京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻修士論文 平成 25 年 2 月



Master's Thesis Department of Urban Management Graduate School of Engineering Kyoto University February 2013

グラウンドアンカー緊張力の 超音波による非破壊評価

京都大学大学院 工学研究科 都市社会工学専攻 ジオマネジメント講座 土木施工システム分野 岩本 勲哉

要旨

我が国の構造物の多くは戦後の復興期から高度経済成長期にかけて急速かつ大量に整 備されてきた。現在、それらの構造物が供用から数十年経過し、その老朽化が問題とな っている。一方で、我が国の維持管理に投資できる予算は厳しい現状があり、今後は限 られた予算で老朽化した多くの構造物を維持管理する必要性がある。本研究の対象構造 物であるグラウンドアンカーも同様の問題を抱えている。グラウンドアンカーは斜面の 安定化を図る目的で高度経済成長期より大量に施工され、現在に至るまで高速道路沿い の斜面を中心に12万本以上が施工されている。現在、供用から数十年経過し、著しく機 能が低下したアンカーの事例が多数報告されるようになり、アンカーの性能低下が問題 となっている。そこで、各所に点在する多数のアンカーの効率的な維持管理手法の構築 が求められている。

現状のアンカーの維持管理フローにおけるアンカー機能の評価は点検および健全性調 査によって行われる。このうち、点検は主に目視点検によって実施され、アンカー機能 の外観からの評価として行われる。しかし、アンカーはその大部分が地盤内部に施工さ れ外観できるのはアンカーヘッド部分のみであり、必ずしもアンカー機能の状態を反映 できるとはいえない。一方で、点検結果から更に健全性調査が必要と判断された場合、 主にリフトオフ試験によるアンカーの残存緊張力の測定が実施される。アンカーの残存 緊張力はアンカー機能を定量的に評価できる指標であり、リフトオフ試験は直接的に残 存緊張力を測定することができる。しかしながら、リフトオフ試験は大規模な試験装置 をともない高コストかつ長時間要することから、多数施工されたアンカーの一部に実施 されるにとどまる。そのため、のり面に施工された個々のアンカーの評価は可能である が、のり面全体の安定性の評価ができないのが現状である。以上のように現状のアンカ ーの機能評価では多数のアンカーの残存緊張力を計価できる手法が求められている。そこで、本研 究では簡便な方法として超音波法に着目し、残存緊張力の推定手法について検討する。

ここでの超音波法は締付力(緊張力)の違いによるアンカーヘッド部分の超音波の伝 播メカニズムに着目した手法である。本研究ではまず、基礎実験によって超音波パラメー タと緊張力の相関を検討した。また、基礎実験で得られた知見が実際に原位置に施工され たアンカーにおいても適用性があるか原位置計測によってさらに検討した。最後に、基礎 実験および原位置計測によって得られた知見をもとに、超音波法の実務への適用方法につ いて提案するとともに、今後の課題を明らかにする。

i

目次

第 1	章	序論1
1.1	研究	の背景1
	1.1.1	アセットマネジメントと点検技術1
	1.1.2	グラウンドアンカーとその問題4
1.2	既往	の研究7
1.3	研究	の目的
1.4	本論	文の構成
第 2	章	超音波法10
2.1	超音	波の概論[17]10
2.2	超音	波探傷試験10
2.3	超音	波法11
	2.3.1	透過法11
	2.3.2	反射法12
2.4	特性	波形パラメータ13
	2.4.1	伝播挙動[25]13
	2.4.2	振動モード16
	2.4.3	反射と透過(Reflection and permeation)[26]17
	2.4.4	最 大 振 幅 値 お よ び 最 大 振 幅 比 (Peak amplitude and amplitude
	ratio)
	2.4.5	エネルギー(Energy)[27]20
	2.4.6	到達時間(Arrival time)20
	2.4.7	周波数(Frequency)
	2.4.8	パーシャルパワー(Partial Power)
第 3	章	超音波法の実アンカーへの適用性24
3.1	実験	概要24
3.2	超音	波パラメータと緊張力(ナットタイプ)
	3.2.1	反射法
	3.2.2	透過法
3.3	超音	波パラメータと緊張力(くさびタイプ)47
	3.3.1	アンカーヘッドと支圧板の接触面からの反射波47
	3.3.2	支圧板底面からの反射波

3.4 温度変化による影響	2
3.4.1 概要	3
3.4.2 結果および考察	3
3.5 まとめ	5
第4章 原位置への適用)
4.1 ナットタイプへの適用	9
4.1.1 計測概要および結果	9
4.1.2 ナットタイプまとめ	8
4.2 くさびタイプへの適用69	9
4.2.1 試験概要および結果	9
4.2.2 のり面ごとの影響	9
4.2.3 くさびタイプまとめ80	0
第5章 実用化の検討	3
5.1 超音波法の用途	3
5.2 ミクロ的検討8	5
5.3 メゾマクロ的検討80	5
5.4 マクロ的検討8′	7
5.4.1 マハラノビス距離8	8
5.4.2 残存緊張力のランク判別手順	9
5.4.3 ランク分割90	0
5.4.4 使用するデータ9	1
5.4.5 仮定条件	3
5.4.6 判別分析結果	3
5.4.7 考察	8
5.5 まとめ	3
第6章 結論と今後の展望101	1
参考文献105	
謝辞108	

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 アセットマネジメントと点検技術

我が国の土木構造物の多くは、戦後の復興期から高度経済成長期にかけて急速かつ大量 に整備された。それらの構造物は現在、供用から数十年を経過し、補修・更新などの対策 の必要性が顕在化してきており、今後は更新時期を迎える土木構造物はさらに増加するこ とが容易に予想される。つまり、老朽化を迎える土木構造物の維持管理の必要性が高まり、 今後はこれらの維持管理に必要な費用が膨大に増加することが予想される。

一方で図1-1に示すように我国の建設投資額は1990年代をピークに減少の一途を辿って おり、更新時期を迎える構造物の維持管理に充てられる費用も限られている。さらに、図 1-2[1]に示すように我国では2006年をピークに人口が減少へと転じ、今後もさらなる人口 の減少が予想される。さらに図のように少子高齢化が進むことから、労働人口の減少が懸 念される。そのため、我が国の財政はより厳しい状況が続くと考えられる。また、図1-3[2] に他の先進国の高齢者人口の割合を示す。図に示すように、他の先進国も同様に、少子高 齢化にともなう財政難が予想され上述の問題は我が国だけの問題ではないといえる。

このように、膨大な量の構造物の維持管理が必要であるにも関わらず、その費用が限ら れている背景を踏まえると、土木構造物の維持管理を効率化し、維持管理費を最小限に抑 える戦略的な維持管理手法の構築が必要なる。このような課題を解決するには土木技術に 加えてコスト意識を持った施設管理と経営理念を導入することが必要であり、近年、アセ ットマネジメントという概念が注目されるようになった[3][4]。

図 1-4 にアセットマネジメントの一般的な流れを示す。図に示すように、アセットマネ ジメントとは点検から性能評価までの技術的な要素と劣化予測から予算の計画までのマネ ジメントの要素を一連の流れとして行うものである。このうち点検から劣化予測、性能評 価・照査のメンテナンス技術はアセットマネジメントの基礎となる部分であり、この部分 の良否が以後の LCC 評価の精度および適切な対策の選定につながると考えられる。特に点 検はアセットマネジメントの始発点であり、点検結果が以後のマネジメントに及ぼす影響 は他に比べても大きいと考えられる。つまり、効率的な維持管理を行う上では目視点検や 計測などにより構造物の性能を適切に診断することが重要といえる。

しかしながら、多くの土木構造物において適切な点検技術手法は確立されていない状況 にある。点検すなわち構造物の性能を診断する技術は、目視点検や打音検査といった技術 者の主観に委ねられるもの、機器を用いた非破壊検査などによる客観的なものに大別され る。このうち、目視点検や打音検査は簡易で容易に行えることからトンネルや橋梁などの 多くのインフラ構造物に適用されているが、評価指標が曖昧であり精度が高いとはいえな い。さらに点検者の技量によって異なる点検結果となる場合がある。また地盤構造物やコ ンクリート構造物のような構造物内部を直視できない場合は、構造物の劣化は表面に顕在 化して初めて評価可能となり、初期の損傷・劣化の評価が難しいなどの問題点が指摘され る。一方で、赤外線サーモグラフィー[5]や超音波探傷試験[6]などの非破壊検査技術を用い ることで、目視点検や打音検査などよりも詳細に構造物の性能を評価することができる場 合もある。特に超音波探傷試験は目視では検知できない構造物「内部」の損傷を評価する ことが可能となる。しかし、非破壊検査は金属や先端複合材料を中心に開発が進められて きた経緯があり、大規模な構造物の日常的な点検に適用できる装置や手法の確立に至って いない。以上のように土木構造物の適切な点検技術の確立は遅れており、適切な点検技術 の構築が求められる。特に今後、限られた予算内でのアセットマネジメントを行うことを 考えれば、簡易かつ精度よく構造物の性能を評価する点検技術の必要性が増すものと考え られる。



図 1-1 建設投資額の推移



図 1-2 人口構成の変化予測





1.1.2 グラウンドアンカーとその問題

本研究の対象構造物のグラウンドアンカーにおいても上述の維持管理における点検技術の問題が顕在化している。

グラウンドアンカー(以下、アンカーと称す)とは、図 1-5 に示すように、アンカーに 作用する引張り力を地盤に伝達するためのシステムで、グラウトの注入によって造成され るアンカー体、引張り部 (テンドン)、アンカー頭部によって構成されるものである[7]。 アンカーは斜面の安定や地すべりの防止、構造物の浮き上がりや転倒を防ぐなどの目的で 広く利用されてきた。我が国においても工期の短縮、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)に岩盤アンカーとして藤原ダム(群馬県)の副ダムにプ レストレスを与えるために採用[8]されて以降、広範にわたり用いられてきた。特に高速道 路沿いの斜面においては、昭和44年(1969年)より斜面の安定や地すべりの抑止を目的 としてアンカーが使用され始め、図 1-6 に示すように年々、供用されるアンカーの数は増 加し、現在までに 12 万本以上のアンカーが打設されている[9]。近年、多数のアンカーは 導入から数十年を経過し、アンカーの残存緊張力の低下やアンカー内部のテンドンの破断 によるアンカーの引き抜けなど、図 1-7 に示すような著しく機能が低下した事例が多数報 告されている[10]。アンカーの耐久性の要となる防食対策に関しては 1988 年に土質工学会 (現:地盤工学会)で制定された「グラウンドアンカー設計・施工基準」によって初めて 規定され、それ以前に施工されたアンカー(以下、旧タイプアンカーと称す)において上 述の問題が特に顕在化してきている。旧タイプアンカーでは、腐食に対していわゆる「二 重防食」の概念が確立されていなかったこともあり、アンカーの耐久性に問題があるもの が多く、これらの旧タイプアンカーに対する対応が早急に必要となってきている。一方で 近年では、上述のことを踏まえ平成2年(1990年)以降、防食性能が向上したアンカー(以 降、新タイプアンカーと称す)が主流となっている。しかし、防食性能が向上したにも関 わらず新タイプのアンカーにおいても導入後 10 年以内に損傷や破断が確認された例も報 告されている。このようなアンカーの耐久性の問題は、我が国だけでなくアンカーの先進 国であるヨーロッパをはじめ世界各国で問題となっている。以上のように永久構造物とし て期待されていたアンカーが供用から数十年の経過を経て、その性能が低下する事例が多 数報告されており、アンカーの適切な維持管理手法の構築が求められている。



図 1-5 グラウンドアンカーの概要



図 1-6 アンカーの施工実績





図 1-7 アンカーの損傷事例(引き抜けたアンカー)

さらに、上述したように、我が国ではアンカーが施工され始めてから 50 年余りを経過し、 大量かつ急速に施工されてきたために今後更新の時期を迎える既設のアンカーが増加する ことが予想される。一方で、図 1-1 に示したように、我が国の建設投資額は 1990 年代を境 に減少の一途を辿っている。そのため、アンカーも多くのインフラ構造物と同様にアセッ トマネジメントの考え方に則し、その健全性を調査・評価し、ライフサイクルコストを考 慮し維持・補修を組み合わせることにより、その延命化を図る必要があり、そのために適 切な維持管理手法の構築が求められている。

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」[11]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。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に疑いがあると考えられるアンカ ーに対して、主に目視点検が実施される。目視点検において健全性に大きな問題があると 判断される場合には、リフトオフ試験に代表されるアンカーの残存緊張力の測定などのア ンカー機能を評価する、健全性調査が実施され、その結果をもとに必要に応じて、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。

具体的には、上述の目視点検によって大量に施工されたアンカー全数を調査することが できるが、目視では外観できるアンカーヘッド部分のみの点検であり、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)を必ずしも反映した調査結 果が得られない。また点検項目は定量的な指標ではなく、点検員の技量や経験で異なる結 果となる場合もあることが指摘されている。

目視点検の結果に応じてアンカー機能を評価するために行われるのが健全性調査であり、 主にリフトオフ試験によってアンカーの残存緊張力の測定が行われる。アンカーの残存緊 張力は地盤のクリープ、テンドンのリラクゼーションなどの影響で時間の経過とともに少 しずつ減少する。また、外力の変化や地盤の変状などの影響を受けた場合、残存緊張力は 大きく変化する。つまり、アンカーの残存緊張力の測定は斜面の安定性を考慮する上で重 要な指標であるといえる。

図 1-8 の測定状況に示されるように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の関係から残存緊張力を推定する手法であ る。よってリフトオフ試験は直接的にアンカーの残存緊張力を推定することができアンカ ーの性能を評価することができる。しかし、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、大規模な試験装置をともなうことから、試験本数 は限られ、斜面に多数施工されたアンカーの一部(10%かつ 3 本以上が目安)に実施され るのみにとどまる。また、リフトオフ試験が適用される頻度は少なく、同じのり面を対象 としてリフトオフ試験が実施される場合でも以前に実施したアンカーに対して必ずしもリ フトオフ試験が実施されないことから、アンカーの残存緊張力の経年的な変化をモニタリ ングするに至っていない。さらに、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、アンカー内部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。

以上のように現状のグラウンドアンカー維持管理のフローにおける点検では、累計 12 万本以上のアンカーを大量に精度よく、かつ定量的に機能を評価するに至っていない。そ のため、残存緊張力を反映したアンカーの劣化予測を十分に行うことできず、適切な維持 管理手法が構築されていない現状にある。また、各のり面の多くのアンカーの残存緊張力 を評価することが困難なことから、残存緊張力をもとにした適切な対策工が合理的に選定 できない現状にある。そこで、効率的な維持管理手法の構築のために、アンカーの残存緊 張力を安価で簡便に計測できる手法の構築が求められている現状にある。



図 1-8 リフトオフ試験状況

1.2 既往の研究

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 されていない現状にある。これまでにもアンカーの残存緊張力を簡便に測定する試みや残 存緊張力の経年的な変化をモニタリングする試みが多くの研究者によって進められている。 以下に既往の研究の概要および課題を挙げる。

大窪ら[12]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を確立し、アンカー 残存緊張力を評価することがのり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[13]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が図られたが、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 ると指摘された。そこで芥川ら[14]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、透磁率の変化から間接的に残存緊張力を推定 することを試みた。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。

また、残存緊張力のモニタリングの観点からは、森[15]によって荷重計による本設地盤 アンカーの残存緊張力の長期にわたる計測事例が報告されている。荷重計による計測の特 徴としてはリアルタイムでの測定が可能で残存緊張力の経時的な変化をモニタリングする ことが可能となる。しかし、劣化の顕在化が報告されるようになる以前の旧タイプアンカ ーの多くは、荷重計が設置されていないため緊張力の測定ができない。そこで、田中ら[16] によって既設アンカーへの荷重計の取り付け事例も報告されているが、既設アンカーへの 取り付けには一度、リフトオフ試験と同様にアンカー体を引張する必要がり、多数のアン カーへの適用には至っていない。

1.3 研究の目的

前節のように長期にわたり広範囲に適用可能な簡便で安価な残存緊張力の計測技術の開 発が望まれているにも関わらず、アンカーの緊張力推定(測定)手法には、実用化に至る技 術が確立されていないのが現状である。そこで、本研究では、アンカーの残存緊張力を安 価かつ簡便に測定する新しいアプローチとして超音波を用いた方法(以下、超音波法と称 す)を提案し、その適用性について検討する。超音波法の利点としては、計測が容易であ り、現状ではデータを後に解析することが必要ではあるが、原位置計測は10-20分/本程 度で実施することができる。また、計測には特別な外力や技術は必要とせず超音波計測機 器のみで容易に実施することができる。つまり、安価かつ簡便な計測に適しているといえ る。

詳細については第2章において述べるが、筆者らが考案した超音波法にはアンカーヘッドにアンカー軸に垂直な方向に超音波を送信しアンカーヘッド内部を透過する波を検討する透過法と、アンカーヘッドから支圧板へ向けて超音波を送信しアンカーヘッド内部で繰

り返される多重反射波を検討する反射法があるが、本研究では両手法についてアンカーの 残存緊張力の推定手法としての適用性の検討を行う。

本研究では、まず実物大アンカーを用いた基礎実験を行い緊張力と超音波パラメータの 相関を検討し、超音波法のアンカーの残存緊張力推定手法としての適用性を検討する。そ して、実斜面に施工されたアンカーに対して原位置試験を行い原位置における適用性を検 証する。さらに得られた知見によって超音波法の実用法について考察を加える。最後に今 後の課題および改良点について明確にする。

1.4 本論文の構成

本論文の構成は全6章からなる。

第1章において、序論として研究の背景、既往の研究との関連および研究の目的を述べた。

第2章では、本研究で用いる超音波およびその適用手法について説明する。また超音波の特性パラメータについて概説する。

第3章では、本研究で提案する超音波法のアンカーへの適用性を検討するために実際の アンカーヘッドを用いた基礎実験を実施し、ナットタイプ・くさびタイプの両タイプのア ンカーヘッドに対しての実験結果を示す。

第4章では、実際の高速道路沿いの斜面に施工されたアンカーに本超音波法を適用し、 原位置における適用性および課題について述べる。また原位置における本手法の精度を検 討するとともに、原位置計測における課題を挙げる。

第5章では、前章までに得られた超音波法の適用性についての知見をもとに、実際の実 用化について検討を加える。

第6では、本研究で得られた知見をまとめ、本手法の問題点および今後の展望を示す。

9

第2章 超音波法

2.1 超音波の概論[17]

超音波とは一般的には人間の耳に聞こえない非可聴周波数の範囲の高周波であり、周波 数が20kHzを越える弾性波(音波)と定義される。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 ネルギーの波を伝送することができる特徴がある。これらの特性を利用し、超音波は様々 な分野への応用が試みられ、その顕著な効果により大きな発展を遂げてきた。例えば、ボ ルト締め振動子などの高効率で使いやすく価格も手頃な超音波発生用振動子の開発や、機 械部品、光学レンズ、電子部品の超音波洗浄などの超音波の動力的な応用が発達した。さ らに医学の分野においては、超音波を人体に照射して軟組織からの反射波を受信すること で、体内の疾患を体表面から診断することが可能となった。今日では超音波による診断は 臨床上必要不可欠なものにまで発展している。このように超音波は、動力的な利用から検 査に至るまで様々な分野に活用されている。

2.2 超音波探傷試験

上述のように超音波は様々な活用用途があり、土木の分野においては、特に非破壊検査 技術の一つとして応用されてきた。中でも、現在、広く普及し実務レベルで活用されてい る技術の一つに超音波探傷試験が挙げられる。超音波探傷試験とは、材料や溶接部および 構造物の内部の損傷・き裂を調べるために実施される。超音波を探触子から発生させ、構 造物内部に送信する。構造物へ送信された波は、構造物内部を伝播するが内部にき裂など の損傷がある場合、き裂の境界面において超音波が反射する。超音波探傷試験では、この 反射波を検知し、反射波が受信される時間や振幅から、損傷の位置や大きさを評価する技 術である。超音波探傷試験は金属からコンクリート材料に至るまで広く適用され、様々な 構造物の内部欠陥の検知に役立てられている。一方で、超音波探傷試験はセンサを直接、 構造物に接触させる必要があることから、点検者の手の届かない部分には適用が困難とさ れてきた。しかし、近年では、非接触超音波探傷技術の進展が進み、レーザを用いたコン クリート欠陥の検知[18]などに代表されるような遠隔地からの超音波探傷も可能となりつ つある。

また、一般的な超音波探傷試験は損傷の有無の検知のみに広く活用されるが、超音波探 傷試験で得られる波形および各種の超音波パラメータを解析することで、損傷の有無の検 知だけでなく構造物の内部の劣化具合や物理量を間接的に評価することも可能となる。例 えば、超音波の伝播速度は、伝播する材質の密度および弾性係数によって定まり、材料の 劣化、損傷によってこれらの値が変化すると伝播速度も変化することになる。そこで、超 音波探傷試験で得られた信号波形を分析し、対象構造物の超音波の伝播速度を求めること で、構造物の弾性係数を間接的に推定することができる。このように、超音波探傷試験は、 構造物内部の損傷を直接的に検知することから、超音波パラメータから間接的に構造物の 物理量、更に健全性が評価できるなど応用の幅が広い。本研究における超音波法は、後者 の方法を応用したものであり、アンカーヘッドに超音波を励起させ、得られた波形の各種 の超音波パラメータと緊張力の関係から間接的にアンカーの残存緊張力を評価しようとす るものである。

2.3 超音波法

前節で述べたように、本研究における超音波法とはアンカーヘッドへ超音波を励起させ、 得られた超音波の波形データを分析し、その各種のパラメータの変化からアンカーの残存 緊張力を間接的に推定するものである。この際、アンカーヘッドに超音波を励起させる方 向によって、超音波法は透過法と反射法の2通りの手法がある。以下では、透過法および 反射波法について詳細を述べる。

2.3.1 透過法

図 2-1 に透過法の概要を示す。透過法とは、超音波をアンカーヘッドにアンカー軸に垂 直な方向に励起させ、その対面でアンカーヘッドを透過する超音波を受信する手法である。 アンカーヘッドとテンドンの締め付け度合は緊張力の増減によって変化することが想定さ れ、微細な変化にも敏感な超音波を透過させることで、それらの透過特性の変化を反映す るものと考えられる。透過法についてはこれまでにも、本研究グループ[19][20][21][22]に よって研究が進められ、基礎実験および原位置試験を通じて、超音波パラメータと緊張力 の相関を確認し、原位置への適用性が示されてきた。しかし、透過法は特にナットタイプ (第3章で詳述する)のアンカーヘッドに対して有効となるが、くさびタイプ(第3章で 詳述する)のアンカーには透過特性の有意な変化が確認されないなど課題を残している。 これは、ナットタイプがアンカーヘッドとテンドン部分である鋼棒によって構成されるの に対して、くさびタイプはアンカーヘッド、テンドン部分のより線およびより線を締め付 けるためのくさびによって構成され、透過特性の変動のメカニズムが複雑であることに起 因するものと考えられる。

