# 超音波反射特性による

# グラウンドアンカーの緊張力推定

平成 23 年 2月 23 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

岩本 勲哉

要旨

我国において、斜面の安定化を図る目的でグラウンド アンカーが多数施工されてきたが、施工から数十年経過 したアンカーに著しく性能が低下したものが確認され、 限られた予算制約のもとでアンカーを効率よく維持管 理・補修することが求められている。しかし、アンカー 性能を定量的に評価するために行うアンカーの残存緊張 力の測定は、その試験にかかる多大な費用と試験時間か ら十分に行われていないのが現状である。そこで本研究 は、低コストで簡易にアンカーの残存緊張力を測定する ために超音波法に着目し、緊張力と超音波の反射特性の 関係を検討した。

本研究の成果として、実験によって緊張力と超音波の 反射特性の相関を確認し、超音波パラメータから特徴的 な反射特性の変化傾向を得た。また数値解析からも実験 で得られた反射特性の変化するメカニズムが確認できた。 これらの結果から超音波の反射法による緊張力推定の可 能性を示すことができた。

第	1章	序 論	1
	1.1	研究の背景	1
	1.2	研究の目的	3
	1.3	既往の研究	3
	1.4	本 論 文 の 構 成	5
第	2 章	超音波	6
	2.1	概 説	6
	2.2	種類	6
	2.3	工学的利用	7
	2.4	非破壞検査	7
	2.5	特性パラメータ	
	2.	5.1 最大振幅値および最大振幅比	8
	2.	5.2 エネルギー	9
	2.	5.3 伝播速度	9
	2.	5.4 反射と透過	10
	2.	5.5 到達時間	10
	2.6	デジタル信号波形の周波数解析としての離散フーリエ変換	11
	2.7	離散フーリエ変換を用いた Partial power	12
第	3 章	反射法のグラウンドアンカーへの適用性(準備実験)	14
	3.1	目 的	14
	3.2	概 要	14
	3.3	結果と考察	
	3.	3.1 振幅値と緊張力	<u>15</u>
	3.	.3.2 フーリエ変換による Partial power	<u> </u>
	3.4	まとめ	18
第	4 章	超 音 波 反 射 特 性 と 媒 質 接 触 の 評 価 実 験	19
	4.1	目 的	19
	4.2	概 要	19
	4.3	結果と考察	20
	4.	3.1 エネルギー	20
	4.	3.2 最大振幅值	22

	4.	3.3 センサ周波数	<u>2</u> 2
	4.4	まとめ	<u>2</u> 3
第	5 章	接触程度のモデル化と数値解析シミュレーション	24
	5.1	目 的	24
	5.2	アルゴリズム	24
	5.3	解析条件	25
	5.4	受信波形	25
	5.5	結果と考察	26
	5.	5.1 最大振幅值	26
	5.	5.2 エネルギー	27
第	6 章	結論	28
	6.1	まとめ	28
	6.2	今後の課題と展望	29
参考文献			
謝問	锌		33

## 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

グラウンドアンカー(以下、アンカーと称す)とは、地中にグラウトによって 造成する定着部(アンカー体)と地表付近の構造物(アンカー頭頂部)を高強度 の引張り材(テンドン)で連結させて緊張力を地盤、構造物に伝達するためのシ ステムである。斜面の安定や、構造物の浮き上がりや転倒の防止などを目的とし て土木建築分野において広く利用されている。我国においては、工期の短縮、工 事費の節減などの経済性にも優れた工法として、昭和 32 年(1957年)に導入さ れて以来、広範に用いられてきた。特に高速道路の斜面においては昭和44年(1969 年)から斜面の安定、地すべり抑止を目的としてアンカーが使用され始め、現在 に至るまでに12万本以上のアンカーが打設されている<sup>1)</sup>。しかし、近年施工され てから数十年経過したアンカーにおいて機能低下したものが多く確認されるよう になり、テンドンの破断や頭頂部の落下、浮き上がり、斜面・構造物などの変状 などの問題が報告されている。特に1988年に土質工学会(現:地盤工学会)で制 定された「永久構造物として必要な防食に関する性能保証の基準」を満たしてい ないアンカー(以下、旧タイプアンカーと称す)で、上述の問題が顕在化してい る<sup>2)</sup>。このことを受けて、平成2年(1990年)以降、防食性能が向上したアンカ ー(以下、新タイプアンカーと称す)が主流となってきた。一方で、すでに使用 されている旧タイプアンカーの割合が多いことや(図 1.1.1、図 1.1.2 参照)、最近、 新タイプアンカーに関しても、導入後10年以内に損傷や破断が確認された例が報 告されており、アンカーの適切な維持管理手法の確立が求められている。現在、 アンカーの維持管理は、「グラウンドアンカー維持管理マニュアル」<sup>3)</sup>に基づいて 予備調査、点検、健全性調査、対策の実施という流れで行われている(図 1.1.3 参 照 ) 。 予 備 調 査 で は 点 検 に 先 立 ち 、維 持 管 理 に 必 要 な デ ー タ を 収 集 し 、ア ン カ ー を 新 タ イ プ 、 旧 タ イ プ に 分 類 し 周 辺 条 件 な ど か ら 点 検 内 容 を 決 定 す る 。 点 検 は 初 期 点 検 、 日 常 点 検 、 定 期 点 検 お よ び 異 常 時 点 検 か ら 構 成 さ れ て い る 。 予 備 調 査 の 結果から健全性の問題が顕在化していると考えられるアンカーに対して、主に目 視によって点検を行う。目視点検において健全性に問題がある可能性が大きいと 判断される場合には、テストハンマー、リフトオフ試験、超音波探傷試験などに

よる健全性調査が行われ、必要に応じて、アンカーの増し打ち、再緊張、緊張力の緩和などの対策が行われる。

上述の目視点検によって外観からの大規模変状は確認できるものの、アンカー 部材の大部分は地中に埋設され直接点検することが困難なため、地盤内部で生じ るアンカー体の初期の劣化状態(腐食の進行、断面欠損率の上昇、緊張力の変動 など)を評価することは容易ではない。地盤内のアンカーは腐食の進行、断面欠 損率の上昇、緊張力の変動というメカニズムで経年的に劣化が進行すると考えら れる。一方で地盤内部のアンカーの腐食の状況や断面欠損率は直接測定すること ができないことから、アンカーの残存緊張力を測定することで、地盤内部のアン カーの劣化状態が推定・評価されている。

アンカーの残存緊張力を測定する手法に関して実用化に至っているものに荷重 計による測定と、リフトオフ試験による測定がある。荷重計に関しては基本的に はアンカーを打設するときに設置することで緊張力の経年的な変化をオンデマン ドで計測することが可能である。しかし、当然のことながら、打設時に荷重計を 設置していないアンカーの緊張力を測定することはできず、旧タイプアンカーの 多くは荷重計が設置されていないのが現状である。荷重計が設置されていないア ンカーやアンカー打設時の緊張力の確認を目的としてリフトオフ試験が行われて いる。リフトオフ試験は油圧式ジャッキを用いてアンカー頭頂部に引張荷重を与 え、荷重と頭頂部の変位量の関係から残存緊張力を推定する手法である。測定概 要を図 1.1.4 に示す。リフトオフ試験は荷重計と同様に精度よく緊張力を推定す ることができる一方で、リアルタイムでの測定はできない。リフトオフ試験は多 大な費用(約 50 万円/箇所)と試験時間(約 60 分/本)を要し、大規模な試験装 置の搬入をともなうことから、試験本数は限られ、試験間隔は長く設定されてい ることが多い。また、リフトオフ試験は直接アンカーに引張り荷重を与えること から、アンカーの劣化状態によっては、試験中にテンドンの破断やアンカー体が 引き抜ける恐れがあることから、慎重に、かつ安全に試験を計画・実施する必要 がある 4)。以上より、リフトオフ試験の簡略化、あるいはリフトオフ試験に代わ る簡易で安価にアンカーの残存緊張力を測定する手法の開発が強く望まれている。

