

ロックボルト補強土の振動特性に関する研究

安井 将文*

1 研究の目的と概要

山岳トンネル工法に使用されているロックボルトと吹付けコンクリートによりトンネルの掘削面を補強し、トンネルの安定化を図る工法は他の地盤にも使用される。たとえば、トンネル掘削による地表面の沈下を防止する目的で施工される縫地工法^{縫地}にロックボルトを使用する例などその一例と言える。また粘着抵抗のほとんど無い砂質土に必要な高さまで積み上げ、人工地盤を築造したり、地盤を掘削し鉛直な壁面を築造する場合、従来はテールアルメ工法、アンカー工法等が採用されているが、積極的に吹付け、ロックボルト工法も適用されている。また急斜面の防災対策として最も一般的に適用されているアンカー工法に対しても、吹付け、ロックボルト工法が採用され始め、表面の保護膜である吹付けコンクリートとその補強体であるロックボルトが一体となり、斜面等を補強する『擬似擁壁』^{擬似擁壁}が提案されている。筆者はこの人工的に形成した擬似擁壁に着目し、振動に対するその構造の特性を調査した。モデルは表面を吹付けコンクリートで保護した砂であり、さらにロックボルトで表面と地盤を補強したものを想定し、この人工砂層を水平振動台上に設置し、これ迄各種の振動実験を行った。

砂地盤基礎からの入力と砂層モデル内の各点の加速度応答波形から、モデルの鉛直方向と奥行方向の伝達倍率の変化を求めた。その結果、ロックボルトと吹付けコンクリートで築造した場合の構造は背面土圧により変形が可能な（大きな）いわゆる“たわみ性擁壁”を形成していることが実証された。

今回の報告は加振時の砂層の表面に及ぼす背面土圧についてである。砂地盤が振動時にロックボルトにより補強された砂層表面部と吹付けコンクリートに及ぼす土圧に着目し、砂層モデルの鉛直な前面壁に作用する土圧の特性を調査することを目的とした。

土圧計の計測装置を製作し、動土圧の特徴を求めるため、砂層モデルの前面を堅固な一枚板で固定した場合のモデル（Aタイプ）とモデル前面を5層5列・計25個の薄板・ロックボルト付き補強板により形成した場合のモデル（Bタイプ）について各種の実験を行った。

2 実験の方法

水平振動台（巾120cm×奥行250cm）の上に砂層モデル用型枠（高さ80cm、巾50cm、奥行60cm）を設置し、型枠内に陣屋硅砂7号の乾燥砂を積み上げる。砂層の総重量はA、Bタイプとも約210kgfである。

*理工学部土木工学科教授 応用力学

2-1 Aタイプモデル

図-1 は前面を剛な板と仮定した場合のモデルと型枠であり、1層の厚さ10cmの砂層重量として40kgfの砂を各層毎に積み上げる。途中、第3層の左右中央の位置に前面固定板の裏側(砂側)に土圧計測装置を設置する。積層終了後、砂層上面の変位計測器を型枠上部に設定する(図-6 参照)。

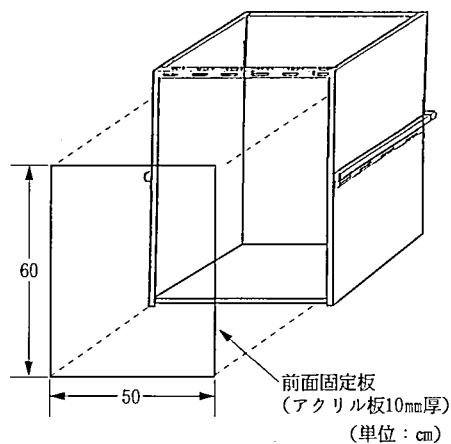
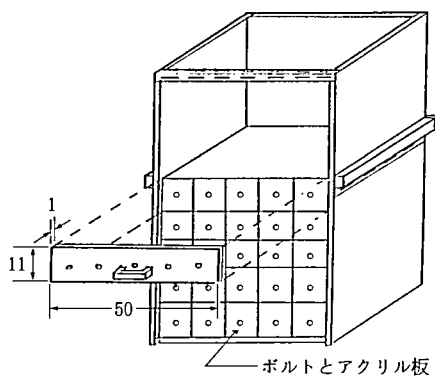
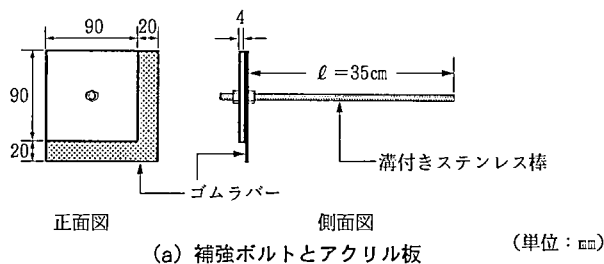