また、既往の研究において透過法のナットタイプの適用性が示されているものの、これ までは特定の規格のアンカーおよび現場でのみの検証にとどまっており、様々な規格のア ンカーへの適用性や各地の現場での検証に至っていない。そこで、本研究では、これまで の検討に加えて、第3章および第4章に詳述する基礎実験および原位置試験によって多種 多様な状況でのナットタイプアンカーで透過法の適用性を検討する。



図 2-1 透過法の概要

2.3.2 反射法

図 2-2 に反射法の概要を示す。反射法とは、アンカーヘッドから支圧板へ向けてアンカ ー軸と平行した方向に超音波を送信し、アンカーヘッドと支圧板の接触面などの境界から の反射波を検討するものである。この際、アンカーヘッドと支圧板の接触の度合が緊張力 の増減にともなって変化することで超音波反射特性が変化することが想定される。実際に 鋼材の接触状態と接触面に生じる荷重によって超音波の反射特性の変化が検討[23][24]さ れ、アンカーの残存緊張力推定手法としての可能性が示されている。また、反射法では支 圧板とアンカーヘッドの接触状態のみの変化を利用しており、ナットタイプおよびくさび タイプのアンカーヘッドで同様のメカニズムが想定される。そのために、透過法で課題を 残したくさびタイプについても適用が期待される。

しかしながら、既往の研究では、アンカーヘッドを模擬した試験体での検討にとどまっ ており、実アンカーへの適用性の検討に至っていない。そこで、本研究では、まず反射法 の実アンカーへの適用性を第3章に詳述する基礎実験によって検討する。さらに、原位置 における反射法の第4章に詳述する原位置計測によって検討を加える。



図 2-2 反射法の概要

2.4 特性波形パラメータ

上述したように、本研究に用いた超音波法では得られた信号波形を分析し、各種の超音 波パラメータからアンカーの残存緊張力を間接的に推定しようとするものである。本節で は、超音波の伝播挙動、振動のモードについて述べ、更に本超音波法の基礎的原理である 弾性波の反射と透過特性について言及する。最後に本研究の検討に用いた各種のパラメー タについて概説する。

2.4.1 伝播挙動[25]

アンカーヘッドに励起された超音波はアンカーヘッド内部では弾性体を伝わる弾性波と して伝播する。以下に弾性波の伝播挙動を示す。

3 次元の弾性体に加わる応力 (σ)は、図 2-3 に示すように、 σ_x 、 σ_y 、 σ_z を垂直応力、 τ を せん断応力とすると式(2.1)のように表される。



図 2-3 3 次元座標と応力

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\sigma}_{x} & \boldsymbol{\tau}_{xy} & \boldsymbol{\tau}_{xz} \\ \boldsymbol{\tau}_{yx} & \boldsymbol{\sigma}_{y} & \boldsymbol{\tau}_{yz} \\ \boldsymbol{\tau}_{zx} & \boldsymbol{\tau}_{zy} & \boldsymbol{\sigma}_{z} \end{bmatrix}$$
(2.1)

ここで、局所的な回転がなく弾性体が静止するためには、式(2.2)が成り立つため応力 (σ) の独立成分は6個である。

$$\boldsymbol{\tau}_{yz} = \boldsymbol{\tau}_{zy}, \ \boldsymbol{\tau}_{zx} = \boldsymbol{\tau}_{xz}, \ \boldsymbol{\tau}_{xy} = \boldsymbol{\tau}_{yx}$$
(2.2)

応力と慣性力とのつり合いから、以下の運動方程式が得られる。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z}$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z}$$
(2.3)

ここで、u、v、wはx、y、z方向の変位であり、pは媒体の密度である。式(2.3)の右辺を

変位の関数として表すために。応力とひずみの間のフックの法則と呼ばれる線形関係と Lameの定数(λ、μ)を用いた以下の関係を用いる。

$$\sigma_{x} = \lambda \Delta + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \tau_{yz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\sigma_{y} = \lambda \Delta + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \tau_{zx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

$$\sigma_{z} = \lambda \Delta + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \tau_{xy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

(2.4)

$$\lambda = \frac{E\nu}{(\nu+1)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(\nu+1)}$$
(2.5)

$$\Delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$$
(2.6)

式(2.4)を式(2.3)に代入すれば、以下の直角座標による3次元弾性体内の運動方程式が得られる。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$
(2.7)

式(2.7)に従う波動は2種類の伝播速度を有し、以下の式で表される。

$$C_{p} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

$$C_{s} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$
(2.8)

ここで、*C_p*は P 波速度、*C_s*は S 波速度である。さらに 2 つの速度の比をとると式(2.9) となる。

$$\frac{C_{p}}{C_{s}} = \sqrt{\frac{\lambda}{\mu} + 2} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}$$
(2.9)

通常 λ と μ は正の値であるので、P 波がS 波よりも速く伝播することが式(2.9)より確認で きる。さらに、弾性係数 E、質量密度 ρ 、およびポアソン比vを用いるとP 波とS 波の波速 は次式で示される。

$$C_{P} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$
(2.10)

$$C_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \tag{2.11}$$

以上より、P波は最も速い速度で進行し、S波と続く。理論上、P波およびS波の速 度の比はポアソン比のみによって決まる。本研究では主に P 波についての検討を行う ものである。超音波を励起させるアンカーヘッドは主に鋼材で構成され、鋼材中の P 波の伝播速度は一般的に 5,920 m/µsec となる。

2.4.2 振動モード

無限に広がる一様な等方弾性体中を伝播する波には、上述の縦波 (P 波)と横波 (S 波)の 2 種類が存在する。さらに弾性体に表面がある場合は、表面を沿って伝播する波である表 面波 (R 波) が存在する。また、弾性体の厚さが励起した弾性波の波長より小さい場合に は板波 (ラム波) が発生する。このような波の種類を振動モードといい、試験体の表面や 他の物質との境界面、および試験体内の欠陥箇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述べる。

(a) 縦波

縦波とは粒子の振動が波の伝播する方向と平行な方向、すなわち縦方向に生じる波のこと で、粒子が粗密を繰り返しながら伝播する。粒子が密になっている部分と疎になっている 部分が一定の間隔となっており、密と密あるいは疎と疎の間の距離を波長という。縦波は P波、粗密波、あるいは圧縮波とも呼ばれている。この波は体積変化が可能な媒質を伝播 するため、固体、液体、および気体の中を伝播することが可能であり、弾性波の中では速 度が最大である。また、弾性波の中でP波のエネルギーは全体の約10%を占める。本研究 で使用した超音波を励起させる垂直探触子は主に縦波を励起させるものである。

(b) 横波

横波とは粒子の振動が波の伝播する方向と直角 (垂直)な方向、すなわち横方向に生じる波 のことで、表面と平行に加えられたひずみが、その方向を変えながら繰り返されて伝播す る。横波は S 波、あるいはせん断波とも呼ばれている。この波は固体中では伝播するが、 せん断弾性がない液体および気体中ではひずみを戻す作用が起こらないので伝播しない。 また、弾性波の中で S 波のエネルギーは全体の約 20%を占める。

(c) 表面波

表面波とは材料の表面部分のみを伝播する波のことで、最初の発見者の名をとってレイリ ー波、あるいは R 波とも呼ばれている。表面付近の粒子の挙動には、表面に対して平行に 動く縦振動 (粗密)と表面に対して上下方向に動く横振動 (横ずれ)がある。したがって、伝 播時にはこれらが合成されたような楕円状の動きをする。表面波は反射境界面を持つ反無 限弾性体を伝播するため、そのエネルギーは円柱状に伝播する。また、表面波のエネルギ ーは弾性波の中で最大で、全体の約 70%を占めている。さらに、実体波よりも減衰しにく いという特徴がある。

(d) 板波 (ラム波)

板波とは波の伝播方向と直角(垂直)な断面の寸法が波長と同程度になると、側面で反射し た波が互いに干渉することで生じる被導波である。板、棒、管などを伝播する被導波は、 すべて板波と呼ばれる。特に、板を伝播する波はラム波と呼ばれ、対称モードSと非対称 Aモードがあり、表面波と同様に楕円状の動きを示す。

2.4.3 反射と透過(Reflection and permeation)[26]

可聴音と同様に、超音波で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おり、本研究の超音波法もこれらの性質を利用する。

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(振幅)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る。

図 2-4 に示すように、入射波の粒子速度、応力を *v_{x1}、σ₁、*透過波および反射波のそれら を *v_{x2}、σ₂ v_{x3}、σ₃とすると式(2.12)*の境界条件を得る。



図2-4 境界面に垂直に入射した縦波の透過と反射

$$\begin{cases} \sigma_1 + \sigma_3 = \sigma_2 \\ v_{x1} + v_{x3} = v_{x2} \end{cases}$$
(2.12)

またそれぞれの波動の応力は媒質の密度および弾性波の伝播速度を用いて式(2.13)で表 される。

$$\begin{cases} \sigma_{1} = \rho_{1}V_{1}v_{x1} \\ \sigma_{2} = \rho_{2}V_{2}v_{x2} \\ \sigma_{3} = -\rho_{3}V_{1}(-V_{1})v_{x3} \end{cases}$$
(2.13)

ここで、式(2.12)および式(2.13)より、以下の式(2.14)を得る。

$$\begin{cases} \sigma_{x2} = \frac{2\rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} \sigma_{x1} \\ \sigma_{x3} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \sigma_{x1} \end{cases}$$
(2.14)

また、粒子速度についても、波動の進行方向を正として、伝播速度を常に正とすると、 式(2.15)を得る。

$$\begin{cases} v_{x2} = \frac{2\rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} v_{x1} \\ v_{x3} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} v_{x1} \end{cases}$$
(2.15)

ここで、Z₁、Z₂をそれぞれの媒質の密度ρと音速 Vの積と定義すると、式(2.14)および式 (2.15)の右辺の係数は以下の式(2.16)および式(2.17)となる。

$$\tau = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$$
(2.16)

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \tag{2.17}$$

ここで*τ*および*r*はそれぞれ、透過率および反射率であり、入射波の音圧における透過波 および反射波の音圧の比率が上式で表される。例えば、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 4.28×10⁻⁴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。

2.4.4 最大振幅値および最大振幅比(Peak amplitude and amplitude ratio)

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 値比と定義する。このパラメータは実験で得られる超音波の時間と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(2.18)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(2.19)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。ここで P_x はxなる距離を伝播後の音圧、 P_0 は初期の音圧、 α は減衰係数、 η は媒質の粘性係数、 ω 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。

$$P_x = P_0 e^{-\alpha x} \tag{2.18}$$

$$\alpha = \frac{\eta \varpi^2}{2V^3 \rho} \tag{2.19}$$

2.4.5 エネルギー(Energy)[27]

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—A_nの離散データの場合、 エネルギーE は式(2.20)のように定義される。

$$E = \sum_{i=1}^{n} (A_i)^2$$
 (2.20)

また超音波のエネルギーには振動数 f を用いて式(2.21)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ことが知られている。

$$E \propto A^2 f^2 \tag{2.21}$$

2.4.6 到達時間(Arrival time)

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。

一般に、目視で波形データを読み取り、超音波波形の振幅の初動部が確認される時間を 到達時間とするが、実務上超音波の振幅に対してノイズと区別できる値をしきい値として 設定し、受信される超音波波形の振幅が初めてしきい値を越える時間を到達時間とするこ とが多い。さらに、近年では、精度が高く汎用化しやすい到達時間読み取り手法として AIC 法(Akaike Information Criterion、赤池情報量基準)を利用した方法が提案され、波形デー タの有意な到達時間の判定に有効であることが報告されている[28]。 以下に AIC 法を示す。N 個のサンプル数で記録された超音波波形の振幅値を Xi(i=1,2,.., N)とし、任意の点 i=k での AICk を式(2.22)により求める。

$AIC_{k} = k \cdot \log\{ \operatorname{var}(X[1,k]) \} + (N-k) \cdot \log\{ \operatorname{var}(X[k,N]) \}$ (2.22)

一般に得られたAICkが最小値を示すi=kでの時間の直前の時間が有意な到達時間となる ことから式(2.23)により到達時間を算出することができる。

$$P1 = T_k \{Min(AIC_k)\} - \Delta T$$
(2.23)

2.4.7 周波数(Frequency)

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。本研究では離散フーリエ変換によって周波数スペクトルを分析した。以下に離散フーリエ変換の理論を述べる。

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。

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i2\pi f t} dt$$
(2.24)

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t)e^{i2\pi f t} dt$$
(2.25)

式(2.24)は離散フーリエ変換、式(2.25)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 *Td* とすると式(2.25)がパワースペクトルと呼ばれている。

$$\frac{1}{T_d} \left| F(t) \right|^2 \tag{2.26}$$

波形の記録は、サンプリング間隔 Td の時系列デジタル量として記録され、機器によってはサンプリング間隔の逆数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 μsec 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(2.24)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 $\angle T$ 、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 $x_m = x(m \angle T)$ 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(2.24)および式(2.25)は以下のようになる。

$$C_{k} = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_{m} e^{-\frac{i2\pi km}{N}}$$
(2.27)

$$x_m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{-\frac{i2\pi km}{N}}$$
(2.28)

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 N $\Delta T/C_k/$ 、N $\Delta T/C_k/^2$ 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 ΔT に対して、 $\Delta f=1/(N\Delta T)$ ごと に与えられ、 Δf のことを基本周波数と呼ぶ。式(2.27)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、式(2.27)の右辺の自然対数部分の性質か 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 N $\Delta T/C_k/$ あるい $dN \Delta T/C_k/^2$ 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。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サンプリング間隔を短くすると基本周波 数(周波数分解能)は大きくなって分析が粗くなる。

2.4.8 パーシャルパワー(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 $f_l - f_n$ に対応する 周波数領域での振幅を $P_l - P_n$ とすると周波数領域 $f_k - f_l$ でのパーシャルパワー(PP)は以下 の式で表される。

$$PP = \frac{\sum_{m=k}^{l} P_m}{\sum_{m=1}^{n} P_m}$$
(2.29)

パーシャルパワー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 超音波法の実アンカーへの適用性

先述のように超音波法のアンカー緊張力推定に関わる研究はこれまでにも進められてき たが、様々なタイプのアンカーで適用性の検討には至っていない。そこで、本研究では様々 な規格のアンカーへの適用性を検討した。以下に基礎実験の概要および手順、そして、そ の結果を示し、超音波法のアンカー緊張力推定への適用性を検討する。

3.1 実験概要

図 3-1 に実験に使用したアンカーヘッドの寸法および実験で与えた最大荷重を示す。本 実験ではナットタイプ、くさびタイプの両タイプのアンカーをそれぞれ許容アンカー力の 異なる3種ずつ、計6種のアンカーヘッドを準備した。アンカーは先述のような施工年次 による新旧タイプの分類の他にアンカーヘッドの形状によってナット、くさびタイプに分 別される。ナットタイプのアンカーはアンカーヘッド部分の六角ナットとテンドン部分の 鋼棒によって構成される。その特徴からナットタイプあるいは鋼棒タイプのアンカーと称 される。図 1-6 のように先述したアンカーの防食対策が規定される以前は多く施工されて おり、ナットタイプの多くは旧タイプアンカーといえる。一方で、くさびタイプのアンカ ーは円柱型のアンカーヘッドとテンドン部分として複数のより線で構成される。また、よ り線を締め付けるためにくさびを使用することから、くさびタイプのアンカーと称される。 くさびタイプは防食対策がなされる以前からも用いられてきたが、防食対策が規定されて 以降、多く施工されている。本実験で用いたナットタイプのアンカーヘッドはそれぞれの アンカーヘッドに対する鋼棒の規格の直径から、許容荷重の小さいものから順に D-23、 D-32 および D-36 と称す。一方で、くさびタイプのアンカーは使用するより線の規格およ びその本数から、許容荷重の小さいものから順に E5-4、E5-7 および E5-12 と称す。

載荷方法は図 3-2 に示すようにテンドンの一端をアンカーヘッドと支圧板によって固定 し、治具を介した他端から油圧ジャッキによって緊張力を与える。その際、図 3-3 に示す ように、無載荷から最大荷重を与える載荷過程①、最大荷重から無載荷までの除荷過程お よび除荷後再び最大荷重まで荷重を与える載荷過程②の三つの過程において超音波計測を 行い、計測結果の再現性を検討する。本実験では治具の安定的な固定のために 20 kN まで の除荷とし、この 20 kN を無載荷とみなす。それぞれのアンカーヘッドでの載荷間隔は表 3-1 に示す通りである。

超音波の計測は、図 3-4 に示した可搬型超音波探傷器 Pocket UT(NDT Automation 製)を使用し、サンプリング周波数は 50 MHz で計測時間は反射法で 650 µsec、透過法で 120 µsec の記録を行った。また、超音波を励起させる探触子については、励起周波数が 1 MHz、5 MHz および 10 MHz となる図 3-5 に示す 3 つの公称周波数の異なる超音波センサを使用し、本

緊張力の推定に有効な周波数の検討を行えるようにした。センサと試験体の接触媒質としては、グリセリン、グリセリンペースト、マシン油および水と様々あるが、本研究ではセンサと試験体の接触による影響を小さくするために、中でも最も超音波伝達効率のよいとされるグリセリンペーストの超音波探傷用接触媒質ソニコート(株式会社サーンテック製)を使用する(図 3-6)。

図 3-7 に透過法および反射法の計測点を示す。透過法はナットタイプを対象に計測を行 うが、鋼棒の山が接する面を計測の対象とした。その際、計測点は、鋼棒とアンカーヘッ ドが最も強く接触する場所を特定するためにセンサを前後させ計測される振幅が最大とな る場所で計測を行った。反射法については、ナットタイプおよびくさびタイプの両アンカ ーを対象に行うが、アンカーヘッドと支圧板にかかる応力の場所依存を検討できるように、 それぞれ2点ずつ計測点を設定した。



(a) アンカーヘッドの寸法と最大許容荷重



(b) 使用したアンカーヘッドおよび支圧板図 3-1 対象としたアンカーヘッド



(a) 載荷方法の概念



(b) 載荷装置図 3-2 載荷方法



図 3-3 載荷過程

種類	最大荷重	載荷間隔
D-23	300 kN	載荷過程①および除荷過程 : 50 kN 載荷過程② : 100 kN
D-32	500 kN	載荷過程①(0~300 kN): 50 kN 載荷過程①(300~500 kN): 100 kN 除荷過程および載荷過程②: 100 kN
D-36	700 kN	載荷過程①(0~300 kN): 50 kN 載荷過程①(300~700 kN): 100 kN 除荷過程および載荷過程②: 100 kN
E5-4	500 kN	載荷過程①(0~300 kN): 50 kN 載荷過程①(300~500 kN): 100 kN 除荷過程および載荷過程②: 100 kN
E5-7	800 kN	100 kN
E5-12	1300 kN	載荷過程①および除荷過程 : 150 kN 載荷過程② : 300 kN

表 3-1 アンカーヘッドごとの載荷間隔



(a) Pocket UT



(b) 計測の様子

図 3-4 超音波探傷器



図 3-5 超音波探触子



図 3-6 接触媒質



図 3-7 計測点

3.2 超音波パラメータと緊張力(ナットタイプ)

本実験の目的は超音波法の実アンカーへの適用性検討である。すなわち、各種の超音波 パラメータと緊張力の相関性の検討である。そこで、本節では、ナットタイプのアンカー に対する、超音波パラメータと緊張力の関係を示し、その緊張力の推定手法としての適用 性を反射法、透過法の両手法で検討する。

3.2.1 反射法

本項では、反射法の検討を行う。既往の研究[23][24]により、鋼材の接触程度と接触面に かかる荷重によって反射波の振幅に相関があることが確認されている。そこで、本研究に おいても振幅に基づき検討を進める。

- (a) アンカーヘッドと支圧板の接触面からの反射波
 - i) 反射特性変動メカニズム

図 3-8 に実験で得られた反射法の波形の一例として D-36 を対象とした 5 MHz のセンサ で記録した信号波形を最大荷重 700 kN と 20 kN を比較し示す。アンカーヘッドから支圧板 へ向けて超音波を送信した場合、アンカーヘッドと支圧板の接触面において反射透過現象 が起きる。D-36の場合、高さ95 mm、超音波の伝播速度5,920 m/secよりセンサで励起さ れた超音波がアンカーヘッドと支圧板の接触面で反射し、再びセンサに返って受信される までの時間は、32.1 µsec となる。したがって図に示すように、繰り返し間隔がおよそ32.1 µsec である波形はアンカーヘッド頭頂部とアンカーヘッド底面と支圧板の接触面との間で 繰り返される多重反射波であると推察される。多重反射波に着目し、最大荷重と無載荷を 比較すると多重反射波の振幅は緊張力の増加にともない減少していることが確認される。 同様の傾向が他のアンカー、周波数においても確認することができる。センサから送信さ れた超音波はアンカーヘッドと支圧板の接触面で反射する波と透過する波に分かれる。反 射波は境界面の条件に依存して得られるが、荷重が増加することでアンカーヘッドと支圧 板の接触状態が完全接触へと近づくことで、支圧板へ透過する波のエネルギーが増加し、 結果として反射してセンサに受信される波のエネルギーが減少し、振幅が緊張力の増加に ともない減少したものと考えられる。



図 3-8 多重反射波の波形 (D-36 の 5 MHz センサの場合)

具体的に、緊張力の増加にともない反射特性が変化するメカニズムを述べる。図 3-9 に 示すように、一見滑らかに見えるアンカーヘッド底面と支圧板上面の接触面には微視的に は凹凸が存在し、固体同士が直接触れ合っている真実接触部分と空隙などが介在する非接 触部分が存在する[29]。また、第2章で述べたように、異なる媒質Iと媒質IIの境界面を 垂直に入射する超音波の反射率は媒質の固有音響インピーダンスを用いて式(2.17)となる。 このとき媒質IIが空気のときは空気の固有インピーダンスが非常に小さいことから透過率 は0となる。また媒質IとIIが同様の物質であれば反射率は理論上0となる。以上をアン カーヘッドと支圧板の場合にあてはめる。アンカーヘッドと支圧板の接触面は上述のよう に真実接触部分と非接触部分に分けられ、それぞれ反射率が0と1となる。このとき、表面科学の分野では真実接触面積は式(3.1)にしたがい垂直荷重の増加で拡大することが知られる。ここでArは真実接触面積、Wは垂直荷重およびPmは塑性流動圧力なる媒質ごとの物性値であることから、真実接触面積は垂直荷重と線形関係となる。アンカーヘッドと支 圧板の接触面においても、緊張力の増加にともない真実接触面積が増加し、アンカーヘッドと支 ドと支圧板の接触面全体としては反射率が減少すると考えられる。そのため、荷重増加に より受信される多重反射波の振幅が減少したと考えられる。



