精度VTR及び画像解析装置、大出力の加振装置が導入されつつある。
- ・最近の発表論文に見られる新規分野への適用例として、環境問題（汚染物質の地下貯蔵）、海底地盤に及ぼす波力の影響、地質学（プレートテクトニクス）がある。
- ・新しい実験手法として、遠心場での施工及び原位置試験方法、互層及び過圧密地盤などの作成方法、小型の高精度センサーが開発されつつある。
- ・土研で大型の装置を導入する場合、メンテナンス費用の確保、専任オペレーターの養成、安全管理の徹底に留意する必要がある。

以下の討議が行われた。

- ・回転時に空力学的な問題はないのか。
→回転腕はスリムになっている。最近多いプラットフォーム方式では抵抗の少ない形状を採っている。真空を利用する試みもオランダで行われている。
- ・回転時に基礎に負担はかからないのか。
→回転腕の左右のバランスを取っているが、それでもアンバランス力が生じ、基礎への負担はかなりかかる。従って、どの程度の基礎となるかを費用・工期の面から詰めておく必要がある。
- ・大型の装置の導入費用はどの程度か。
→標準的なもので基礎も含めると10億円程度ではないか。
- ・測定点数はどの程度必要なのか。
→現状の16chでは不十分である。回転腕上でAD変換したデータを光スリップリングを用いて転送すれば、測定点数を非常に大きく設定できる。
- ・土研の動的遠心力載荷実験装置のオペレーションはどのように行っているか。
→模型作成などは外注する場合もあるが、回転操作は各研究室の担当者が行っている。不具合が生じた

場合には、動土質研究室と施設課で対応している。

- ・大型の装置で用いられている電動機の仕様は。

→詳細は不明だが、数千ボルトの電力を大量に用いている。（竹中技術研究所の場合、電動機の仕様は600V、2000KWで、6600Vの高圧電源を専用トランスを介して用いている。）

(3) 各研究室の研究状況

古閑研究員（動土質研究室）より、資料1－3に沿って報告が行われた。

- ・動土質研究室の現在の研究項目は以下のようである。

- 1) ジオテキスタイル補強盛土の安定性
- 2) 盛土のある地盤の液状化時の挙動
- 3) 液状化による地中構造物の浮上がり
- 4) 液状化対策工の効果
- 5) フィルダムの地震時安定性
- 6) 地震時土圧

- ・今後、遠心力載荷実験装置をより効果的に使用していくための課題として、以下の項目がある。

- 1) 試料容器の前、背面と模型間の摩擦、及び試料容器側面の変位拘束の影響の検討
→試料容器の奥行き、長さを大きくする。せん断土槽を導入する。
- 2) 互層地盤、複合地盤の地震時挙動の検討
→遠心場において地盤の作成、地盤改良の再現ができる装置を開発するとともに、実験装置本体にこれが搭載できるようにする。
- 3) 地中構造物の縦断方向、橋台の地震時挙動の検討
→3次元的な模型が作成できる試料容器とする。測定点数も増やす。
- 4) 実験の可視化
→高精度のVTR装置、画像処理装置を導入する。
- 5) 実験の再現性、及び実験能率の向上
→地盤の作成方法（砂撒き、飽和作業など）の自動化を図る。作成した地盤の物性を簡易的に測定する方法（例えばせん断波速度の測定）を確立する。

以下の討議が行われた。

- ・模型地盤の表面は曲面となっているが、底面は平坦である。影響はないのか。
→容器の長手方向を鉛直方向に向けると影響は少なくなる。最近の大型の装置ではこの方式が導入されている。ただし、この状態で加振する場合には、回転腕を上下方向の振動に抵抗できる構造とする必要がある。
- ・模型外面の変位だけではなく、内部の測定も行えるように技術開発を進めていくべきではないか。
- ・実物大実験と遠心模型実験との比較例が少ない。土研には各種試験装置が揃っており、この分野で土研の特色を生かすことができる。なお、UJNRの第4回液状化ワークショップでは、動土質研究室が発