図-1 前面固定砂層モデル(Aタイプ)

2-2 Bタイプモデル

図-2 に示すように、砂層の前面に溝付きステンレス棒(長さ $\ell=35\text{cm}$)と一体となっ



(b) 5層の補強された砂モデル (単位: cm)

図-2 ボルト補強した砂層モデル(Bタイプ)

た薄いアクリル板 (90×90×4 mm) を1層につき5枚水平に設置し、1層分の砂を積み上げる。乾燥砂が表面の薄板間からもれ出るのを防止するため、アクリル板には図-2に示すように、ゴムラバーを付した。この操作を5回繰り返し、5層の高さ50cmの補強砂層を作る。土圧の計測はAタイプモデルと同一位置である第3層の中央に図-3に示す計測装置を設置し行う。

2-3 加振の種類

表-1にAタイプ、Bタイプモデルの実験の概要を示す。加振は周波数10Hz一定、2分間加振の場合 (A-C、B-Cと表現) と周波数10Hz～50Hzの往復スウィープの場合 (A-S、B-Sと表現) の2種類である。スウィープ加振の場合も加振時間は2分である。

表-2にそれぞれの補強の種類、加振の種類による実験の名称を掲げる。表中の数値はそれぞれの加振時の加速度の大きさを示す。

表-1 実験の概要

タイプ	実験の種類	概要
Aタイプ (前面固定)	A-C	周波数10Hz一定 2分間加振
	A-S	周波数10Hz～50Hz往復スウィープ 2分間加振
Bタイプ (ボルト補強)	B-C	周波数10Hz一定 2分間加振
	B-S	周波数10Hz～50Hz往復スウィープ 2分間加振

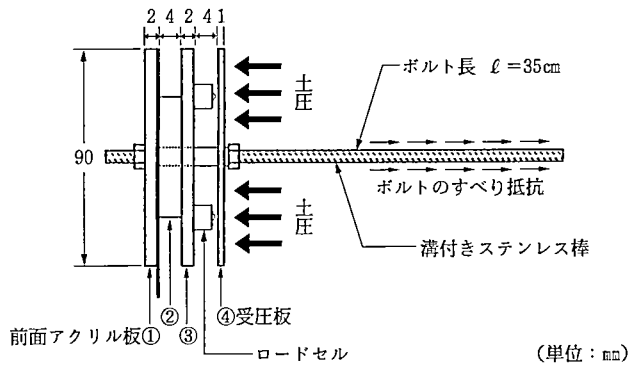
表-2 実験の種類

実験名	前面	水平加振	加速度 (G)
A-C-0.05 A-C-0.1 A-C-0.2 A-C-0.4 A-C-0.6 A-C-0.8	固定	10Hz一定 2分間加振	0.05 0.1 0.2 0.4 0.6 0.8
A-S-0.05 A-S-0.1 A-S-0.2 A-S-0.4 A-S-0.6 A-S-0.8			0.05 0.1 0.2 0.4 0.6 0.8
B-C-0.1 B-C-0.2 B-C-0.3	ボルト 補強	10Hz一定 2分間加振	0.1 0.2 0.3
B-S-0.1 B-S-0.2 B-S-0.3			0.1 0.2 0.3

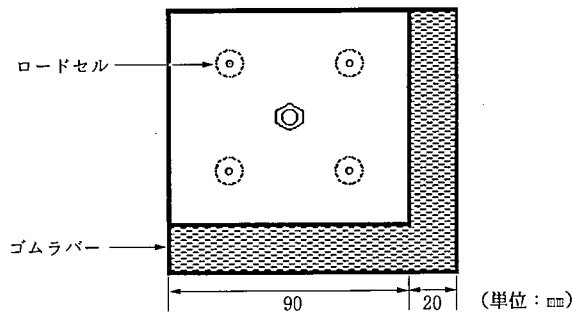
3 土圧計測装置

図－3 は土圧計測装置である。砂層表面を保護・補強する吹付けコンクリートは一般的にはロックボルトにより補強され吹付けコンクリートと一体化した構造である。表面の吹付けコンクリートは砂から圧力を受け、この圧力は吹付けコンクリートと一体となっているロックボルトの砂中におけるすべり抵抗により釣合い、安定を保つ機構となっている。