図 3-9 接触の模式図

$$Ar = W / P_m \tag{3.1}$$

ii) 信号波形の処理

緊張力の増加にともなう多重反射波の振幅の減少を定量化するために、既往の研究 [23][24]では記録波形のエネルギーを算出している。振幅の減少を評価するにあたり、得ら れる反射波の最大振幅値を比較することが第一に考えられるが、荷重の増加にともなう接 触面の反射特性の変化は微小であり、最大振幅値のみの検討では緊張力の増加にともなう 変化が微小なため緊張力の推定に有効でないという知見が得られているためである。本研 究においても、反射波の最大振幅値と緊張力の関係を図 3-10 に示すが、緊張力の増加にと もなう変化は微小であり緊張力の増加にともなう反射特性の変化が微小であることが示唆 される。そこで、本研究においても既往の研究にしたがい、式(2.20)に示すエネルギーによ る評価を行う。本研究ではまず、収録波形全体(0 µsec~650 µsec 間)のエネルギーを算出し た。しかしながら、図 3-11 には一例として D-36 の 5 MHz の全体のエネルギーを算出し た。しかしながら、図 3-11 には一例として D-36 の 5 MHz の全体のエネルギーと緊張力の 関係を示しているが、エネルギーと緊張力には測定に有意な関係が得られない。これは、 図 3-8 に示したように収録波形全体にはアンカーヘッドと支圧板の接触面からの反射波の 他に、ノイズや他方向からの反射波が多数含まれているためと考えられる。そこで、それ

らの影響を除去するために、接触境界面からの多重反射波のみに着目する。具体的には、 多重反射波のみを目視で判断し、抽出することで、それぞれの繰り返しの反射波群(第1 反射波群、第2反射波群、第3反射波群)ごとにエネルギーを算出することとした。図3-12 に一例として D-36 の 5 MHz センサの場合の各反射波群のエネルギーと緊張力の関係をそ れぞれ示す。図のように、多重反射波のみに着目することで緊張力の増加にともないエネ ルギーが特徴的に減少する傾向を確認することができる。しかしながら、図 3-12 の左図の ように載荷過程①と他の除荷・載荷②過程においては顕著な差異が確認される。一方で、 右図に示したように除荷過程および載荷過程②については顕著な差異は確認されない。載 荷過程①において差異が大きいのは初期の載荷の段階で塑性変形が生じ、その影響を強く 受けその後の過程と異なるものと考えられる。本実験の最大試験荷重はアンカーヘッドの 規格をもとに決定したため、アンカーヘッド自体が塑性変形しているとは考えがたいが、 トライボロジーに則してアンカーヘッドと支圧板の接触状態を考えると、微視的には微小 な凹凸の接触部分が塑性変形することが知られる[30]。そのため、本実験においてもアン カーヘッドと支圧板の接触面において微視的な塑性変形が生じ、載荷過程①とその他の過 程では顕著な差異が生じたものと考えられる。これらの差異が生じることは緊張力の推定 においてそれぞれの過程で異なる参照曲線を用いなければならないことを示唆している。 しかし、本研究の目的は施工段階における初期導入力の推定ではなく、最大荷重導入後(施 工後)の緊張力の変動を推定することである。つまり、着目すべきは図 3-12 の右図に示す 最大荷重を与えた後の除荷過程および載荷過程②である。これらに着目すると顕著な差異 はなく、ユニークな参照曲線が得られるものと思われる。



図 3-10 最大振幅値と緊張力の関係(D-36/5 MHz センサ/計測点①)



図 3-11 全体のエネルギーと緊張力の関係 (D-36/5 MHz センサ/計測点①)







(b) 第2反射波群のエネルギーと緊張力の関係



(c) 第3反射波群のエネルギーと緊張力の関係 図 3-12 各反射波群のエネルギーと緊張力の関係(D-36/5 MHz センサ/計測点①)
図 3-12 の右図に示すように、第1 反射波群、第2 反射波群および第3 反射波群を比較す ると、第1 反射波群では緊張力の増加にともなうエネルギーに有意な変化を確認すること はできないが、第2、第3 反射波と反射を繰り返すことで緊張力の増加にともなうエネル ギーの減少する傾向は顕著になることが確認できる。これは緊張力の増加にともなうアン カーヘッドと支圧板の接触面の反射特性の変化が微小であるため、第1 反射波、つまり一 回の繰り返し反射のみでは有意な変化を確認することができないものと推察される。一方 で、第2、第3 反射波群と反射回数が増加することで、接触面の反射特性の変化が累乗的 反射特性に影響し、特徴的な変化が確認できると考えられる。本研究では、緊張力の増加 にともない顕著にエネルギーの減少傾向が確認できた第3 反射波のエネルギーに着目して、 その緊張力の推定手法としての有用性について考察を加える。

iii) 結果および考察

図 3-13 にナットタイプの規格(D-36、D-32、D-23)ごとに第3 反射波のエネルギーと緊張 力の関係を列に各計測点(場所①、②およびその平均)、行に各周波数(1 MHz、5 MHz、10 MHz)とした一覧を示す。図に示すようにどの周波数、形状および計測点においても概ね緊 張力の増加にともない第3 反射波のエネルギーの減少が得られる。しかしながら、300 kN 以上の荷重を与えた D-32 および D-36 において、300 kN を越える荷重域ではエネルギーの 大きな変化はなく、収束している。これ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反射率が小さいため反射波のエネルギーが減少し、その結 果 0 V²に収束しつつあるためと考えられる。よって本パラメータが適用できる最大荷重が 存在し、本実験では 300 kN 付近であると推察される。

また、概ね各場合において除荷過程と載荷過程②に顕著な差異はないことからヒステリ シスの影響は小さく、実務に適した手法であるといえる。正常なアンカーは施工時に設計 荷重を導入後、内部の鋼材の経年劣化や地盤内部のクリープ現象とともに緊張力が減少す る。一方で、緊張力が減少しアンカーの性能が弱まり更に地盤に変状が発生すると土圧な どの影響を受けアンカーの残存緊張力は増加に転ずる過緊張状態となることがある。この ように実際のアンカーは設計荷重導入後に緊張力が減少するのみならず増加に転ずること がある。しかしながら、顕著な地盤の変状が地表面に現れない限り、アンカーの緊張力が 増加・減少のどちらの過程にあるかの判断は困難である。そのため、ヒステリシスの影響 が小さなパラメータによって緊張力を推定することが可能となれば、継続的なモニタリン グを行うことで、アンカーの残存緊張力が増加あるいか減少しているかの判断が可能とな ると考えられ、より実務に有効なパラメータであるといえる。

各アンカーで緊張力の増加にともなうエネルギーの減少する傾向は確認することができ たが、そのエネルギーの値がとり得る範囲は規格(形状)ごとに異なる。これは、アンカー ヘッドの寸法が異なることで、多重反射にあたっての伝播距離が異なるために伝播距離に よる減衰の影響を受けたためと考えられる。また、アンカーヘッドが支圧板へ接触する面積もアンカーヘッドによって異なるため、同様の緊張力を与えたとしても接触面の応力が 異なり反射特性が異なると考えられる。そのため、本パラメータをもとに緊張力を推定す るには、アンカーヘッドの規格ごとに参照曲線を得る必要がある。

また、同じアンカーヘッドの結果でも計測点によってエネルギーの値が異なる場合があ ることも確認される(図 3-13、計測点ごとの図を参照)。これは、同一のアンカーヘッドに おいてもアンカーヘッドと支圧板の接触面上の応力は均一ではなく場所によって異なるた めと考えられる。そこで、本パラメータを検討する際には、複数の計測点を設定し、その 平均値を用いることでアンカーヘッド支圧板の接触面に生じる応力を総合的に検討する必 要があるといえる。

本実験では、緊張力の推定に有効な周波数を検討できるように、1、5 および 10 MHz の センサを用いて行ったが、概ねすべての周波数で緊張力の増加にともないエネルギーが減 少する特徴的な傾向を確認することができた。よって周波数が 1-10 MHz の範囲では周波 数による影響は小さいと考えられる。



(a) D-36

図 3-13 ナットタイプの第3反射波のエネルギーと緊張力の関係



(b) D-32





図 3-13 ナットタイプの第3反射波のエネルギーと緊張力の関係

(b) 支圧板底面からの反射波

i) 支圧板底面からの反射波

上述のようにアンカーヘッドと支圧板の接触面からの反射波については第3反射波のエ ネルギーに着目することで緊張力との関係に有意性が確認された。ここで、改めて反射法 で得られた波形を検討する。図 3-14 に図 3-8 に示した波形の荷重の順序を入れ替えたもの を示す。前項では支圧板と接触面における多重反射波のみに着目し検討した。しかし、図 に示すように他方向からの反射波と思われる検討の対象外とした部分において、緊張力の 増加にともなう振幅の明らかな変化が確認される。これらの波はその到達時間から、アン カーヘッドと支圧板の接触面で支圧板へと透過し、支圧板の底面から反射した波であると 推察される。ここで、支圧板底面からの反射波の振幅は緊張力の増加にともない顕著に変 化しているため、先述のようなエネルギーでの評価でなく、最大振幅値によって緊張力に ともなう振幅の変化を評価する。図 3-15 に図 3-13 と同様に各形状、周波数および計測個 所における支圧板底面からの反射波と緊張力の関係の一覧を示す。図には上述の第3反射 波のエネルギーと同様に載荷過程①には他の除荷・載荷過程②と差異が確認されたため、 除荷・載荷過程②の結果のみを示す。図に示すように緊張力の増加にともなう支圧板底面 からの反射波の最大振幅値の増加する傾向が確認される。



図 3-14 波形データ



(a) D-36





図 3-15 支圧板底面からの反射波の最大振幅値と緊張力の関係



(c) D-23

図 3-15 支圧板底面からの反射波の最大振幅値と緊張力の関係

ii) メカニズム

上述のように緊張力の増加にともなう支圧板底面からの反射波の最大振幅値が増加する 傾向を確認した。この傾向はアンカーヘッドと支圧板の接触面からの反射波とは異なる傾 向を示している。図 3-16 に支圧板底面からの反射波の振幅が緊張力の増加にともない増加 に転ずるメカニズムの概念図を示す。図に示すように、緊張力の増加にともないアンカー ヘッドと支圧板の鋼材同士の接触が強まる。同一媒質の接触の場合、接触面にかかる荷重 が増加すると、先述したように真実接触面積が変化することで反射率は小さくなる。その ため、接触面からの反射波は緊張力の増加にともない減少する。一方で、反射率が小さく なることは透過率が大きくなることを示し、そのためアンカーヘッドと支圧板の接触面で 透過する波は緊張力の増加にともない増加する。また、支圧板はコンクリート板で固定さ れており、一度、支圧板へと透過した波は支圧板底面でコンクリートという音響インピー ダンスの異なる媒質との接触面で強く反射しセンサに受信される。そのため、支圧板底面 からの反射波は緊張力の増加にともない増加すると考えられる。



図 3-16 反射波の変化するメカニズム

本研究では上述のメカニズムでアンカーヘッドと支圧板の接触面からの反射波および支 圧板底面からの反射波の振幅が変化することを数値解析シミュレーションによって検証し た。数値解析シミュレーションは弾性波伝播シミュレーションソフト Wave2000 (サイバー ロジック社製)を用いて算出した。本ソフトは二次元の弾性波動方程式について近似解を 算出するものである。そのアルゴリズムは有限差分法を基本とし、粘性損失を含め、式(3.2) に示す弾性方程式を用いている。シミュレーションは D-36 を模擬し、アンカーヘッドの 高さ 95 mm および支圧板高さ 40 mm のモデルとした。シミュレーションにあたり、接触 状態をモデル化する必要があるが、既往の研究に基づき、図 3-17 に示すように接触面を真 実接触部分としての反射率 0 の部分と空隙としての反射率 1 の部分に分割する。その反射 率 0 と 1 の部分を境界条件として交互に均等に配置し、反射率 0 の部分の割合を徐々に増 加させることで緊張力の増加にともなう真実接触部分の増加をモデル化した。つまりシミ ュレーションに際して、接触面全体 A に占める真実接触部分 Ar: real contact area の割合 Ar/A を変化させることとなり、本研究では 10-50 %まで Ar/A を変化させた。シミュレー ションには媒質の物性値として密度およびラメ定数を入力する必要がある。採用したアン カーヘッドと支圧板部分の鋼材およびコンクリー受圧板部分の物性値を表 3-2 に示す。

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

$$\rho : 単位体積重量 \lambda, \mu : ラメ定数 \eta : せん断粘性係数$$
(3.2)

 φ :体積粘性係数 ∇ :勾配演算子 ∇ ●:発散演算子 t:時間



図 3-17 数値解析モデル

表 3-2 物性值

	入力値	
	コンクリート	鋼材
密度	2300 kg/m ³	7690 kg/m 3
λ	37431 Mpa	110200 Mpa
μ	11949 MPa	78750 Mpa

図 3-18 に Ar/A を変化させたときのシミュレーション波形を示す。図 3-19(a)に支圧板の 接触面および支圧板底面からの反射波の最大振幅値と Ar/A の関係を示す。また図 3-19(b) に Ar/A が 10%の時の最大振幅値を 1 として正規化したものを示す。図に示すように Ar/A を増加させると、支圧板上面との接触面からの反射波は減少し、反対に支圧板底面からの 反射波は増加する傾向が確認される。これは実験結果と整合しており、振幅変化のモデル 化の妥当性が確認される。つまり支圧板との接触面および支圧板底面からの反射波の振幅 はアンカーヘッドと支圧板の接触面の反射特性が変化することで有意な変化が生じると考 えられる。また、図 3-19(b)のように接触面からの反射波に比べて支圧板底面からの反射波 の振幅の変化率が大きいことが確認される。つまり支圧板底面からの反射波は接触面の反 射特性の変化により敏感なパラメータであることが確認される。実験結果では、図 3-10 に 示す接触面からの反射波の最大振幅値は変化が微小であり、一方で図 3-15 に示したように 支圧板底面からの反射波の最大振幅値の変化は顕著な傾向が確認される。上述の支圧板底 面からの反射波の振幅の変化を評価するには最大振幅値を用い、接触面からの反射波の振 幅を評価するにはエネルギーによる評価を行ったが、このことの妥当性がシミュレーショ ン結果からも確認される。







図 3-19 Ar/A と最大振幅値の関係

iii) 考察

上述のように支圧板底面からの反射波の最大振幅値と緊張力に有意な傾向が得られた。 ここでは緊張力の推定に有効なパラメータであるか考察を加える。図 3-15 に示したように 各アンカーヘッドの形状、周波数および計測点において緊張力の増加にともなう支圧板底 面からの反射波の最大振幅値の増加する傾向が確認される。これらの相関を用いることで 緊張力を間接的に推定できるものと考えられる。また、ヒステリシス、計測点およびアン カーヘッドの形状の差異による影響は概ね先に述べた第3反射波のエネルギーと同様の結 果であることが確認される。つまり、除荷過程および載荷過程②についてはヒステリシス の影響が小さい。また、計測点によって傾向が同様ではあるが、最大振幅値は異なってお り、接触面の応力が場所によって異なるためと考えられる。そのため、原位置では複数の 計測点を設定し平均値を検討する必要がある。また、アンカーヘッドの形状の差異によっ ても、傾向は同様であるが最大振幅値の値は異なる。そのため、本パラメータでは、アン カーヘッドごとに参照曲線を作成する必要がある。

以上のように着目するパラメータが異なるだけで想定されるメカニズムは同様であるた めに第3反射波のエネルギーと同様の考察を加えることができる。しかし、ここで注目す べきは支圧板底面からの反射波の最大振幅値の300 kNを越える高荷重域における結果で ある。図3-13に示した第3反射波のエネルギーではD-36やD-32のように300 kNを越え る緊張力を与えた際、第3反射波のエネルギーは収束し、有意な変化が得られなかった。 一方で、図3-15に示す支圧板底面からの反射波の最大振幅値は300 kNを越える高荷重域 においても荷重増加にともない最大振幅値が増加する傾向が確認される。つまり、300 kN を越える高荷重域でも完全接触に至ることなく、接触面の反射特性は変化していると推察 される。したがって、支圧板底面からの反射波の最大振幅値は高荷重域においても反射特 性の変化を反映できるパラメータであるといえ、緊張力の推定に有効なパラメータである と考えられる。

3.2.2 透過法

前節では反射法の緊張力推定手法としての適用性を確認した。本節では透過法の検討を 行う。既往の研究では振幅および周波数による検討がなされており、本研究においても振 幅および周波数に基づく検討を行う。

(a) 累積振幅值[31]

i) 波形処理

図 3-20 に透過法で得られた波形の一例として D-23 の 5 MHz の載荷過程①における 300 kN の結果を示す。透過法の波形には、図 3-21 に示すようにナットから鋼棒へ透過し対面 のセンサに最短経路を伝播して受信される波の他に鋼棒中を伝播しない様々な方向からの 回折波および反射波が含まれている。そのため、図 3-20 に示したように最短経路を通る波 と鋼棒中を伝播しない他の反射波を目視で区別することが困難である。一方で透過法では 緊張力の増加にともないナットと鋼棒の接触が強まり透過特性が変化することが想定され る。つまり、透過法では鋼棒へと透過した最短経路を透過した波のみを検討する必要があ る。そこで、本研究では既往の研究にしたがい得られた波形の初動部分に着目し、累積振 幅値を検討することで最短経路を透過した有意な波形と他の波形の区別を行った。図 3-22

に初動部分の波形を、図 3-23 に時間と累積振幅値の関係を示す。D-23 の場合、その対辺 距離は 46 mm であり鋼棒とアンカーヘッドが完全に接触しているとした場合の最短到達 時間は約 7.8 µsec と算出される。図 3-20 に示す波形は約 8 µsec に到達しており、初動部分 の波形は鋼棒を透過した波であることが確認される。また、同図より約 8 µsec まではノイ ズ、約 8-9 µsec 間は有意な超音波波形が確認でき、9 µsec 以降は徐々に振幅が小さくなる。 すなわち、ノイズ、有意な波形の立ち上がりおよび減衰という 3 つの特徴的な変化が上記 の時間領域で生じている。ここで図 3-23 に累積振幅値を示す。累積振幅値に着目すると上 述の 3 段階の過程が 3 つの特徴的な傾きとして得られ、明確に 3 過程が分類可能となる。 つまりアンカーヘッドと鋼棒部分の接触部分の透過特性の影響を受けた有意な波形を識別 することができる。本研究では上記の 2 つ目の過程にあたる有意波形の立ち上がり部に着 目し、緊張力の変動にともなう累積振幅値の変化について検討する。



図 3-20 波形

図 3-21 超音波の経路



図 3-22 初動部の波形



図 3-23 時間と累積振幅値

ii) 結果および考察

図 3-24 に各アンカーヘッドおよび周波数における累積振幅値と緊張力の関係を示す。ただし、D-36 の 10 MHz の結果については距離減衰が著しく有意な透過波が得られなかったため解析の対象外とした。図に示したように載荷過程①については概ねそれぞれの場合で緊張力の増加にともない累積振幅値が増加する傾向が確認される。これは、緊張力の増加によってアンカーヘッドと鋼棒の接触が強まり接触部分の透過率が増加したためと考えられる。具体的なメカニズムは先に示したように、接触面の真実接触部分と非接触部分が変化することで説明ができる。緊張力が増加することでアンカーヘッドと鋼棒の接触部分に作用する荷重が増加し、真実接触面すなわち超音波を透過する部分が増加する。その結果透過率が大きくなり、得られる累積振幅値が増加したものと推察される。

一方で、除荷過程、載荷過程②は載荷過程①と大きく傾向が異なることが確認される。 また、除荷過程および載荷過程②に着目すると、両過程には概ね顕著な差異がないことが 確認される。先に述べた反射法と同様に透過法もアンカーヘッドと鋼棒の僅かな接触状態 の変化を利用するものである。しかし、接触面では微視的な塑性変形が生じ、その影響を 受け載荷一回目と他の過程では傾向が異なると推察される。既往の研究[23][24]では載荷過 程および除荷過程のみの計測にとどまっており、載荷および除荷過程の差異に関しては、 ヒステリシスの影響であると結論付けられていた。しかしながら本実験結果をふまえて考 えるとヒステリシスの影響ではなく微視的な塑性変形によるものと結論付けることができ る。

除荷および載荷過程②に着目すると載荷①に比べて変化は微小ながら緊張力の増加にと もなう累積振幅値の増加する傾向が確認される。しかしながら、一部では単調に増加する ことなく傾向が見受けられない場合がある。透過法は反射法のようにアンカーヘッドと支 圧板が面せず、アンカーヘッドと鋼棒がねじ山の点で接触しているために接触状態が一様 でなく複雑である。また、載荷①と比べて、除荷および載荷②過程では透過特性の変化は 微小である。そのため得られる透過波はセンサの設置位置の僅かな差異によって影響を受 け、有意な傾向が一部では確認されなかったと考えられる。本実験では得られる波形の振 幅が最大となる点を計測位置として定めたが、透過法を適用するにあたり、今後はセンサ の設置位置について更なる検討が必要である。



図 3-24 累積振幅値と緊張力

(b) 卓越周波数

i) 波形処理

先述のように振幅に基づくパラメータとして初動部分の累積振幅値に着目し緊張力の増加にともない累積振幅値の増加する傾向が確認された。しかし、センサの設置場所の僅かな違いの影響が大きいことが確認される。ここでは振幅に加えて、透過特性の変化が周波数に与える影響を考え周波数にもとづくパラメータの検討を行う。具体的には第2章において述べた離散フーリエ変換による卓越周波数の最大値および卓越周波数のPartial Powerを検討する。

図 3-20 に示したように透過法で得られる波形はアンカーヘッドと鋼棒の接触面を透過 した波形以外にも他方向からの回折および反射波が含まれる。そこで、周波数を検討する 際も累積振幅値と同様に初動部分に着目することで他方向からの回折波の影響を軽減する。 また、離散フーリエ変換を適用するにあたり、データ数 N は 2 のべき乗となることが条件 となる。そこで本研究ではノイズ部分から初動部分にあたる、5 μsec からの 20.5 μsec 間の 1024 個の振幅データに離散フーリエ変換を適用し、周波数特性を検討する。