表した振動台実験と動的遠心模型実験の比較が、液状化に関する初めての検討例として高い評価を受けた。

- ・最大遠心加速度は 200G 程度で十分か。

→模型の縮尺が 1/200 以下となると測定精度などの問題が生じる。また、土粒子の粒径の影響も大きくなる。従って、現状の知見では 200G で十分と考えられる。

- ・回転半径は大きい方が良いのか。

→大きいほど曲率の影響が少なく、また、遠心加速度の不均一性の影響も小さくなる。

- ・遠心場で模型を作成する意味はあるのか。

→構造物の施工による基礎地盤中の応力状態の変化が重要な場合などに必要である。

(4) その他

- ・次回は今回に引き続いて各研究室の研究状況の紹介を行う。日程は後日改めて調整する。

- ・勉強会に提出された資料は、最終的には土木研究所資料としてとりまとめる。

遠心力載荷実験装置勉強会（第2回）

議事録

1. 日 時 平成6年9月9日（金） 10:00～12:00

2. 場 所 531会議室

3. 出席者 田村次長

川島, 加藤, 木村（舗装）, 真下, 苗村, 小川, 梅本, 須田, 二宮, 仙頭, 松尾, 古関, 堤

4. 議 題

(1) 第1回議事録の確認

(2) 遠心模型実験に関する研究状況と今後の課題

①トンネル研究室

②施工研究室

(3) CENTRIFUGE94報告

5. 配布資料

2-1 遠心力載荷実験装置勉強会（第1回）議事録

2-2 トンネル研究室における遠心模型実験を用いた研究状況について

2-3 施工研究室における遠心模型実験に関する研究状況と今後の課題

2-4 CENTRIFUGE94に参加して

6. 議事要旨

(1) 前回議事録の確認

古関主任研究員（動土質研究室）より、資料2-1に沿って報告が行われ承認された。

(2) 遠心模型実験に関する研究状況と今後の課題

①トンネル研究室

真下主任研究員より、資料2-2に沿って報告が行われた。

・トンネル研究室の現在の研究項目は以下のようである。

1) トンネル周辺地盤の挙動

2) シールドトンネルに作用する荷重

3) トンネル切羽の安定性

・今後の課題として、以下の項目がある。

1) 装置の規模、能力

→直観的な判断であるが、これまでの経験から少なくとも現状の 1.5～2 倍程度の規模の試料容器を使える装置が必要ではないか。

2) スリップリング

→非接触型の構造にし、測点数を現在の16点（実状としては6点しか使えない）から少なくとも数倍程度にする必要がある。

3) 作業性

→砂箱の載荷装置への取付をワンタッチにする。

カウンターウェイトの設置は、平板を取り付ける構造に改良されたが、調整に時間かかるため改善する。

模型地盤作成を自動化する。

4) 地盤の変位、変形量の測定

→地盤の中に鉛球を埋め、X線撮影により測定する方法を考えてみてはどうか。

写真から標点の動きが一度に読み取れる画像解析の方法が考えられないか。

5) 地盤強度の測定

→遠心載荷中に直接求められる方法を考える必要がある。

6) 実験がたて込んでおり、各研究室の装置使用可能日数が少ない。

以下の討議が行われた。

・実物との比較はどうしているのか。

→実験結果と現場との比較を行っている。シールドトンネルに関しては、東京湾横断道路の測定データとの比較を行いたい。

・実験にどの程度時間がかかるのか。

→圧密を要しない場合は2人1組で1日1ケース。ルーチン化されていない実験であるため、外注しにくい。

・スリップリングのメンテナンスはどうしているのか。

→カーボンブラシなどが消耗品なので交換する必要がある。たった今行っている実験が終了後、交換する予定。

・研究目的で、標準化しにくい模型の自動化は得策か。

→砂撒き等の共通部分については可能。細かい作業は人がやるべきではないか。

・カウンターウェイトは、オートバランスがよい。

・地盤の変位、変形量および強度等の測定方法については、専門家の意見を参考にする。

・X線撮影を行っているところはある。ただし、実験の前後に試料容器を毎回取り出して撮影するため、途中の変位、変形を連続的に知ることができない。なお、X線を用いた測定の導入にあたっては、法的