装置は砂が接触する受圧板④と、この力を計測するセンサーを貼り付けた板③と、表面の保護板①から成っている。背面の圧力が④に作用し、この力が土圧計を介して③に伝わり、さらに①を通してボルトのすべり抵抗とつり合うものである。



側面図



正面図

図－3 土圧計測装置

図-4、図-5 は完成した土圧計測装置のそれぞれ静的・動的校正試験結果である。図-4 の場合は、各 1 kgf を 10 秒間静的に载荷し、4 kgf の往復試験結果で、これを計 3 回行った。どの場合も精度良く測られていることが分かる。図-5 の動的载荷は(a)図に示す振り子式を適用した。重りは 1.1kgf で柄の長さ $\gamma = 38.0\text{cm}$ であり、最下点 A 点通過時の土圧計に作用する鉛直下向きの力 F は 1.74kgf であり、図から (1.77、1.80、1.89、平均 1.82kgf) 約 5 % 以内の精度である。

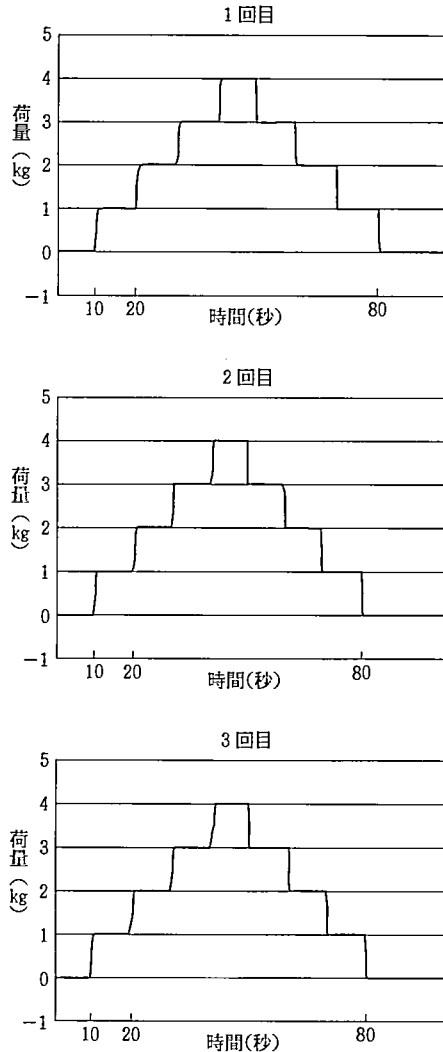
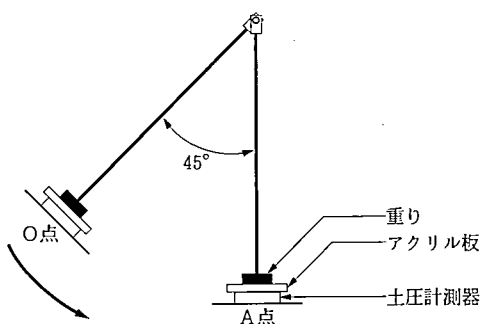
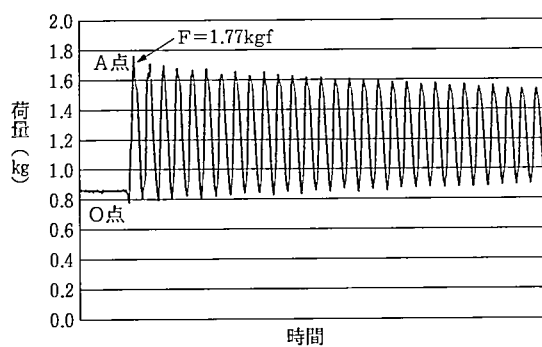


図-4 土圧計測装置の校正試験結果 (静的な場合)