## 1.2 研究の目的

先述のようにアンカーの残存緊張力の測定は、アンカーの健全性や斜面・構造 物の挙動の把握には非常に重要であり、長期にわたる計測が必要であるにもかか わらず、十分に実施されていないのが現状である。そのため長期にわたり広範囲 に適用可能な簡易で安価な残存緊張力の計測技術の開発が望まれている。そこで 本研究では、一般に測定が簡便なことで知られる超音波を用いた方法(以下、超 音波法と称す)に着目して、アンカーの緊張力推定法としての適用性を検討する ことを目的に研究を進める。超音波法を用いる手法として、アンカーの軸方向に 超音波を入射し破断箇所からの反射波を利用する手法や、アンカーヘッドにアン カー軸とは垂直な方向に超音波を入射させ、その透過特性から緊張力を推定する 手法(以下、透過法と称す)が研究されている(詳細は後述する)。しかし、アン カーヘッドの形状によっては入射位置ごとの透過特性に差異が認められる場合や、 ヒステリシスの影響がみられる場合もある。特にくさびタイプにおいてはアンカ 一頭部の締付け度合いが緊張力以外にその定着具に起因するせん断力の影響を受 けるためにヒステリシスの影響が顕著であった。そこで本研究では、くさびタイ プにも対応可能な方法を検討する。新たなアプローチとしてはアンカーヘッドの 頭頂部において支圧板に向かい超音波を送信し、アンカーヘッドと支圧板との間 において多重反射する超音波(以下、反射法と称す)を用いる。一般に超音波は 異なる媒質を伝播するときに媒質の物性に応じた反射特性を示す。また同じ媒質 でも境界がある場合は、その条件(接触面積、応力など)に応じた反射特性を示 す。本研究では、アンカーヘッドと支圧板の接触程度が緊張力によって変化する ことで、 接 触 面 を 反 射 す る 超 音 波 特 性 が 変 化 す る こ と が 期 待 さ れ る 。 本 研 究 は 以 下のように展開する。まず反射法の適用性を、緊張力を変化させた実際のアンカ ーにより検討する。そして反射波と接触程度との関係を、頭頂部を中実丸鋼で模 した室内載荷実験によって詳細に検討する。さらに、数値解析シミュレーション により実験結果を検証するとともに媒質接触のメカニズムについても考察する。 最後に本研究の今後の課題と展望を述べる。

## 1.3 既往の研究

本節ではアンカーの維持管理、緊張力の測定に関する既往研究を概観するとと もに本研究との関連について述べる。これまでアンカー緊張力を直接的あるいは、 間 接的 に 推 定 す る 試 み が 多 く の 研 究 者 に よ り な さ れ て い る 。 例 え ば 、大 窪 ら<sup>5)</sup>は 、 高速道路の斜面に導入されているアンカーの維持管理に関して、リフトオフ試験 法の確立と簡略化、あるいは全く別の簡便な緊張力推定手法の確立がアンカーエ を 施 工 した 法 面 全 体 の 安 定 性 に つ な が る と 指 摘 し た 。こ れ を 踏 ま え 、酒 井 ら <sup>・)</sup>は 、 従来のリフトオフ試験に用いられるセンターホール型ジャッキの改良に取り組み、 小型・軽量化を図った SAAM ジャッキの開発を行った。この軽量化された SAAM ジャッキを用いることで、リフトオフ試験の簡便化は図れるものと考えられる。 しかし、高速道路の斜面だけでも12万本以上のアンカーが設置されているなか、 斜面の安定性を検討するためにはより多くのアンカーの性能を推定・評価する必 要があり、時間・コスト面においても優れた測定手法が必要であると指摘した。 そこで芥川ら<sup>71</sup>は、リフトオフ試験に代わる全く別の簡便な緊張力の推定手法と して、緊張力の変動にともなう透磁率の変化を利用した「磁歪法を利用した簡便 な ア ン カ ー の 緊 張 力 測 定 手 法 」 を 提 案 し た 。 磁 歪 法 は 主 に 地 下 空 洞 に 導 入 さ れ て いる PS アンカーを対象に研究が進められてきたが、アンカーヘッドの材質、形 状、寸法のわずかな違いにより、緊張力の変動にともなう透磁率の変化傾向に大 きな差が生じるという問題が生じ、様々なタイプのアンカーに適用するまでには 至らなかった。

塩谷らのグループ<sup>8)9)10)</sup>は、すでに短いボルトの緊張力測定に応用され、測定 が簡便な超音波法による緊張力の測定を提案した。この方法は、緊張力の変動に ともないアンカー頭部の締め付け度合いが変化することを利用し、本研究の手法 とは異なるアンカー頭頂部において、アンカーの軸方向に対して垂直な方向に超 音波を透過させる方法(透過法)によって緊張力の変動にともなう透過特性の変 化傾向を確認し、その適用性を示した。この方法ではナット型のヘッドには有効 であるが、くさび型のヘッドはくさびの形状から、測定高さによって透過特性に 変化するという課題を残す。またヘッドの形状によっては透過特性の変化が顕著 に認められない場合や、載荷過程と除荷過程でヒステリシスを示す場合が指摘さ れていた。

そこで本研究では、塩谷らの研究において透過波の変動にヒステリシスの影響が大きかったアンカーヘッドにも対応し、かつくさび型のヘッドにも適用可能と

なる新たな超音波法のアプローチを示す。具体的にはアンカーヘッドから支圧板 に向かい超音波を発信し、応力に依存したヘッドと支圧板からの反射波の特性に 着目する。反射法によって緊張力を測定することが可能になれば、上述の塩谷ら の研究の透過法と合わせて超音波法が確立され、より精度よく様々なヘッドタイ プのアンカーの緊張力を測定することが可能となる。

一方で、アンカーの地盤内部の劣化については、鋼材の引張荷重強度比(緊張 力測定によって得られる)と断面欠損率の関係、ならびに鋼材の断面欠損率と供 用年数の関係が図1.3.1と図1.3.2に示す回帰線で大津ら<sup>11)</sup>により報告されている。 大津らは、同図を用いてアンカー工の性能低下曲線を設定し、斜面のライフサイ クルコストを算定し、合理的な斜面対策工の補修・補強計画を立案した。

以上より、超音波法が上述のように確立されれば、より多くの斜面においてア ンカーの性能低下が効率的に推定でき、各斜面のライフサイクルコストを算定す ることで、より合理的な斜面対策工の補修・補強計画の立案が可能になるものと 考える。

## 1.4 本論文の構成

本論文は全6章から構成される。

第1章では本研究の背景、目的、既往の研究との関連について述べた。

第2章では本研究で用いる超音波について概説するとともに、超音波の特性パ ラメータおよび周波数解析手法について述べる。

第3章では反射法のアンカーの緊張力推定への適用性を確認する準備実験について、その目的、方法および結果と考察を詳述する。

第4章では超音波反射特性と媒質接触の評価実験について、実験の目的、方法 を述べた後に、実験結果ならびに考察について詳述する。

第5章ではアンカーヘッドと支圧板の接触をモデル化し、数値解析シミュレー ションにより接触状態を定性的に検討する。ここではシミュレーションの目的、 解析手法について述べた後に、解析結果ならびに考察について詳述する。

第6章では第3章、第4章および第5章で得られた結果をまとめ、考察を加えるとともに、今後の課題と展望について述べる。

## 第2章 超音波

## 2.1 概説

超音波は人間の耳に聞こえない非可聴周波数範囲の高周波音波であり、周波数範囲が約 20 kHz 以上の音波を示すことが多い。また超音波は周波数が高いことや強度を高くすることが可能なことから、可聴周波数の音波領域では得られない 種々の特異な性質がある。

#### 2.2 種類

主に超音波には縦波(P波)、横波(S波)、表面波(R波)の3種類があり、このような波の種類を振動モードという。また試験体の表面、他の物質との境界面、および試験体内の欠陥個所などで振動モードが変化することをモード変換という。以下に各振動モードについて説明する。

a) 縦波 (P波)

縦波は弾性波動において P 波(Primary wave) と呼ばれるもので、圧縮波とも 呼ばれる。波を伝える媒質の変位が波の進行方向、すなわち縦方向に起こる波で ある。媒質が気体、液体の場合にはこの縦波しか伝播しない。超音波の中では最 も速く伝播する。本実験で使用した垂直探触子は主に縦波を励起させるものであ る。

b) 横波(S波)

横波は弾性波動においてS波(Secondary wave)と呼ばれるもので、すべり(せん断)波とも呼ばれる。波を伝える媒質の変位が波の進行方向に垂直方向である。 横波は固体中のみで伝わり、伝播速度は縦波より遅い。

c) 表面波(R波)

表面波は媒質の表面あるいは二つの境界面にそのエネルギーを集中させて伝播 する波のことである。表面から1波長分の非常に浅い層にエネルギーの大部分は 集中し、表面付近の粒子は、縦振動と横振動を混同したような挙動を示す。

## 2.3 工学的利用

超音波は光や電波と同じ波動エネルギーであるが、その特徴は光や電波に比べ て伝播速度が遅く、反射しやすく、大きな音響エネルギーを伝送することができ る特徴を有する。超音波は、これらの性質を利用して種々の距離計、ソナー、診 断装置、殺菌など応用範囲は広く、様々な分野で利用されている。

超音波の工学的な利用は、超音波の波動を利用して情報をやり取りする通信・ 情報的利用、超音波の波動、振動の特長を利用して各種の特色ある電子通信デバ イスやセンサを実現するデバイス的利用、超音波のパワーを利用して物質、物体 に何らかの有効な変化を与える動力的利用の三つに大別できる。

