

岩盤亀裂発生装置（大型遠心力載荷装置）と遠心載荷による自重破壊実験

(Dead fracture test by bedrock crack generator and centrifugal loading)

北海道開発局開発土木研究所	正会員	池田 憲二	(Kenji IKEDA)
同 上	○同 上	中井 健司	(Kenji NAKAI)
同 上	同 上	畑山 朗	(Akira HATAKEYAMA)
同 上	同 上	日下部祐基	(Yuki KUSAKABE)
応用地質(株)	同 上	水野 敏実	(Toshimi MIZUNO)
住金関西工業(株)		原口 哲朗	(Teturo Haraguchi)

1. はじめに

北海道の日本海沿岸に位置する急崖斜面は、溶岩が水中で急激に冷やされてできた水冷破砕岩で構成された斜面が多い。水冷破砕岩は、均質ながらも脆さを有した亀裂の少ない岩盤といわれている。このような急崖斜面においてなんらかの要因で亀裂が進展すると、斜面背面の少ない亀裂が連結して比較的大規模な崩落が生じる可能性がある。このことから、亀裂の進展機構を岩盤力学的観点から研究することが重要となっている。

ここで報告する装置は、積雪寒冷地における大規模岩盤崩落の原因の一つである、亀裂進展の機構解明に関する実験を行うために製作されたものである。本装置を用いた実験は、表面亀裂を有した岩体などに遠心力を作用させることにより自重を増し、その状態で亀裂に水圧や凍結圧を発生させて、岩体が破壊に至るまでの亀裂の進展機構を究明しようとするものである。ここでは、装置の主な仕様と特徴、完成に至るまでの設計施工、および装置の性能確認を兼ねた遠心載荷による自重破壊実験について概要を報告する。

2. 装置の主な仕様

本装置の主な仕様を表-1に示す。また、図-1に装置の外観を示す。開発土木研究所においては、遠心

力載荷装置として本装置は2号機となる。1号機は、現在土質基礎研究室が保有している平成6年3月に導入されたもの⁴⁾である。表-1には、1号機の仕様も参考値として示した。遠心力載荷装置の規模を示す値としては、一般に最大遠心加速度にその加速度での最大積載質量を乗じた容量(G-ton)がある。この値を比較すると2号機は、1号機のおおよそ4倍の規模をもつ装置であることがわかる。