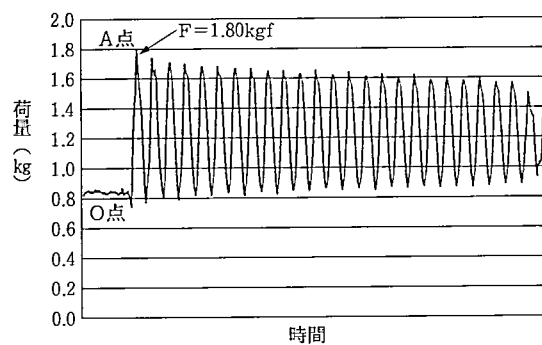


(a) 校正試験装置

1 回目



2 回目



3 回目

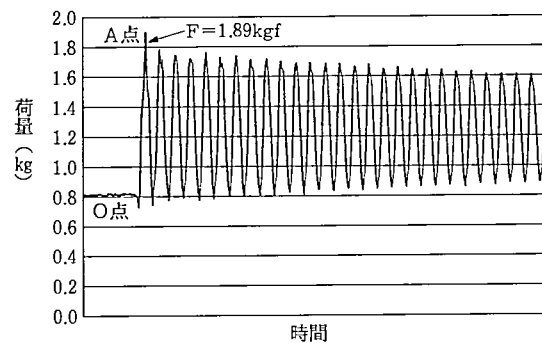
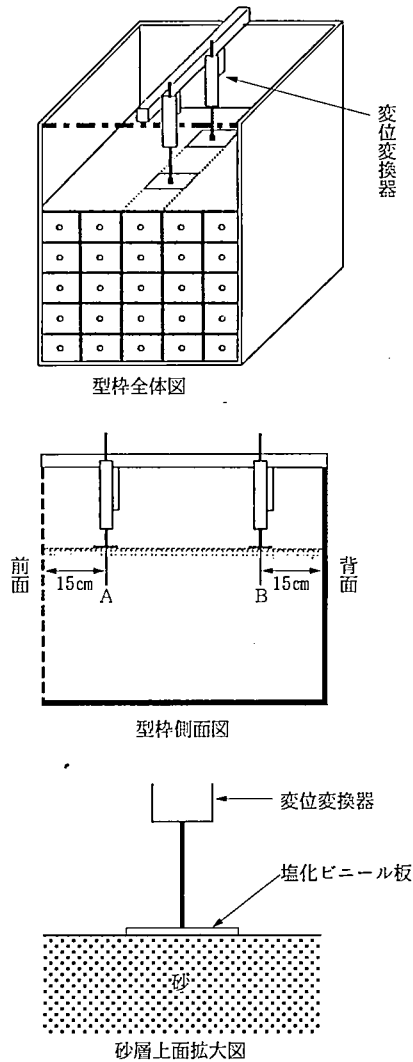


図-5 土圧計測装置の校正試験結果 (動的な場合)



図－6 砂層モデル上面の変位計測装置

加振時、砂層モデル上面の鉛直方向変位を計測するため図－6に示すように砂層型枠に2個の変位変換器を取り付けた。砂の表面の変位を接触型で直接測定することは困難であり、図のごとく変換器の棒の先端に9 cm角の塩化ビニール板を取り付け、この板を砂の上面に設置し計測した。計測については変換器を取り付けた梁の振動や、棒の先端の板の振動などの影響はあるものの計測可能である。