情報的利用とは、超音波そのものを情報として利用するもので、ここでは超音 波センサが使用される。この場合、破壊にともない発生する超音波を受信するパ ッシブ方式(アコースティックエミッション)や、センサ自身から超音波を発振 し、その反射や透過を検知するアクティブ方式がある。本研究では後者のアクテ ィブ方式を利用する。

デバイス的利用は超音波の様々な性質を各種のセンサに利用するもので、圧力、 温度、加速度、粘度などの測定に超音波センサが利用されている。

超音波の振動エネルギーそのものを動力的に応用するものが動力的利用である。 また超音波を熱に変換して利用することもある。いずれも超音波エネルギーを優 先するもので、強力超音波などがこの部類に属する。

## 2.4 非破壊検査

先述のように超音波の利用用途は多く広範に応用されているが、本節では本研 究と密接に関わる超音波の非破壊検査への応用について詳述する。非破壊検査と は材料、構造物などに傷をつけたり破壊したりせずに、それらの状態、内部構造、 内部の欠陥などを検査する方法である。超音波法による非破壊検査には、反射波 や透過波を利用し材料内部の損傷や欠陥などを調べる探傷法と、超音波を透過さ せて、その超音波の減衰や音速、周波数の変化から材料特性や応力状態を調べる 方法などがある。本研究では超音波の反射特性の変化からグラウンドアンカーの 緊張力を検討するものであり、以下に想定される超音波伝播メカニズムに基づく。 アンカー頭頂部には地表に定着させるための支圧板が設置されている。緊張力 を変動させると負荷緊張力に対応したアンカー頭頂部と支圧板の接触状態が生じ る。その接触した境界面に超音波が到達すると、接触程度を反映した反射波が得 られ、アンカーの残存緊張力を反射波の種々の特性により推定しようとするもの である。

2.5 特性パラメータ

## 2.5.1 最大振幅値および最大振幅比

送信波の最大振幅値に対する受信波の最大振幅値の比を百分率(%)で表した ものを最大振幅比と定義する。このパラメータは実験で得られる超音波の時間— 振幅波形のデータから直接求められる。

一般に超音波の振幅値の減衰量は式(2.1)に示すように伝播距離に依存して大 きくなる。これは伝播にともなう超音波の拡散損失や散乱減衰が生じるためと考 えられる。また振幅値の減衰は式(2.2)に示すように周波数、温度、振動モード にも依存して変化する。本研究ではアンカー頭頂部と支圧板の接触面で生じる反 射による散乱減衰がアンカーの緊張力によって変化するメカニズムを利用してい る。

$$P_x = P_0 e^{-\alpha x} \tag{2.1}$$

$$\alpha = \frac{\eta \varpi^2}{2V^3 \rho} \tag{2.2}$$

*P<sub>x</sub>*は*x*なる距離を伝播後の音圧、*P<sub>0</sub>*は初期の音圧、αは減衰係数、ηは媒質の粘 性係数、σは角周波数、*V*は媒質の弾性波速度、ρは媒質の密度である。

## 2.5.2 エネルギー<sup>12)</sup>

計測機器により定義は異なるが、一般に超音波波形が振幅 A1-Anの離散データの場合、エネルギーEは式(2.3)のように定義される。

$$E = \sum_{i=1}^{n} (A_i)^2$$
(2.3)

また超音波のエネルギーには振動数fを用いて式(2.4)の関係も成り立ち、振幅 Aの二乗と周波数の二乗の積に比例する。

$$E \propto A^2 f^2 \tag{2.4}$$

## 2.5.3 伝播速度

均一な半無限の弾性固体中の弾性波速度はヤングの弾性係数 E、質量密度 ρ、 ポアソン比 vの関数である。無限固体を伝播する縦波と横波の波速は次式で示さ れる。

$$V_{P} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$
(2.5)

$$V_{S} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}}$$
(2.6)

 $E はヤングの弾性係数、<math>\rho$  は質量密度、vはポアソン比、 $V_P$ は縦波の速度、 $V_S$ は 横波の速度である。

P波は一番速い速度で進行し、以下 S 波、R 波と続く。理論上、P 波、S 波、R 波の速度の比はポアソン比によってのみ決まる。

## 2.5.4 反射と透過<sup>13)</sup>

可聴音と同様に、超音波も音響的性質が異なる媒質の境界面で反射、透過が生 じる。これらの性質と鋭い指向性を利用して、材料中の欠陥の探知、人体内部の 疾患の診断やその他の計測が行われている。

媒質の異なる物質の境界面に垂直に平面音波が入射すると、音波の一部は境界 面で反射し、一部は透過して伝播する。その時の入射波の音圧に対する反射波・ 透過波の音圧の割合をそれぞれ反射率r、透過率τと呼ぶ。媒質 I から媒質 II へ と超音波が入射する場合の反射率、透過率は境界面において「面に作用する応力 および変位が連続」という条件、あるいは「音圧および粒子速度が連続」という 条件から求めることができ、それぞれ次式で表される。

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \tag{2.7}$$

$$\tau = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \tag{2.8}$$

Z<sub>1</sub>、Z<sub>2</sub>は媒質 I、IIにおける固有音響インピーダンスを表し、固有音響インピ ーダンスはそれぞれの媒質の密度 ρ と音速 Vの積で与えられる。

特に媒質 II が空気である場合は、空気の固有音響インピーダンスが 4.28×10<sup>-4</sup> と小さいことから、透過率はほぼ 0 とみなすことができ全反射を示す。また、一 方で当然のことながら媒質 I と II が同一の物質で、完全接触である場合の反射率 は 0 となり全透過を示す。

#### 2.5.5 到達時間

超音波が送信され、受信されるまでに要する時間を伝播時間といい、受信セン サで検出された時間を到達時間という。一般に、伝播距離が既知の場合には到達 時間から伝播速度が、伝播速度が既知の場合には到達時間から伝播距離が求めら れる。

## 2.6 超音波波形の周波数解析としての離散フーリエ変換<sup>14)</sup>

一般に波動現象が記録された波形に対しての波形解析は、周波数スペクトル分析を示していることが多い。超音波法で用いる波形もスペクトル分析することによって、波形に含まれる周波数成分が判断できる。離散フーリエ変換の概念から 任意の連続関数 *f*(*t*)は、以下のような離散フーリエ変換された関数 *F*(*t*)との関係 が成立する。

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i2\pi f t} dt$$
(2.9)

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) e^{i2\pi t} dt$$
 (2.10)

式(2.9)は離散フーリエ変換、式(2.10)はフーリエ逆変換の式として知られている。スペクトル分析では、一般にF(t)の絶対値をとった|F(t)|をフーリエスペクトル、f(t)の継続時間を $T_d$ として $\frac{1}{T_d}|F(t)|^2$ がパワースペクトルと呼ばれている。波形の記録は、サンプリング間隔 $T_d$ の時系列デジタル量として記録され、機器によっては波形の $F_s = \frac{1}{\Delta t}$ としてサンプリング周波数と呼ばれることもある。たとえば、1 $\mu$ sのサンプリング時間間隔のことを、サンプリング周波数1 MHzと表現することもある。

スペクトル分析を行うには、式(2.9)にしたがって離散フーリエ変換を得ること が必要である。ところが、この場合 f(t)がデジタル量として与えられているので、 このようなデジタル量に対する離散フーリエ変換を高速に遂行する手段として開 発されているのが FFT (Fast Fourier Transform)法である。近年では FFT 法は PC により、波形記録装置と組み合わせて容易にスペクトル解析することができる。 FFT 法は、サンプリング間隔  $\Delta t$ 、サンプル数 N(ただし,Nは2のベキ乗;  $N = 2^{M}$ )の時系列デジタル量  $x_{m} = x(m\Delta t)$ に対する有限離散フーリエ変換および逆変換を実行するもので、式(2.9)および式(2.10)は以下のようになる。

$$C_{k} = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_{m} e^{-\frac{i2\pi km}{N}}$$
(2.11)

$$x_m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{-\frac{i2\pi km}{N}}$$
(2.12)

このとき、フーリエスペクトル、パワースペクトルはそれぞれ NAT  $|C_k|$ , NAT  $|C_k|^2$ で与えられる。ここで、注意すべきは前述のようにサンプル数 N が 2 のべキ乗で なければならないということである。スペクトル各点は、時系列の区間 AT に対し て、Af = 1/(NAt)ごとに与えられ、Af のことを基本周波数と呼ぶ。式(2.11)より、 $x_m$ の N 個のデータから N 個の複素数  $C_k$ が得られる。複素数は実数部と虚数部より 成り立つので N 個のデータから 2N 個の係数が決定されているように見える。こ れは、 $e^{\frac{i2\pi km}{N}}$ の性質から実際は  $C_k$ の実数部は  $f_{N/2} = N/2 \times \Delta f$ の N 個の中心周波数に 対して対称、虚数部は逆対称となっている。スペクトル NAT  $|C_k|$ あるいは NAT  $|C_k|$ 2