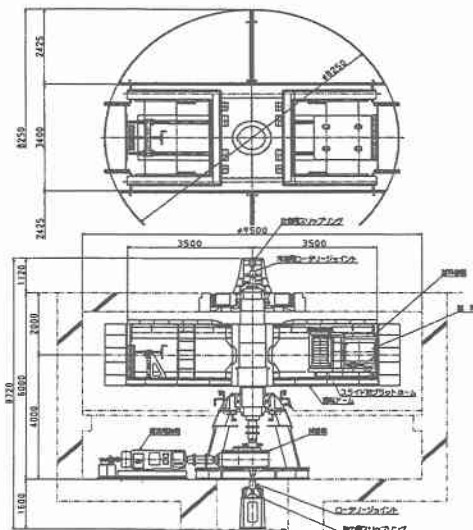


図-1 遠心力載荷装置の外観

表-1 遠心力載荷装置の緒元

項目	項目	3ヶ月仕様値	1ヶ月仕様値	備考
装置本体の諸元	形式	円盤型フレーム	ビーム型	
	回転半径	右端半径 3.5m ビット内径 9.5m ビット径 6.8m	2.5m 6.0m 3.0m	
	最大重心相速度	100G	200G	
	最大質量	2500kg	200kg	筐体構造あり
	最大容量	250G/ann	80G/ann	
	最大回転数	160rpm	267rpm	
	最大読取時間	168s	88	
	筐体材質	MAX 1500kg		
	筐体寸法	MAX 800×800×600mm		
	全重量	約1200kN		
主ビーム	形式	4本柱	3本柱	
試料容器設置方式	方式	バー型試料ホルダー	ミニバフケット型	
検出・中心検	検出器	1400×1400×1800mm		
	中心検出	720mm (検出器)		
	検出	上下2点検出	下側2点検出	
	検出器	1.5ゲージ、D、オイル		
	検出器	下側検出		
駆動装置	駆動システム	直流電動機	直流電動機	
	電力	200KW	123KW	
	最高回転速度	1280rpm	1788rpm	
	run-up time	15min (0→100G)	15min (0→200G)	
	付属機器	1号・4号		
減速機	減速機	1号・4号	1号・4号	
	減速方法	カブリング		
	減速方法	オイル潤滑		
	減速方法	オイル潤滑		
冷凍装置用型枠	寸法 (内寸)	W1000×D1000×H1000mm		
冷凍システム	耐圧	MAX+90kPa		
	システム	空気循環式		
	媒体	不凝性 (市販低温N ₂ -30℃) +20→-10℃ 約6時間		点検あり
冷却チャンセル	チャンセル数	12台 (最大96台設置可能)	2台	
資料保管システム	410243-7	設備場所: 2台	2台	
	資料保管	ビット型面冷却	ビット型面冷却	
	資料保管	ビット型面冷却	ビット型面冷却	
	資料保管	ビット型面冷却	ビット型面冷却	

表—2 国内の遠心力載荷装置一覧表

所 有 機 関 名	有効半径 (m)	最大加減速度 (G)	最大搭載質量 (ton)	容量 (G-ton)	完成年度
建設省土木研究所 No. 3	6.60	150	2.70	400	1997
竹中工務店	6.50	200	2.00	400	1993
運輸省港湾技術研究所	3.80	115	2.70	300	1980
北海道開発局開発土木研究所 No. 2	3.50	100	2.50	250	2000
西松建設	3.80	150	1.30	200	1997
水産庁水産工学研究所	3.00	150	1.00	150	1993
中央大学	3.05	180	0.56	100	1988
日建設計	3.00	230	0.43	100	1997
鹿島建設	3.90	200	0.50	100	1990
日本工営	2.60	250	0.40	100	1996
労働省産業安全研究所	2.00	200	0.50	100	1988
大成建設	2.50	200	0.40	80	1990
東洋建設	2.20	250	0.30	75	1984
北海道開発局開発土木研究所 No. 1	2.20	200	0.30	60	1994
大阪市立大学	2.55	200	0.20	40	1983
建設省土木研究所 No. 1	1.25	360	0.10	40	1961
東京工業大学	1.25	150	0.25	38	1981
京都大学防災研究所	2.50	200	0.17	24	1988
建設省土木研究所 No. 2	2.00	200	0.10	20	1987
防衛庁技術研究本部試験所	2.00	100	0.15	15	1993
農水省九州農業試験所	1.30	200	0.07	14	1975
清水建設	3.35	150	—	—	1991
南知工業高等専門学校	1.50	200	—	—	1985
宇都宮大学	1.18	120	—	—	1970

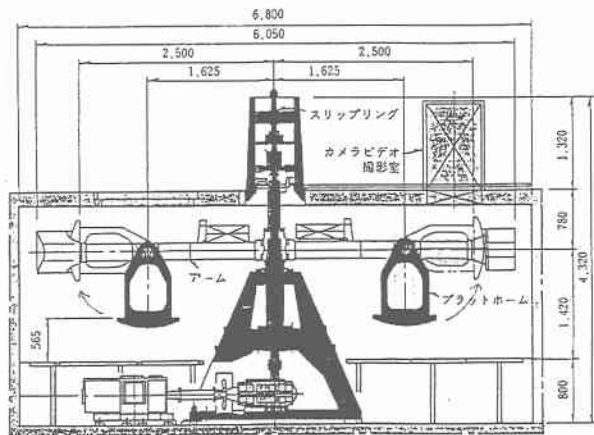
表－２は、1996年に調査された国内遠心力载荷装置一覧⁵⁾に、その後導入された装置を調査して加筆したものである。現在、21研究機関で24台の装置が保有されている。本装置の規模は、運輸省港湾技術研究所の装置に次いで4番目にランクされる。容量の不明な装置もあるため断定は出来ないが、本装置は国内で5本の指に入る大型のものであることが推測される。なお、ここでは有効半径を1m以上のものを対象とした。1m以下の小型のものを加えると、この他に後述するドラム型の装置を保有した大学等が含まれるようである。