図 3-25 に一例として D-36 の載荷過程における離散フーリエ変換によるスペクトル振幅 と周波数の関係を示す。図に示すように 1 MHz および 5 MHz のセンサを使用した場合は 1 MHz 付近(0.5-2.0 MHz)および 5 MHz 付近(4.0-6.0 MHz)の周波数が卓越していることが確認 される。一方で、10 MHz のセンサを使用した場合では 10 MHz の周波数が卓越するのでな く 3 MHz 付近(0.5-5 MHz)の周波数が卓越している。これは 10 MHz が他の周波数に比べて 高周波であり減衰の影響を受けやすいためと考えられる。ここで、卓越周波数帯に着目し、 その最大値および Partial Power と緊張力との相関を検討する。







図 3-25 スペクトル振幅と周波数

ii) 結果および考察

図 3-26 に D-36 の場合におけるスペクトル振幅の最大値および Partial Power と緊張力の 関係を示す。図に示すように卓越周波数のスペクトルの最大値と緊張力には有意な傾向が 得られない。また、Partial Power を用いることでノイズの影響やセンサの接触状況の影響 を軽減させることが期待されたが、Partial Power による検討においても有意な傾向が得ら れない。ここには D-36 の結果を示したが、他のアンカーヘッドの場合でも同様に周波数 に基づくパラメータと緊張力に相関を確認するに至らなかった。そのため、透過法を適用 する際には、周波数による検討は困難であり、振幅に基づくパラメータを検討する必要が あると考えられる。



図 3-26 周波数パラメータと緊張力

3.3 超音波パラメータと緊張力(くさびタイプ)

本節ではくさびタイプのアンカーに対する超音波法の適用性を検討する。先述のように くさびタイプは透過法の適用が困難であるため、本研究では反射法を適用する。本節では 超音波パラメータと緊張力の関係を示し、その緊張力の推定手法としての適用性を検討す る。

3.3.1 アンカーヘッドと支圧板の接触面からの反射波

前節のナットタイプでは反射法のパラメータとしてはアンカーヘッドの支圧板の接触面 からの反射波および支圧板底面からの反射波を検討した。本項ではナットタイプと同様に、 まず接触面からの多重反射のうち、第3反射波のエネルギーに着目し検討する。

図 3-27 に図 3-13 と同様に各くさびタイプのアンカーヘッド、周波数および計測点における第3反射波のエネルギーと緊張力の関係の一覧を示す。E5-7 および E5-12 に着目する

と先に示したナットタイプと同様に緊張力の増加にともない第3反射波のエネルギーが減 少する傾向が確認される。さらに、除荷過程および載荷過程②においては顕著な差異はな くヒステリシスの影響が小さいことも確認される。また、アンカーヘッドの形状や計測点 による差異はナットタイプと同様の結果であり、本パラメータで参照曲線を作成する際に はアンカーヘッドの規格ごとに作成しなければならないことや複数の計測点とそれらの平 均値を用いることが重要であることが確認される。また、ナットタイプでは 300 kN を越え る荷重域ではエネルギーの変化が収束していたが、くさびタイプでは 300 kN を越える荷重 域でもエネルギーの減少する傾向を確認することができる点である。一見すると、くさび タイプでは最大で1300 kN の緊張力を与えることで反射率が小さくなりナットタイプ同様 にエネルギーが収束してしまうと考えられる。しかし、ナットタイプではアンカーヘッド と支圧板の接触面積が非常に小さいため緊張力は小さいが、接触面にかかる応力は大きい。 一方でくさびタイプはアンカーヘッドと支圧板の接触面積が大きいため、接触面にかかる 応力は小さい。そのため、結果としてくさびタイプの方が緊張力は大きいが応力は小さい ため、反射率も小さくエネルギーが収束することなく変化したものと考えられる。実際に はナットタイプの D-36 のアンカーヘッド底面の面積は約 2,475 mm² であり、くさびタイプ の E5-12 の底面の面積は約 11,300 mm²と算出される。それぞれ最大荷重で 700 kN および 1300 kN を与えているが、接触面にかかる応力が均一であると仮定した場合の圧力は 0.242 kN/mm²と 0.115 kN/mm²と算出され、くさびタイプのアンカーヘッドの方が接触面にかか る応力は小さいことがわかる。また、図 3-28 の左図にくさびタイプの E5-12 の 5MHz で計 測した場合の最大荷重 1300 kN 時の波形を、右図にナットタイプの D-36 の 5 MHz で計測 した場合の最大荷重 700 kN 時の波形を示す。当然、一回の反射にかかる距離が異なるため、 距離減衰の影響は異なるが、ナットタイプの波形と比較してくさびタイプの波形では繰り 返しの多重反射波の振幅が大きく減衰していないことが確認される。つまり、このことか らくさびタイプの方が緊張力は大きいものの反射率は大きくなることが確認できる。

一方で、E5-4の結果に着目すると、各周波数ともに有意な変化傾向が確認されない。E5-4 では最大 500 kN の荷重を与えているが、先に述べたようにくさびタイプでは接触面積が大 きく応力の変化は小さいと考えられる。そのため、第3反射波のエネルギーで有意な傾向 が得られるほど反射率が変化しなかったためと考えられる。

以上のようにくさびタイプではナットタイプとは異なり高緊張力域においても本パラメ ータの有効性を確認した。しかしながら、低荷重域では顕著な変化を確認するに至らなか った。



(a) E5-4





図 3-27 くさびタイプの第3反射波のエネルギーと緊張力の関係



(c) E5-12

図 3-27 くさびタイプの第3反射波のエネルギーと緊張力の関係



図 3-28 波形の比較

3.3.2 支圧板底面からの反射波

本項では、ナットタイプと同様にくさびタイプでもアンカーヘッドと支圧板の接触面からの反射波に加えて支圧板底面からの反射波を検討する。図 3-29 に図 3-27 と同様に各アンカーヘッド、周波数および計測点における支圧板底面からの反射波の最大振幅値と緊張力の関係の一覧を示す。くさびタイプの検討にあたり、1 MHz の結果については検出波形の継続時間が長くアンカーヘッドと支圧板接触面からの反射波と支圧板接触面からの反射

波の区別が目視では困難であったため、解析の対象外とした。また、E5-4の10 MHzの波 形に関しても支圧板底面からの反射波の振幅が小さく、ノイズとの区別が目視では困難で あったため、解析の対象外とした。

図に示すようにナットタイプと同様に緊張力の増加にともなう支圧板底面からの反射波 の最大振幅値の増加する傾向が確認される。本傾向をもとにアンカーの残存緊張力の推定 が可能であると考えられる。また、これまでの知見と同様にくさびタイプでもヒステリシ スの影響が小さいことが確認される。また、各アンカーヘッドの形状および計測点による 差異に関しても、これまでの知見と同様の結果となった。つまり、本パラメータで参照曲 線を作成するにはアンカーヘッドの規格ごとに検討し、複数の計測点とその平均値を検討 することが重要となる。

本パラメータで注目すべきは E5-4 の結果である。前述の第3反射波のエネルギーによる 検討では、荷重の小さな E5-4 に関して緊張力の増加にともなう有意な変化傾向が確認され なかった。そのため、くさびタイプの低緊張力域における推定には課題を残した。しかし ながら、本パラメータによる検討では E5-4 においても緊張力の増加にともなう有意な変化 傾向が確認される。これは、前述のシミュレーションによって示したように支圧板底面か らの反射波は反射特性の変化に敏感であるためと考えられる。

つまり、くさびタイプの低荷重域では反射特性の変化は微小であり、第3反射波のエネ ルギーで検討した場合ではそれらの影響を反映した結果を得られない。一方で支圧板底面 からの反射波の最大振幅値は微小な変化にも敏感なために有意な変化傾向が得られたと考 えられる。



(a) E5-4

図 3-29 支圧板底面の反射波の最大振幅値と緊張力





図 3-29 支圧板底面の反射波の最大振幅値と緊張力

3.4 温度変化による影響

前節までの検討では、超音波法の実アンカーへの適用性を検討するため超音波パラメー タと緊張力の相関を検討した。しかし、基礎実験で得られた結果を原位置試験へ適用する には、幾つか課題がある。例えば原位置では、アンカーが屋外に設置されていることから、 水分、アンカーヘッドのさびや温度変化による影響がある。本実験では中でも温度による 影響がアンカーヘッドと支圧板の接触状態に与える影響が大きいと考え、その影響を検討 した。

3.4.1 概要

温度変化による影響はナットタイプ、くさびタイプそれぞれ D-32 および E5-7 を対象に 検討を行う。具体的には図 3-30 に示す実験状況のようにジェットヒーターおよびスポット クーラーによってアンカーヘッドの温度を 15、40、60 度と変化させた。その際アンカーヘ ッドの温度はサーモトレーサーによって、図 3-31 に示すように測定した。また、温度変化 の検討にあたり緊張力は D-32 で 100 kN と 500 kN、E5-7 で 100kN と 700 kN の二段階の緊 張力状態でそれぞれ温度を変化させて測定を行った。計測は D-32 では 1 MHz および 5 MHz のセンサを使用し、反射法の計測を上述のように 2 点で行った。E5-7 も同様に 2 点で計測 し、1 MHz のセンサで計測した。



図 3-30 実験状況



図 3-31 サーモグラフ

3.4.2 結果および考察

図 3-32 に得られた波形の一例として D-36 の 500 kN の 1 MHz のセンサで記録した波形

を示す。図に示すように温度の上昇にともない反射波の振幅が減少する傾向が確認される。 これは、温度変化にともない接触面に熱応力が発生したためと考えられる。熱応力とは、 拘束されている物体に熱変化が加わった際に生じる内力のことである。拘束のない物体の 場合は熱変化が加わると自由膨張あるいは自由収縮する。しかし、物体が拘束されている 場合はこの変形を妨げるように熱応力が発生する。アンカーヘッドにおいてもテンドン部 分にかかる緊張力によって拘束されており熱応力が発生したと考えられる。超音波法で検 討するのは接触面の反射特性の変化であり、反射特性は接触面にかかる応力に依存すると 考えられるため、反射波の振幅に変化がみられたと考えられる。これらの影響が緊張力の 推定に与える影響を検討する。図 3-33 および図 3-34 に D-32 の温度変化の影響を示す。図 には各計測点の平均の結果を示す。図の黒点の散布図は先に述べた緊張力の変化にともな う各超音波パラメータの変化、つまり常温(20度)における緊張力の影響(除荷過程・載荷過 程②)を示している。ただし、黒点の散布図のデータは温度変化を検討した試験体とは別の 試験体で別途計測を行ったものである。そのため、応力の場所依存による影響が異なるこ とが考えられる。図に示すように、温度変化によって第3反射波のエネルギーや支圧板底 面からの反射波の最大振幅値の値は変化していることが確認される。温度による影響は後 に示すくさびタイプと比較して小さいと考えられる。ナットタイプでは接触面積が小さく 緊張力によってあらかじめ大きな応力がかかると考えられる。そのため、温度変化によっ て多少の応力が変化しても、その影響は小さいものと考えられる。しかしながら、緊張力 の変化による影響と比較して温度による振幅の変化による影響は必ずしも無視できるほど 小さいとはいえない。また図 3-35 に E5-7 の温度変化による影響を示す。くさびタイプで は温度変化の影響が緊張力による影響範囲と比較して大きいことが確認できる。これは、 くさびタイプは接触面が大きく緊張力による接触面にかかる応力が小さいため、熱応力の 影響を受けやすいためと考えられる。また、1 MHz の波形では先述の結果同様に支圧板底 面からの反射波の最大振幅値の検討は困難であったため、解析の対象外とした。今後は、5 MHz および 10 MHz での計測によってさらなる検討が必要である。

以上のように緊張力の推定に際して熱応力の影響を考慮する必要性が示唆される。しか し、本実験では、温度変化の実験に使用した試験体と常温下で緊張力の変化を検討した試 験体は異なる。そのため、応力の場所依存による影響が大きく図 3-32 に示す 5 MHz の 100 kN の結果のように常温での緊張力変化を検討した黒点とその他の温度の変化を検討した 点が大きく異なる。つまり、本実験結果は温度の影響に加えて応力の場所依存の影響を受 けた結果であるといえる。今後は、同一の試験体により緊張力の変化と温度の変化をあわ せて検討し、応力の場所依存の影響を小さくし、温度による影響のみ改めて検討をするこ とが必要といえる。

54



図 3-32 各温度における波形



(a) 1 MHz

(b) 5 MHz

図 3-33 D-32 の温度変化と第3 反射波のエネルギー



図 3-34 D-32 の温度変化と支圧板底面からの反射波の最大振幅値



図 3-35 E5-7 の温度変化と第3 反射波のエネルギー

3.5 まとめ

本章で得られた知見を以下にまとめる。

- ナットタイプ
- (a) 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面からの反射波の振幅が減 少する傾向が確認された。これは、緊張力の増加によって接触面の真実接触部分が増 加し反射率が小さくなるために結果として得られる振幅が減少したと考えられる。本 研究では第3反射波のエネルギーに着目することで緊張力との特徴的な相関を得た。 これらの傾向を用いることで緊張力の推定が可能であると考えられる。しかしながら、 300 kN を越える高荷重域ではエネルギーの減少が収束してしまい顕著な変化が確認 されない。そのため本手法の適用できる最大緊張力は基礎実験からは 300 kN 程度で あると推察される。
- (b) 緊張力の増加にともない支圧板底面からの反射波の振幅の増加する傾向が確認される。これは、緊張力の増加によってアンカーヘッドと支圧板の接触面の真実接触面積が増加し、支圧板へと透過する波が増加する。一度、支圧板へと透過した波は支圧板の底面でコンクリート受圧板との接触面で音響インピーダンスの差異に基づいて反射する。そのため、緊張力の増加にともない支圧板底面からの反射波の振幅は増加すると考えられる。本研究では支圧板底面からの反射波の最大振幅値に着目することで緊張力との特徴的な相関を得た。これらの傾向を用いることで緊張力の推定が可能であると考えられる。また、第3反射波のエネルギーでは適用範囲が300 kN 程度であると考えられたが、本パラメータでは300 kN を越える荷重域でも他の荷重同様の傾向を得ることができ緊張力の推定により有効であると言える。
- (c) (a)、(b)より反射法の適用性が確認されるが、反射法の適用にあたっては、計測点によって応力が異なるため、反射特性が異なることから複数の計測点を設けてその平均値を評価することが重要であることがわかった。

- (d) 緊張力の増加にともない透過波の初動部分の振幅の増加する傾向が確認される。これ は、緊張力の増加にともないアンカーヘッドと鋼棒部分の接触部分にかかる応力が増 加することで接触部分の真実接触面積が増加し、透過率が大きくなるためと考えられ る。本研究では透過波の初動部分の累積振幅値に着目することで緊張力との相関を得 た。しかしながら、透過法では初動部分の僅かな接触の変化を検討しており、センサ の設置位置による影響が大きいと考えられる。そのため、今後はセンサの適切な設置 位置を定め更なる検討が必要である。
- (e) 緊張力の増加にともない得られる透過波の周波数に影響があると考え、卓越周波数の 最大値および Partial Power の検討を行ったが、緊張力との相関は得られなかった。そ のため、周波数に基づいたパラメータによる検討は困難であるという知見が得られた。
- (f) 上記の第3反射波のエネルギー、支圧板底面からの反射波および透過波の累積振幅値では各アンカーヘッドにおいて同様の傾向が得られた。しかしながら、アンカーヘッドの差異によって距離による減衰や接触面にかかる応力が異なることから、これらのパラメータによって参照曲線を作成する際には、アンカーヘッドの規格ごとに作成する必要がある。
- くさびタイプ
- (a) ナットタイプと同様に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面からの反射波の振幅が減少する傾向が確認される。これはナットタイプと同様に接触面の真実接触部分と接触面にかかる荷重によって説明される。本研究ではナットタイプと同様に第3反射波のエネルギーに着目し、緊張力との相関を得た。ナットタイプでは300 kN 程度が本パラメータの適用の限界とされた。しかしながら、くさびタイプでは最大で1300 kN の荷重域まで有意な変化傾向を得た。一見して緊張力ではくさびタイプの方が大きな値を与えているが、くさびタイプは接触面がナットタイプより大きいために接触面にかかる応力は小さい。そのため高荷重域でもエネルギーが収束することなく有意な変化が確認されたと考えられる。しかしながら、E5-4 のように与える緊張力が小さい場合では有意な変化が確認されない。これは応力が小さいことは逆を言えば反射特性の変化が小さいことと同意であり、有意な変化傾向が得られるほど反射特性が変化しなかったためと考えられる。
- (b) くさびタイプにおいても、ナットタイプと同様に緊張力の増加にともない支圧板の底面からの反射波の最大振幅値の増加する傾向が確認される。先に述べたナットタイプの場合と同様のメカニズムで変化したものと考えられる。また、本パラメータは接触面からの反射と比較して反射特性の変化に敏感なパラメータであると言え、そのため第3反射波のエネルギーでは有意な変化が得られなかった E5-4 においても有意な変化傾向が得られた。

- (c) くさびタイプについても反射法の適用性が確認されるが、反射法の適用にあたっては、 ナットタイプと同様に計測点によって応力が異なるため、反射特性が異なることから 複数の計測点を設けてその平均値を評価することが重要であることがわかった。
- (d) ナットタイプと同様にくさびタイプでも第3反射波のエネルギーおよび支圧板底面からの反射波の最大振幅値それぞれ各アンカーヘッドで同様の傾向が得られた。しかしながら、やはり距離減衰や接触面にかかる応力の違いから、本パラメータによって参照曲線を作成する際はアンカーヘッドの規格ごとに作成する必要がある。
- 温度変化
- (a) ナットタイプでは温度による影響は比較的小さいことが示唆された。ナットタイプは もともと緊張力によって大きな応力がかかる。これは、熱膨張にともない応力が微小 に変化しても影響は小さいためと考えられる。しかしながら、温度変化による影響が 無視できない場合も確認される。
- (b) 一方で、くさびタイプは温度による影響が大きいことが示唆される。くさびタイプは ナットタイプに比較して緊張力によって接触面にかかる応力は小さい。そのため熱膨 張によって応力が変化すると影響をより受けやすいと考えられる。
- (c) 温度変化の影響を受けてしまうことの対策としては、極端な高温や低温下では試験を 実施しないことが挙げられる。
- (d)本実験では常温下での緊張力を変化させた試験体と温度変化を検討した試験体は異なる。そのため、温度変化の影響に加えて応力も場所依存の影響を受けた結果となり、 十分に温度による影響を検証するに至っていない。そこで、今後は緊張力の変動と合わせて温度による影響を検討できる実験を行い、再度温度による影響を検討する必要がある。

第4章 原位置への適用

第3章では基礎実験によって緊張力と各種の超音波パラメータの相関を検討した。その 結果、ナットタイプの反射法では第3反射波のエネルギーと支圧板底面からの反射波の最 大振幅値、透過法では累積振幅値に緊張力との特徴的な相関を得た。一方で、くさびタイ プでは第3反射波のエネルギーと支圧板底面からの反射波の最大振幅値に特徴的な相関を 得た。これらのパラメータを用いることで緊張力を間接的に推定することが可能であると 考えられる。しかしながら、実際の供用下のアンカーでの超音波計測に際し、緊張力の影 響以外に気温の変化や降雨およびアンカーヘッド自身の劣化やサビなど様々な因子の影響 を受けると考えられる。そのため、室内実験の結果を原位置へ適用するには更なる原位置 に即した検討が必要である。そこで本研究では実際の高速道路沿いの斜面に施工された供 用下のアンカーに対して本超音波法を適用し、原位置における適用性の検討を行った。具 体的には超音波法と合わせてリフトオフ試験が実施され、リフトオフ試験結果をもとに残 存緊張力の校正を行い、超音波パラメータと残存緊張力の相関を検討した。

4.1 ナットタイプへの適用

本節ではナットタイプの原位置での適用性を検討する。基礎実験から、ナットタイプは 反射法および透過法で有用性が確認されており、両手法を実際の供用下のアンカーに適用 する。以下に原位置計測の概要および結果を示し、得られた知見および今後の課題を挙げ る。

4.1.1 計測概要および結果

本研究での原位置計測はリフトオフ試験結果によって残存緊張力の校正を行う必要があ る。ただし、リフトオフ試験は1つののり面に多数施工されたアンカーのうち数本行われ るにとどまる。そのため、原位置で得られるサンプル数は限られる。対象としたアンカー は基礎実験に使用した D-36、D-32、および D-23 に加えて、実験では使用していない D-26 のアンカーの4種のアンカーヘッドである。以下に原位置計測の概要および結果について 計測を実施したのり面ごとに順に示す。

(a) 原位置計測①

図 4-1 に本計測の対象となったのり面を示す。場所は山口県の中国自動車道本線に沿うのり面である。対象となるアンカーヘッドは図 4-2 に示す D-36 のナットタイプのアンカ ーヘッドで計4本のアンカーを対象とした。図に示すようにアンカーヘッドには十分に防 食油が施され比較的にサビの少ないアンカーといえる。また鋼棒にも防食油が施されアン カーヘッドと鋼棒の接触面に防食油が浸透している可能性が考えられる。対象となるそれ ぞれのアンカーにリフトオフ試験が実施され、残存緊張力は小さいものから 208 kN、286 kN、316 kN および 497 kN というリフトオフ試験結果が得られている。本のり面では設計 当時の情報が少なくアンカーの設計アンカー力は不明である。しかしながら、一般にアン カーの設計アンカー力はアンカーヘッドの規格ごとの許容アンカー力の 80 %程度である と知られる[7]。そのため、本のり面では D-36 の許容アンカー力 659 kN より、すると設計 アンカー力は 527 kN 程度であると推察される。よって設計アンカー力を大きく越える残存 緊張力のアンカーは対象にはなく、本のり面では過緊張状態にはないアンカーを対象とし ていると考えられる。

計測方法は概ね基礎実験と同様であり、使用した計測機器、センサおよび接触媒体は同様である。ただし、基礎実験で課題となった透過法の計測点については、図4-3に示すように鋼棒の山の位置に設定した。基礎実験ではアンカーヘッドと鋼棒が最も接触している点を探索するため、得られる振幅が最大となる点を計測点とした。しかし、微小な計測点のずれで得られる透過波が変化することも確認されている。そこで本計測では簡易に計測点が選定でき、なおかつ各アンカーで一様な接触状態が期待される鋼棒の山から山までの間隔をもとにした鋼棒の山となるであろう点を予め求めて計測を行った。



図 4-1 対象のり面



図 4-2 D-36



図 4-3 透過法の計測点

図 4-4 に超音波法による累積振幅値とリフトオフ試験による残存緊張力の関係を示す。 図に示すように残存緊張力の増加にともない累積振幅値の増加する傾向が確認される。つ まり原位置においても基礎実験結果と調和的な結果が得られた。本のり面では計測位置の 選定方法を基礎実験から変更して行ったが、新手法の原位置における適用性が確認された。 ここで、残存緊張力の増加にともない累積振幅値が増加する傾向は確認されたが、300 kN 以上のアンカーでは急激に値が増加する一方で、300 kN 以下のアンカーでは微小な変化で ある。そのため、今後は更なるデータを集積し、低荷重域における適用性は検討する必要 がある。