では、 $f_{N/2}$ はスペクトル分析可能な上限の周波数で Nyquist 周波数と呼ばれる。  $f_{N/2} = N/2 \times \Delta f = 1/(2\Delta T)$ であるから、サンプリング間隔により、スペクトル分析の Nyquist 周波数は高くなるが、サンプル数が同じであれば基本周波数は大きくなっ て分析が粗くなる。

## 2.7 離散フーリエ変換による Partial power

超音波波形信号を離散フーリエ変換した図において、全体の面積に対する、特定の周波数区間における面積を比で表した値である。フーリエ変換結果の周波数 $f_1 - f_n$ に対応する周波数領域での振幅を $P_1 - P_n$ とすると周波数領域 $f_k - f_l$ でのPartial power (PP) は以下の式で表される。

$$PP = \frac{\sum_{m=k}^{l} P_m}{\sum_{m=1}^{n} P_m}$$
(2.13)

Partial power はノイズを含む波形や送信した超音波の振幅が一定でないときなどに、特定の周波数域の大きさを相対的に表すことができる指標である。

第3章 反射法のグラウンドアンカーへの適用性(準備実験)

## 3.1 目的

本研究の目的は超音波法によって簡便にアンカーの残存緊張力を測定できる手法を構築することである。そこで本実験ではアンカー頭頂部のアンカーヘッドと 支圧板との接触程度が緊張力によって変化する場合、接触面で反射する超音波の 特性パラメータと緊張力とに有意な関係が得られるかを簡易に検討する。

#### 3.2 概要

a) 計測システム

図 3.2.1 に実験の概略を示す。一つの探触子で超音波の送信と受信の両方を行い、受信波形信号を図 3.2.2 に示す超音波探傷器に送信し、波形データをデジタル信号としてコンピュータで記録・保存した。使用した機器はデジタル超音波探 傷器: UI-23 Log (三菱電機製)、探触子: 2 MHz, φ20 mm 垂直探触子(ジャパング ローブ製)である。

b) 測定方法

図 3.2.3 に測定状況を示す。アンカー頭頂部のアンカーヘッドの上部表面に垂 直探触子を設置する。探触子から超音波を送信すると超音波はアンカーヘッドと 支圧板との境界面において反射を示し、その後アンカーヘッド内部で多重反射す る。この反射波を、超音波を送信した探触子で受信する。なお、本実験は先述の 塩谷らの研究において透過波の変動にヒステリシスの影響が大きかった、くさび 定着方式のアンカーヘッドを対象とする。

c) 定着具の形状

くさび定着方式のアンカーヘッドの形状を図 3.2.4 に示す。ヘッドは直径 110 mm、高さ 55 mm である。アンカーヘッドを伝わる超音波の伝播速度は 5,920 m/sec であり、超音波の最短伝播距離は反射距離より 110 mm となる。

#### d) 載荷方法

アンカーヘッドと支圧板をより線の一端に固定し、固定冶具を介在させ逆端から油圧ジャッキで緊張力を与える。油圧ジャッキによって最大緊張力 800 kN まで200 kN 間隔で単調載荷を行う。また、載荷過程、除荷過程ともに載荷荷重毎に超音波波形の計測を行う。

### e) 波形データ

本実験は反射法によるグラウンドアンカーの緊張力推定に対する適用性を確認 することを目的に行っているために、本実験で計測データは簡易なものとした。 特別な信号波形記録装置を用いず一般的な超音波探傷器を用いた。本探傷器は反 射波を正負の連続で記録せず、正側のみの記録であり、また、そのサンプリング 間隔は4 µsecと荒く設定されている。

## 3.3 結果と考察

## 3.3.1 振幅値と緊張力

本実験より得られた振幅値と時間の関係を図 3.3.1 および図 3.3.2 に示す。得ら れた波形はアンカーヘッドの上面の探触子から送信された超音波がアンカーヘッ ド底面と支圧板との接触面で反射した後、再びアンカーヘッドの上面に到達した 波を受信し、以後反射を繰り返し、多重反射する波形を計測したものと考えられ る。既述のとおりアンカーヘッド内部の超音波伝播速度は 5,920 m/sec、最短伝播 距離は 110 mm であり、理論上の最短到達時間は 18.58 µsec となる。これより本 実験で励起された超音波は 18.58 µsec に受信され、以後 18.58 µsec の周期で反射 が繰り返されることになる。

各緊張力における振幅値を比較したものを図 3.3.3 に示す。ここで、収録され た波形は計測区間 0 µsec から約 200 µsec で計測機器の記録可能な最大振幅値を受 信波形の振幅値が越えている(サチュレーションが生じている)ため、最大値は 一定値として記録されている。一方で 200 µsec 以降の波形を比較すると、緊張力 の増加にともなう有意な振幅の減少が確認される。振幅値の減少要因は、緊張力 の増加にともないアンカーヘッドと支圧板の接触が完全接触へと近づき、アンカ ーヘッドと支圧板で反射、透過現象が起こる際に超音波の支圧板へと透過する度 合いが増し、結果的に受信さる反射波の強度が小さくなり振幅が減少したともの と推察される。具体的には、表面科学<sup>15)</sup>の分野では固体同士の接触を次のように 説明している。乾燥下での固体の接触面をミクロな視点でみると、滑らかに見え る固体表面にも凸凹が存在し、固体同士が直接触れ合っている真実接触部分と空 気などが介在している非接触部分に分けて説明される(図 3.3.4 参照)。真実接触 部分は完全接触の状態なので接触する固体同士が同一の材質であれば理論上、反 射は生じない。一方で非接触部分は空気などが介在することで反射が生じること になる。つまり超音波を透過させる真実接触部分が大きくなることで反射波は弱 くなり、受信される振幅値は小さくなる。この真実接触面積は垂直荷重に依存し て大きくなることが既往の研究で知られており、これらのメカニズムなどによっ て反射波の振幅値が緊張力の増加にともなって減少したと考えられる。

緊張力の増加にともなう振幅の減少量を定量的に評価する方法としては多重反 射する波形のなかでも1回目の反射波(以下、第1反射波と称す)の最大振幅値 をパラメータとし、それを比較する方法が考えられる。しかし、本実験ではサン プリング間隔は4µsecと粗く設定したため、この検討は第4章での詳細実験結果 を用いて行う。ここでは多重反射する波形全体の評価を試みる。具体的には振幅 の2乗の累積であるエネルギーをパラメータとして選定し、緊張力の増加にとも なう振幅値の減少傾向を検討した。エネルギーと緊張力の関係を図3.3.5と図 3.3.6に示す。図3.3.5では本実験において計測した0µsecから計測終了の1696 µsec間のエネルギーを示しており、図3.3.6は振幅の差異が顕著に現れ始める200 µsec以降から計測終了までのエネルギーにより求めた図である。これらの図より、 特に200 kN - 400 kN 間でエネルギーの差異が着しいことが確認される。このこと は、400 kNを越える高緊張力下では、接触の状態が定常化に向かっている可能 性が考えられる。しかし、一方で本実験が簡易計測であり、ノイズの影響や測定 の精度の影響も考えられるため今後の追加実験での検討が必要である。

また各緊張力で載荷過程と除荷過程で大きな違いがないことが分かる。このこ とは、アンカーヘッドと支圧板の接触程度は緊張力の影響を大きく受けて変化し ていると考えられる。定着具に起因するせん断力の影響の大きい透過法とは異な り、反射法ではヒステリシスの影響が小さいと推察される。導入後のアンカーが 経年劣化による緊張力の減少、あるいは地盤の変状による緊張力の増加をたどる

と考えられる。一方で、そのようなアンカーの緊張力の変動過程を外観からの目 視点検では地盤変状が発生する以前では判断することが困難とされている。よっ て載荷過程・除荷過程でヒステリシスによる影響が小さいことは緊張力を精度よ く推定する際には本手法の利点として考えられる。

次に図 3.3.5 および図 3.3.6 よりアンカー緊張力の推定法として考察を述べる。 緊張力 200 kN-400 kN の範囲でエネルギーに大幅な減少傾向が見られるものの、 他の領域ではこの範囲に比べ減少率は小さい。このことから簡易な試験器(一般 的に市販される超音波探傷器)で緊張力を推定する際には緊張力が 200 kN 以下、 400 kN 以上、あるいはその中間であることを概ね推定・評価できるものと考えら れる。例えば、設定緊張力が 500 kN のアンカーを対象に測定を行い、エネルギー が著しく大きな値が得られた場合はアンカーの残存緊張力が 200 kN 以下である ことを示唆し、アンカーの性能が著しく低下しているものと判断できる。一方で エネルギーが著しく小さい値が得られれば、アンカーの残存緊張力が 400 kN 以上 であることを示唆し、アンカーの性能が健全であることが判断できる。