3. 装置の特徴

本装置の特徴は、試料容器の設置方式としてフレーム固定型水平設置方式を採用したこと、装置の構造形式を円盤形フレーム形式としたこと、および試料容器内の供試体を凍結させる冷凍システムを導入したことにある。

3.1 フレーム固定型試料容器水平設置方式

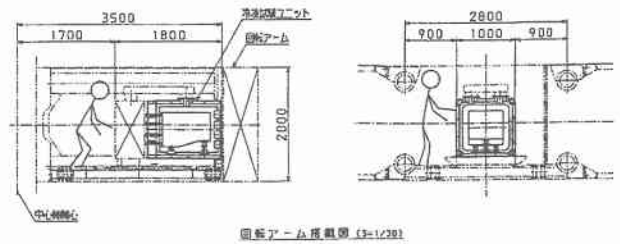
試料容器の設置方式には、当研究所1号機でも採用された試料容器を載せる台座をつり下げた図－2に示すスイングプラットフォーム方式や、試料容器を直接回転ビームにつり下げる方式⁶⁾がある。これらの方式では、自立しない粘土や砂などの粒状体を用いた模型実験を行う場合に、ビームの回転と伴に試料容器が振りあがるため、常に地球の重力加速度と遠心加速度の合成加速度の方向が、試料容器の鉛直下向きに作用することになり、模型実験の模型作成などが容易になる。



図－2 スイングプラットフォーム方式
(開発土木研究所1号機)

本装置の試験対象である岩体は固結して強度が大きく、これに遠心力をかけて破壊させるためには、供試体を大型化する必要がある。このような供試体を用いて、例えば遠心力により引張荷重を供試体に作用させる場合には、従来のつり下げる方式を用いると大きな岩体を宙吊りにして設置しなければならない。本装置では、実験の簡素化と岩体破壊時の耐衝撃性の向上を図るために、図－3に示すフレーム固定型試料容器水平設置方式を採用している。但しこの方式では、先に

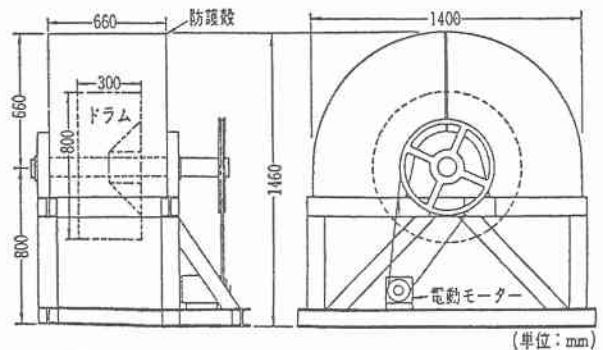
述べた合成加速度の方向が遠心加速度の大きさによって異なるため、実験ではその影響を考慮する必要があると考える。



図－3 フレーム固定型水平設置方式

3.2 円盤形フレーム形式

遠心力载荷装置は、大別するとビーム型とドラム型に分類される。ビーム型とは当研究所1号機の形式のもので、図－2に示したように回転する主桁(ビーム)の端部に試料容器を設置して回転させるものである。ドラム型とは、図－4に示すようにドラム(円筒)を高速で回転させるもので、このドラムが試料容器となっている。本装置の形式は、基本的にはビーム型のものである。ただし、ビーム型の外側を鋼板で覆い円盤形にしたために、形状がドラム型に類似したものとなっている。



図－4 ドラム型遠心力载荷装置の例

従来のビーム型遠心力载荷装置では、装置が高速回転する時の最も大きな抵抗は空気である。高速回転時に空気の抵抗、つまり空気の移動量を少なくすることは、装置運転電力の縮減と安定した遠心力の確保につながる。本装置では、この空気抵抗を少なくすると共に、さらにコマの原理である回転慣性モーメントを生かして小電力化が期待できる円盤形フレーム形式を採用している。