本計測では基礎実験と同様に透過法に加えて反射法の計測も行った。しかし、反射法で はアンカーヘッドと支圧板の接触面からの反射波およびその後の多重反射が計測されなか った。実際に施工されているナットタイプは、後述するがアンカーヘッドと支圧板が平面 で接触していないものがある。つまり、施工段階でアンカー軸が必ずしものり面に垂直に ならない場合があることから、あらかじめアンカーヘッドの底面および支圧板に曲率が与 えられたものがある。本のり面ではアンカーヘッドと支圧板の接触面が図 4-2 に示すよう に加工されており、目視で確認することが困難であったが、後述の他のアンカーでの結果 より多重反射波が得られないのは接触面に曲率が与えられている可能性が高い。そのため、 原位置においては支圧板上面の形状を考慮しなければならす、必ずしもナットタイプにお いて反射波法が適用可能ではないことが確認された。



図 4-4 原位置計測結果(累積振幅値と残存緊張力)

(b) 原位置計測②

図 4-5 に本計測の対象となった斜面を示す。場所は熊本県の九州自動車道沿いの側道に 面した斜面である。対象となるアンカーヘッドは D-32 であり、図 4-6 に原位置でのアンカ ーヘッドの状況を示す。図に示すように本のり面のアンカーヘッドはコンクリートキャッ プによって処理されており、漏水などの影響によってサビが顕在化していた。そのため、 センサの設置面をサンドペーパーによって平滑にする処理を行った。またアンカーヘッド と支圧板の接触面には曲率が与えられており、先の例と同様に反射法の適用は困難であっ た。本のり面では8本のアンカーを対象にリフトオフ試験が実施され、残存緊張力は小さ いものから順に 70 kN、80 kN、90 kN、100 kN、100 kN、120 kN、120 kN および 160 kN と なった。本のり面の設計アンカー力は257 kN であり、対象となるアンカーは過緊張状態で はないと推察される。計測方法は前述の原位置計測と概ね同様である。基礎実験で使用し ていたセンサは径が大きいため反射法の計測をする際、鋼棒やより線を避けるようにセン サの設置可能な位置は限られた。そこで本現場より図 4-7 に示す直径の小さなセンサを用 い、より広範囲での計測を可能とした。新しいセンサについても周波数はこれまでと同様 に 1 MHz、5 MHz および 10 MHz の 3 つの異なる公称周波数のセンサ(NDT Automation 製) を準備した。また、透過法の計測点については前述の原位置計測と同様に鋼棒の山となる 点で計測を行った。



図 4-5 対象のり面



図 4-6 アンカーヘッドの状況



図 4-7 新センサ(左から直径 o 15 mm、10 mm、10 mm、高さ h17 mm、14 mm、15 mm)

図 4-8 に周波数ごとの累積振幅値と残存緊張力の関係を示す。緊張力の増加にともなう 累積振幅値の増加する傾向が想定されたが、本のり面での計測では残存緊張力と累積振幅 値に有意な変化傾向は得られなかった。本計測の対象となったアンカーの残存緊張力は 200 kN以下の低緊張力のものであった。そのため緊張力によるアンカーヘッドと鋼棒の接 触面の透過特性の変化は微小であると推察される。基礎実験においても変化が微小な荷重 域であり、現場でのサビやセンサの設置位置の微妙な変化が得られる波形に影響し傾向が 得られなかったと考えられる。本計測ではセンサの設置位置は簡易に設置位置を選定でき るように前述の計測と同様に鋼棒の測定した山の位置とした。しかし、本手法では必ずし も得られる振幅が最大となる点、つまりアンカーヘッドと鋼棒が最も接触している点を捉 えているとは限らない。そのため、本計測のように残存緊張力が比較的小さく僅かな接触 の違いを反映さるためには本計測位置の選定は適していないと考えられる。一方で、前述 の原位置計測①のように残存緊張力が大きい場合は透過特性の変化が大きいために本計測 位置の選定方法でも有意な傾向が得られたものと考えられる。以上を考慮に入れると、透 過法の特に低荷重域の場合、計測点の選定方法は得られる波形の初勤部分の振幅が最大と なる点、つまりアンカーヘッドと鋼棒が最も接触している点が適していると考える。そこ で、以後の試験では計測位置の選定方法を最大振幅値位置に変更し、改めて行い透過法の 低荷重域での適用性を検討する。



図 4-8 累積振幅値と残存緊張力

(c) 原位置計測③

図 4-9 および図 4-10 に本計測の対象となったのり面とアンカーヘッドを示す。場所は熊本県の九州自動車道沿いの側道に面した斜面である。対象となるアンカーは D-23 タイプのアンカーヘッド計4本である。本のり面のアンカーの多くは頭部をコンクリートキャップで処理されていたため、防食加工が十分でなくサビが顕在化している。そのため、アンカーヘッドの計測面をサンドペーパーによって平滑になるように処理した。また本計測の対象となったアンカーもアンカーヘッドと支圧板の接触面には曲率が与えられており反射法の計測は適用できなかった。本のり面においても超音波計測は、リフトオフ試験が実施されたアンカーで行い、残存緊張力は小さいものから順に 64 kN、70 kN、104 kN および134 kN が得られている。本のり面では対象となったアンカーごとに設計アンカー力が126.9 kN、126.9 kN、242 kN および235.7 kN と定められているが残存緊張力は設計アンカーカ内であり、過緊張状態のアンカーではないと推察される。計測方法は前述の計測と同様である。ただし、計測点の選定方法については、前述のように低緊張力のアンカーヘッドでは

僅かな接触条件の変化を検討する必要があるために、得られる信号波形の初動部分が最大 振幅値となる点とした。



図 4-9 対象のり面

図 4-10 対象アンカーヘッド

図 4-11 に累積振幅値と残存緊張力の関係を示す。図に示すように1 MHz および5 MHz でデータ数は少ないが緊張力の増加にともなう累積振幅値の増加する傾向が得られた。こ れは、本計測は得られる波形の初動部分の振幅が最大となる点で計測を行ったために、緊 張力によるアンカーヘッドと鋼棒の接触状態の変化を反映できたためと考えられる。しか しながら、10 MHz では累積振幅値と残存緊張力に有意な傾向が確認されない。10 MHz は 他に比べて波長が小さく、より微小な変化を反映できるもの考えられたが、距離減衰の影 響が大きいために有意な信号波形が得られなかったと考えられる。本計測ではデータ数は 4 本と限られるが、計測点を振幅が最大となる点と定めることで、低緊張力下でも透過法 の適用の可能性を確認できた。今後、さらにデータ数を増加させ、透過法および本計測点 の選定方法の妥当性を検討する。



(a) 1 MHz図 4-11 累積振幅値と残存緊張力



図 4-11 累積振幅値と残存緊張力

(d) 原位置計測④

図 4-12 および図 4-13 に本計測の対象のり面とアンカーヘッドを示す。場所は熊本県の 九州自動車道本線に面したのり面である。対象のアンカーヘッドは D-26 タイプのアンカ ーヘッドで図に示すように防食対策のために鋼棒部分に塗装が施されており新タイプのア ンカーであった。アンカーヘッドにもエポキシ樹脂によって防食対策がされていたが、計 測にあたり減衰の影響をできるだけ小さくするように、図に示すように樹脂を除去して計 測を行った。鋼棒部分の塗装についても減衰の影響を受けると考えられるが、除去するこ とが困難であった。しかし、塗装の影響が対象となる各アンカーで同様に受けるとすれば、 同じ条件での試験結果として整理できると考えられる。また本計測の対象となったアンカ ーで反射法の計測を実施したところ接触面からの反射波および以後の多重反射波は計測さ れなかった。図に示すようにアンカーヘッドと支圧板の接触面は加工されており目視で確 認することはできなかったが、本アンカーもこれまでの原位置計測と同様に接触面に曲率 が与えられており、反射法の適用は困難であったと考えられる。よって本計測もこれまで と同様に透過法のみ適用した。対象となるアンカーは計5本であり、それぞれリフトオフ 試験によって残存緊張力が小さいものから順に 40 kN、70 kN、70 kN、100 kN および 100 kN であった。計測方法は前述の原位置計測③と同様であり、計測点の選定方法も同様に得ら れる波形の初動部分が最大振幅値となる点とする。



図 4-12 対象のり面



図 4-13 対象アンカーヘッド

図 4-14 に累積振幅値と残存緊張力の関係を示す。図に示すように1 MHz および5 MHz で緊張力の増加にともなう累積振幅値の増加する傾向が確認される。一方で、10 MHz に ついては有意な傾向は確認されない。これらの傾向は前述の原位置計測③の結果と整合性 のとれた結果である。つまり、計測点の選定方法を初動部分の振幅が最大となる点で計測 を行うことで、緊張力によるアンカーヘッドと鋼棒の接触状態の変化を評価することがで き、緊張力の増加にともない累積振幅値が増加する有意な傾向が得られたと考えられる。



図 4-14 累積振幅値と残存緊張力

4.1.2 ナットタイプまとめ

上述の4カ所での原位置計測によって得られた知見および今後の課題を以下に示す。

- (a) 原位置計測①の D-36 を対象に実施した計測結果より、計測点を鋼棒の山の位置に設定した場合でも D-36 では累積振幅値と残存緊張力に有意な傾向が得られ、本手法の原位置での適用性が確認された。
- (b) 原位置計測②では計測点を鋼棒の山の位置に設定したが、累積振幅値と残存緊張力と に有意な相関が得られなかった。
- (c) 原位置計測③および④では計測点を初動振幅が最大となる点と設定し計測を行った。 両計測結果とも、1 MHz および 5 MHz で累積振幅値と残存緊張力に基礎実験と同様の 有意な傾向が得られた。一方で、10 MHz では距離にともなう減衰の影響が大きく傾 向が得られなかった。
- (d) i、iiおよびiiiの結果より、以下のことが推察される。300 kN以下の低荷重域のアンカーでは緊張力が小さく透過特性の変化が小さい。そのため鋼棒の山の位置に設定しただけでは微小な透過特性の変化を反映できない。よって、計測点を初動振幅が最大となる点、つまり最も接触している点で計測することが必要であり、本選定方法によって有意な傾向が得られたと考えられる。一方、D-36 のように高荷重域のアンカーは透過特性の変動が大きいために厳密に最も接触する点を選定することもなく有意な傾向が得られたと考えられる。以上より、透過法では振幅が最大となる点、つまり最も接触した点を選定し計測を行うことが重要といえる。しかしながら、現状の計測点の選定には、目視で波形の振幅を読み取らなければならず、実用的な方法とはいえない。また、センサとアンカーヘッドの接触による影響も受けると考えられる。そのため今後はセンサを接触させる際の治具の開発や、センサを斜めに配置するなどの新しい計測点の選定方法を試し、実務を見据えた一般化を図る必要がある。
- (e) 本研究では上記の原位置試験に加えて、他のアンカーヘッドの規格および他ののり面での計測も行ったがサンプル数が少なく本手法の適用性の検討に至らなかった。また上記の原位置においても有意な傾向が確認されたが、サンプル数が少なく精度の検証やのり面ごとの影響の検討には至らなかった。今後の課題としては更なるデータの集積につとめデータベースを構築し本手法の適用性についてさらなる検討が必要である。また、ナットタイプには反射法の適用も期待されたが、原位置において適用できる事例が得られなかった。つまり本研究で計測したのり面に施工されたアンカーはアンカーヘッドと支圧板の接触部分に曲率が与えられ曲面で接していたためである。一部でアンカーヘッドと支圧板が平面で接触しているアンカーが施工された現場もあり反射法の適用を試みたがサンプル数が少なく超音波法の適用性の検討には至らなかった。そのため、反射法の適用性についても今後さらなるデータ集積に努め改めて
検討することが必要である。

4.2 くさびタイプへの適用

本節ではくさびタイプの原位置での適用性を検討する。基礎実験から、くさびタイプで は反射法の有用性が確認されていることから、実際の供用下のアンカーにも反射法を適用 する。以下に原位置計測の概要および結果を示し、得られた知見および今後の課題を挙げ る。

4.2.1 試験概要および結果

対象となるアンカーヘッドは E5-7 および基礎実験には使用されていない E5-3 のアンカ ーである。以下に原位置計測の概要および結果について計測を実施したのり面ごとに示す。

(a) 原位置計測①

図 4-15 と図 4-16 に対象のり面とアンカーを示す。場所は山口県の中国自動車道本線沿 いののり面である。本計測は隣接する 2 つののり面にわたって実施した。アンカーヘッド は E5-7 を対象とし、計4本のアンカーに対して超音波計測を行った。対象となるアンカー はリフトオフ試験が実施され、残存緊張力は小さいものから順に 110 kN、419 kN、724 kN および 729 kN である。本のり面では設計アンカー力は不明であるが、E5-7 の許容アンカ ー力より過緊張状態のアンカーではないと推察される。計測方法は基礎実験と同様であり、 センサについても基礎実験と同様のものを使用した。また、計測点についても基礎実験と 同様に対称の2点を計測した。



図 4-15 対象のり面

図 4-16 対象アンカー

図 4-17 および図 4-18 に第 3 反射波のエネルギーと支圧板底面からの反射波の最大振幅 値の結果を示す。図は各計測点の結果およびその平均を示す。また図 4-17 の(b)に関して は得られた波形を示す。図に示すように本計測は基礎実験と同様の計測条件で計測したに も関わらず 5 MHz のセンサでの計測では計測機器が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)ために第 3 反射波のエネルギーの検 討は解析の対象外とした。今後は、基礎実験と同様の計測条件に拘ることなく、原位置で の状況に合わせて振幅の増幅率を変更することで計測を行うことで対応可能であると考え られる。

図 4-17 では1 MHz の結果(a)に関しては計測点ごとの平均に着目すると、基礎実験と同様に残存緊張力の増加にともなう第3反射波のエネルギーが減少する傾向が得られる。一方で10 MHz の結果に関しては有意な傾向は得られていない。しかしながら、110 kN の結果に関しては値が0に近く極端に小さいことから計測に不備があった可能性もある。

図 4-18 には支圧板底面からの反射波の最大振幅値は基礎実験と同様に 5 MHz および 10 MHz の結果を示す。5 MHz に関しては一部でサチュレーションが生じており、過小評価している部分もあるが、図に示すように両結果とも各計測点の平均値に着目すると緊張力の増加にともなう最大振幅値の増加する傾向が得られる。これは基礎実験と整合性のとれた傾向で、本パラメータの原位置における適用性が確認される。

エネルギーおよび最大振幅値とも基礎実験と同様の傾向が得られ、原位置での適用性が 確認されるが、個々の計測点の結果は必ずしも一様の傾向にはない。理想下の基礎実験と は異なり原位置では施工条件やアンカーの劣化からアンカーヘッドと支圧板の接触面にか かる荷重に偏心があると考えられる。特にくさびタイプのアンカーヘッドは複数のストラ ンドワイヤーによって緊張力を与えているため、原位置ではそれらすべてが均等の緊張力 を有することはなく、偏心が生じやすいと考えられる。そのため、原位置では複数の点で 計測を行い、それらを平均して議論することが重要である。今後、さらに計測点を増加す る必要があると考えられる。



(a) 1 MHz図 4-17 第 3 反射波のエネルギーと残存緊張力



図 4-17 第3 反射波のエネルギーと残存緊張力



図 4-18 支圧板底面からの反射波の最大振幅値と残存緊張力

(b) 原位置計測②

図 4-19 に対象となったのり面を示す。場所は佐賀県の西九州道本線に面したのり面であ り、本計測は隣接 2 つののり面にわたり計測を行った。対象となるアンカーは図 4-20 に示 す E5-3 タイプのアンカー計 9 本である。それぞれ、リフトオフ試験が実施され残存緊張力 は小さいものから順に、0 kN(引き抜けたアンカーであり、以後でも引き抜けアンカーは 0 kN とみなす)、120 kN、125 kN、135 kN、150 kN、160 kN、205 kN、245 kN および 255 kN であった。本のり面では設計時の設計アンカー力は不明であったが、E5-3 の許容アンカー 力 329 kN より設計アンカー力は 263 kN と推察され、過緊張のアンカーではないことが推 察される。

E5-3は3本のストランドワイヤーを使用することが期待された設計のアンカーヘッドで あるが、図に示すように本計測現場では一部で2本のワイヤーのみで施工されたものがあ った。そのため、偏心の影響が大きいことが予想され、計測点ごとの差異も大きいと考え られた。そこで、本のり面では図に示したように計測点を6点と増加させ計測を行った。 また、アンカーヘッド表面に関しては一部でサビが確認されたため、計測の際にはサンド ペーパーによって平滑に処理した。

計測方法は基礎実験と同様であるが、本試験より図 4-7 に示した直径の小さな新しいセ

ンサを使用する。



図 4-19 対象のり面



図 4-20 対象アンカー

図 4-21 に第3 反射波のエネルギーと残存緊張力の関係を示す。図には計6点の計測点の 平均値を示す。一見すると図に示すように0kNの結果を除くと残存緊張力の増加にともな い第3 反射波のエネルギーが増加する傾向が得られている。しかし、基礎実験結果より第 3 反射波のエネルギーは残存緊張力の増加にともなって減少することが知られ、本計測結 果は基礎実験とは調和的な結果ではない。理想下で実施した基礎実験では、E5-3 は取り扱 ってないため形状の近い E5-4 の結果に着目すると、E5-4 では与えた緊張力が小さく接触 面の反射特性の変動が微小なため、第3 反射波のエネルギーでは有意な傾向が得られなか った。本計測の対象となったアンカーも残存緊張力は 300 kN 以下の低荷重であり、そのた め有意な傾向が得られなかったと考えられる。

図 4-22 に支圧板底面からの反射波の最大振幅値と残存緊張力の関係を示す。図中の赤点 は計9本のアンカーの計測結果を示す。ここで、両周波数の結果ともに赤点の 205 kN の最 大振幅値が他に比べて著しく大きい値が得られた。そこで、図中の青点に 205 kN の結果を 除いた他の8本のアンカーについて縮尺を変更して示す。図中の赤・青のプロットともに 6点の計測点の平均値を示している。

図中の青点に着目すると残存緊張力の増加にともない最大振幅値が増加する傾向が得 られた。これは基礎実験と整合性のとれた傾向といえる。本計測の対象のアンカーは偏心 の影響によって計測点によって応力が異なると考えられたが、計測点を増加させ平均値を 検討することでアンカーヘッド全体を評価することにつながり、結果として有意な傾向が 得られたと考えられる。しかし、赤点に示した 205 kN の値が著しく大きな値となったこと については、偏心の影響が大きく応力が極端に集中した点で計測した影響とも考えられる。 そこで、今後は計測点を増加させるなど、計測点数についてさらなる検討を行う。

ここで、基礎実験においても与えた荷重が小さく支圧板上面からの第3反射波のエネル ギーで有意な傾向が得られなかった E5-4 に関しても、支圧板底面からの反射波の最大振幅 値では有意な傾向が得られた。これは、支圧板底面からの反射波が接触面の反射特性の変 化に敏感なパラメータであると考えられたが、原位置においても同様の結果となった。つ まり、300 kN以下の低荷重域のアンカーを対象とした場合、第3反射波のエネルギーの適用は困難であり、支圧板底面からの反射波を検討する必要があると考えられる。しかしながら、本計測現場特有の結果であることも否定できない。そこで以下に示す本計測の以後に実施した原位置計測結果を加えて検討を加える。



(b) 5 MHz

(c) 10 MHz

図 4-21 第3 反射波のエネルギーと残存緊張力



(a) 5 MHz

図 4-22 支圧板底面からの反射波の最大振幅値と残存緊張力



(b) 10 MHz

図 4-22 支圧板底面からの反射波の最大振幅値と残存緊張力

(c) 原位置計測③

図 4-23 に対象となるのり面を示す。場所は熊本県の九州自動車道沿いの側道に面したの り面である。対象となるアンカーヘッドは前述の計測②と同様に E5-3 タイプのアンカー計 4 本である。それぞれの残存緊張力はリフトオフ試験結果より、0 kN、70 kN、160 kN およ び 220 kN であった。計測方法は原位置計測②と同様であり、小型のセンサを使用して計測 点は 6 点定めた。本のり面においても第3反射波のエネルギーと支圧板底面からの反射波 の最大振幅値について検討する。



図 4-23 対象のり面



図 4-24 対象アンカーヘッド

図 4-25 に第3 反射波のエネルギーと残存緊張力の関係を示す。図には計6点の計測点の 平均を示している。図に示すように第3反射波のエネルギーと残存緊張力には有意な相関 が確認されない。これは、前述にように E5-3 のように与えられる緊張力が小さい場合は、 緊張力によるアンカーヘッドと支圧板の接触面の反射特性の変化が小さいために、第3反 射波のエネルギーでは有意な傾向が得られないと考えられる。

一方で、図 4-26 に示す、支圧板底面からの反射波の最大振幅値と残存緊張力には基礎実

験と同様に緊張力の増加にともない最大振幅値が増加するという有意な相関が本のり面に おいても得られる。

基礎実験においても E5-3 のような 300 kN 以下の緊張力が与えられる場合は、第3反射 波のエネルギーでは有意な相関が得られない。一方で支圧板底面からの反射波の最大振幅 値では緊張力の増加にともなう最大振幅値の増加する傾向が得られた。原位置においても、 前述の原位置計測②の結果と合わせて考えると、第3反射波のエネルギーでは有意な傾向 が確認されず、支圧板底面からの反射波の最大振幅値で基礎実験と整合性のとれた結果が 得られる。つまり、原位置においても 300 kN 以下の低緊張力のアンカーでは支圧板底面か らの反射波の最大振幅値が有効である。さらに原位置においても基礎実験と調和した結果 が得られ、本パラメータの原位置での適用性が確認される。





(a) 5 MHz

(b) 10 MHz

図 4-26 支圧板底面からの反射波の最大振幅値と残存緊張力

(d) 原位置計測④

図 4-27 に対象となるのり面を示す。場所は山口県徳山市の山陽自動車道本線に沿ったの り面である。図 4-28 に示すように対象となるアンカーは試験②および③と同様に E5-3 タ イプの計 11 本である。それぞれリフトオフ試験結果より残存緊張力は小さいものから順に、 0 kN が 2 本、58 kN が 2 本、70 kN、115 kN、145 kN が 2 本、158 kN および 231 kN である。 本計測の対象のアンカーにおいても設計アンカー力を越える残存緊張力のものはなく過緊 張状態ではないと推察される。計測方法は前述の計測と同様の方法で行い、計測点に関し ては図に示すように 12 点設定した。また図に示すように本計測の対象のアンカーヘッドは 防食対策のためにアンカーヘッド表面に塗装加工がされていた。そこで、塗装の影響を検 討するために、残存緊張力が 58 kN のアンカーを対象に塗装がある場合とグラインダーに より研磨除去した場合で超音波計測を行った。図 4-29 に塗装の影響を示す。図の(a)に示す のは計測点 1 における塗装の有無による波形の比較である。図に示すように塗装がある場 合では減衰の影響を受けて振幅の著しい減少が確認される。また、(b)に示す支圧板底面か らの反射波の最大振幅値に着目すると減衰の影響によって本来検出されるべき有意な波形 が得られず振幅を過小評価することが確認される。そこで本現場ではすべてのアンカーヘ ッド表面をグラインダーによって研磨し、塗装を除去した後に計測を行った。