## 3.3.2 離散フーリエ変換による Partial power

本実験で得られた超音波波形を離散フーリエ変換し、得られた周波数スペクト ルを図 3.3.7 および図 3.3.8 に示す。なお、離散フーリエ変換はサンプル数が 2 の ベキ乗でなければならない。本実験データから 2 のベキ乗個抽出するにあたって は時間が経過すれば反射波が減衰していくことから反射波をより計測している計 測開始からのデータ数 256 個を対象に行った。ここで反射波の最短到達時間が 18.58 µsec であり、以後の最短経路をたどって励起する多重反射は 18.58 µsec の 周期で起こると考えられることから、反射による卓越周波数は 53.8 kHz と考えら れる。そのため図 3.3.7 および図 3.3.8 において 50-70 kHz の周波数スペクトル が卓越しているのは最短経路をたどって反射した波が主に受信されていることを 示す。卓越した 50-70 kHz の周波数帯を対象に Partial power を算出し、得られた Partial power と緊張力の関係を図 3.3.9 に示す。緊張力が増加するにともなう Partial power の減少が認められた。ただし、この変化が顕著であるかどうかは簡 易計測のため言及できないが図 3.3.6 と比べると、その変位率はエネルギーと緊 張力の関係ほどではないと考えられる。離散フーリエ変換によって得られた卓越 した周波数は最短経路をたどって反射した波と考えられ、その波だけを抽出して 緊張力ごとで傾向を見たときに大きな差異が得られなかったと考えられる。一方 で波は同心円状に広がることから、他の境界面位置に達し様々な反射経路をたど る波も加重したエネルギーに顕著な差異が表れたと考えられる。

## 3.4 実験のまとめ

本実験によって反射法のグラウンドアンカーへの適用性が確認できた。想定さ れたようにアンカーの緊張力の増加にともなって接触程度が変化し、反射波の振 幅値が減少する傾向が得られた。また緊張力の増加にともなう反射波の振幅値の 減少をエネルギーによって評価することでアンカーの緊張力が推定できる可能性 が示唆された。一方、本実験では、反射法のアンカーの緊張力推定への適用性を 準備検討することに重点をおいたために、緊張力の載荷間隔が 200 kN と大きく、 数少ないデータに基づく結果といえる。また粗い波形サンプリング記録であるた めに第1反射波の最大振幅値を検討しなかった。以上より次章においては高精度 超音波計測装置により詳細に波形データを記録する室内実験を実施する。

一方、離散フーリエ変換による Partial power による評価は最短距離をたどる反 射波を抽出して評価できるので、アンカーヘッドの形状や、測定箇所に依存する ことなくアンカーヘッドと支圧板の接触の状態の評価ができる利点がある。しか し、本実験では Partial power による良い相関はみられなかったために有用性が小 さいと推察される。

## 第4章 超音波反射特性と接触状態の評価実験

## 4.1 目的

準備実験(第3章参照)により、反射法のアンカーへの適用性は確認された。 しかし、前述の実験では、波形データが簡易計測によるものであること、また載 荷間隔が200kNと粗く設定されるなど、荷重による接触の状態と超音波の反射特 性の詳細な関係や他の超音波パラメータを検討するには至らなかった。そこで本 実験では、詳細に波形データを記録し、載荷間隔を細分化して実験を行い、超音 波反射特性と接触程度の関係をより詳細に検討する。

## 4.2 概要

a) 計測システム

図 4.2.1、図 4.2.2 に実験の概略および実験の様子を示す。実験は反射特性と接触程度を評価することを目的としているために、実際のアンカーでの引張による載荷ではなく、簡易にアンカーヘッドを模した鋼材試験体を上部より圧縮載荷する方法とした。圧縮載荷によって接触程度を変化させ、探触子からの受信波形の信号を図 4.2.3 に示す高精度超音波計測装置: Pocket UT (NDT Automation 製) に送信し、波形データをデジタル信号として記録し保存した。

b) 使用探触子

前述の準備実験においては周波数2MHzの探触子のみを使用したが、本実験で は励起周波数と反射特性が検討できるように、1MHz、5MHz、および10MHzの 3種類のコンポジット垂直探触子を使用した。(図 4.2.4 参照)

c) 載荷方法

先述のように本実験ではアンカーヘッドを模した試験体を上部よりアムスラー 載荷装置によって圧縮荷重を加える。その際、超音波の測定箇所を確保するため に金属の冶具を介在させる。載荷荷重は最大 600 kN とし、50 kN 間隔で単調載荷 する。また測定箇所による反射特性の変化や、使用探触子の周波数による違いが 確認できるように、4回の載荷ステップを設定し、測定場所、周波数を変えて計 測を行った(図 4.2.5 参照)。

d) 試験体と測定箇所

実験に使用した鋼材試験体の寸法および測定箇所を図 4.2.6 に示す。試験体は 半径 60 mm、高さ 50 mm のものを使用した。超音波の測定箇所は、試験体上面の 中心から 40 mm の場所で 6 時および 9 時の方向に 2 箇所を設定。

e) ひずみ計測

本実験の載荷は冶具を介在させているために試験体表面に均等に載荷が行われ ていない(図 4.2.1 参照)。そこで本実験では複数箇所でひずみを計測することで 試験体の応力状態を確認した。ひずみの計測箇所は図 4.2.6 に示すように表面に 2 箇所、側面に 4 箇所の合計 6 箇所とした。

f)波形データ

本実験では荷重にともなう接触面の反射特性の変化傾向をより検討するために サンプリング周波数を第3章で示した実験の250kHzから10MHzと大きくし、 波形の記録時間を1300 µsecとした。

#### 4.3 結果と考察

## 4.3.1 エネルギー

本実験によって得られた各荷重段階における振幅値と時間の関係の一例を図 4.3.1-4.3.8に示す。また最大荷重 600 kN と 0 kN の波形を比較したものを図 4.3.9 および図 4.3.10に示す。両図ともに荷重増加にともない振幅値が減少しているこ とが確認できる。ここで、第 3 章の実験において良い相関が示されたエネルギー によって振幅値の減少傾向を評価した。前述の実験のエネルギーは波形データが 簡易なサンプリングによるものであり初動が読み取れていないことでノイズの判 別が困難であったために、計測開始から計測終了の 1696 µsec までの波形データ から単純にエネルギーを算出していた。一方で本実験では詳細な波形データを記 録できたことからノイズを除外した有意な波形を抽出し、そのエネルギーを算出 した。ノイズは明らかにノイズであると識別できる時間区間においてノイズの最 大振幅値を求め、有意な波形到来後のノイズをその最大振幅値を利用して定めた。 その結果、計測開始から約 300 µsec から 400 µsec までが有意な波形であることが わかった。よってエネルギーを計測開始から 400 µsec までの波形データに対して のみ算出した。

エネルギーと載荷荷重との関係を図 4.3.11 および図 4.3.12 に示す。同図より、 センサ周波数 1 MHz と 5 MHz で、エネルギーと載荷荷重の関係に良い相関が得ら れた。準備実験と同様に、本実験でも載荷荷重の増加にともうエネルギー減少が 得られた。また本実験では計測を行う載荷間隔を 50 kN と細分化して行ったため、 より詳細な傾向を得ることができた。前述の実験結果では 200 kN を境に大きく傾 向が異なっていたが、図 3.3.5 に示すように特定の荷重域で大幅な減衰を示すの でなく、本実験結果では各荷重において段階的に減少する様子が確認できた。こ の特徴的な減衰傾向より、詳細にアンカーの緊張力を推定することが概ね可能と 思われる。

以下、ヒステリシスについて考察する。本実験においては載荷ステップ1の測 定箇所Aの低荷重領域において載荷と除荷に差異が現れた。このことは、測定箇 所Aは最初の載荷ステップ1であり試験体と載荷装置の接触に初期段階のみに生 じるずれが生じやすいこと、本実験の試験体の応力分布は複雑であり偏心が生じ ていることなどに起因した結果と考えられる。また載荷ステップ2の測定箇所 B には載荷と除荷で顕著な差異が見られないことを考慮すると、載荷と除荷に差異 が生まれたのは測定箇所Aにおいて載荷の初期段階で局所的にのみ現れたものと 考 え ら れ る 。 実 際 に 本 実 験 で 計 測 さ れ た 載 荷 荷 重 と ひ ず み の 関 係 の 一 例 を 図 4.3.13-4.3.15 に示す。これらの図より載荷ステップごとにひずみを考察すると載 荷ステップ1に関してはひずみの経路が他と異なっていることから、既に推察し たように特異的に載荷ステップ1に関しては載荷初期の試験体と載荷機のかみ合 わせのなじみにより生じたものと考えられる。よって載荷初期の影響を除き、計 測 箇 所 B (図 4.3.11 上図を除く) に着目することで、本手法はヒステリシスの影 響が小さいものと判断することができる。また、実際のアンカーに適用する際は、 すでに大きい緊張力を導入したアンカーに対しての計測を想定しているため、導 入時のなじみの影響は小さく、実計測においてはヒステリシスの影響は小さいも

