

中部電力（株）電力技術研究所 正会員○佐藤正俊 上田稔 近藤寛通
名古屋工業大学 正会員 長谷部宣男

1. まえがき

ダムなど岩盤上に建設される重要構造物の地震時挙動を把握するために、構造物と岩盤の連成応答解析が実施される。この解析において地震時の岩盤の動的剛性を的確に評価する必要がある。地震時に構造物基礎岩盤内には上部構造物の自重等による静的応力に加え、地震による動的応力が発生する。この動的応力は振動レベルに応じ変化する。これに対し、通常行われる原位置平板載荷試験は、階段荷重で、段階ごとに応力ゼロまでの除荷と載荷を繰り返す載荷方式¹⁾である。このためその応力状態は、地震時に岩盤に生じるものとは異なっている。そこで本研究は、ある応力値を中心とした硬質岩盤の動的剛性の応力振幅依存性について実験的に検討するものである。

2. 試験概要

2. 1 供試体の種類

硬質岩盤の代表として、アーチダムサイトの岩盤より供試体を採取した。地質は流紋岩（中生代）でありかなり堅硬である。供試体は以下の3種類である。(1)岩盤ブロック供試体を図-1(1)に示す。原位置で採取した大型で割れ目の多い岩塊よりダイヤモンドカッターで切り出し作製した。(2)モデル岩盤供試体（一個の割れ目部をモデル化した供試体）を図-1(2)に示す。ボーリングコアより切り出した天然のクラック部分を供試体中央に配置し、その周囲をモルタルで整形した。モルタル部の弾性係数は、岩石コアの圧縮試験より得られた値程度となるように高強度モルタル（早強モルタルにシリカフェームを混入）で作製した。岩石の引張強度は小さいため、比較的低応力より割れ目の端部に屈折クラックが発生するものもある。この点を考慮して、供試体の割れ目部は屈折クラック（図中の発泡スチロール板の部分）を有するタイプと無いタイプの2種類とした。割れ目部の角度 θ は 45° 程度とした。(3)岩石コア供試体（岩盤の基質部に相当）は、ボーリングコアより割れ目の無い部分を切り出した円柱供試体（直径9x高さ18cm）である。

2. 2 試験条件

図-2に載荷パターンを示す。ある応力を振幅の中心値とし応力振幅を変えた試験を行った。波形は載荷速度を一定とするために三角波とした。各応力振幅において、処女載荷部を除き除荷載荷の1波形を含むように1.5波形とした。表-1に試験条件を示す。地震時に岩盤内に発生するであろう最大加速度は数100gal程度である。この程度の加速度に対して、発生する応力振幅の目安として、無限弾性体中を伝播する平面正弦波（P波）によって発生する最大応力振幅を算出すると、加速度200galに対して $1\sim 40\text{kgf/cm}^2$ 程度（周波数20~0.5Hz、P波速度は対象地点の地震記録より求めた値の2700m/s）である。よって応力振幅は 40kgf/cm^2 以下の範囲とした。載荷速度は、原位置平板載荷試験で標準的な速度である $5\text{kgf/cm}^2/\text{min}$ と、その1000倍で200galの地震時に岩盤内に発生する最大応力速度とほぼ等しい $5000\text{kgf/cm}^2/\text{min}$ とした。応力振幅の中心値は岩盤上の構造物の自重や岩盤内の位置により異なる。本試験では20、 40kgf/cm^2 の2ケースとした。

供試体の変形を高精度に計測するため、約0.003mmの精度を有する差動変圧器(LVDT)を用いた。さらに供試体端面の影響を除くために、LVDTを図-1に示すように供試体表面の端面から離れた位置に直接接着した。特に岩盤ブロック供試体では、割れ目の分布が複雑であるので供試体全体の8ヶ所で変形を計測した。計測精度を十分なものとするため、載荷速度にかかわらず計測間隔を約 0.1kgf/cm^2 とした。供試体数は岩盤ブロックが4体他は3体である。なお試験は供試体を気乾状態にして行った。

3. 試験結果及び考察

図-3に岩盤ブロック供試体の応力-変形曲線の一例を示す。応力-変形曲線はループを描いており、このループの上下の頂点を結ぶ直線の傾きより弾性係数を求めた。弾性係数は岩盤ブロック供試体では約 $10\sim 40\text{kgf/cm}^2$ 程度の値である。同様に、図は略すが弾性係数はモデル岩盤供試体は約 $5\sim 20\text{kgf/cm}^2$ 程度、岩石コアは $40\sim 50\text{kgf/cm}^2$ 程度の値である。