上述の原位置計測②および③より、E5-3 タイプのアンカーヘッドにおいて支圧板底面の 反射波の最大振幅値と残存緊張力に有意な傾向が原位置においても得られた。その際、複 数点を計測し平均値を検討することで接触面全体にかかる応力を評価することが重要であ ることがわかった。しかし、計測にあたり、計測点を何点設定する必要があるか、また計 測点を増加させることで精度がどの程度向上するのかを検討する必要がある。そこで、本 試験では支圧板底面からの反射波の最大振幅値の適用性と合わせて、精度と計測点の関係 を検討する。



図 4-27 対象のり面



図 4-28 対象アンカーヘッド



まず、精度の検討にあたり、支圧板底面からの反射波の最大振幅値と緊張力の相関関係 を検討した。支圧板底面からの反射波の最大振幅値が緊張力によって変化するメカニズム は第3章の述べた通り、緊張力によって接触部分における真実接触面積が変化するためで ある。第3章に示したシミュレーションによって真実接触面積が増加することで支圧板底 面からの反射波の最大振幅値が大きくなることが得られた。それらの関係に線形回帰式を 導入したものを図4-30に示す。図に示すように支圧板底面からの反射波の最大振幅値と真 実接触面積は概ね線形関係にあることが確認される。ここで、真実接触面積と緊張力には 第3章に示した式(3.1)の関係が成り立ち、真実接触面積と接触面にかかる垂直荷重は線形 関係となる。すなわち、シミュレーション結果から示された最大振幅値と真実接触面積に 線形関係が成り立つとすると、実験で得られる最大振幅値と緊張力の関係も線形となる。 そこで、基礎実験結果に線形回帰式を導入したものを図4-31に示す。図に示すように各周 波数およびアンカーヘッドにおいて高い相関性が確認される。よって本研究では支圧板底 面からの反射波の最大振幅値と緊張力は線形関係であるとして、線形回帰式によって精度 の検証を行う。



図 4-30 シミュレーション結果の線形回帰式



図 4-31 基礎実験結果の線形回帰式

本試験では、支圧板底面からの反射波の最大振幅値と残存緊張力の相関に加えて計測点 数と精度の関係を検討する。そこで、計測点を3点(場所2、6、10)、6点(場所2、3、6、7、 10、11)、12点と増加させた場合の精度、すなわち標準偏差を検討する。図4-32に各周波 数で、計測点数を増加させた場合の支圧板底面からの反射波の最大振幅値と残存緊張力の 関係および、その精度を示す。図に示すように、計測点数を増加させることで、近似精度 の向上が確認される。これまで検討したようにアンカーヘッドと支圧板の接触面にかかる 応力は均等ではなく場所によって異なると考えられる。そのため場所によって反射特性が 異なるが、計測点数を増加させることでアンカーヘッドと支圧板境界面の応力分布がより 正確に評価でき、精度が向上するものと考えられる。つまり、本手法ではアンカーヘッド 全体の接触圧を評価することが重要であり、本試験で12点計測したようにアンカーヘッド 周り全体を網羅的に計測することが重要であると考えられる。

ここで、計測点が 12 点の結果に着目すると、支圧板底面からの反射波の最大振幅値と残 存緊張力には有意な相関がみられ、基礎実験および原位置計測②③と整合性のとれた結果 が得られ本手法の原位置での適用性が確認できた。しかしながら、5 MHz および 10 MHz の両場合とも標準偏差が約±50 kN の精度であり、基礎実験と比較して誤差が大きいもの と考えられる。これは、理想下の基礎実験とは異なり、原位置では各アンカーでサビなど の劣化が必ずしも一様でないこと、またアンカーごとに水分や防食油、塗装などの状況が 必ずしも一様ではないことから、それら緊張力以外の因子の影響を受けたためと考えられ る。そのため、それらの影響を考慮しそれぞれのアンカーごとの状況に合わせて分類し参 照曲線を作成することで精度の向上が図ることが望まれるが、原位置においてそれぞれの アンカーの状態を定量的に評価し、アンカーの状態に見合った劣化曲線の作成は困難であ ると考えられる。



図 4-32 原位置計測結果

4.2.2 のり面ごとの影響

上述の原位置計測によってくさびタイプに対して原位置における超音波法の適用性が確認された。しかしながら、各のり面において得られた傾向がのり面共通のものであるか検討する必要がある。そこで、本項では E5-3 を対象に計測した佐賀、熊本および徳山での計測結果を比較検討する。図4-33 に各のり面の結果を比較したものを示す。佐賀・熊本の計測では計測点が6点と接触圧全体の評価は十分にされていない可能性はあるが、図に示すように各のり面で残存緊張力の増加にともない最大振幅値が増加する傾向は同様であるが、その値や傾きはのり面によって異なることが確認される。

のり面ごとに施工条件が異なるため、アンカーの規格は同様であっても支圧板や支圧板 を受圧するためのコンクリートのり枠などはのり面によって必ずしも同一の媒質ではなく、 支圧板およびその受圧板の寸法・材質の違いによる影響が考えられる。また、のり面によ って周囲の自然環境が異なることや、のり面ごとに塗装などの防食加工が実施されたのり 面と実施されていないのり面などに分かれることで接触面に介在する媒質(空隙・水分・防 食油・塗装など)の違いの影響を受けることが考えられる。上述の影響は施工条件の違いか らのり面ごとに異なると考えられるが、一つののり面内では基本的には概ね一様と推察さ れ、のり面ごとにデータを分類することで誤差を小さくできると考えられる。本研究では 緊張力以外の因子については温度変化による影響を検討するにとどまる。そのため、今後、 追加実験や原位置データの更なる集積によって、施工条件の違いによる影響の感度を検討 する必要がある。

さらに、支圧板の材質や水分などの異なる音響インピーダンスの媒質の存在による影響 に加えて、アンカーヘッド表面のサビなどのアンカーヘッド自身の劣化による影響も考え られる。一方で、サビなどの目視で判断できる劣化については、本研究での原位置計測現 場では概ね各のり面によって一様であった。つまり、防食加工の有無によって、サビが顕 在化したのり面とそうでないのり面についての区別が可能であった。サビの進行は防食の 有無や経過年および周囲の自然環境の影響を受けると考えると、のり面ごとに施工条件や 周囲の環境については概ね一様であることから、表面のサビなどの影響についてものり面 ごとにデータを分類することで影響を小さくできるものと考えられる。しかしながら、先 述のように本研究ではサビによる影響については十分に検討されておらず、今後、アンカ ーヘッド表面のサビによる影響について追加実験などで詳細に検証する必要がある。また、 図 4-32 に示したように同一ののり面であってもアンカーの劣化が一様ではないために誤 差が生じると考えられ、同一ののり面内においても必ずしも同一の劣化ではないことを考 慮しなければならない。

以上のように図 4-33 に示した、のり面ごとの影響については、図 4-32 に示した個々の のり面内でのアンカーの状態による影響に加えて、緊張力以外の因子(施工条件・表面のサ ビなど)による影響がのり面ごとに異なり、そのため超音波パラメータの傾向が異なったと 考えられる。しかし、上述のようにのり面ごとにデータを分類することで施工条件や表面 のサビに基づいた影響を小さくできるものと考えられる。つまり、E5-3 という同一の規格 のアンカーで比較した場合でも超音波パラメータと残存緊張力の参照曲線はのり面(施工 条件や劣化)により異なる。そのため、超音波パラメータと残存緊張力の関係を用いた参照 曲線から残存緊張力を作成する場合には、アンカーヘッドの規格ごとに分類することに加 えて、のり面ごとにデータを分類し、参照曲線を作成することが必要であると考えられる。 のり面ごとに分類することで図 4-32 に示したような参照曲線が作成されるものと考えら れる。



(a) 5 MHz

(b) 10 MHz

図 4-33 のり面ごとの支圧板底面からの反射波の最大振幅値と残存緊張力

4.2.3 くさびタイプまとめ

上述の原位置計測によって得られた知見および今後の課題を以下に示す。

- (a) E5-7を対象に行った計測では第3反射波のエネルギーおよび支圧板底面からの反射波の最大振幅値の両パラメータにおいて基礎実験と整合性のとれた結果が得られ、本手法の原位置における適用性が確認された。
- (b) E5-3 を対象に行った計測では支圧板底面からの反射波の最大振幅値は基礎実験と同様の傾向が得られ、適用性が確認された。一方で、第3反射波のエネルギーには残存緊張力と有意な相関が得られなかった。これは、E5-3 に与えられる緊張力が小さいため反射特性の変化が小さく第3反射波のエネルギーでは有意な変化が反映されなかったためと考えられる。
- (c) iおよびiiより、第3反射波のエネルギーは300 kNを越える高緊張力のアンカーに 適用性があり、支圧板底面からの反射波の最大振幅値は概ねすべてのアンカーへの適 用性が見込まれる。
- (d) 反射法を原位置におけるくさびタイプのアンカーヘッドに適用する際、複数の場所で 計測し、その平均値を検討することが重要である。これは接触面にかかる応力が場所 によって異なるために、複数の計測点を設定しアンカーヘッド全体にかかる応力を平 均値として評価することが重要であるためである。また、計測点を増加させることで 精度の向上が期待される。そのため計測はアンカーヘッド周り全体を網羅的に計測す ることが残存緊張力の推定には有効であると考えられる。
- (e) 塗装がされたアンカーに対して、塗装の有無によって波形を比較した結果、塗装によって超音波が減衰することで本来得られるはずであった反射波を計測することができない場合があった。そのため、原位置で精度よく計測するためには塗装をグラインダーなどで研磨し除去することが必要である。
- (f) 計測点を 12 点と増加させて計測を行った場合、概ね±50 kN 程度の精度で計測が可能 であることが得られた。
- (g) それぞれののり面で超音波パラメータと緊張力の相関は確認されたが、その値や回帰 式の傾きは異なる。これは、のり面によって周囲の自然環境や施工年が異なるためア ンカーヘッドそのもの劣化が異なるためであると考えられる。そのため、超音波パラ メータと残存緊張力の関係による参照曲線から残存緊張力を推定するには、アンカー ヘッドの規格ごとに分類することに加えて、のり面ごとに参照曲線を作成する必要が あると考えられる。
- (h) 本研究では上記の原位置計測に加えて、他のアンカーヘッドの規格および他ののり面での計測も行ったがサンプル数が少なく本手法の適用性の検討に至らなかった。また、上述の結果についても各のり面特有の傾向である可能性も否定できない。そこで、今後の課題としては、さらなるデータの集積につとめ、本研究で得られた知見の検証および他のアンカーヘッドによる結果を検討する必要がある。
- (i) 原位置計測によって原位置での誤差の要因として、アンカーの施工条件に起因するも

のと、アンカーの劣化に起因したものに大別されると推察される。前者は施工条件の 相違によって支圧板やその受圧板の材質や寸法の相違による影響である。また、後者 はアンカーヘッドごとの劣化(サビ)などの影響である。また、前者についてはのり面 ごとにデータを分類することで影響を小さくできると考えられる。後者の影響につい ても表面のサビの進行についてはのり面によって異なることが考えられる。そのため、 上記の影響をいのり面ごとに分類することで小さくできるものと考えられる。しかし、 これらの影響が緊張力による影響と比較して大きいものであるか、また補正は可能で あるかなど、追加実験によって検討することが必要である。

第5章**実用化の検討**

第4章では原位置での適用性の検討を行った。その結果、ナットタイプのアンカーでは 透過法による累積振幅値に着目することで、基礎実験と同様の有意な傾向が得られること が確認された。その際、透過法の計測位置は初動部分の振幅が最大となる点、つまり鋼棒 とアンカーヘッドが最も接触している点を計測することが重要であることが明らかとなっ た。一方で反射法の適用は困難な場合が多く、今後さらなるデータの集積および検討が必 要である。くさびタイプのアンカーでは、概ね基礎実験と同様の傾向が得られた。具体的 には300 kNを越える高荷重域においては第3反射波のエネルギーと残存緊張力に有意な相 関が得られ、支圧板底面からの反射波の最大振幅値では、概ねすべての場合で有意な相関 が得られた。その際、計測点を複数設定しアンカーヘッドの接触面にかかる応力を全体と して評価することが重要であることがわかった。特に E5-3 を対象とした原位置計測④では、 支圧板底面からの反射波の最大振幅値を用い、計測点を 12 点設定しアンカーヘッド全体の 接触面にかかる応力を評価することで標準偏差約±50 kN 程度の精度で緊張力の推定が可 能であることが示された。しかしながら、E5-3 タイプののり面ごとの影響を比較したとこ ろ、各のり面で同様の傾向を示さず、超音波パラメータと緊張力からなる参照曲線を作成 するにはのり面ごとに作成することで誤差を小さくする必要がある。すなわち、1 つの参 照曲線で多数点在するすべてののり面のアンカーを評価することは容易ではないと考えら れる。そこで、本章では以上のことを踏まえて、現状の維持管理フローの中での、超音波 法の実務的な活用方法について検討を加える。具体的には、複数のり面の原位置計測デー タが得られた E5-3 を対象に事例検証を行い、現状の維持管理フローの課題を明らかにし、 本超音波法による新たな維持管理手法のアプローチを提案する。

5.1 超音波法の用途

図 5-1 に現状のアンカーの維持管理フローを示す。現状では、点検結果にもとづき、ア ンカーおよび地盤・構造物などの健全性(健全性調査の必要性)を各のり面に対して判定す る。健全性の判定は対象とする地盤・構造物などの重要度の大きさ、周辺状況(住居・施設 など)、アンカーの供用年数などにより異なり、各のり面の状況を考慮に入れて行うことに なる。以上のフローは多数ののり面を対象に行っていることから本研究ではマクロ的検討 と称す。マクロ的検討の結果、健全性調査が必要とされたのり面に対して、その調査とし て主にリフトオフ試験で個々のアンカーの残存緊張力が測定される。この際、得られた残 存緊張力に基づき、アンカー定着構造物の設計基準などを考慮してのり面の安定性評価も 合わせて行われる。これらのフローは個々ののり面を対象としていることから、本研究で はミクロ的検討と称す。ミクロ的検討結果より、適切な対策工の検討および選定がされる。 ここで、マクロ的検討に際しては主に目視点検が行われるが、目視点検は必ずしも地盤 内部のアンカーの劣化および性能、すなわち残存緊張力を反映した結果が得られるとは限 らないことや点検員の経験や技量によって点検結果に差異が生じる場合があることが指摘 されている。また、ミクロ的検討に際しての健全性調査は主にリフトオフ試験による残存 緊張力の測定として行われる。リフトオフ試験は直接的に緊張力を求める試験方法である ので、アンカーの劣化・健全性を精度よく評価することが可能となるが、現状では多数施 工されたアンカーのうち数本のみが測定される。その結果、個々のアンカーの健全性評価 にとどまり、のり面全体の安定性を十分に検討するには至っていない。

さらに、ミクロ的検討において健全性調査を実施するに際しては、一つののり面内にお いて多数施工されたアンカーの内、どのアンカーに健全性調査を実施するか否かの多数の アンカーを対象としたメゾマクロ的検討が含まれる。このメゾマクロ的検討にあたっては、 現状では目視点検結果をもとに調査を実施するアンカーを経験則的に決定している。つま り、アンカーの健全性(残存緊張力)が必ずしも考慮されているとはいえない。そのため、 リフトオフ試験を実施し残存緊張力が得られたとしても、その得られた値がのり面の中で 健全なアンカーを対象に実施したものか、不健全なアンカーを対象に実施したものか判断 は容易ではない。そこで、本検討においてはあらかじめのり面におけるアンカーの健全度 を推定し、健全度に合わせて残存緊張力の測定を実施することが望まれる。

以上よりミクロ(メゾマクロ)、マクロの両側面においても簡易に多数のアンカーの残存 緊張力を評価することが重要であるといえる。そこで、以下ではミクロ的およびマクロ的 両側面に対応した簡便アンカー残存緊張力評価手法として本超音波法のアプローチを検討 する。



図 5-1 アンカーの維持管理フロー

5.2 ミクロ的検討

前章までは各種の超音波パラメータと緊張力の相関を検討してきた。その結果、本事例 検証の対象となる E5-3 に関しては支圧板底面からの反射波の最大振幅値と残存緊張力に 原位置において、基礎実験と同様の相関が確認された。その際、塗装を除去することや計 測点を多数設定することが重要となることがわかった。これらの残存緊張力と支圧板底面 からの反射波の最大振幅値の関係を用いて参照曲線を作成することで残存緊張力の推定が 可能であり、のり面に施工された多数のアンカーの残存緊張力を評価することができ上述 のミクロ的検討に貢献できるものと考えられる。

しかしながら、超音波パラメータと緊張力の関係から参照曲線を作成する際に留意すべ き点がある。第4章において図4-33に示したように、参照曲線を作成する際にはデータを のり面ごとに分類し検討する必要がある。これは、各のり面で施工条件・周辺の自然環境 が異なることやサビなどのアンカーヘッド自身の劣化が異なるためと考えられる。そのた め、のり面ごとにデータを分類し誤差を小さくすることが求められる。よって超音波パラ メータと残存緊張力の関係による参照曲線から残存緊張力を推定するには、のり面ごとに 参照曲線を作成する必要がある。ここで、各のり面の参照曲線を作成するあたり、のり面 の既知緊張力データによって補正する必要があると考えられる。この場合、原位置計測で 相関を検討した方法と同様にリフトオフ試験結果を併用し残存緊張力が既知のプロットを 設定することで補正が可能となり、各のり面において参照曲線の作成が可能となる。

しかしながら、個々ののり面においてもアンカー表面のサビなどの劣化による影響は必 ずしも一様ではない。そのため、本手法でのり面ごとに分類し参照曲線を作成したとして も誤差が含まれることに留意しなければならない。すなわち、一つののり面で検討しても、 アンカーの劣化の相違に基づく標準誤差が含まれる。本研究での原位置計測では標準誤差 ±50 kN であることが確認された。そのため、現状では精度よく緊張力を推定可能である とはいいがたい。しかし、目視点検では引き抜け(0 kN)か否かの判断は可能であっても、 残存緊張力の有無に関しての評価は容易ではない。そのため、本手法によって標準誤差± 50 kN の誤差を含めても残存緊張力が検討できることにより、これまで以上に残存緊張力 を反映したデータが得られることが期待される。

しかし、本研究では様々なのり面でのアンカーの劣化の相違に基づく標準誤差の検討が 行えていない。今後は更なるデータの集積に努め、他の計測のり面における誤差を検討し、 のり面ごとに分類した上でアンカーの劣化の相違に基づく標準誤差が実務に有効な範囲で あるか検討を行う必要がある。また、合わせて表面のサビなどの影響を検討し、それら影 響が補正することを検討し、精度の向上を図ることが望まれる。

以上より、1 つののり面を対象としたミクロ的検討への超音波法のアプローチの提案と して、まず、これまでと同様にリフトオフ試験を一部のアンカーに実施する。そのリフト オフ試験結果を用いて超音波パラメータと残存緊張力の関係を検討し参照曲線を作成する。 作成した参照曲線をリフトオフ試験が実施されてない他の多数のアンカーに適用すること で、それらの残存緊張力が推定でき、のり面全体の安定性を考慮に入れた適切な対策工の 検討に貢献できると考えられる。

5.3 メゾマクロ的検討

先述のようにミクロ的な検討ではリフトオフ試験を併用し参照曲線を作成することによる、リフトオフ試験を実施していない他のアンカーの残存緊張力の評価手法について提案 した。ミクロ的検討のアプローチでは現状と同様にリフトオフ試験の必要性を述べた。

ここで、ミクロ的検討に先立っては、メゾマクロ的検討によって、一つののり面に多数 施工されたアンカーの内、どのアンカーに対してリフトオフ試験を実施するかの検討・判 断が求められる。現状では目視点検結果をもとに残存緊張力を反映しないまま、リフトオ フ試験を実施するアンカーが決定されている。そのため、残存緊張力が得られたとしても、 その得られた値がのり面の中で健全なアンカーを対象に実施したものか、不健全なアンカ ーを対象に実施したものか判断することは容易ではなく、さらなる検討が求められる。そ のため、メゾマクロ的な検討に際しては、まずアンカーの残存緊張力に基づき不健全なア ンカーのスクリーニングを実施することが望まれる。よって、ここでは、一つののり面の 中での不健全なアンカーのスクリーニング手法に対する超音波法のアプローチを検討する。

先述のように本事例検証の対象である、E5-3のアンカーに対しては支圧板底面からの反 射波の最大振幅と残存緊張力に相関が確認された。すなわち、残存緊張力の増加にともな い最大振幅が増加する傾向である。ここで、施工条件や自然環境の相違から、それらの傾 向はのり面によって異なると考えられる。そのため、先述のミクロ的検討においてはリフ トオフ試験の併用によって既知のデータによる補正を行い、残存緊張力を推定することを 提案した。しかし、メゾマクロ的検討では絶対的な残存緊張力の値が得られずとも、一つ ののり面に多数施工されたアンカーの内、相対的に残存緊張力が小さいと推定されるアン カーを発見することが望まれる。ここで、前章に示したように一つののり面に着目しのり 面ごとにデータを分類することで残存緊張力の増加にともない最大振幅が増加する傾向が 得られると考えられる。それら傾向を利用すること絶対的な残存緊張力値については推定 できずとも、相対的に最大振幅の小さなアンカーが、対象ののり面の中で相対的に残存緊 張力が小さいことが推定可能であると考えられる。すなわち、超音波計測によって得られ る支圧板底面からの反射波の大小によって、一つののり面内で相対的に不健全な(残存緊張 力の小さな)アンカーのスクリーニングに貢献できると考えられる。

以上より、メゾマクロ的検討では一つののり面の中で不健全な(残存緊張力の小さな)ア ンカーのスクリーニングが求められるが、超音波パラメータと残存緊張力の相関から相対 的に不健全なアンカーの推定が可能であり、リフトオフ試験を実施すべきアンカーの選定 に貢献できると考えられる。