3.3 試料容器内冷凍システム

前述したように積雪寒冷地における岩盤斜面の崩壊原因には、冬期間に亀裂表面付近の水が凍結することによる凍結圧や、岩盤の凍結融解による岩質劣化などが考えられる。この現象を実験的に究明することを目的に、試料容器内冷凍システムが設けられた。システムは、図－5に示すように実験室内に冷凍機を設置して、それによって冷やされた不凍液(ブライン)をロ

ータリージョイントを介して試料容器背面に設置された熱交換システムとの間を循環させ、試料容器内に冷気を挿入するものである。

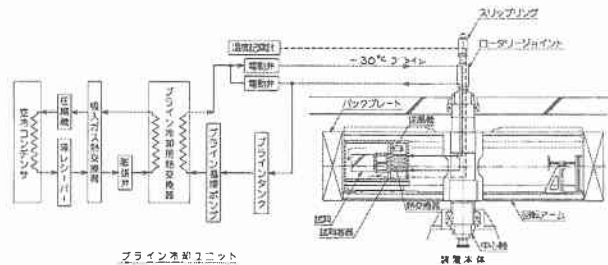


図-5 試料容器内冷凍システム図

4. 設計および施工

遠心力载荷装置の基本となる構造設計計算では、どのような異常状態を想定するかで必要となる各部材強度が異なる。異常状態としては、最高回転時に片側試料容器内の試料のみが飛散する状態、試料容器ごと脱落する状態、あるいは最悪のものでは回転フレームの半部分が脱落する状態が考えられる。現状の装置の設計では、どの状態を設定するか基準がなく、設計者の判断に委ねられている。本装置では、片側試料容器ごと脱落する状態を考えてアンバランス荷重を2.75MN (280tf) としている。この荷重に耐えられる中心軸として、回転フレーム取付部で外径720mmのものが用いられている。

円盤形フレーム形式にしたことによる節電効果については、試運転時にモータ消費電力を測定して確認した。その結果を図-6に示す。設計計算では、円盤形フレーム形式とした場合の最大中心軸回転数160rpm (遠心加速度100G) でのモータ消費電力は、ビーム型とした場合のおおよそ57%の消費電力となることが予想されていた。それに対して試運転による測定では、おおよそ59%の消費電力であり、設計計算値に比べ2%

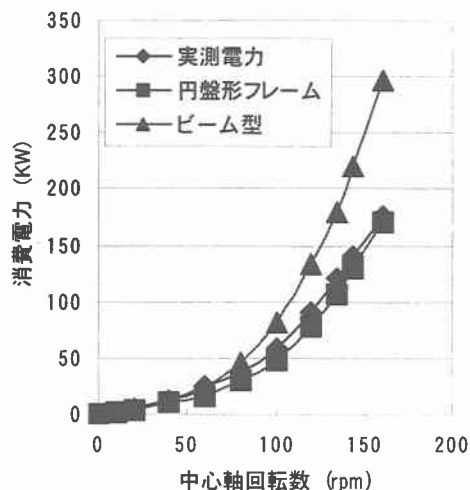


図-6 モータ消費電力測定結果

程度大きくなった。大きくなった原因としては、装置回転体側面にあるビデオ撮影窓の切欠きや、試料容器

およびカウンターウェイトを挿入するための開口部等の風損 (風による抵抗) が考えられるが、この程度の誤差は許容できるものと判断した。

試料容器内冷凍システムの設計では、凍結融解試験に関する資料を参考⁷⁾に、本装置の仕様として岩盤表面温度を初期温度+20°として到達温度-10°に要する時間を6時間以内とした。本装置では、この仕様確認としてモルタル供試体を用いて冷却試験を実施し、予測シミュレーションした結果と比較検討している。図-7は、モルタル供試体表面温度の経時変化について予測シミュレーション値と試験実測値を比較したものである。実測値は、シミュレーション値に比べて温度低下が速く推移していることがわかる。そこで、試験実測値からシミュレーション計算に必要なパラメータを逆算して求め、それと岩盤の諸物性値を用いて予測シミュレーション値を求めた。図-8は、計算結果を示したものである。計算上は、岩盤表面温度が6時間で-10°になるが、この結果については今後の岩体を用いた実験で確認する予定である。