図-4に応力振幅と弾性係数の関係の一例を示す。弾性係数は応力振幅の中心値と応力振幅により著しく異なる。

図-5(1)に岩盤ブロック供試体の弾性係数を、応力振幅1kgf/cm²時の弾性係数で基準化した弾性係数比と応力振幅の関係、載荷速度5000kgf/cm²/minの場合について示す。応力振幅の中心値(a)20kgf/cm²、(b)40kgf/cm²ともに、応力振幅が大きくなる程弾性係数比は小さくなり、最大振幅時には概ね0.5まで低下している。振幅1~5kgf/cm²間で弾性係数比が大きく低下しているものも見られる。図5-(1)(a)、(b)で同じ応力振幅に対する弾性係数比は応力振幅の中心値により異なる。しかし応力振幅の中心値に対する応力振幅の比で見ると、ほぼ一致している。これはある応力振幅の中心値に対し応力振幅依存性が求められている場合に、別の応力振幅の中心値に対するある一つの応力振幅の弾性係数を求めれば、その応力振幅の中心値に対し任意の応力振幅の弾性係数が求められることを示していると考えられる。

図-5(2)にモデル岩盤供試体の弾性係数比と応力振幅の関係を示す。モデル岩盤供試体でも上記の応力振幅依存性が認められる。なお、屈折クラックの有無による大きな違いは認められない。

以上は載荷速度5000kgf/cm²/minの場合である。図を省略するが5kgf/cm²/minでも同様の結果が得られている。即ち、載荷速度の応力振幅依存性への影響はほとんどない。

岩石コアの変形は応力振幅によらず線形であり、剛性の応力振幅依存性はない。岩盤の弾性係数の応力振幅依存性は割れ目部に起因する特性であると言える。

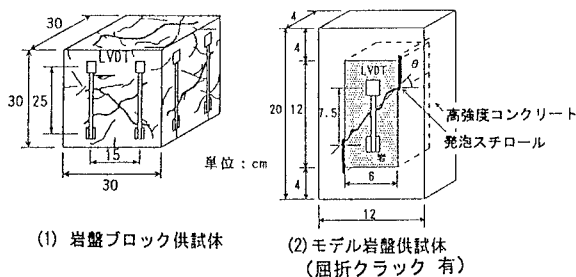


図-1 供試体寸法および計測位置

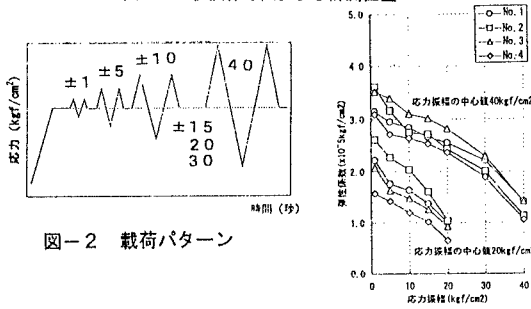


図-2 載荷パターン

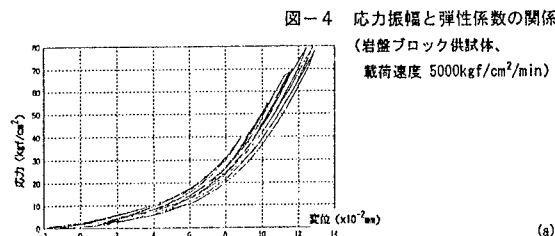
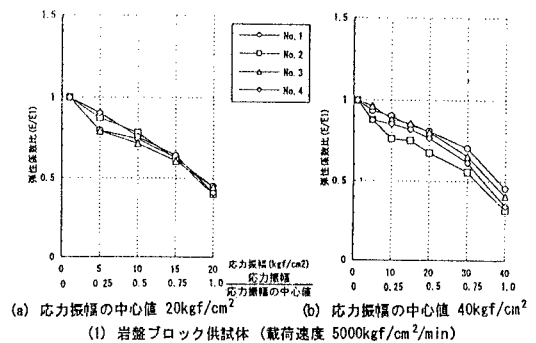


図-3 応力-変形曲線（岩盤ブロック供試体 No. 3、
載荷速度 5000kgf/cm²/min）

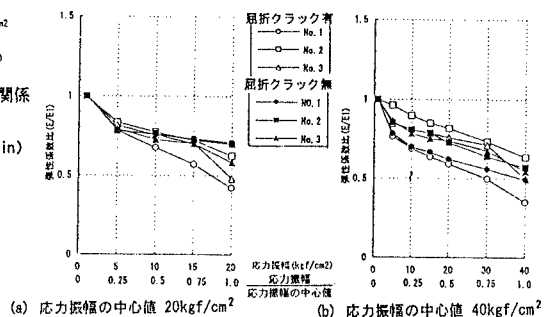
表-1 試験条件

応力振幅の中心値 (kgf/cm ²)	載荷速度 (kgf/cm ² /min)	応力振幅 (kgf/cm ²)
20	5	1, 5, 10, 15,
40	5000	20, 30, 40*

* 応力振幅の中心値 40 kgf/cm²のみ



(1) 岩盤ブロック供試体（載荷速度 5000kgf/cm²/min）



(2) モデル岩盤供試体（載荷速度 5000kgf/cm²/min）

図-5 応力振幅と弾性係数比の関係