5.4 マクロ的検討

先述のように超音波パラメータと緊張力の相関を用いた参照曲線によって、これまで以 上に多数のアンカーの残存緊張力を評価することが可能であると考えられる。また、参照 曲線を作成せずとも、相対的に不健全な(残存緊張力の小さな)アンカーのスクリーニング に貢献できると考えられる。しかし、参照曲線による緊張力推定にはリフトオフ試験の併 用が不可欠である。また、不健全なアンカーのスクリーニングではのり面間での比較は困 難である。そのため、健全性調査の必要性やその優先順位を検討するマクロ的検討では多 数ののり面を対象に評価するため、それぞれののり面でリフトオフ試験を実施する必要が あり、すべてののり面においてリフトオフ試験を実施することは経済的に効率的とはいえ ない。つまり参照曲線による残存緊張力の評価法はマクロ的検討には不向きであると考え る。

参照曲線による残存緊張力推定では、超音波パラメータと緊張力の相関を検討している が、原位置では緊張力の影響以外にも原位置特有のサビや支圧板およびその受圧板などの 材質など様々な因子の影響が複雑に絡んでいる。そのため、それらの複雑な現象を数理モ デル化することは容易ではなく、参照曲線の作成にあたっては、まずリフトオフ試験によ って補正を行うことを考えた。一方で、同様に複雑でとらえにくい事象を具体化する手法 として多次元のデータを利用した統計解析データ解析がある。多次元の既知データから計 測などで得られた新規データを推定する場合、ニューラルネットワークを用いた方法など によって繰り返し学習により最適化を行うのが一般的である。ニューラルネットワークに よる繰り返し学習によって多次元データから緊張力を推定することが可能であると考えら れるが、適切なネットワークモデルの作成には繰り返し学習が必要であることや過剰学習 に至らない最適な学習回数の設定には試行錯誤が必要である。一方で、管理者側のニーズ としては数 kN 単位の精度での緊張力の推定ではなく、緊張力の有無などのおおまかな健 全性の判定が可能であれば実務には有効であるという意見もある。そこで、マクロ的検討 にあたり、多次元のデータから緊張力の階級の区分判別を検討する。検討にあたり、本研 究では統計解析手法であるマハラノビス距離法によって緊張力の階級区分判別を検討する。 マハラノビス距離による判別分析は品質工学の分野で不良品判定や機械の故障判定に採用 されている。マハラノビス距離を用いた判別分析では、データの統計的な分布に基づいた 判別がされるため、ニューラルネットワークのような複雑なモデルの生成が必要とされな い利点が挙げられる。一方で、マハラノビス距離は良・不良の判定などに適用された経緯 があり、損傷の程度や位置などの連続量の複雑な判定には用いられてこなかった。しかし、 マハラノビス距離を用いた判別分析を損傷位置の同定などの連続量に適用する試みがある。 例えば岩崎ら[32]は CFRP 平板に生じる剥離の位置の同定にマハラノビス距離による判別 分析を適用し、その有用性を示した。また、結城[33]は AE 波形(振幅-時間)にマハラノビ ス距離を適用し、有意波形の到達時間の判定の有用性を示した。このように、近年では位 置や時間といった連続量に対して任意に水準を設定しマハラノビス距離による判別分析を 適用し、その有用性が示されてきた。そこで本研究では、残存緊張力という連続量に対し てマハラノビス距離による判別分析を適用し残存緊張力のランク判別法の提案を行う。

5.4.1 マハラノビス距離

判別分析とは固体に固有の特性値から各固体が所属する階級(ランク)を判別する手法で ある。判別分析の判断基準は様々存在するが、ランクごとの特性値分布がばらつきを持つ 場合に多く用いられるのがマハラノビス距離法である。

マハラノビス距離とは、変数間の相関を用いた指標であり、対象データの基準空間から の距離を表す距離尺度である[32]。データが正規分布であるとするとマハラノビス距離は 式(5.1)で定義される。ここで *D*_i は基準空間 *i* へのマハラノビス距離を、*x* は観測データを、 *µ*_iは階級 *i* における平均を、 *S* は各階級間の分散共分散行列を示す。マハラノビス距離を 用いた判別分析では、基準データが作る特性値空間への帰属度から、対象の新規データが 属するランクを判別する。あるランクに属することが既知のデータを基準データと呼び、 各ランクの基準データの集合を基準空間と呼ぶ。式(5.1)によって対象データの各ランク(基 準空間)に対してのマハラノビス距離が算出され、最小のマハラノビス距離を与えるランク にそのデータは属すると判定される。データが正規分布に従う場合、マハラノビス二乗距 離は自由度 nの x 二乗分布に従うため、マハラノビス距離から対象の判別ランクに分類さ れる確率(帰属率)を定量的に導出することが可能である。マハラノビス二乗距離の確率密 度関数は式(5.2)で定義される。ここで p_iは基準空間 i に対する確率密度、D_iは基準空間 i へのマハラノビス距離を示す。各基準空間への確率密度から、各基準空間 i への帰属率は 式(5.3)で与えられる。

$$D_i^2 = (x - \mu_i) \Sigma^{-1} (x - \mu_i)$$
(5.1)

$$p_{i} = \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \Gamma(\frac{n}{2})} D_{i}^{2(\frac{n}{2}-1)} e^{-\frac{D_{i}^{2}}{2}}$$
(5.2)

5.4.2 残存緊張力のランク判別手順

本研究では残存緊張力のランクをマハラノビス距離による判別分析を適用し推定する。 E5-3 を対象とした徳山・熊本・佐賀の3つののり面で超音波データが得られており、それ ぞれののり面で11本、4本、9本の計24本のアンカーでの各種サンプルデータがある。こ れらを対象にマハラノビス距離法による残存緊張力の判定の適用性ついて検討する。以下 に最小マハラノビス距離を用いた残存緊張力のランク推定手順を示す。

- ① 既知の残存緊張力と超音波パラメータの関係に基づき基準データを作成する。
- ② 残存緊張力のランクを設定し、各ランクに帰属する基準データから各水準の基準空間 を作成する。
- ③ 各基準空間の統計量(平均値や共分散)を算出する。
- ④ 各基準空間の統計量から、推定する測定データのマハラノビス距離を算出する。
- ⑤ マハラノビス距離から推定データの帰属するランクを推定する。

5.4.3 ランク分割

先に示したランク判別手順のように、マハラノビス距離によって残存緊張力のランクを 推定するにあたり、残存緊張力のランク水準を作成する必要がある。図 5-2 に残存緊張力 とアンカー健全度の目安を示す。図に示す通り、定着時緊張力(Pt)の 80 %がアンカーの健 全か否かの一つの目安になると考えられる。ここで現状実施されている目視点検は損傷が 顕在化した(引き抜けた)アンカーを特定することは可能であっても、損傷が顕在化してい ない(引き抜けていない)アンカーの健全性(緊張力の有無)の判定までは困難である。つまり 本手法によって、外観からの目視点検では判別が困難な「損傷が顕在化していないが不健 全なアンカー」を判定することが重要といえる。そこで本事例検証ではサンプルデータ数 が 24 本と限られていたが、定着時緊張力の 80 %を境として、それ未満を不健全(残存緊張 量が低下)のランクI、それ以上を健全(残存緊張力有)のランクIIという 2 つのランク区分 を策定し検討を進める。ただし、0 kN の引き抜けたアンカーに関しては目視点検でも判断 可能であると考えられるが、本事例検証ではデータ数が限られるためにランクI に含める。

本事例検証の対象となる E5-3 のアンカーではアンカーヘッドの規格の許容アンカーカ は 329 kN である。一般的な値として設計アンカー力は許容アンカー力の 80 %である[7]と すると設計アンカー力は 263 kN と推定される。また定着時緊張力は一般的には設計アンカ ーカの 40-80 %であるが、施工時に定着時の緊張力は多くの場合記録されていない現状に ある。本研究では、鋼棒タイプの結果ではあるが、定着時緊張力が測定されたデータがあ り、そちらを参考に定着時緊張力は設計アンカー力の 50 %と仮定する。定着時の緊張力が 設計アンカー力の 50 %と仮定すると E5-3 の場合、定着時緊張力は 105 kN となる。そこで、 本研究の原位置計測においては設計アンカー力を大きく越える過緊張のアンカーは対象で なかったことから表 5-1 に示すように 105 kN を境とした残存緊張力のランクを設定する。

残存引張力の範囲	健全度	状態	対策例
0.97//5-		破断の恐れあり	緊急対策を実施
1.1Ta-	D	危険な状態になる 恐れあり	対策を実施
許容アンカーカ(Ta)-	С	許容値を超えている	
1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.	В		経過観察により 対策の必要性を検討
定差時緊張力(ht)-	А	健全	
21时来近7(11) 0 8Pt-	А	健全	
0.5Pt-	В		経過観察により 対策の必要性を検討
0.1Pt-	С	機能が大きく低下している	対策を実施
	D	機能していない	

図 5-2 残存緊張力とアンカー健全度の目安

表 5-1

ランク	残存緊張力	状態
I	0-105 kN	不健全
П	105 kN-	健全

5.4.4 使用するデータ

マハラノビス距離による判別分析は多次元データの相関を利用するものであり、複数の パラメータを組み合わせることが必要となる。また、多数のパラメータを組み合わせるこ とで各基準空間を特徴付ける情報量が増加し、精度の向上が期待される。本研究において、 第一に各種の超音波パラメータを多次元データとして使用することが期待されるが、本事 例検証の対象である E5-3 関しては超音波パラメータとして支圧板底面からの反射波の最 大振幅値と残存緊張力の相関が確認されるにとどまる。しかしながら、支圧板底面からの 反射波の最大振幅値のみに着目した場合でも複数の多次元のデータが得られているものと 考えられる。図 5-3 に一例として熊本の支圧板底面からの反射波の最大振幅値の計測結果 を示す。図には全計測点の平均および最大最小と残存緊張力の関係を周波数ごとに示して いる。図に示す通り、周波数を変更させたデータとして 5 MHz と 10 MHz の 2 種のデータ が得られる。また、参照曲線の作成に際して各計測点の平均を検討していたが、平均に加 えて最大値に着目すると緊張力の増加にともない増加する傾向が得られる。これは、緊張 力が大きいほど接触面の応力も大きくなることで、場所によって多少の変化はあるものの 最大値も緊張力の増加にともない増加すると考えられる。そこで、マハラノビス距離法の 適用にあたり、これまで個別に検討していた異なる2種のセンサ1 MHz および5 MHz と これまで得た各計測点の平均および最大のデータの計4種のデータを用いて検討する。表 5-2 に使用する全データを示す。左から実際の緊張力とそれを基にしたランク、および各 周波数における平均値と最大値を示している。



図 5-3 計測データ例

計測のり面	残存緊張力	残存緊張力 二、力		lz(V)	10 MHz(V)	
	(kN)	,,,,	平均	最大	平均	最大
佐貨	0	Ι	0.0124777	0.0235294	0.0039216	0.0039216
熊本	0	Ι	0.0098039	0.0117647	0.0039216	0.0039216
法山	0	Ι	0.0215686	0.0313726	0.0039216	0.0039216
18日	0	Ι	0.0010895	0.0028865	0.0000109	0.0000218
	58	Ι	0.0235294	0.0627451	0.0045752	0.0078431
	58	I	0.0663399	0.2980392	0.0098039	0.0313726
	70	Ι	0.0470588	0.0941177	0.0052288	0.0078431
	70	I	0.0415033	0.1607843	0.0094771	0.0235294
	74	Ι	0.0770054	0.2000000	0.0078431	0.0156863
	115	Π	0.0196078	0.0431373	0.0052288	0.0117647
	120	Π	0.0003192	0.0013969	0.0000300	0.0001364
	125	Π	0.0026213	0.0059422	0.0000355	0.0000491
	135	Π	0.0130730	0.0385016	0.0000618	0.0002674
	145	Π	0.1486631	0.5176471	0.0163993	0.0470588
	145	Π	0.0810458	0.3176471	0.0179739	0.0901961
	150	Π	0.0059302	0.0282869	0.0002574	0.0013969
	158	Π	0.0623094	0.1843137	0.0075163	0.0117647
	160	Π	0.0581699	0.1411765	0.0104575	0.0352941
	160	Π	0.0051646	0.0216571	0.0000371	0.0000873
	205	Π	0.0914585	0.3465140	0.0004574	0.0012277
	220	Π	0.1666667	0.4980392	0.0117647	0.0196078
	231	Π	0.1068627	0.3019608	0.0143791	0.0588235
	245	Π	0.0029329	0.0059422	0.0000668	0.0001364
	255	Π	0.0181222	0.0772705	0.0000564	0.0001364

表 5-2 使用するデータ

5.4.5 仮定条件

図 5-4 に一例として 5 MHz の平均の計測値にランクを適用した結果を示す。ここで、マ ハラノビス距離法の適用に際して、図に示すように各ランクの計測データの確率密度は対 数正規分布に従うと仮定する。マハラノビス距離の適用にあたり、データは正規分布であ ることが必要となるが、本事例のデータでは振幅が負の値をとらないことから対数正規分 布とした。そのため、実際にはそれぞれの計測データの自然対数をとったものをマハラノ ビス距離の計算に適用する。

本研究ではデータが限られているため、データの分布について検証が困難であり、上記 のような仮定条件を設定し検討を進める。そのため、マハラノビス距離の信頼性には問題 がある。本研究ではマクロ的検討に対するアプローチの一提案としてマハラノビス距離の 適用性を上記の仮定条件のもとで検討する。



図 5-4 各ランクの計測データ

5.4.6 判別分析結果

本研究では、まずマハラノビス距離が任意に分割した残存緊張力のランク推定への有用 性を検討する。そこで、得られたサンプル数 24 本のデータを用いた基準空間の判別分析精 度を検証する。表 5-3 に 24 本のサンプルデータによるマハラノビス距離による判別分析結 果を示す。表には左から実際の緊張力とそれを基にしたランク、各基準空間に対するマハ ラノビス距離、推定ランク(マハラノビスが最小となるランク)および推定ランクと実際の ランクが合致しているかの判別結果を示す。表の判別結果に示す通り、高い正答率での判 別分析結果が確認される。その判別正答率は約 92 %であり、連続量の残存緊張力を任意に ランク分割した場合でもマハラノビス距離による判別分析が高い精度で可能であり、本手 法の有用性が確認される。

誤判別されたデータに関しても、ランクⅠ、Ⅱの両ランクの基準空間に近い性質を持ち、 両ランクの基準空間に対して小さなマハラノビス距離を有するために誤判別されたと考え られる。ここで、実務に本手法を適用する場合、アンカーが健全であるか否かを検討でき ることが重要といえる。つまり、先に示したように一意に帰属するランクを確定する必要 はなく、それぞれのランクに帰属する確率によって確率論的にアンカーの不健全生を検討 することが重要である。ここで、帰属率で検討することで、各ランクへの帰属率による確 率論的な検討が可能となり、帰属率に有意水準を設定することでさらなる精度の向上が可 能となると考えられる。図5-5に表5-1の判別結果のそれぞれのランクへの帰属率を示す。 図には各残存緊張力のアンカーに対するランクIへの帰属率を青、ランクIIへの帰属率を 赤の棒グラフで示す。図に示す通り、ランクIにあるアンカーのIへの帰属率は大きく、 ランクIIにあるアンカーのランクIIへの帰属率は大きくなり、帰属率による検討からも精 度の高い判別分析結果が得られていることが確認される。また、ランクIIであると誤判別 された 74 kN の結果に着目するとランクIへの帰属率は 40%を越えており、ランクIの危険性 をランクIへの帰属率 1/3以上を有意水準と定めることで 74 kNのアンカーの危険性 をランクIへの帰属率 1/3以上を有意水準と定めることで 74 kNのアンカーは正しく判別 され精度を向上することができる。このように帰属率に原位置に対応した有意水準を定め ることでアンカーの機能低下の危険性の確率論的推定が可能である。

緊張力(kN)	真のランク	距離I	距離Ⅱ	推定ランク	判別結果
0	Ι	5.06	9.69	Ι	0
0	Ι	6.88	14.93	Ι	0
0	Ι	2.02	9.97	Ι	0
0	Ι	7.09	3.74	Π	×
58	Ι	0.52	3.16	Ι	0
58	Ι	3.09	3.83	Ι	0
70	Ι	2.40	4.00	Ι	0
70	Ι	2.25	3.62	Ι	0
74	Ι	2.70	1.45	Π	×
115	Π	16.68	2.86	Π	0
120	Π	73.12	8.18	Π	0
125	Π	10.06	4.51	Π	0
135	Π	34.64	6.25	Π	0
145	Π	4.89	1.74	Π	0
145	Π	38.85	3.18	Π	0
150	Π	32.63	3.26	Π	0
158	Π	9.14	3.61	Π	0
160	Π	37.15	2.48	Π	0
160	Π	16.55	2.73	Π	0
205	Π	33.84	3.47	Π	0
220	Π	18.15	3.13	Π	0
231	Π	39.45	2.63	Π	0
245	Π	9.90	4.38	Ш	0
255	Π	36.30	3.61	Ш	0

表 5-3 判别分析結果



図 5-5 各ランクへの帰属率

上述のように、連続量である残存緊張力を任意のランクに分割した場合でもマハラノビス距離による判別分析の適用性が確認される。ここでは、実際の既知データから新規ののり面のデータのランク推定に有効であるか検討する。本事例検証の対象の E5-3 では佐賀・熊本・徳山の3のり面のデータが得られている。佐賀・熊本ののり面の計測結果を既知データとして基準空間を作成し、熊本の4本のアンカーの計測結果を新規データとして残存緊張力のランクの推定を行う。

表 5-4 および図 5-6 に佐賀・熊本のサンプル数 20 本のデータによる基準空間の判別分析 結果および帰属率を示す。表の判別結果に示すように高い正答率の基準空間判別分析結果 が得られ、その判別正答率は 90%と高い精度であることが確認される。また、帰属率によ る確率論的な検討することで、ランク I への帰属率として 1/3 を有意水準と定めることで 誤判別された 0 kN の結果についても正しく判定できることが確認され、精度を向上させる ことができる。そこで、ランク I への帰属率の有意水準として 33%を設定し、新規データ のランク推定を検討する。

表 5-5 および図 5-7 に新規データとした熊本の計測結果の判別分析結果およびその帰属 率を示す。表に示すように概ね新規データもランクの推定が可能であることが確認される。 その判別正答率は、データは少ないながら 75%となる。また、誤判別とされた 70kNのア ンカーの結果に関しても帰属率より、ランクIへの帰属率は約35%でありランクIの危険 性を反映した結果といえる。先に示した有意水準 33%を仮定すると 70kNのアンカーに関 しても正しく判別することが可能である。以上のように新規のデータについてもマハラノ ビス距離によって概ねアンカーの残存緊張力のランクを推定することが可能であることが 明らかとなった。

緊張力(kN)	真のランク	距離I	距離Ⅱ	推定ランク	判別結果
0	I	4.32	9.63	Ι	0
0	Ι	5.11	14.35	Ι	0
0	Ι	5.13	3.09	Π	×
58	Ι	0.26	3.45	Ι	0
58	Ι	2.36	3.77	Ι	0
70	Ι	1.92	4.12	Ι	0
74	Ι	4.91	2.02	Π	×
115	Π	13.48	3.12	Π	0
125	Π	93.66	7.17	Π	0
135	Π	10.15	3.85	Π	0
145	Π	28.48	5.82	Π	0
145	Π	5.20	2.11	Π	0
150	Π	33.10	3.02	Π	0
158	Π	33.30	2.74	Π	0
160	Π	10.58	4.35	Π	0
160	Π	14.14	2.52	Π	0
205	Π	44.79	3.08	Π	0
231	Π	30.50	3.01	Π	0
245	I	7.32	3.92	Π	0
255	I	39.56	3.29	I	0

表 5-4 基準データの判別分析結果



図 5-6 基準データの帰属率

表 5-5 新規データの判別分析結果

緊張力(kN)	真のランク	距離I	距離Ⅱ	推定ランク	判別結果
0	Ι	5.04	9.93	I	0
70	Ι	5.61	4.09	Π	×
160	Π	28.77	2.99	П	0
220	Π	25.03	4.04	П	0



図 5-7 新規データの帰属率

5.4.7 考察

上述のように新規のデータに対してもマハラノビス距離によってランクの判別が高い精 度で可能である。実用化の観点から考えると、残存緊張力が既知なデータベースを構築す ることで、マハラノビス距離による判別分析を利用して、残存緊張力が未知な新規ののり 面のアンカーの残存緊張力ランクを推定できると考えられる。つまり、図 5-1 のアンカー の維持管理フローでのマクロ的検討に利用可能であると考えられる。現状のマクロ的な検 討に際しては、主に目視点検結果によって健全性調査の必要性や優先順位の検討がされる。 しかし、目視点検はアンカーヘッド部分のみの点検であり、引き抜けなどの著しく機能が 低下したアンカーを評価することは可能であるが、その他のアンカーでは必ずしもアンカ ー機能、すなわち残存緊張力を反映しているとは限らない。ここで、超音波法による簡便 な判別分析を併用することで残存緊張力を反映した結果が目視点検結果に加えて得ること ができると考えられる。例えば目視点検時に一部のアンカーに対して超音波法を適用し、 データベースから計測したのり面のデータに対してマハラノビス距離を算出し、残存緊張 力のランクが推定可能である。推定されたアンカーのランクによって残存緊張力を反映し た健全性調査の必要性や優先順位の検討が可能になると考えられる。

ただし、本手法の適用にはデータベースの構築が必要であり、まずはマクロ的検討を実施する中で多数のアンカーの残存緊張力と超音波パラメータの既知データが必要である。 また、本研究で提案したマハラノビス距離についてはデータの正規性について十分な検証 がされていないため、本研究では仮定条件のもとで検討を行った。そのため、本結果の信 頼性は十分とはいえず、マクロ的検討に対するアプローチの一提案にとどまる。そこで、 今後はデータの正規性を検証しデータの分布に基づいて、本手法の適用性を改めて検討す る必要がある。

5.5 まとめ

簡便に多数のアンカーの緊張力を評価することは現状のフローにおけるマクロ的、メゾ マクロ・ミクロ的の両側面で重要である。本章ではそれぞれの検討に対する超音波法のア プローチを提案した。以下にそれぞれの検討に対する提案をまとめる。

マクロ的検討すなわち健全性調査の必要の検討にあたっては、従来は目視点検結果のみ による検討がされてきた。ここで、点検時に同時に超音波計測を実施し、マハラノビス距 離による判別分析を適用することで残存緊張力をランクとして判別することができる。目 視点検結果に加えて超音波法による残存緊張力の判別分析結果によってアンカー機能、す なわち残存緊張力を反映した各のり面の健全性調査の必要性・優先順位付けに貢献できる。 マクロ的検討によって健全性調査が必要と判定されたのり面に対して健全調査が実施 される。その際、メゾマクロ的検討として多数のアンカーの中で健全調査を実施するアン カーを選定することが求められる。ここで、超音波計測によって得られる超音波パラメー タの大小から、絶対的な緊張力の値の推定はできずとも、のり面の中で相対的に不健全(残 存緊張力の小さい)であろうアンカーをスクリーニングすることが可能となる。それにより、 不健全なアンカーに対してリフトオフ試験を実施するなどの検討に貢献できると考える。