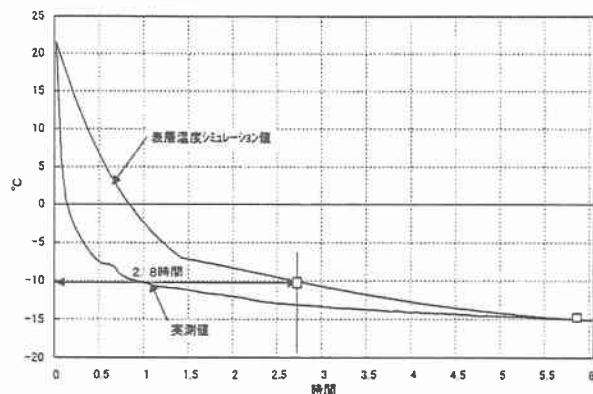


図-7 モルタル供試体による冷却試験結果

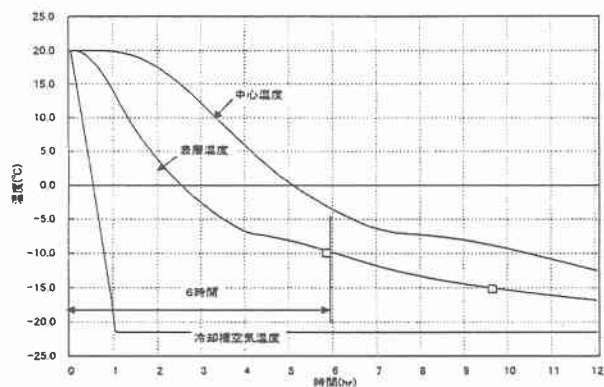
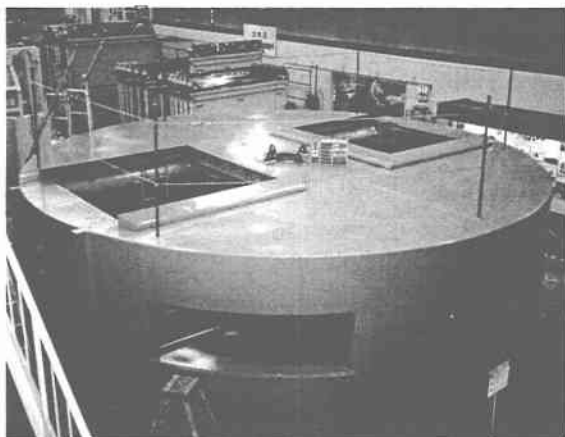


図-8 岩体冷却シュミレーション計算結果

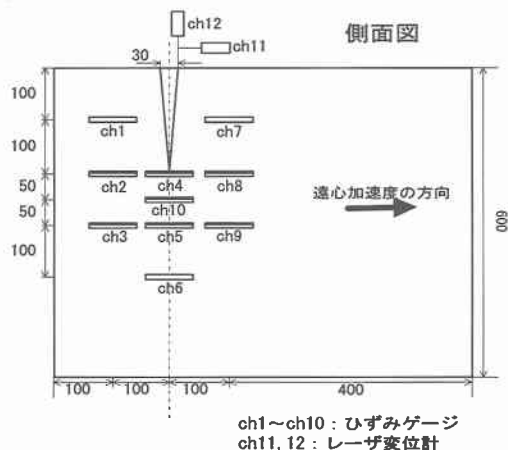
施工では、本装置は各部品単体の重量や寸法上から、実験棟建て屋完成後に設置することが不可能であることが判明した。そのため施工順序としては、平成10年度に本装置の工場製作および装置を設置する地下ピットの建設を行い、平成11年度に装置部材を地下ピットに仮置きして建て屋を建設した。その後、装置組立および試運転の実施という施工工程がとられ、平成12年3月に全工程を完了した。写真-1は、工場製作完了後の仮組状況全景を示したものである。

