

## Ⅲ-347

## 硬質岩盤の動的剛性の載荷速度依存性について

中部電力（株）電力技術研究所 正会員○近藤寛通 佐藤正俊 上田稔  
 日本道路公団 正会員 今泉尚久  
 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。この解析において岩盤の動的剛性を的確に評価する必要がある。このため載荷速度を変えた動的繰返し平板載荷試験が行われることがある。しかしこの試験は主に軟岩を対象に行なわれており、硬質な岩盤で試験が行われた例は極めて少ないようである。硬質岩盤では載荷方式と試験に要する時間を考慮した静的速度（ $0.02 \sim 0.17 \text{ kgf/cm}^2/\text{s}$ の範囲、 $0.09 \text{ kgf/cm}^2/\text{s}$ が標準）<sup>1)</sup>で試験が行われるのがほとんどである。このため硬質岩盤の動的剛性に載荷速度が及ぼす影響は十分に解明されていない。そこで本研究では、岩塊より切り出した岩盤ブロック供試体や岩盤を構成している基質と割れ目部をモデル化した供試体の動的載荷試験を行い、硬質岩盤の動的剛性の載荷速度依存性について考察を行なう。

**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（1）岩盤ブロック、（2）モデル岩盤供試体、（3）岩石コア供試体の3種類である（詳細については参考文献<sup>2)</sup>を参照）。

**2. 2 試験条件**

**（1）試験A** 平板載荷試験と同じ載荷パターンで、載荷速度を通常原位置平板載荷試験で実施される標準速度（ $0.09 \text{ kgf/cm}^2/\text{s}$ ）とその1000倍の速度で試験を行った。供試体の変形を高精度に計測するため、約 $0.003 \text{ mm}$ 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。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 $0.1 \text{ kgf/cm}^2$ とした。供試体本数は岩盤ブロックが4体で他は3体である。なお、試験は次の試験Bを含め供試体を気乾状態にして行った。

**（2）試験B** 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た一定振幅のSIN波の周波数を変化させ載荷速度を変えた試験とした。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 $100 \text{ gal}$ 程度である。この程度の加速度に対して発生する応力速度の目安として、無限弾性体中を伝播する平面正弦波（P波）によって発生する応力速度を算出すると、加速度 $300 \text{ gal}$ に対して $160 \text{ kgf/cm}^2/\text{s}$ 程度（P波速度は対象地点の地震記録より求めた値の $2700 \text{ m/s}$ ）である。一方平板載荷試験相当の載荷速度から加速度を概算すると、 $0.1 \text{ gal}$ 程度で微弱であり、平板載荷試験の載荷速度は地震時に比べると非常に遅い。よって試験の載荷速度を平板載荷試験相当の $0.09 \text{ kgf/cm}^2/\text{s}$ からこの10000倍で $900 \text{ kgf/cm}^2/\text{s}$ までの、上記地震時に発生する最大加速度程度を十分に含む範囲とした。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 $20, 40 \text{ kgf/cm}^2$ の2ケースとした。応力振幅は $15 \text{ kgf/cm}^2$ である。さらに載荷の繰返しが剛性に与える影響について検討するため、表-1の一連の載荷速度を変えた載荷パターンを3回繰返した。計測精度を十分なものとするため、載荷速度によらず1波形あたり約100点の計測を行った。

**3. 試験結果及び考察**

**（1）試験A** 図-3(1)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き、荷重ホールド時にクリープ、除荷後には残留変形が生じている。図-4にサイトで実施した原位置平板載荷試験の応力-変形曲線の例を示すが、これと似ている。図-3(2)のモデル岩盤供試体の応力-変形曲線も原位置平板載荷試験の応力-変形曲線に似ている。これに対し図を省略するが岩石コアの応力-変形曲線はほぼ線形で可逆的であった。

岩盤ブロック、モデル岩盤供試体ともに載荷・除荷のループは載荷速度が速い方が大きい。接線弾性係数、変

形係数は載荷速度により異なる。これは、岩盤の応力-変形特性に載荷速度の影響があることを示している。なお、モデル岩盤供試体の応力-変形曲線には屈折クラックの有無による顕著な違いは認められなかった。

（2）試験B 図を省略するが岩盤ブロック供試体の応力-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では、10～35万 $\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度である。同様に図を省略するが、弾性係数はモデル岩盤供試体は5～15万 $\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度、岩石コアは40～50万 $\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度の値である。

図-5(1)に岩盤ブロック供試体の弾性係数を静的載荷速度時の弾性係数で基準化した弾性係数比と載荷速度の関係を示す。試験は一連の載荷速度を変えた載荷パターンを3回繰り返して行ったが、回数により弾性係数にはほとんど違いが見られないため、1回目の弾性係数比を図に示した。応力振幅の中心値20  $\text{kgf}/\text{cm}^2$ (a)、40 $\text{kgf}/\text{cm}^2$ (b)ともに、供試体による値のばらつきは大きいものの、載荷速度が速くなる程弾性係数比は大きくなっていく。しかし地震時に作用する程度の載荷速度の範囲（数100 $\text{kgf}/\text{cm}^2/\text{s}$ 以下）では、最大でも約1.2であり小さい。