ミクロ的検討では、リフトオフ試験が実施されると、リフトオフ試験を実施したアンカ ーの残存緊張力値をもとにのり面全体の安定性の評価および対策の検討がされた。ここで、 従来通り健全性調査の際にリフトオフ試験を実施し、その結果をもとに対象となるのり面 の超音波パラメータと残存緊張力の参照曲線を作成する。作成した参照曲線によってリフ トオフ試験を実施していない他の多数のアンカーの残存緊張力を本超音波法で推定するこ とができる。また、これまで以上に多数のアンカーの残存緊張力を評価することができ、 より精度よくのり面全体の安定性の検討および対策工の選定に貢献できるものと考えられ る。

また、以下に本章で得られた知見および今後の課題を示す。

- (a) 参照曲線はのり面ごとに作成する必要があり、作成にあっては数本のアンカーでのリ フトオフ試験によって既知の残存緊張力データを得ることが必要である。
- (b) メゾマクロ的検討においては、不健全なアンカーのスクリーニング技術が求められ、 超音波パラメータと残存緊張力の相関によって、のり面の中で相対的に不健全なアン カーを発見することができると考えられる。
- (c) リフトオフ試験を併用することなく残存緊張力を評価する手法として統計手法による方法を検討し、マハラノビス距離による判別分析によって概ね残存緊張力のランクの判別が可能であることが確認された。その際に、各ランクへの帰属率を検討することで、アンカーの不健全性の確率論的な検討が可能となり、現地に合わせた有意水準を設定することで精度を向上できることが確認された。
- (d) マハラノビス距離による緊張力のランク判別分析では、データの正規性の検証を十分 に行うことができていない。そのため、マハラノビス距離による判別分析の信頼性が 検討されておらず、マクロ的検討に対する超音波法のアプローチの一提案にとどまる。 今後は、さらなるデータの集積に務め、データの正規性および分布について検討・検 証を行い本手法の適用性を改めて検討することが求められる。
- (e) 判別分析の検討にあたってはサンプル数が24本と限られたため、2ランクの判定に留 まった。今後さらにデータが集積されることで、さらに区分を細分化したランク判定 まで可能であるか検討する必要がある。
- (f) 参照曲線の作成にあたって、リフトオフ試験結果による補正が必要であると考えられ

るがリフトオフ試験結果の残存緊張力値に偏りがある場合、参照曲線の補正は困難で ある可能性が指摘される。そこで、今後は、リフトオフ試験によって何本程度既知の プロットを設ければ参照曲線の作成が可能となるか検討する必要がある。ここでメゾ マクロ的検討に示したように、あらかじめのり面内での相対的な健全度を評価するこ とで、データの偏りを軽減できる可能性がある。以上のことを今後さらに検討する必 要がある。

第6章 結論と今後の展望

本研究は効率的な維持管理に貢献できる、簡易かつ安価なアンカーの残存緊張力の評価 手法として超音波法について検討した。室内実験および原位置計測によって超音波法の適 用性と有用性を検討し、得られた知見をもとに実用化の検討を行った。以下に本研究の成 果を列挙しまとめとする。

- (a) 基礎実験においてナットタイプのアンカーヘッドについては、反射法では第3反射波のエネルギー・支圧板底面からの反射波の最大振幅値、透過法では累積振幅値にそれぞれ緊張力との相関を確認することができた。これらは、緊張力が増加するにともないアンカーヘッドと支圧板・鋼棒の接触の程度が変化し超音波の反射・透過特性が変化するためと考えられる。
- (b) 基礎実験においてくさびタイプのアンカーヘッドについては、反射法の適用を試みた。 その結果、ナットタイプと同様に第3反射波のエネルギーおよび支圧板底面からの反 射波の最大振幅値のそれぞれ緊張力との相関が確認された。
- (c) 各アンカーのタイプおよび規格で超音波パラメータと緊張力の相関を確認し、緊張力の推定に有効であると考えられる。しかし、アンカーヘッドごとに距離減衰や応力の影響が異なるために、超音波パラメータと緊張力の関係から緊張力を推定する際には、アンカーヘッドの規格ごとに参照曲線を作成する必要があることが得られた。
- (d) 数値解析シミュレーションによって反射波特性の変化するメカニズムの一考察を行った。その結果、反射特性の変化するメカニズムとしては、アンカーヘッドと支圧板の接触面において真実接触部分と非接触部分が存在するためと考えられる。真実接触部分は垂直荷重に比例して増加することが知られ、実験結果と整合性のとれたシミュレーション結果が得られた。
- (e) 特に有用性が確認された支圧板底面からの反射波の最大振幅値についてシミュレーション結果をもとに回帰式の検討を行った。その結果真実接触面積と支圧板底面からの反射波の最大振幅値は概ね線形的な変化であることが確認された。また、真実接触面積は垂直荷重と比例するとすれば、基礎実験結果すなわち緊張力(垂直荷重)と支圧板底面からの反射波の最大振幅値の関係も線形関係になると考えられる。基礎実験結果に線形回帰を適用すると高い相関係数を示し、概ね線形式で回帰できることが確認できた。
- (f) 原位置計測によってナットタイプの透過法について原位置における適用性が示唆された。その際、透過法はアンカーヘッドと鋼棒の僅かな接触状態の変化を検討しているため、厳密にアンカーヘッドと鋼棒が最も接触している部分を計測することが重要であるといえる。具体的には初動の振幅が最大となる点で計測を行うことが重要とな

る。

- (g) 原位置計測によってくさびタイプの反射法の原位置における適用性が確認された。反射法のうち第3反射波のエネルギーは300 kNを越える高緊張力のアンカーに対して適用性が確認された。一方で、支圧板底面からの反射波の最大振幅値については概ねどの荷重域のアンカーについても適用性が確認された。
- (h) くさびタイプのアンカーに反射法を適用するにあたり、計測の条件が明らかとなった。 第一に、アンカーヘッドに塗装が施されている場合、本来受信されるべき支圧板底面 からの反射波が塗装層による減衰の影響を受けてしまう。そこで、グラインダーなど で簡易な研磨で塗装を除去することで精度の向上につながる。また、くさびタイプで はアンカーヘッドと支圧板の接触面積が大きく接触面の応力が場所によって異なる。 そのため、複数の計測点を設定し接触面の応力の平均を評価することが重要となる。 複数の計測点とは具体的には、アンカーヘッドの内周に沿ってアンカーヘッド全体を 評価することが精度の向上につながると考えられる。
- (i) 計測点を 12 点と増加させ、塗装の影響を除去し計測した、徳山ののり面では、支圧 板底面からの反射波の最大振幅値と残存緊張力の関係に線形回帰式を適用したとこ ろ、約±50 kN の精度で緊張力の推定が可能であることが示唆された。
- (j) のり面の影響を検討したところ、計測点やアンカーヘッド表面の研磨の違いによる影響を含んでいるものの、やはり、のり面によって超音波パラメータと緊張力の相関は傾向が異なることが確認された。これは、のり面によって施工年や周辺の自然環境が異なるためにアンカーヘッド自身の劣化が異なるためと考えられる。そのため、参照曲線の作成にあたってはアンカーヘッドの規格に加えてのり面ごとに分類し作成する必要性が明らかとなった。
- (k) 本研究では複数のデータが得られた E5-3 を事例検証の対象として実用化の検討を行った。ミクロ的な側面からの実用化にあたっては、参照曲線による残存緊張力の推定法を提案した。また、参照曲線による緊張力の推定にはのり面ごとの影響を受けるが、リフトオフ試験を併用することで参照曲線を作成することが可能であると考えた。
- メゾマクロ的検討においては、不健全なアンカーのスクリーニング技術が求められ、
 超音波パラメータと残存緊張力の相関をもとに、超音波パラメータの大小によって絶対的な緊張力の値を推定することはできずとも、のり面の中で相対的に不健全なアンカーを発見することができると考えられる。
- (m) マクロ的な側面からの実用化の検討として、リフトオフ試験を併用せず緊張力を評価 する手法として統計解析手法の一つであるマハラノビス距離による判別分析を提案 し、その有用性を示した。その際、各ランクを一意に決定するのでなく、各ランクへ の帰属率を検討することで、アンカーの不健全性の確率論的な検討が可能となり、現 地に合わせた有意水準を設定することで精度を向上できることが確認された。

以上のような知見を得たが、本研究によって浮き彫りになった課題もあり、以下に課題を 挙げ、今後の研究に繋げるものとする。

- (a) 基礎実験において温度変化の影響を検討する実験において課題を残した。具体的には 温度による影響を検討した試験体と緊張力の影響を検討した試験体が異なる点であ る。そのため、温度の影響と合わせて応力の場所依存の影響を受けてしまい、十分な 検討に至っていない。今後は同一の試験体で緊張力を変化させながら温度も変化させ て応力の場所依存の影響を小さくし、改めて検討する必要がある。
- (b) 原位置計測においてナットタイプの透過法の適用にはセンサの計測点が重要である ことが得られた。しかし、現状では目視で波形を確認するなど定量的な方法とはいえ ない。そこで、今後はセンサを接触させる治具の開発やセンサを斜めに配置するなど の新しい計測法について検討する必要がある。同様に、反射法についてもセンサの接 触状態が影響を及ぼすと考えられる。今後はセンサの接触状態の影響を検討し、必要 があれば接触状態が均一になるような治具を開発することを検討する。
- (c) ナットタイプの原位置計測については、十分なデータが揃わず精度の検証に至っていない。また、反射法の適用を試みたが反射法が適用困難な計測現場が多かった。今後は、さらなるデータの集積に努め、本研究で得られた知見のさらなる検証とともに、反射法の適用性について検討を加える必要がある。
- (d) くさびタイプの原位置計測結果についても、本研究で得られた知見が対象ののり面の 特有の傾向である可能性も否定できない。そこで、今後も、原位置データの集積に努 め、本研究で得られた知見の検証および本研究で扱えなかった他のアンカーヘッドに よる結果を検討する必要がある。
- (e) 原位置計測によって原位置での誤差の要因として、アンカーの施工条件に起因するものと、アンカーの劣化に起因したものに大別されると推察される。前者は施工条件の相違によって支圧板やその受圧板の材質や寸法の相違による影響である。また、後者はアンカーヘッドごとの劣化(サビ)などの影響である。また、前者についてはのり面ごとにデータを分類することで影響を小さくできると考えられる。後者の影響についても表面のサビの進行についてはのり面によって異なることが考えられる。そのため、上記の影響をいのり面ごとに分類することで小さくできるものと考えられる。しかし、これらの影響が緊張力による影響と比較して大きいものであるか、また補正は可能であるかなど、追加実験によって検討することが必要である。
- (f) マハラノビス距離による緊張力のランク判別分析では、データの正規性の検証を十分 に行うことができていない。そのため、マハラノビス距離による判別分析の信頼性が 検討されておらず、マクロ的検討に対する超音波法のアプローチの一提案にとどまる。

今後は、さらなるデータの集積に務め、データの正規性および分布について検討・検 証を行い本手法の適用性を改めて検討することが求められる。

- (g) マハラノビス距離による判別分析の検討にあたってはサンプル数が 24 本と限られた ため、2 ランクの判定に留まった。今後さらにデータが集積されることで、さらに区 分を細分化し、どの程度のランク判定まで可能であるか検討する必要がある。
- (h) 参照曲線の作成にあたって、リフトオフ試験結果による補正が必要であると考えられ るがリフトオフ試験結果の残存緊張力値に偏りがある場合、参照曲線の補正は困難で ある可能性が指摘される。そこで、今後は、リフトオフ試験によって何本程度既知の プロットを設ければ参照曲線の作成が可能となるか検討する必要がある。ここでメゾ マクロ的検討に示したように、あらかじめのり面内での相対的な健全度を評価するこ とで、データの偏りを軽減できる可能性がある。以上のことを今後さらに検討する必 要がある。
参考文献

- [1] 国立社会保障・人口問題研究所:日本の将来推計人口,Ⅱ.年齢別人口,表 2-7 年齢(3
 区分)別人口の推移と将来推計,2012.2.11.
- [2] 国立社会保障・人口問題研究所:人口統計資料集,Ⅱ.年齢別人口,表 2-17 主要国の
 65 歳以上の人口割合,2012.2.11.
- [3] 小澤一雅:社会資本におけるアセットマネジメントの導入,建設マネジメント技術, 2006年9月号, pp.7-11, 2006.
- [4] 大津宏康:地盤工学分野における維持管理とアセットマネジメントの取り組み,地盤 工学会誌, Vol. 59, No. 9, pp. 1-5, 2011.
- [5] 高羅信彦, 魚本健人: サーモグラフィー法によるコンクリート構造物の検査手法の開発, 生産研究, Vol. 54, No. 3, pp. 82-85, 2002.
- [6] 日本非破壊検査協会:超音波探傷試験 I,日本非破壊検査協会,2006
- [7] 地盤工学会: グラウンドアンカー設計・施工基準,同解説, 鹿島出版会, 2012.
- [8] 山門明雄: グラウンドアンカーの発展の経緯と提案,地盤工学会誌, Vol. 38, No. 5, pp.
 5-8, 1990.
- [9] 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し調査--,地盤工学研究発表会発表論文集,45-2, pp. 1897-1880, 2010.
- [10] 山田浩: グラウンドアンカー工法技術の進歩とその歴史(その 2)一耐久性と維持管理 一, 斜面防災技術, Vol. 35, No. 3, pp. 13-20, 2009.
- [11] 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
- [12] 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.
- [13] 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, Vol. 56, No. 12, pp. 611, 2008.
- [14] 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, pp. 91-96, 2008.

- [15] 森利弘:長期に亘る本設地盤アンカー緊張力の計測事例,日本建築学会技術報告集, Vol. 16, No. 33, pp.489-492, 2010.
- [16] 田中尚,石田孝司: 既設アンカー緊張力モニタリングシステム(Aki-Mos)による既設 アンカーへの荷重計取り付け事例報告,第46回地盤工学研究発表会 CD-ROM, pp. 1321-1322, 2011.
- [17] 中村僖良:超音波,コロナ社, pp. 1-2, 2003.
- [18] 島田義則, オレグコチャエフ, 篠田昌弘, 御崎哲一, 高橋康将, 瀧浪秀元: レーザを用いたコンクリート欠陥検出の進展, 非破壊検査, Vol. 61, No. 10, pp. 519-523, 2012.
- [19] D.G. Aggelis, D. Kleitsa, K. Iwamoto and T. Shiotani, Elastic wave simulation in ground anchors for the estimation of pre-stress, Elsevier Science, Tunneling and Underground Space Technology, 30, pp. 55-63, 2012.
- [20] D. Kleitsa, K. Kawai, T. Shiotani and D.G. Aggelis, Assessment of metal strand wire pre-stress in anchor head by ultrasonics, Elsevier Science, NDT & E International, Vol. 43, pp. 547-554, 2010.
- [21] K. Kawai, T. Shiotani, H. Ohtsu, H. Tanaka and 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.
- [22] 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,地盤工学会関西支部,地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2009, pp. 25-32, 2012.
- [23] K. Iwamoto, T. Shiotani, H.Ohtsu : ESTIMATION OF AXIAL STRESS IN GROUND ANCHORS WITH REFLECTED ULTRASONIC WAVES, EIT-J Symposium 2011 on Human Security Engineering, 2011.
- [24] 岩本勲哉,塩谷智基,大津宏康:超音波反射特性に着目したグラウンドアンカーの緊張力推定に関する研究,日本建築学会,構造物の安全性および信頼性 Vol. 7,
 JCOSSAR 2011 論文集,A 論文,664-670,2011.

- [25] 土木工学会:弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集, pp.100-104, 2004.
- [26] 塩谷智基: 地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, pp.38-43, 1998.
- [27] 腰欣司:超音波とその使い方,日刊工業新聞社, pp. 15-16, 1994.
- [28] 大野健太郎, 下薗晋一郎, 沢田陽祐, 大津政康: AE 波初動部の自動読み取りの開発に よる SiGMA 解析の改良, 非破壊検査, Vol. 57, No. 11, pp. 531-536, 2008.
- [29] 松岡宏:摩擦の物理,表面科学, Vol.24, No. 6, pp. 328-333, 2003.
- [30] 山本雄二, 兼田宏: トライボロジー, 理工学者, pp. 32-33, 2010.
- [31] T. Shiotani and D. G. Aggelis: Wave propagation in cementitious material containing artificial distributed damage, Springer, Materials and Structures, 42, pp. 377-384, 2009.
- [32] 岩崎篤, 轟章, 島村佳伸, 小林英男:マハラノビス距離を用いた判別分析による損傷同 定法(平行直行積層板の層間はく離検出法への適用), 日本機会学会論文集, No.67, pp. 1242-1247, 2001.
- [33] 結城宏信:マハラノビス・タグチ法を用いた AE 波初動部の同定, 非破壊検査, Vol. 61, No. 11, pp. 572-576, 2012.

謝辞

本論文を締め括るにあたり、本研究にご協力いただいた方々やお世話になった方々への 感謝の意を表したいと思います。

京都大学大学院工学研究科教授・大津宏康先生には、研究室に配属が決まった学部4回 生の頃から3年間にわたってご指導頂きましたことを心から感謝いたします。研究の面で は、中間発表として多くの発表の機会を頂き、常に高いモチベーションを持って研究に勤 しむことができました。私の研究が行き詰まったり迷走したりした際には、時には厳しく、 時には暖かいアドバイスを何度も送って頂きありがとうございます。また、先生からは研 究以外の面でも授業や飲み会の席などで様々なことを学ばせて頂きました。特に先生が 常々おっしゃっている、「若者は海外へ飛び出せ」・「土木技術者として社会貢献しようとす る気持ちインフラマインドを持って仕事に臨め」というメッセージは強烈に私の胸に響い ております。先生の教えを胸に抱き今後とも精進して参りたいと思います。心よりお礼申 し上げます。

京都大学大学院工学研究科准教授・塩谷智基先生には、公私にわたって大変お世話にな りました。先生とは、研究室全体のゼミとは別に何度も質問や議論をさせていただきまし た。先生のご指導のもとで本論文を書き上げるに至ったと思っております。感謝いたしま す。また、先生には多くの社会経験をさせて頂きました。日本全国、また海外に至るまで 国際学会での発表する機会や研究会には学生という立場ながら参加する機会を頂きました。 研究一色になりがちな大学院生活の中でも、社会人としての考え方や責任感、また国際人 としての心構えなど多くのことを学ばせて頂きました。深くお礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科准教授・西山哲先生には、本論文の副査を務めて頂き、的確 かつ貴重なご意見を頂きました。先生のご助言をもとに本論文をより充実させることがで きたと思っております。心より感謝致します。

京都大学大学院工学研究科助教・稲積真哉先生には研究面だけでなく生活面でも研究に 集中できる環境を作って頂きました。また、普段はあまりお話を聞く機会は少なかったか と思いますが、お酒の席などでおもしろく興味深いお話を聞かせて頂きました。深くお礼 申し上げます。

西日本高速道路株式会社の浜崎智洋様、藤原優様、柳迫信吾様をはじめとする多くの関 係者の方々には、本研究の核となる原位置計測の手配をして頂きました。また全国各地へ の計測にもご同行いただき、管理者側からの貴重なご意見やアドバイスをしてくださいま した。心よりお礼申し上げます。

日特建設株式会社の田中尚様をはじめとする多くの関係者の方々には、本研究で実施し

た基礎実験の準備・手配から実験の補助に至るまで手伝って頂きました。特に、私の段取 りが悪く実験が思うように進まなかった際には、夜遅くまで一緒に作業を手伝って頂きま した。皆様のおかげで基礎実験を遂行することができ、本論文を書き上げることができた と思っております。深く感謝いたします。

大津研究室前秘書の伊東さん、秘書の大八木さんには、出張の多かった私ですが、その 都度出張の手続きを丁寧にご対応して頂きました。心より感謝いたします。

京都大学大学院工学研究科土木施工システム分野の同回生の磯田君、太田君、木許君、 古賀君のおかげで非常に有意義な研究室生活を送ることができました。太田君、古賀君と は京都大学の入学式の日に出会い、長いもので6年間もともに大学生活を過ごさせて頂き ました。二人の勉強に対する真摯な姿に何度も刺激を受けました。また学部生の頃から勉 強の苦手な私に幾度となく救いの手をかざしてもらったことは忘れられません。本当に感 謝しております。また、磯田君、木許君とは研究室に配属されてからの付き合いとなりま したが、多くの思い出ができました。磯田君とは席が隣同士であったことや、木許君とは 同じアンカーを対象に研究を進めていることから、何度も私生活や研究の相談にのって頂 きました。本当に感謝しております。皆さんのおかげで毎日が楽しい研究室生活だったと 思います。深く感謝申し上げます。

京都大学大学院工学研究科土木施工システム分野のTaweeephongさん、奥野君、高田君、 益田君、松塚君、山本君、池永君、大澤君、熊本さん、袴田さんら先輩後輩のおかげで、 非常に有意義な研究室生活となりました。修士一回生には、飲み会、研究室旅行、野球大 会など様々なイベントを企画して頂き、研究一辺倒な研究室生活に華をそえて頂きました。 また、学部4回生とは共に中間発表や論文に取り組み、皆さんの研究に熱心な姿勢に多く の刺激を貰いました。本当にお礼申し上げます。特に、研究を共にした高田君、大澤君と は多くの思い出ができました。高田君には原位置計測を手伝ってもらい、私の無茶な指示 にも応えて頂き本当に助かりました。また、大澤君とは様々な実験を共に実施しました。 大澤君のひたむきな姿に刺激を受け、私の研究に対するモチベーションが高まりました。 研究室の先輩として、後輩共々にしてあげられたことは少ないかもしれませんが、皆様か らは多くのことを支えて頂きました。本当に感謝申し上げます。

京都大学大学院工学研究科土木施工システム分野を卒業された先輩方々にも多くのこと を学ばせて頂きました。特に、研究をともにした河合さん、後藤さんには本当に感謝申し 上げます。お二人のご指導や実験のお手伝いなどがあってこそ、修士論文を書き上げるに 至ったと思っております。また研究以外にも就職活動や私生活に至るまで人生の先輩とし てたくさんのことに相談にのっていただきました。深く感謝申し上げます。

最後に、これまでの人生を暖かく見守ってくれていた両親に感謝申し上げます。また研 究に関わって頂いたここに書ききれないほどの多くの方々、私の人生を共にした友人に感 謝致します。本当にありがとうございました。