な規制がある。

- ・ 模型内部の変形状況を測定する方法（例えばレーザートモグラフィー）について、もっと最新の研究をレビューする必要がある。

②施工研究室

苗村室長より、資料2-3に沿って報告が行われた。

- ・ 施工研究室の現在の研究項目は以下のようである。

1) 深層混合処理工法による地盤の変形抑止工の設計施工法に関する試験調査

- ・ 今後の課題として、以下の項目がある。

1) 計測値の信頼性

→チャンネル数をさらに多くし、高精度な非接触型のスリップリングが必要である。

2) 壁面摩擦の影響

→試料容器の奥行きを大きくする。

3) 試料容器の大型化

→模型の縮尺を現状より小さくすることは困難であるので、回転半径の延伸、容器の大型化が必要である。

4) 軟弱地盤作成の効率化

→同時に複数の試料容器を圧密できるようにすることも1つの方法かも知れない。

5) 実験状況の視覚化

→高解像度のVTR装置、効率的で高精度な画像処理方法を導入する必要がある。

6) 実験中の重心移動

→カウンターウェイトのオートバランス装置が是非必要である。

7) 計測器からのコードの処理方法

→地盤の挙動に影響を与えないように処理することを考えなければならない。

以下の討議が行われた。

- ・ 夜間の運転はどのようにしているか。
→無人で行っている。
- ・ VTRを試料容器に設置できないのか。
→既に利用されているが、歪の測定に用いるにはまだ解像度が十分ではない。
- ・ 画像処理に関して、振動研究室では振動実験をVTRで撮り、この映像解析によって色付けした標点の変位を計測している。これについて、次回以後に本勉強会で紹介しても良い。
- ・ 粘性土の場合には、壁面摩擦を低減させるために容器と供試体の間に薄い寒天を入れた所、有効であった（施工研究室）。
- ・ 現在の遠心力载荷装置よりどの程度の大きさアップを図るかについて、もっと具体的な検討が必要ではないか。例えば、試料容器を現在の2～3倍にすると、作業に要する手間、実験コスト、期待できる精

度向上等がどうなるか各研究室ごとに整理してみてはどうか。

(2) CENTRIFUGE94報告

古関主任研究員（動土質研究室）より、資料2-4に沿って報告が行われた。

- ・論文数は前回の会議の2倍近くに増えた。新しい話題として以下のものがあった。
 - 1) 装置の大型化：遠心載荷装置本体と加振装置
 - 2) 回転中に各種の実験を行う装置の開発・改良（精密化）：貫入試験、杭の打設、地盤掘削、シールドトンネルの建設
 - 3) 回転腕を持たないドラム型の遠心載荷装置
 - 4) 砂と粘土の中間的な性質を持つ中間土の支持力特性・動的挙動
 - 5) 波力による砂地盤の液状化
 - 6) 基礎の振動に対する地中防振壁
 - 7) 汚染物質の地中への浸透
- ・約160名の参加者のうち約1/4が日本からの参加であり、日本の各機関が積極的に取り組んでいる状況が伺われた。次回の会議は3年後に東京で行われる。
- ・従来より行われていた基礎的な研究に加えて、実際の設計・施工事例への適用例も報告されていた点が特徴的であった。
- ・重力場での大型の実験との比較検討の重要性が各分野で強調されていた。今後はこの点において土研が国際的にも大きな役割を果たすことができると考えられる。
- ・シンガポール国立大学の実験施設の見学では、回転バランスの管理体制とシンプルな構造のロータリージョイントに関して有益な情報を得た。また、会議参加者より、光スリップリングの信頼性が現時点では必ずしも十分ではないとのコメントを得た。

(3) その他

- ・次回（第3回）は竹中技術研究所の遠心力載荷装置を見学する。日程は後日改めて調整する。
- ・第4回は、基礎研究室の研究状況の紹介を行うとともに、今後土木研究所で必要とされる装置、機能についての検討に入りたい。また、振動研究室の画像処理等、有望な新技術について紹介を行う。なお、新技術に紹介できるものがあれば、幹事まで連絡していただきたい。

遠心力载荷実験装置勉強会（第3回）

議事録

1. 日 時 平成6年10月7日（金） 13:30～16:00

2. 場 所 竹中技術研究所

3. 出席者

（土木研究所）田村次長，中岡研究調整官

加藤，木村（舗装），古賀，松尾，古関，堤

（竹中技術研究所）小林所長，松元副所長，鈴木（吉）主任，馬場崎主任

（竹中土木）松浦常務，神崎副本部長，永山部長，奥村課長，藤井課長

4. 議 題

（1）竹中グループの研究開発システムの紹介

（2）竹中技術研究所の施設概要および技術開発の実績紹介

（3）遠心実験に関するディスカッション

5. 議事要旨

（1）竹中グループの研究開発システムの紹介

松元副所長（竹中技研）より，以下の説明が行われた。

- ・研究員は150人。
- ・昨年3月に基礎研究の充実と生産技術開発の効率的な推進を図るために開発技術委員会を中心とした新しい組織を作った。
- ・応用研究はマトリックス型式（いくつかの研究グループをテーマ毎に組み合わせる）で行う。
- ・3カ年単位で研究を実施する。

以下の討議が行われた。

- ・開発された技術の評価をどのように行っているのか。
→「成果評価額」システムにより評価する。
- ・基礎研究の割合はどの程度か。また評価はどうしているのか。
→マンパワーで10%程度を基礎研究にあてている。基礎研究は応用研究に引き継がれることが多く，この段階ではまだ直接的には評価を行っていない。まだ新しいシステムであり，個人の評価方法などは

模索中の段階である。

・現場との人事交流はあるのか。

→プロジェクトの中で現場と交流する機会が多い。研究員は別枠で採用し、基本的には研究所に配属するが、現場に引き抜かれる場合もある。なお、現場の人間が社内留学する研修員制度（2年間）がある。