図-5(2)にモデル岩盤供試体の弾性係数比と載荷速度の関係を示す。モデル岩盤供試体でも岩盤ブロック供試体の場合と同様の載荷速度依存性が認められる。一方、岩石コアの変形は載荷速度によらずほぼ線形であり、剛性の載荷速度依存性はなかった。硬質岩盤の弾性係数の載荷速度依存性は割れ目部に起因する特性であると言える。

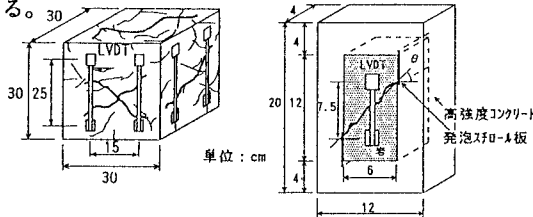


図-1 供試体寸法および計測位置  
(1) 岩盤ブロック供試体 (2) モデル岩盤供試体 (屈折クラック 有)

表-1 試験条件

| 載荷速度<br>( $\text{kgf}/\text{cm}^2/\text{s}$ ) | 載荷応力<br>( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) | ホールド時間<br>(min) |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| 0.09                                          | 5, 10, 15, 20, 25,                   | 5               |
| 90                                            | 30, 40, 50, 60, 60                   | 0.005           |

(1) 試験A

| 応力振幅の中心値<br>( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) | 応力振幅<br>( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ) | 載荷速度<br>( $\text{kgf}/\text{cm}^2/\text{s}$ ) |
|------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 20                                       | 900, 450, 90, 9, 0.09                | (10) <sup>*</sup> (5) (1) (0.1) (0.001)       |
| 40                                       | 15                                   |                                               |

(2) 試験B

\* 周波数相当

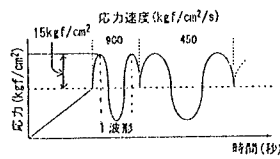


図-2 載荷パターン (試験B)

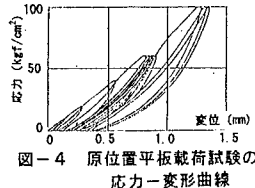


図-4 原位置平板載荷試験の  
応力-変形曲線

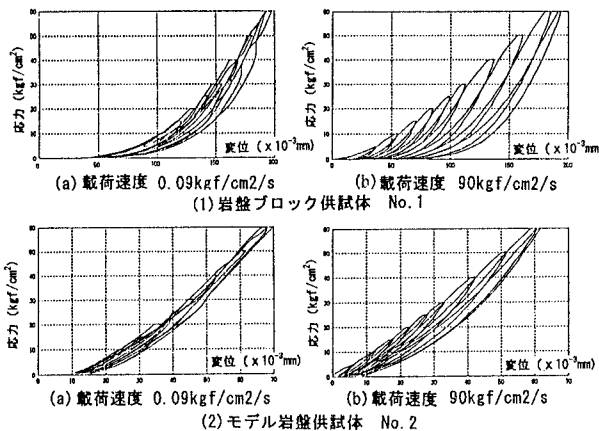
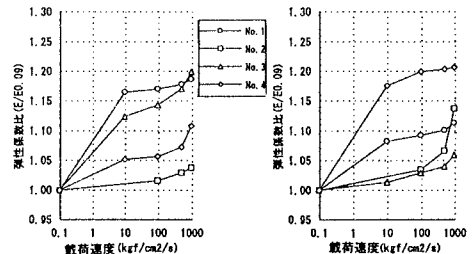


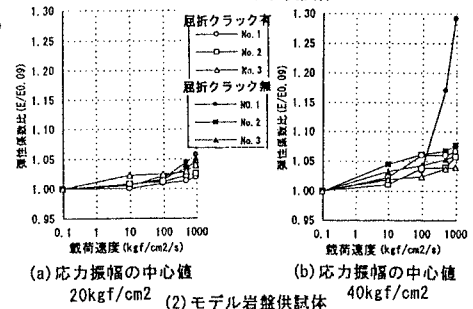
図-3 応力-変形曲線



(a) 応力振幅の中心値  
20 $\text{kgf}/\text{cm}^2$

(b) 応力振幅の中心値  
40 $\text{kgf}/\text{cm}^2$

(1) 岩盤ブロック供試体



(a) 応力振幅の中心値  
20 $\text{kgf}/\text{cm}^2$

(b) 応力振幅の中心値  
40 $\text{kgf}/\text{cm}^2$

図-5 載荷速度と弾性係数比の関係

参考文献 1) 土木学会：原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針  
2) 著者ら：硬質岩盤の動的剛性の応力振幅依存性について、本概要集

—解説と設計の指針—, pp. 3～16, 1983.