4 実験結果

図－7、図－8にそれぞれA－CとB－Cの周波数10Hz一定2分間加振の場合の動土圧の計測結果を示す。

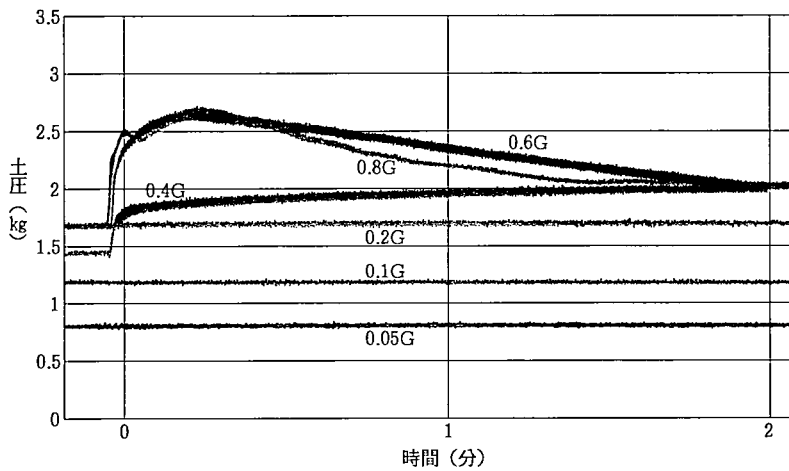


図-7 A-Cタイプの土圧計測結果

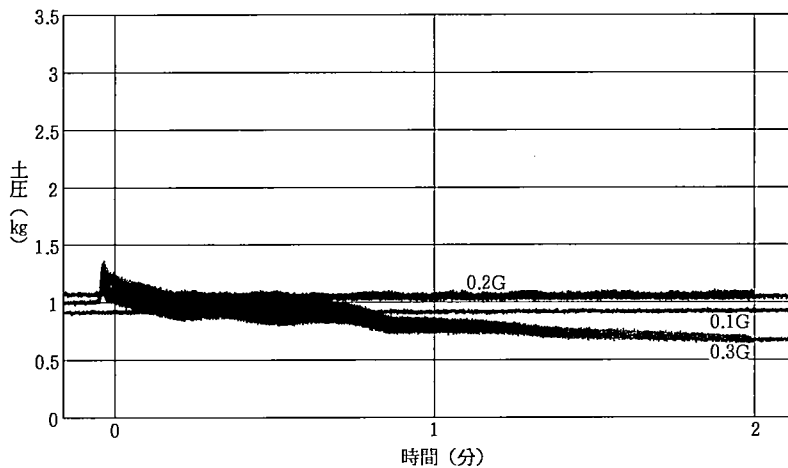


図-8 B-Cタイプの土圧計測結果

図-7のA-C（前面剛な固定面）の場合には、0.05G～0.2Gの範囲では動土圧は全く変化しない。0.4G以上では10Hz一定加振が作用し始めた瞬間から急激な土圧の増加が見られ、その後徐々に減少はするが、加振終了時には加振前より増加した値になる。

図-8はボルトにより補強されたいわゆる柔構造の砂層モデルの場合である。0.1～0.2Gの加振力についてはA-Cと同様に土圧の変化は生じない。0.3Gの場合には開始時に土圧の増大はあるが、時間の経過とともに減少し、終了時には開始直前の値よりも減少する。

この事は砂層前面がボルトにより補強された砂とボルトと薄板から成る領域を鉛直方向に積み重ねたいわゆる擬似擁壁を形成しており、この構造が変形能が大きく、水平方向に変形することにより背面の圧力を軽減させたことを示している。この事実は通常の柔構造の現象そのものであり、その現象が砂層モデルの場合にも出現したものと考えられる。

図-9、図-10はそれぞれAタイプ、Bタイプモデルの10~50Hz往復スウィープの計測結果である。

図-9 から、0.05~0.2Gの範囲では周波数の変化とともに土圧のゆるやかな増加を示している。0.4G以上では加振の開始時に急激な圧力の増加が見られ、約2~2.5倍に増大している。また終了時の圧力も初期圧力の1.5~2倍に増大。この変化は10Hz定常2分間加振の場合より大きな値である。

図-10から0.1Gの場合は変化はほとんど見られず、0.2~0.3Gでは土圧が図-9(a)のAタイプの場合とは逆に減少している。この結果は図-8に示した場合と同一の現象で、加振による背面土圧により、ボルトと前面の補強板が変位し背面土圧が軽減されたことを示しており、補強された砂層部分の構造がたわみ性擁壁の特徴を往復スウィープ試験時にも発現されていることを実証したものと言える。