・なぜこの場所に研究所を移したのか。

→いくつかの候補地を探した結果である。千葉ニュータウンの業務地区にあり、環境的に恵まれている。

・スタッフの体制はどうなっているのか。

→従来は区別があったが、現在は一本化している。スタッフにも修士卒が多い。実験補助は外注で賄う。

(2) 竹中技術研究所の施設概要および技術開発の実績紹介

永山部長（竹中土木）より、以下の説明が行われた。

- ・昨年10月に開所、所員262名、面積6万㎡。
- ・中央に管理部門、外側に実験施設を配置。
- ・高密度化を避けた低層建築。
- ・主な研究分野：地盤、コンクリート、ダム、トンネル、道路橋梁、環境
- ・技術開発の実績：

深層混合処理工法（以下、DMMと称する）

凍結サンプリング

液状化解析

AEによる地盤破壊探知

建設副産物の利用 など

以下の討議が行われた。

・土木研究所との共同研究へ参加するかどうかをどう判断しているのか。

→所長と総本店の技術担当常務の判断の後、社長決裁。研究としてペイするかどうかよりも、当該技術を開発するべきかどうかで判断する。

→土研内でもチェック機能の強化を図っている。厳しい目で見て頂きたい。

(3) 遠心実験に関するディスカッション

鈴木主任（竹中技研）より、遠心力载荷装置を用いた現在の研究テーマとして以下の紹介があった。

- ①多層地盤（砂、シルト層）の地震時挙動
- ②直接基礎、杭基礎（+地盤改良）の地震時挙動
- ③DMMを仮設として用いた場合の安定性
- ④DMMを土留として用いた場合の安定性
- ⑤ケーソン支持地盤をDMMにより改良した場合の安定性

このうち、①②は解析でシミュレーションを行う予定である。従来は液状化問題が主体であったが、今後は装置の大型化に伴い上記のようなテーマをとりあげる。

過去の研究テーマとして、楕状に改良したDMMの抜け出しの検討の紹介があった。

以下の討議が行われた。

- ・いつ本装置を導入したのか。
 - 2カ月前に加振装置、その他の周辺装置を導入した。本格的な実験はまだ行っていない。
- ・スケールが大きいことのメリットは？
 - 従来の装置では、実験槽の大きさは70×50cm（平面）で、模型が小さすぎる。このため、計測器の影響が相対的に大きかった。現有の装置は100×100cm相当の模型を遠心加速度 100G、縮尺 1/100でモデル化することを想定して、200×200cmとした。トンネル掘削の再現のための機械的な制約から、この程度の大きさの土槽が必要であった。
- ・装置全体の管理、維持はどうしているのか。
 - 鈴木主任ほか4人（研修員をいれると7、8人）で管理している。
 - 実験は1シリーズ2～3千万円のオーダーで受託している。（電気代を除く）
 - 本体のメンテナンスは、三菱商事が設立した会社が担当しており、費用は年間1200万円。（定期点検（月1回）と異常時対応を含む）
- ・地盤以外のテーマはないのか。
 - 海洋関係の実験計画があるが、詳細はまだ未定。
- ・装置本体の基礎の施工方法は？
 - コンクリート、アンカーボルトを先に施工し、本体を設置した。高精度の施工が要求された。
- ・回転時に振動は生じないのか。
 - 特に問題ない。同じ建物内の電子顕微鏡にも影響はない。
 - ただし、風が発生するので、通り道を設ける必要がある。
- ・電力は？
 - 6600V。他の高電圧装置を停止させる必要があるため、使用するときは社内での届出が必要。高電圧のため磁気シールドを厳重にし、専用トランスを用いている。また、静止時に発生する電力はヒーターを使用して放電させている。
- ・機械に悪影響があるので、常に除湿状態を保つ必要がある。

遠心力载荷実験装置勉強会（第4回）

議事録

1. 日 時 平成6年11月17日（木） 15:00～17:00

2. 場 所 532会議室

3. 出席者 田村次長

川島, 加藤, 木村（舗装）, 木村（基礎）, 二宮, 東, 松尾, 古関, 堤

4. 議 題

- (1) 第2回及び第3回の議事録の確認
- (2) 画像処理技術について
- (3) 遠心模型実験に関する研究状況と今後の課題
- (4) 装置規模を大きくした場合に想定される状況

5. 配布資料

- 4-1 遠心力载荷実験装置勉強会（第2回）議事録
- 4-2 遠心力载荷実験装置勉強会（第3回）議事録
- 4-3 画像処理技術について
- 4-4 基礎研究室における遠心模型実験を用いた研究状況について
- 4-5 装置規模を大きくした場合に想定される状況（動土質研究室）