のと推察される。

## 4.3.2 最大振幅值

次に荷重によって接触底面の反射特性が変化するのであれば、多重反射を利用 しなくとも、第1反射波だけを検討しても傾向を読み取ることができるとも考え られるため、第1反射波の最大振幅値と載荷荷重との関係を検討した。試験体の 高さは 50 mm、伝播速度は 5,920 m/sec であり最短到達時間は 16.89 usec となる。 したがって第1反射波は16.89 usec 以降に到達するともの考えられ、16.89 usec 以降に到達した波でノイズと区別できる有意な反射波の最大振幅値を読み取った。 図 4.3.16 に 載 荷 荷 重 と 第 1 反 射 波 の 最 大 振 幅 値 の 関 係 を 示 す 。 載 荷 荷 重 が 増 加 す ると第1反射波の最大振幅値は減少されると予想されたが、同図に示す通り、載 荷荷重と最大振幅値にはエネルギーほど良好な相関は得られなかった。その理由 として載荷荷重の増加にともなう第1反射波の振幅変化は小さく、最初の反射で は反射特性に顕著な違いが得られなかったものと考えられる。また反射特性の変 化による振幅の減少よりも、センサと試験体のわずかな接触状況による送信波の 振幅の増減による影響が第1反射波の振幅のみでは大きいために、良い相関が得 られなかった可能性も考えられる。一方で、反射を何度も繰り返し反射特性が強 調されて受信されることで、載荷荷重の増加にともなうエネルギーの減少傾向は 明瞭に確認することができたと考えられる。本検討より反射法として載荷荷重の 増加にともなう振幅値の減少傾向を定量化し評価するためのパラメータとしては エネルギーが有効であることが明らかとなった。

## 4.3.3 センサ周波数

エネルギーと載荷荷重の関係について使用したセンサの周波数の違いを、図 4.3.17を用いて考察する。周波数1MHzと5MHzの探触子での計測においては荷 重の増加にともなって振幅は減少する傾向にあり、荷重による反射特性の特徴的 な変化傾向を得ることができた。載荷荷重によって振幅が減少するのは先述の通 り垂直荷重に依存して真実接触面積が変化し、接触面の反射特性が変化すること で反射にともなう振幅の減衰が荷重に依存して変化することで説明できる。一方 で、10 MHz においては全体としてエネルギーに有意な変化傾向が得られなかった。 振幅と時間の関係で、時間経過により振幅が減衰する要因には、超音波が支圧板 との接触面で多重反射を繰り返すことに起因する減衰と、超音波の媒質中を伝播 することよる減衰の 2 種類が考えられる。伝播にともなう減衰は超音波の周波数、 温度、振動のモードに依存する。特に伝播にともなう粘性減衰は周波数の 2 乗に 比例し(式(2.2)参照)、高周波であるほど減衰が大きく、一般に高周波の超音 波は距離が大きくなると著しい減衰のために厚い試験体への適用は困難であると されている。本実験においても 1 MHz と 5 MHz に関しては荷重にともなう反射特 性の変化が大きく影響し、エネルギーと載荷荷重に特徴的な傾向が得られた。一 方で 10 MHz の高周波でエネルギーと載荷荷重に、良い相関が得られなかった。 これは伝播にともなう上述の周波数に因る減衰の影響が大きく、荷重変化にとも なう反射特性の変化が反映できなかったと考えられる。また前述の実験で使用さ れた探触子は周波数が 2 MHz と比較的低周波であることから、荷重による反射特 性の変化傾向を得るには超音波領域においては比較的低周波による計測が適して いると思われる。

## 4.4 まとめ

本実験結果を研究の目的である緊張力の推定法として考察し、以下にまとめる。 第3章に示した簡易な実験による結果ではアンカーの性能が著しく低下している か否かの傾向しか読み取れなかった。しかし本実験で詳細な波形データを記録す ることでエネルギーと載荷荷重の特徴的な傾向が明らかとなった。よって、エネ ルギーと載荷荷重の減衰傾向をもとに残存緊張力を概ね推定できることが確認さ れた。今後は実際のアンカーを用いてデータを蓄積することでエネルギーと載荷 荷重の関係の定量化を図りたい。また、本研究では、くさび定着タイプのアンカ ーに対して検討してきたが、実験によって接触程度の変化にともないエネルギー が変化することが確認されたことから、アンカーヘッドと支圧板を有するすべて のアンカーヘッドに対しての適用性があると考えられる。また実験により反射法 には概ねとステリシスの影響がないことが確認された。

## 第5章 接触程度のモデル化と数値解析シミュレーション

## 5.1 目的

本研究で用いた反射法のメカニズムは、荷重の増加にともないアンカーヘッド と支圧板との接触程度が完全接触へと近づき、超音波が支圧板へ透過する割合が 増加し、反射波の振幅が減少するものと想定される。実際に、第3章および第4 章の実験によって荷重の増加にともない振幅が減少することが確認された。そこ で本章では、真実接触面積が荷重に依存して増加すると仮定した場合に、これま で検討してきた超音波パラメータにどのような傾向が確認されるか数値解析シミ ュレーションによって検証し、実験値との整合性を検討する。

## 5.2 アルゴリズム

本研究に用いた数値解析ソフト Wave2000(サイバーロジック社製)は二次元の 弾性波動程式について近似解を計算するものである。このアルゴリズムは有限差 分法を基本とし、粘性損失も含め、式(5.1)で示す弾性方程式を用いている。

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \left[ \mu + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right] \nabla^2 w + \left[ \lambda + \mu + \phi \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\eta}{3} \frac{\partial}{\partial t} \right] \nabla (\nabla \bullet w)$$

$$\rho : \quad \Psi \ \dot{\Omega} \ \dot{R} \ \dot{R} \ \dot{R} \ \dot{R} \ \dot{M} \ \dot{R} \ \dot{R} \ \dot{R} \ \dot{R} \ \dot{R} \ \dot{M} \ \dot{R} \$$

また、wは二次元の列ベクトルで、その構成要素は位置(x,y)での変位の x 成分と y 成分であり、式(5.2)で表せる。

$$w = \begin{bmatrix} wx(x, y, t) & wy(x, y, t) \end{bmatrix}$$

(5.2)

## 5.3 解析条件

本解析では、単位体積重量、ラメ定数 λ、および μにより材料の物性を設定す る。アンカーヘッドと支圧板の多くが鋼材で形成されていることを考慮して、本 解析の物性値は鋼材の一般的な値(図 5.3.1 参照)を入力した。また送信波につ いては、図 5.3.2 に示すような正弦波(送信波周波数、振幅、時間は図参照)を 設定した。周波数については前述の実験結果で良い相関関係を示し、粘性減衰の 影響の小さな 1 MHz を代表的な周波数として設定した。センサ位置については接 触底面の変化がより反映されるように中央に設定した。計測時間については第 4 章の実験で設定した 0 µsec から 1300 µsec 間の計測を行った。またアンカーヘッ ドと支圧板との接触を以下に示す境界条件を与えることでモデル化した。接触面 を真実接触部分と非接触部分とに分け、真実接触部分は反射率 0 の完全透過を、 非接触部分は反射率 1 の完全反射を境界条件とした。これは、真実接触部分は同 ーの鋼材であるアンカーヘッドと支圧板とが完全接触していることと、非接触部 分は空気が介在していることを表現している。この真実接触面積と非接触面積の 割合を段階的に変化させて数値解析を行い、荷重にともなって真実接触面積の割 合が変化するものとしてモデル化した。(図 5.3.3 参照)

#### 5.4 受信波形

本解析の受信波形は、縦方向と横方向の振動が別々の波形として出力される。 一般にセンサで収録された波形は縦方向と横方向の振動を合成して検知される。 そこで、本解析で得られる波形に関しては、先に受信が確認された方向の到達時 間を P 波の初動到達時間とした。また、反射波の振幅を読み取る場合は、縦方向 の振幅値を L、横方向の振幅値を T とすると、受信センサの縦方向と横方向の感 度特性を一対一と仮定して、式(5.3)に示すように縦方向と横方向の振幅値の二乗 和の平方根をとった合成値をその時間の振幅値 R と定めた。(図 5.4.1 参照)

$$R = \sqrt{L^2 + T^2} \tag{5.3}$$

また数値解析によって得られた波形の一例を図 5.4.2 に示す。同図より真実接触面積の割合(Ar/A)の増加にともない実験と同様に振幅値が減少する傾向が確認できる。