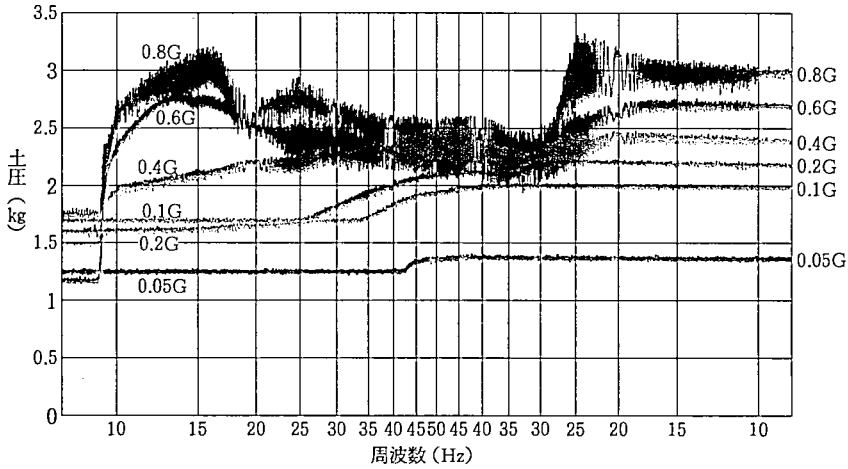


図-9 A-Sタイプの土圧計測結果

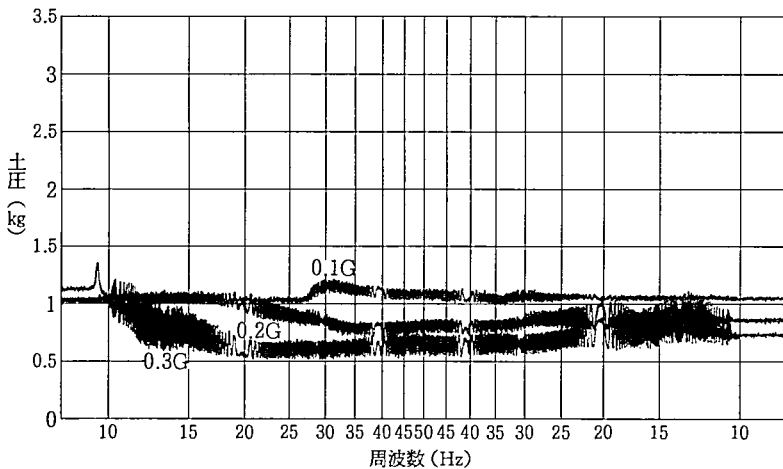


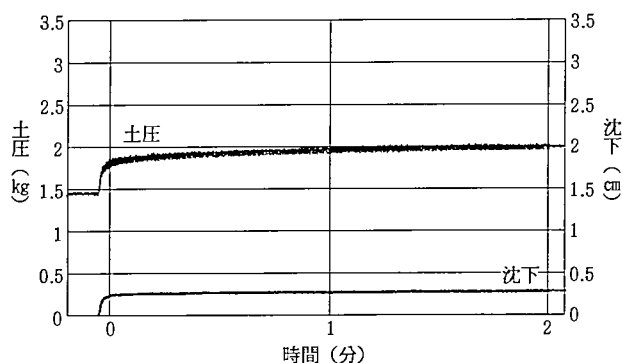
図-10 B-Sタイプの土圧計測結果

尚、この場合 (0.3G) には補強された砂層前面の個々の壁面 (5 層 \times 5 列 = 25ヶ) は互いに大きな相対変位を有し、しかも前面左右方向に弯曲したアーチ状の曲面を形成し安定を保つ。しかしながらボルト長 $\ell = 35\text{cm}$ の場合には加振力 0.4G 以上では前面の変形が大きく、個々の補強板の間の相対変位により砂が板相互の隙間から漏れ、破壊した。砂の移動を防止する一層の工夫によりこの破壊は防止可能と思われる。従ってこの報告は $\ell = 35\text{cm}$ の場合の非破壊の条件に限定した値を採用している。

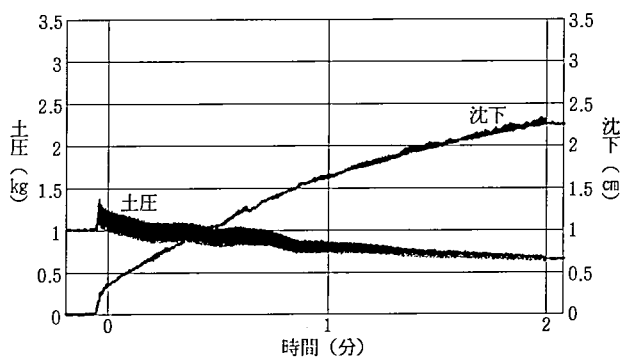
図-11、図-12にそれぞれ定常加振、往復スウィープ試験の場合の土圧、変位の計測結果を示す。

図-11から定常加振の場合、Aタイプモデルは砂層上面の変位は加振開始時に急激に生じ、その後は発生せず最終沈下量も 5 mm 以下である。一方、Bタイプモデルの場合は加振開始後ほぼ一定の割合で沈下し、最終値は 20mm であり Aタイプに比較して大きな値である。これは補強モデルが前述の柔構造を有する擬似擁壁である事の証例であり、土圧の減少と砂層上面の沈下は一对の現象であることは自明の理と言わねばならない。