6. 議事要旨

- (1) 第2回及び第3回の議事録の確認

堤研究員（動土質研究室）より、資料4-1、4-2に沿って報告が行われた。第3回議事録中の竹中技研の遠心载荷装置に関する記述に以下の項目を付け加える。

- ・回転時に熱が発生するので、冷却用の大規模なファンが必要である。
- ・装置の軸にベアリングを用いていないので振動が生じない。詳細については竹中技研に確認してはどうか。

→通常、軸の底面と側面にベアリングを用いるが、竹中技研の装置はすり鉢状に斜めになったベアリングが用いられている。振動対策は別途行っている。

- ・大きな電力が発生するのは、静止時ではなく減速時である。これを放電するための処置に予想外の費用

がかかった。

- ・模型を作成するフロアと装置のフロアが同一レベルにあるため、実験担当者が多少危険を感じることもある。
- ・堤研究員が、当日の見学の内容を執筆し、本勉強会の最終レポートに加えるようにする。

(2) 画像処理技術について

二宮主任研究員（振動研究室）より、資料4-3に沿って報告が行われた。

- ・振動研究室では、画像解析装置を用いて非接触で対象物の変位量を測定している。
- ・ビデオ画像を縦512×横512ドット、明度8ビットでA/D変換を行い、前後の画像のマーカの座標を比較して変位量を算出する。
- ・縦横のドット数が固定されているので、測定の分解能には限界がある。
- ・解析可能周波数は、ビデオカメラのシャッター間隔から30Hzである。
- ・測定のためには、点状のマーカが必要である。
- ・今までに以下のような使用例がある。
 - 1) 地震時におけるケーソン基礎の滑動に関する振動台模型実験：ケーソン模型の変位量
 - 2) 地盤の流動変状に関する模型振動実験：地盤の変位量

以下の討議が行われた。

- ・この技術を遠心載荷装置で使用するためには、回転碗にビデオカメラを設置する必要がある。
→中央大学で画像解析装置を設置している例はある。ただし、まだ解析データが公表される段階には至っていないようである。
- ・ビデオカメラの設置条件と最小分解能との関係を具体的に示すとよい。
- ・ビデオ画像は歪んでいるので、測定した変位量の精度を検証する必要があるのではないか。
- ・静的な実験による変位量の測定では周波数30Hzでも測定可能だが、加振実験を行う場合には、1kHz程度の周波数が必要となる。
- ・動土質研究室では、回転碗に高速度カメラを設置しているが、写真があまり鮮明でないため細かい挙動まではとらえられない。まだ、ごく短時間しか計測できない。
- ・普通のビデオカメラで撮影した画像があれば、このシステムを用いて変位量の測定が容易にできるので、土技資等で振動研究室の装置を他研究室にPRしてはどうか。

(3) 遠心模型実験に関する研究状況と今後の課題

木村研究員（基礎研究室）より、資料4-4に沿って報告が行われた。

- ・基礎研究室の現在の研究項目は「直接基礎の支持力」である。
- ・実験上の課題として、以下の項目がある。
 - 1) 実験地盤の作成

→基礎の支持層となる良好な地盤の作成が困難である。

2) 基礎模型の設置

→深い基礎においては、基礎の設置法及び施工法による差などの評価が困難である。

3) 試料容器

→三次元的な実験を行えるように奥行きを大きくする必要がある。

以下の討議が行われた。

- ・遠心場と重力場における粒径の違いによる影響は、別途検討する必要がある。
- ・土研の1号機は、50Gを越えると回転が不安定になる場合がある。
→原因は装置の老朽化である。完全に修理するためには数千万円必要と見積もられている。
- ・変位の読み取りは手作業（直営）で行っているのか。
→その通りである。将来は自動化したい。
- ・地盤内の変位をどうすれば測定できるか。
→レーザーやX線を用いて測定した例はある。今後、検討する必要がある。

(4) 装置規模を大きくした場合に想定される状況

古関主任研究員（動土質研究室）より、資料4-5に沿って報告が行われた。

- ・現状、現状の2倍及び10倍（竹中技研相当）の規模を想定し、これに要する模型の製作費、製作日数を比較した。

以下の討議が行われた。

- ・あまり大型化すると遠心力実験の手軽さがなくなる。
→大型化した場合のデメリットも表にまとめるとよい。
- ・竹中技研の受託実験費用（2～3千万円）の内訳はどうなっているのか。
→詳細はわからないが、装置の減価償却費は計上されていないとのことであった。
- ・本勉強会の成果は、あと2回程度でとりまとめるようにしたい。
→次回は以下の3点について紹介する。