5.5 結果と考察

#### 5.5.1 最大振幅值

まず実際に本解析におけるモデル化で接触底面の反射特性が変化しているかを 検討するために第1反射波の最大振幅値を検討する。第1反射波の最大振幅値と *Ar/A*(見かけの接触面積 *A*に対する真実接触面積 *Ar*の割合)の関係を図 5.5.1に 示す。横軸の *Ar/A*は見かけの接触面積における真実接触面積の割合を示し、真実 接触面積での接触は完全接触であり完全透過を仮定しているために、 *A<sub>r</sub>/A*=1は 接触面全体が完全透過であることを意味する。逆に *A<sub>r</sub>/A*=0は接触面全体が完全 反射であるという境界条件を意味している。本解析はノイズの影響がないために 単純に反射波の最短到達時間 16.94 μsec 以降に到達した波の最大振幅値を第1反 射波の最大振幅値とした。 図 5.5.1 に示す通り第1反射波の最大振幅値は *Ar/A*の 増加にともない概ね線形的に減少することが得られた。第1反射波の最大振幅値 が線形的に変化することは本解析でモデル化した真実接触面積の変化にともなっ て接触面の反射特性も線形的に変化していることが推察される。つまり接触面の 反射特性は真実接触面と非接触面との割合に応じて定まりその関係性は線形的に 対応していることが得られた。

一方で、第4章における実験ではこのような傾向は得られなかった。本解析は ノイズの影響やセンサの接触状況が考慮されていない理想状態での解析なので傾 向が明確に認識できたと考えられる。本解析では真実接触面積の割合を0から1 まで変化させた。つまり全反射の状態から全透過の状態までを解析対象としたが、 実際の実験の現象としては真実接触面積の変化は微小と思われ、ノイズやセンサ の接触状況の影響を大きく受けて、その最大振幅値に有意な変化を与えるに至ら なかったとも考えられる。

## 5.5.2 エネルギー

次に実験で良い相関が得られたエネルギーについて検討する。数値解析によっ て得られたエネルギーと A<sub>r</sub>/Aの関係を図 5.5.2 に示す。本解析におけるエネルギ ーはサンプリング間隔 0.09 µsec で記録されており、エネルギーを評価する時間区 間は実験と同様に 400 µsec までの波計データとした。本数値解析により真実接触 面積の割合が増加するにともなってエネルギーが指数関数的に減少する傾向が得 られた。図 5.5.1 で示した最大振幅値の結果から、真実接触面積と反射特性が概 ね線形対応である一方で、エネルギーは多重反射する波全体を評価しているので、 反射を繰り返すことで接触面の反射特性の変化を反射回数に応じて累乗的に影響 を受けるために指数関数的な減衰となったと考えられる。

次に実験結果との整合性を検討する。本解析結果でのエネルギーと真実接触面 積の割合も実験で得られたエネルギーと荷重の関係と同様に減衰傾向にあること が得られた。真実接触面積が荷重に依存して変化することから、本解析結果と実 験結果には関連性があると考えられる。例えば表面科学<sup>15)</sup>の分野では、真実接触 面積は垂直荷重に比例すると考えられている。真実接触面積が垂直荷重に比例し て増加すると仮定すると、シミュレーションの真実接触面積の割合と実験の載荷 荷重も線形対応の関係にあるのでエネルギーと載荷荷重の実験結果も指数関数的 な減衰傾向の一部を示していると言える。実際に第3章および第4章で得られた エネルギーと緊張力および載荷荷重の関係も下に凸の減衰を示し概ね指数関数的 な減衰の挙動と言える(図 5.5.3 参照)。しかし、実験の載荷荷重によってどの程 度の真実接触面積が増減し、その見かけの接触面積に対する真実接触面積の割合 がどの程度なのかは解明できておらず、数値解析上のどの領域の結果を実験結果 が示しているかは今後、検討する必要がある。また、ある載荷荷重を越えるとア ン カ ー ヘ ッ ド と 支 圧 板 が 完 全 接 触 と な り 反 射 特 性 は 完 全 透 過 を 示 し 以 後 、 反 射 特 性の変動が見られなくなると考えられるため、本手法の適用可能な最大荷重の検 討も必要と思われる。また実際のアンカーにおいてはアンカーヘッドとテンドン 部 分 の 境 界 が あ り 、 側 面 か ら 生 じ る 反 射 波 の 影 響 が あ る と 考 え ら れ 、 今 後 は 、 側 面からの反射波の影響の検討も必要である。

### 第6章 結論

## 6.1 まとめ

本研究によって反射法のアンカーへの適用性が示され、多重反射波のエネルギーの荷重にともなう変化傾向から概ねアンカーの残存緊張力の推定ができることが確認された。以下に第3章、第4章での実験および、第5章の数値解析シミュレーションの結果から得られた本研究の成果を列挙する。

- アンカーの緊張力の増加にともなってアンカーヘッドと支圧板の接触の状態 が変化し、超音波の反射特性に特異な影響を与えることが得られた。(第3章 参照)
- 2)実験で得られた超音波波形から、エネルギーを検討し、その荷重にともなう 減衰の傾向を用いることでアンカーの性能を概ね推定・評価できることが確 認された。(第3章参照)
- 3)透過法においてヒステリシスが確認されたアンカーヘッドの形状に対して、 反射法では載荷過程と除荷過程で大きな差異はみられず、ヒステリシスの影響が小さいという利点が確認できた。(第3章および第4章参照)
- 4) 反射法によるアンカーの緊張力の推定に関しては、伝播減衰による影響を小 さくするために使用するセンサは低周波であることが望まれ、実験では1 MHz と 5 MHz のセンサにおいて良い結果が得られた。(第4章参照)
- 5)第1反射波の最大振幅値では底面の反射特性よりもセンサの接触状況やノイズの影響が大きく、良い相関関係が得られなかったが、パラメータとしてエネルギーを選定することで多重反射を評価することができ、荷重と良い相関関係が得られた。(第4章参照)
- 6) 接触程度にともなう反射特性の変化については真実接触部分と非接触部分の 割合が垂直荷重によって変化することで概ねモデル化することができた。(第 5章参照)
- 7)数値解析シミュレーション結果ではエネルギーと載荷荷重の傾向は指数関数的な挙動を示すことが確認された。真実接触面積が垂直荷重に比例すると仮定すれば、実験結果のエネルギーと荷重の関係も指数関数的な減衰傾向の一

部分を示していると言える。(第5章参照)

8) 数値解析上ではセンサの接触状況やノイズの影響を受けないために第1反射波の最大振幅値とモデル化した真実接触面積の割合とに良い相関関係が得られた。(第5章参照)

#### 6.2 今後の課題

今後さらに検討すべき課題を以下に列挙し、今後の研究に繋げるものとする。

- 1)本研究では、反射法によるアンカーの緊張力の推定への適用性を確認することと、その際の反射特性の傾向について重点をおいて研究を進めたために、 実際のアンカーによるエネルギーと緊張力のデータは数少ないものであり、 エネルギーと緊張力の関係に回帰曲線を導入することができなかった。今後は、室内の理想条件下で実際のアンカーを用いて実験を繰り返し行うことで 同曲線を導入し、アンカーの緊張力推定を行う際の指標を作成する必要がある。また最終的には同曲線をもとに実際の現場のアンカーの緊張力を測定する際の推定精度を検証する必要がある。
- 2) 反射法においてエネルギーと載荷荷重に特徴的な傾向が確認されたが、エネ ルギーはその特性上、対象とする時間区間およびサンプリング間隔によって その絶対量が変化する。よって適切な時間区間を定めるとともに精度の良い 荷重状態のエネルギー値をもとに正規化し相対的にエネルギーの変化を検討、 比較する必要がある。
- 3) くさび定着タイプのアンカーヘッドは、より線によって引張荷重が与えられるが、実際の現場では、より線ごとの導入荷重は異なる場合もある。そのため偏心が予想され本手法を適用するには複数箇所の測定箇所を設定する必要がある。測定箇所の設定方法についても追加実験で検討する。
- 4) 第1反射波の最大振幅値のみでの比較検討にはセンサの接触状況やノイズによる影響が大きく、良い相関関係が見られなかった。今後はノイズの影響を考慮し、送信波の最大振幅を大きくして再度実験、検討が望まれる。
- 5) 本研究は1種類のくさび定着タイプのアンカーヘッドに対してのみの実験結 果であるが、本手法は支圧板の有するアンカーに対しての適用性があると考

えられる。よって寸法の異なるアンカーヘッド、およびナット定着タイプの アンカーヘッドにおいても反射法の適用性があるのか、今後の追加実験なら びにシミュレーションで確認する必要がある。