写真－１ 工場仮組状況全



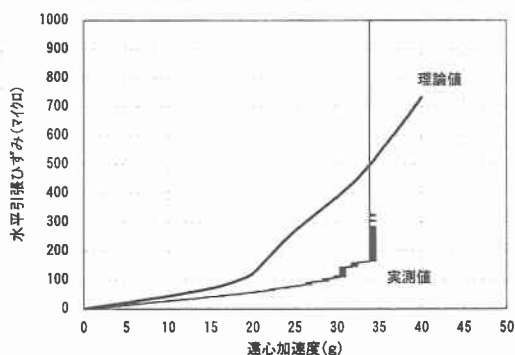
5. 自重破壊実験

装置の性能確認及び、遠心力载荷による自重破壊時の亀裂の進展状況を把握する目的で、単純な引張条件の遠心力载荷実験を行った。図－9に示すように供試体に亀裂幅3cm、深さ20cmの亀裂を入れ亀裂面の直行方向に遠心力が作用するよう供試体を設置した。また、亀裂の進展状況を把握するため亀裂周辺にひずみゲージ(ch1～ch10)、亀裂上面にレーザ変位計(ch11、12)を取り付けた。実験は加速度増加中における供試体の破断を避けるため、遠心加速度の増加を2Gずつ小刻みに行い、ひずみゲージの値を常時モニタした。そして、加速度増加に伴う供試体全体のひずみが安定したことを確認し、順次遠心加速度を増加させた。実験の結果、遠心加速度が34Gで供試体が亀裂面から破断した。



図－9 供試体計測器配置図

実験の解析は現在進めているが、1例として亀裂直下のひずみゲージ(ch4)の理論値(FEMによる弾塑性解析)と実測値との比較を図－10に示す。この結果によると実測値では、遠心加速度が30Gまでひずみが線形的に増加し、30Gを超えると急激に増加し34Gで破断に至った。理論値では約20Gまでひずみがほぼ線形的に増加するが、20Gを超えるとひずみの増加率が急変し、32G近傍で再び変化している。このことから解析結果と実験結果の特徴を利用することにより、ある程度破壊荷重が推定できると考える。



図－10 実測値と理論値の比較

今後はさらに詳細な解析を進め、破壊時のひずみ量の検討を行うとともに、亀裂の位置や深さを変化させたり、亀裂内に水圧や氷結圧を作用させた実験を実施する予定である。

6. あとがき

遠心力载荷装置を用いた岩盤の実験は、現在基礎的実験が開始されて間もない状態である。今後、基礎的実験の結果を踏まえて実際の現場条件に近い実験を行い、防災工事などの現場に役立つ研究成果を出せるよう努力する所存である。

なお、本装置の導入計画からご指導された現札幌開発建設部札幌道路事務所所長(前開発土木研究所構造研究室室長)工学博士 佐藤昌志氏には、装置製作においても適切なご指導を頂いた。また、本装置の製作および設置工事を担当した(株)旭鉄工所の担当各位には多大なご協力を頂いた。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 豊浜トンネル崩落事故調査委員会：豊浜トンネル崩落事故報告書，1996.9
- 2) 第2白糸トンネル崩落事故調査委員会：第2白糸トンネル崩落事故報告書，1998.2
- 3) 木村猛ほか：講座 遠心模型実験，土と基礎，Vol.35，No.11，1987.～Vol.36，No.9，1988.
- 4) 土質基礎研究室：遠心力载荷装置導入される，開発土木研究所月報，No.491，pp75～77，1994.4
- 5) 能登繁幸，日下部祐基：一新技術紹介ー 遠心力载荷装置，北海道技術士センター，コンサルタンツ北海道，No.74，pp23～30，1994.10
- 6) 川島一彦ほか：遠心力载荷装置を用いた実験の現状と将来，建設省土木研究所，土木研究所資料第3339号，1995.3
- 7) 地盤工学会編：岩の調査と試験，pp436～444，1990.11