1) 各研究室で、研究テーマ毎に、装置に要求される性能・仕様を表形式にまとめる。現在までに遠心载荷実験の経験のない研究室は要望をまとめる程度でもよい。

2) 新しい装置の目玉をどこに置くのかを、担当者を決めて次回までに検討する。

①本体（加振装置を含む）：動土質研究室

②画像処理：振動研究室

③土中計測：基礎研究室

3) 遠心载荷装置のレビュー結果

次々回では具体的なポンチ絵も示すようにする（動土質研究室）。

(3) その他

- ・次回（第5回）は12月5～16日の間で日程を調整する。可能ならば遠心载荷装置の専門家の講演会も開催する。
- ・第6回は年内に行いたい。

遠心力載荷実験装置勉強会（第5回）

議事録

1. 日 時 平成6年12月6日（火） 9:00～11:00
2. 場 所 627会議室
3. 出席者 田村次長
川島, 古澤, 加藤, 真下, 小川, 木村（基礎）, 古賀, 東, 松尾, 古関, 堤
4. 議 題
 - (1) 第4回議事録の確認
 - (2) 新装置の特徴とすべき技術について
 - ①本体及び加振装置
 - ②画像処理
 - ③土中計測
 - (3) 各研究室で必要とする遠心載荷装置の規模について
 - (4) 遠心載荷装置の動向に関する整理結果
5. 配布資料
 - 5-1 遠心力載荷実験装置勉強会（第4回）議事録
 - 5-2 新装置（本体及び加振装置）の特徴とすべき技術について
 - 5-3 画像解析装置の遠心載荷実験への適用方法について
 - 5-4 土中計測について
 - 5-5 遠心載荷装置を用いた研究項目と必要とされる要件（動土質研究室）
 - 5-6 遠心載荷装置を用いた研究項目と必要とされる要件（振動研究室）
 - 5-7 遠心載荷装置を用いた研究項目と必要とされる要件（トンネル研究室）
 - 5-8 遠心載荷装置を用いた研究項目と必要とされる要件（基礎研究室）
 - 5-9 遠心載荷装置を用いた研究項目と必要とされる要件（施工研究室）
 - 5-10 遠心模型実験に関する検討業務目次（案）

6. 議事要旨

(1) 第4回議事録の確認

堤研究員（動土質研究室）より、資料5-1に沿って報告が行われ、竹中技研に遠心載荷装置に用いられているベアリングの詳細を問い合わせるよう指摘があった。

(2) 新装置の特徴とすべき技術について

古関主任研究員（動土質研究室）、東技官（振動研究室）、木村主任研究員（基礎研究室）より、資料5-2、5-3、5-4に沿って報告が行われた。

以下の討議が行われた。

①本体及び加振装置

- ・装置本体については、アーム回転式から大きく形式を変えることには、非常に多くのリスクと開発費用が見込まれる。したがって、こちらに装置開発の重点を置くのではなく、実験を現象により忠実に実行するような工夫（例えば、回転中の地盤作成装置等）に、土木研究所で遠心載荷装置を作成する際の特徴を持たせるべきではないか。