- 6)本研究で扱った反射法は、超音波法によるアンカーの緊張力推定の際の1つの判断指標という位置づけであり、今後は透過法と合わせてより精度よくアンカーの緊張力を推定することが望まれる。その際にはアンカーヘッドの形状によって各手法のパラメータと緊張力の相関を比較・検討し、最終的には各アンカーヘッドの形状に対して最も有効性の高い手法およびパラメータを選出する必要があると考えられる。
- 7)本研究において扱った実験はすべて室内の条件下における結果であることから、今後、荷重以外の超音波の反射特性に影響を与える要因も検討する必要がある。具体的に現場でのアンカーの状況を想定すると、温度の変化、水の存在、アンカーヘッドの変状、およびアンカーヘッドに付着したサビの影響などを考慮する必要がある。今後、想定される様々な条件下においても反射法の適用性が示されるか確認するために追加実験が必要と思われる。

## 参考文献

- 竹本将,藤原優,横田聖哉:グラウンドアンカーの健全度評価とリフトオフ試験の適用性について-グラウンドアンカーの掘り起こし調査-,第45回地盤工 学研究発表会,2010.
- 山田浩: グラウンドアンカー工法の維持管理と補修補強に関する課題、日本地 すべり学会、2008.
- 3) 土木研究所、日本アンカー協会:グラウンドアンカー維持管理マニュアル、 2008.
- 4) 酒井俊典, 關泰史, 常川善弘, 横田聖哉, 竹本将, 藤原優, 竹家宏治, 原克
   仁:アンカーのリフトオフ試験におけるリフトオフ前勾配と残存引張り力の
   関係について, 第45回地盤工学会研究発表会, 2010.
- 5) 大窪克己, 竹本将: 高速道路斜面の維持管理について-特にグラウンドアンカーについて-, 地盤と調査 2008 年第1号, pp. 13-18, 2008.
- 6) 酒井俊典,常川義弘,福田雄治,永野正典: SAAM ジャキを用いたアンカーの 残存引張り力の調査方法,地盤工学会誌 56-12(611), 2008.
- 7) 芥川真一,中森絵美,森本紘太郎,馬場修二,森聡,櫻井春輔:磁歪法による PSアンカーの軸力推定法の提案と大規模地下空洞における適用例,第37回岩 盤力学に関するシンポジウム講演集(社)土木学会,2008.
- D. Kleitsa, K. Kawai, T. Shiotani, D.G. Aggelis: Assessment of metal strand wire pre-stress in anchor head by ultrasonic, NDT&E International Vol. 43, pp. 547-554, 2010.
- 9)河合啓介,塩谷智基,大津宏康,田中尚,川越洋樹:超音波によるグラウンドアンカーの緊張力推定手法に関する研究,地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2009,2009.
- 10) K. Kawai, T. Shiotani, H. Ohtsu, H. Tanaka, H. Kawagoe: ESTIMATION OF AXIAL STRESS IN GROUND ANCHORS BY MEANS OF INDIRECT ULTRASONIC TECHNIQUE, Engineering Technics Press, Structural Faults and Repair 2010, 13th International Conference and Exhibition, CD-ROM, 2010.
- 11) 大津宏康,松山裕幸, Nutthapon Supawiwat,高橋健二:斜面対策工の性能低下

過程の不確実性を考慮した LCC 評価, 土木学会論文集 F, Vol. 62, No.2, pp. 405-418, 2006.

- 12) 腰欣司著: 超音波とその使い方, pp. 15-16, 1994.
- 13) 中村信良偏:超音波,コロナ社,pp. 14-15, 2003.
- 14) 塩谷智基:岩盤内破壊評価法へのアコースティックエミッションの適用に関する研究,熊本大学博士学術論文,1998.
- 15) 松岡宏:摩擦の物理,表面科学 Vol. 24, No. 6, pp. 328-333, 2003.
#### 謝辞

本論文の執筆にあたり多くの方々に支えられて研究に取り組むことができました。充実した1年間を過ごすことができたことに感謝し、お世話になった方々に 御礼を申し上げたいと思います。

京都大学・大津宏康教授には、数多くの発表の機会を与えていただき、その都 度、厳しくも温かいご指摘や的確なご助言の手をさしのべていただきました。先 生のご指導のもとで研究に取り組めたことを心より感謝いたします。

京都大学・乾徹准教授には、本論文の副査を務めていただきました。不十分な 部分をご指摘していただき、本論文をより充実させることができました。深くお 礼申しあげます。

京都大学・塩谷智基准教授には、本研究の実験・解析・論文の作成など多岐に わたってご指導していただきました。先生の度重なる激励のおかげで本論文を書 き上げることができました。深く感謝いたします。

京都大学・稲積真哉助教には、1回生の頃よりチューターとしてお世話してい ただきました。研究面だけでなく生活面でもサポートしていただき充実した大学 生活を送ることができました。厚く感謝いたします。

京都大学・大島義信准教授には実験および解析のサポートをしていただきました。先生のおかげで無事に実験を行うことができ本論文を書き上げることができ ました。厚くお礼申しあげます。

株式会社ジャスト・柳瀬高仁氏、武田悠治氏、村田光氏には度重なる質問や実 験器具の借用のご依頼に応えていただきました。深くお礼申しあげます。

大津研究室の伊東宏美秘書、先輩方、ならびに同回生の方々のおかげで有意義 な研究生活を過ごすことができました。先輩方には様々なアドバイスをしていた だきました。また同回生の方々とはともに助け合い研究に取り組むことができた と思います。本当にありがとうございました。

最後に本論文を書き上げることができたのも、あらゆる面で私を支えていただ いた両親をはじめとする家族や友人のおかげであります。心から感謝の意を表し ます。



図1.1.1 ヘッドのタイプによるアンカーの分類

# 平成3年までのアンカーの種類別の導入率







図1.1.2 NEXCO西日本管轄内のアンカーの内訳





#### 図1.1.4 リフトオフ試験

出典:斜面防災対策委員会 ホームページ http://www4.ocn.ne.jp/~dpr/top.html



図1.3.1 鋼材引張荷重強度比と断面欠損率の関係



#### 図1.3.2 鋼材の断面欠損率と経過年数の関係

出典:切土のり面構造物の維持補修計画の立案方法に関する検討 大津宏康



#### 図3.2.1 実験の概要



#### 図3.2.2 超音波探傷器



図3.2.3 測定状況





図3.3.1 振幅と時間の関係 載荷過程







図3.3.3 緊張力ごとの振幅値の比較



#### 図3.3.4 接触状態の模式図



図3.3.4 緊張力とEnergyの関係 0-1696 µ sec間



図3.3.6 緊張力とEnergyの関係 200-1696 µ sec間





図3.3.8 フーリエ変換結果 除荷過程



図3.3.9 緊張力とPartial power















図4.2.4 探触子



図4.2.5 載荷ステップと測定項目



図4.2.6 試験体の形状および寸法





図4.3.2 振幅値と時間の関係 1MHz 測定箇所A 除荷過程





図4.3.4 振幅値と時間の関係 1MHz 測定箇所B 除荷過程



図4.3.5 振幅値と時間の関係 5MHz 測定箇所A 載荷過程



図4.3.6 振幅値と時間の関係 5MHz 測定箇所A 除荷過程





図4.3.8 振幅値と時間の関係 10MHz 測定箇所A 除荷過程



### 図4.3.9 載荷0 kNと載荷600 kNの振幅値の比較



#### 図4.3.10 載荷0 kNと載荷600 kNの振幅値の比較



図4.3.11 載荷荷重とEnergyの関係







表面1の最小ひずみ量

## 図4.3.14 ひずみ量と載荷荷重の関係



図4.3.15 ひずみ量と載荷荷重の関係



図4.3.16 第1反射波の最大振幅値と載荷荷重の関係


図4.3.17 周波数ごとの載荷荷重とEnergyの比較

Material No.: 1			
Previous Iron		<u>N</u> ext	Add
Density (kg/m^3)	7690		Delete
lambda (MPa)	110200		
mu (MPa)	78750		Сору
Gray Level	100		Library
Damping ParametersDampingeta (Pa*s)6phi(Pa*s)0.1Frequency (MHz)1		VL = 5900.12 (m/s) AlphaL = 0.00879265 (dB/cm) d(AlphaL)/df = 0.0175959 (dB/cm/MHz) ZL = 45.3719 (MRayl) L. Wave Length = 5.90012 (mm)	

図5.3.1 解析の物性値







## 図5.3.3 解析モデルの設定







図5.4.2 数値解析による波形



図5.5.1 Ar/Aと第1反射波の最大振幅値



図5.5.2 Ar/AとEnergyの関係





## 図5.5.3 実験結果の近似曲線