図-12から Aタイプの場合でも各種の周波数を含んだスウィープ試験では堅固な箱に詰められた砂の締固めを振動により行った場合と考えられ、締固めによる上面の沈下が生じた。また、Bタイプの場合には図-11(b)の場合より大きな沈下が生じ、各種の周波数によ



(a) A-C (0.4G) の場合



(b) B-C (0.3G) の場合

図-11 A-C (0.4G) と B-C (0.3G) の変位と土圧の計測結果

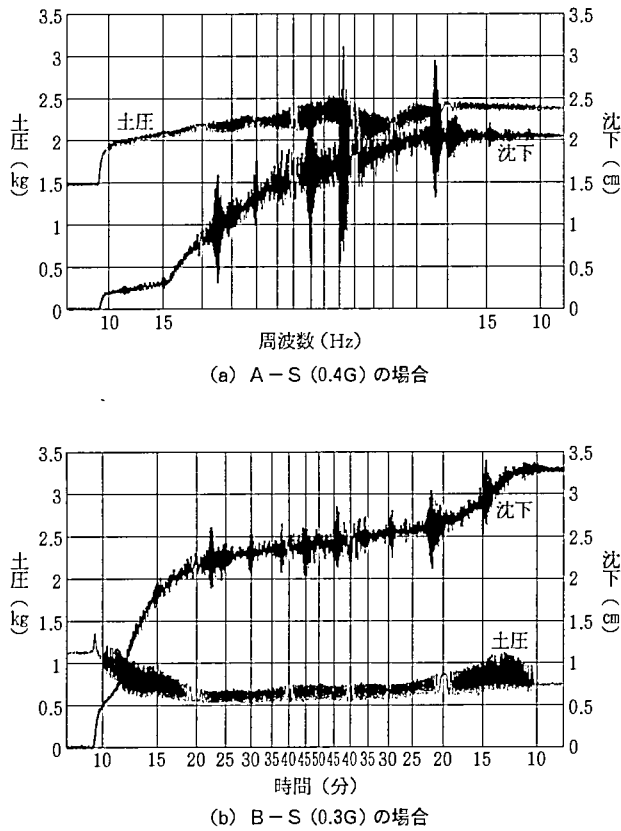


図-12 A-S (0.4G) と B-S (0.3G) の変位と土圧の計測結果

る影響が現れていることが分かる。

5 考察

砂質地山を吹付けコンクリートにより補強した場合の斜面の安定を考えるため、粘着抵抗のない摩擦抵抗のみを有する砂から成る鉛直壁面を有するモデルを考え、モデル前面を1枚板である剛な壁面モデル (Aタイプ) と5層5列 (25枚の補強された板) に配置したボルト付薄板補強板で前面を形成したモデル (Bタイプ) について、周波数10Hz一定加振と10~50Hz往復スウィープ加振の2種について加振力を変化させ実験を行った。

その結果を図-7から図-12に示したが、それらの結果から『薄板を溝付きボルト ($\ell = 35\text{cm}$) で補強した前面板25個より成るモデルは、加振時、各板の変形能が大きく、また、変形により背面土圧の軽減がなされている』ことが実証された。

この事は、ロックボルト、吹付けコンクリートにより補強した斜面の構造が、個々の補強した板の大きな変形能により土圧を軽減させ安定化する機構を有する構造であることを物語っている。以上の機構を考慮に入れて吹付けコンクリートとロックボルトにより施工される砂質地盤の斜面について重要なことは

- ①壁面とロックボルトが一体であることが基本

②壁面は個々の分割した要素と考え、要素の相対変位が可能な構造であること

③背面の砂質地山が流出しない構造

などである。

なお、本研究は平成6、7年度の土木工学科卒業研究として行われた資料を採用したものであり、特に7年度卒業生である浅見健一、有賀貴志、小林健介、塚田哲也、萩原龍也、久島敏靖君の6名にはその努力に心からの感謝を致します。また本研究は明星大学特別研究助成の研究課題であることをここに記す。

参考文献

- 1) 西村・山本；比較的短いロックボルトによる斜面安定のつり合い力、土木学会第40回年次学術講演会講演概要集、Vol.3pp163-164, 1985