- ・加振方向を回転軸と平行方向にする。

→当然、その必要がある。なお、現在はそれが主流となっている。

- ・現在は装置内部の振動台の加振を油圧で行っている。電磁式にすることも考えられるが、パワーが小さいため、新装置への導入には向いていない。

- ・ロッキング、加振波形の再現性の向上はどう対応していくのか。

→ロッキングについては、まだどこも十分解決していない。

通常は、油圧サーボ弁は1つしか設けていないが、竹中技研の装置では2つ併用することによって、波形の再現性を高めている。こうした工夫が必要である。

②画像処理

- ・反射鏡を使用する方式では振動で映像がぶれるため、レコーダーだけを回転腕の付け根付近に置き、C Dカメラで直接模型を撮影する方がよい。

- ・放送局で使用されているカメラは非常に高精度であり、この使用が考えられる。ただし、この場合には、ビデオデッキ、解析装置も高精度化する必要がある。

③土中計測

- ・X線撮影及び微小発信装置については、かなり魅力的なのでさらに検討する価値がある。

→発信装置については、静的実験と動的实验とでは要求性能が異なるため、別のものとなる可能性がある。

- ・物理学や医学等の全く土木とは別のジャンルで利用されている計測手法が参考になるのではないか。

(3) 各研究室で必要とする遠心載荷装置の規模について

古関主任研究員、東技官、真下主任研究員（トンネル研究室）、木村主任研究員、小川主任研究員（施

工研究室)より、資料5-5, 5-6, 5-7, 5-8, 5-9に沿って報告が行われた。

以下の討議が行われた。

- ・土槽寸法は、実物をどの程度縮小するか、あるいは模型製作に係わる細かい複雑な作業が必要とされるか、の限界から決まるのではないか。

→細かい作業という点では土槽が大きい方がよいが、地盤の均一性、作業性を考慮すると、あまり大きいと模型が作りにくい。

- ・4つの土槽を同時に取り付けて、実験することは可能か。

→今まで実例はないが、可能である。

- ・次回は、今回の議論を踏まえて以下の項目について報告する。

1) 土槽寸法を3種類程度に整理してみる。：動土質研究室

2) 機能・仕様に関する新しいアイデアを、簡単なポンチ絵にする。

- ・回転中に地盤作成ができる装置：動土質研究室

- ・杭頭を牽引できる装置(静的載荷装置)：振動研究室

- ・回転中にトンネル掘削及び排土が行える装置：トンネル研究室

- ・回転中に地盤強度の測定ができる装置：トンネル研究室

- ・地中の変位が測れる装置：施工研究室

- ・水及び油圧供給装置を本体に組み込む工夫：施工研究室

- ・実験中の状況をビデオカメラによりリアルタイムで把握できる装置：施工研究室

3) 各研究室で必要とする装置規模について以下の追加検討を行う。

- ・将来的な研究テーマに必要な装置規模：基礎研究室

- ・実験に要する電気料：施工研究室

- ・メンテナンスフリーにするための具体的方策：施工研究室

4) 画像処理、土中計測について技術調査を行い、資料内容をアップデートする。

：振動、基礎研究室

(4) 遠心載荷装置の動向に関する整理結果

古関主任研究員より、資料5-10に沿って報告が行われた。

主要な討議は以下の通りである。

- ・各機関の遠心載荷装置の使い勝手の良さ、悪さに関するコメント、装置の設置にあたっての留意事項がわかれば、調査すると良い。

- ・装置諸元と費用(電気料、建設費等)との関係をプロットしてはどうか。

(5) その他

- ・次回(最終回)は、12月19日(月)15:00~16:30に行う。

遠心力載荷実験装置勉強会（第6回）

議事録

1. 日 時 平成6年12月19日（月） 15:00～17:00

2. 場 所 524会議室

3. 出席者 田村次長（顧問）

川島, 染谷, 真下, 小川, 二宮, 仙頭, 東, 松尾, 古関, 堤

4. 議 題

- (1) 第5回議事録の確認
- (2) 新装置の機能・仕様に関する検討結果
- (3) 報告書のとりまとめ方針

5. 配布資料

- 6-1 遠心力載荷実験装置勉強会（第5回）議事録
- 6-2 回転中の地盤作成装置について（動土質研究室）
- 6-3 新装置の機能・仕様について（トンネル研究室）
- 6-4 遠心載荷実験における画像収録・解析技術について（振動研究室）
- 6-5 遠心載荷装置について（施工研究室）
- 6-6 杭基礎構造物の液化化時の挙動（振動研究室）
- 6-7 既往の遠心載荷実験装置の所要電力及び導入費用について（動土質研究室）
- 6-8 「遠心載荷装置を用いた実験の現状と将来」目次, 担当及び執筆要領（案）

6. 議事要旨

(1) 第5回議事録の確認

堤研究員（動土質研究室）より、資料6-1に沿って報告が行われ承認された。

(2) 新装置の機能・仕様に関する検討結果

古関主任研究員（動土質研究室）、真下主任研究員（トンネル研究室）、東技官（振動研究室）、小川主任研究員（施工研究室）、仙頭部外研究員（振動研究室）より、資料6-2, 6-3, 6-4, 6-5, 6-6に沿って報告が行われた。

以下の討議が行われた。

①回転中の地盤作成装置

- ・2次元模型を作成する場合には砂撒き装置（資料6-2の1枚目）が、3次元模型を作成する場合にはセルに分割した砂落下制御装置（2, 3枚目の図）が適している。

→デルフトの砂落下制御装置のパンフレットを請求し、検討してはどうか。

②地盤強度の測定方法

- ・小型の試験装置は現在すでに市販されている。
- ・この測定方法に関する研究だけで十分一つの研究テーマに成り得る。

→強度と先端抵抗との関係の経験式を導くことも可能である。

③画像収録・解析技術

- ・遠心載荷装置にカメラを設置する場合、CCDカメラ本体には問題ないが、回転シャッターの耐圧性が問題となる。

- ・ストロボの耐圧性に関するデータは全くない。

→カメラ、ストロボ自体の耐圧テストを土研に現在ある遠心載荷装置を用いて行ってはどうか。

④電気浮上型軸受け

- ・摩擦によるエネルギー損失がないため、コストが低減できる。
- ・魅力的な装置なので、電気メーカー等に問い合わせて別途検討してはどうか。

⑤杭頭牽引装置

- ・この案はあまりにもプリミティブなので、もっとしっかりした案を作成する。

引き続き古関主任研究員より、資料6-7に沿って報告が行われた。

以下の討議が行われた。

- ・現在の土研の遠心載荷装置の電気代は3~4万円/月であり、振動台（月数十万円）に比較すると電気代自体は安い。
- ・竹中技研クラスの装置になると高電圧（6600V）を使用するため、基本電気料が非常に高くなる。このため、実際の使用料よりも基本料金で、電気代が決まっているらしい。
- ・消費電力が大きい装置を導入する場合には、他施設との実験工程の調整を行う必要があるかもしれない。
- ・日本製の装置ではスポット契約的なメンテナンスが可能であるが、フランス製の装置では定期点検を前提としたメンテナンス体制を組まないと、メンテナンス契約しない方針となっている。本来のメンテナンスということを考えれば、定期点検方式が望ましいが、コスト高になる。
- ・電気代とメンテナンス費用のバランスを考える必要がある。

(3) 報告書のとりまとめ方針

古関主任研究員より、資料6-8に沿って説明が行われた。

- ・一次原稿を平成7年1月13日（金）までに堤研究員まで提出する。

- ・新遠心载荷装置の導入に当たっては、本勉強会の報告書をもとに、さらに詳細について検討を続ける必要がある。

動土質研究室 堤 達也

1994年10月7日に千葉ニュータウンにある竹中技術研究所に見学に行きました。同研究所は昨年10月に開所されたばかりであり、日本では最大規模の遠心力載荷実験装置を備えております。装置規模は、表-2.4を参照して下さい。以下、見学にもとづいて、私の受けました印象を記します。

建物は地下1階地上4階と低層になっており、まだ新しいためか、建物の壁は一面真っ白で、研究所というよりは美術館のような印象を受けました。しかし建物への出入りは厳重で、各自がIDカードを持っておりそれが鍵の役目をしているようでした。また、最初に案内された会議室への通路には窓がなく、男性の平均的な目の高さに幅10cmのスリットがあるだけでした。

見学した施設は、遠心模型実験室の他に、応用数理実験室、岩石・基礎工実験室、大型構造実験室、緑化コンクリート、スーパーブリッジの5つでした。

私は、つい最近、土木研究所の遠心力載荷実験装置を使うようになったばかりですが、竹中技研の装置はモンスターだという話を聞いており、実物を見てその通りだと実感しました。有効回転半径は6.5mで、土研が所有している装置(2m)の3倍以上です。装置の収納スペースは単純計算で30倍程度になります。確かに、土研の場合は腰を屈めなければ入れませんが、竹中技研の場合は中で小さな会議が開けそうな程の広さでした。測定チャンネル数も、土研の16点に対して50点と3倍以上あり、これだけあれば通常の実験では十分だと思います。また、回転腕の左右のバランスをオートで行っており、土研のカウンターウェイト方式の手間を考えると、新装置では是非オートバランス方式を採用していただきたいと思います。

ただ、この竹中技研の装置はフランス製で、メンテナンスは三菱商事が設立した会社が行っていますが、費用が年間1200万円かかるという話でした。また、装置が大きいため、土研の装置では実験1ケース当たり2日程度で行えるのに対して、竹中技研の装置は1ケース当たり10日程度かかるという話で、手軽さはありません。装置の操作は簡単で、スイッチ1つで動きますが、その反面運転管理を十分注意する必要があるという話でした。総合的に考えますと、ただ大きければ良いという訳にはいかないようです。

その他の施設では、特に印象に残っている2つについて以下に記します。

応用数理実験室では、超高層ビルの地震時の挙動をコンピューターを使って数値解析し、その結果を3次元で可視化したものを見せていただきました。実験室というよりは実際には研究室ですが、非常に静かで落ち着いており、行政の研究機関である土木研究所とは雰囲気が違うなと感じました。

緑化コンクリートは、コンクリートに直接植物を根付かせたもので、実物を見せていただきました。現在は水平から60度まで傾斜させることが可能になっていますが、将来的には、90度傾けてビルの壁面にも利用したいという話でした。もし実現すれば、環境的にも良く、とても鮮やかな景観になると思います。

最後に、忙しい中を説明していただきました竹中グループの方々に厚くお礼申し上げます。

遠心力載荷装置を用いた実験の現状
と将来

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3339号
平成7年3月(1995)

要 旨

平成6年度に土木研究所内に組織された遠心載荷実験装置勉強会において、新しい装置の導入に関する知識のストックを図るとともに、中長期的な展望のとりまとめを目的に検討を行った。本報告書は、その結果をとりまとめたものであり、土木研究所に求められる遠心力載荷装置としていくつかのオプションを提示した。

キーワード：遠心力載荷装置、勉強会、将来展望



郵便はがき

切手をは
つて下さい。

305-□□

建設省
土木研究所
土質研究室

御中

茨城県つくば市大字旭一番地

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



○

土木研究所資料第 3339 号(遠心力載荷装置を用いた実験の現状と将来)
部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

土木研究所資料第 3339 号

○

遠心力載荷装置を用いた実験の現状と将来