グラウンドアンカー緊張力の原位置超音波 計測による推定手法に関する研究

# 平成 26 年 2 月 21 日

京都大学工学部地球工学科 土木工学コース

# 中井 俊博

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。

本研究では、既往の研究で適用性が示された計測手法 にもとづき、さらなる手法の改良により、原位置のアン カーを対象にした計測において、より高い精度での緊張 力推定が可能であることを示すことができた。また、現 状の維持管理状況を踏まえての評価手法の提案により、 本超音波法が実務への適用が可能なものであることを示 すことができた。

第 1	章	序	論			. 1
1.	1 砖	Ŧ究	の	了景		
1.	2 炅	E往	$\mathcal{O}^{2}$	千究		
1.	3	Ŧ究	の	丨的		
1.	4 才	に論	文	)構成		
第 2	章	超	音	:法		. 5
2.	1 趏	日音	波	景傷試験		
2.	2 趏	日音	波	÷ <sup>17)</sup>		
	2.2	2.1	反	すと透過(Re	eflection and transmission) <sup>18)</sup>	
	2.2	2.2	超	テ波法で用い	いる波のモード7	
	2.2	2.3	最	、振幅値お。	よび最大振幅比(Peak amplitude and amplitude ratio)7	
2.	3 万	を射	法			
	2.3	5.1	適	対象のア:	ンカー8	
	2.3	5.2	概	Ē		
	2.3	3.3	ア	/カーヘッ	ドと支圧板の接触面からの反射波	
	2.3	8.4	支,	三板底面か	らの反射波10	
2.	4 詐	F価	パ	ラメータの材	検討11	
	2.4	.1	ア	/ カーヘッ	ドと支圧板との接触面からの反射波(A面反射波)に	関
	す	る評	F価	パラメータ		
	2.4	.2	支,	三板底面かり	らの反射波(B面反射波)に関する評価パラメータ13	
	2.4	.3	評	Gパラメー?	タのまとめ13	
2.	5 万	を射	法	関する過言	去の知見のまとめ <sup>15)</sup> 13	
第 3	章	原	位間	計測		15
3.	1 〕	ミ験	概	÷		
3.	2	〔位	置	▶測結果		
	3.2	2.1	原	工置計測①.		
	3.2	2.2	原	工置計測②.		
	3.2	2.3	原	工置計測③.		
	3.2	2.4	原	正置計測ま	とめ	
3.	3	〔位	置	ト測結果の⇒	考察19	

# 目次

		3.3	. 1	セ	ン	サ	計	測	点	の	表	面	条	件	の	問	題	•••		••••	•••	•••	••••	••••			• • • •	••••		19	
		3.3	. 2	セ	ン	サ	の	接	触	圧	の	問	題			• • • •					•••	•••	••••	••••				••••		20	
		3.3	.3	よ	ŋ	線	<u> </u>	と	の	緊	張	力	の	差	異	に	起	因	す	る	問	題	••••					••••		20	
		3.3	.4	支	圧	板	と	P	ン	力	-	$\sim$	ツ	ド	の	相	対	的	位	置	関	係	の -	ずオ	にに	こ起	因	する	る問	題 2	1
		3.3	. 5	原	位	置	計	測	結	果	の	考	察	の	ま	と	め				•••	•••	••••	• • • •				••••		22	
第	4	章	実	用	化	の	検	討	•••	•••	••••	•••	•••	•••	•••	••••	••••	•••		•••	•••	••••			•••					••••	23
4	. 1	計	測	点	<u>~</u>	と	の	平	均	値	を	用	い	た	参	照	曲	線	で	の	評	価	••••	••••				• • • • •		23	
		4.1	. 1	P	ン	力	_	規	格	に	よ	る	分	類	と	異	な	る	の	り	面	$\sim$	のう	凡月	目性	ŧκ	関	する	る考	察 23	3
		4.1	.2	異	な	る	ア	ン	力	_	規	格	$\sim$	の	汎	用	性	に	関	す	る	考	察	••••				• • • • •		24	
4	.2	超	音	波	法	の	用	途	•••	•••	•••		••••		•••	••••				•••	•••	•••	••••					••••		25	
4	.3	閾	値	を	用	い	た	評	価		•••		•••			• • • •				•••		•••						••••		26	
		4.3	. 1	評	価	手	法	の	概	説	と	適	用	可	能	性	の	検	証			•••						••••		26	
		4.3	.2	実	務	に	お	け	る	計	測	手	法	の	提	案					•••	•••						••••		29	
第	5	章	結	論	と	今	後	の	課	題	•••	• • •	•••	•••	•••	• • • •	•••	•••	•••	•••	•••	•••			•••					••••	30

## 参考文献

謝 辞

## 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、図1-1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 成されるものであり1)、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、昭和 32 年に採 用されて以降、特に高速道路沿いの斜面においては、図1-2に示すように現在ま でに 12 万本以上のアンカーが打設されている 2)。近年、多数のアンカーが導入 から数十年を経過し、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1-3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 <sup>3)</sup>。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 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 1)」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 1999 年以降、防食性能が向上したアンカーが主 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。以 上のように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。

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 1-4 に示すように、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おり、平成 24 年度に東日本 大震災からの復興等により反転・上昇が見られたが、1990 年代のピーク時と比較 するといずれ少ない状況が続いている。したがって、今後急速に老朽化が進んで いく構造物の維持管理に十分な建設投資がなされていない現状にある。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、適切な維持管理手法の構築が 求められている<sup>4)5)</sup>。現状のアンカーの維持管理は、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る<sup>6)</sup>。特にアンカーの点検、健全性調査など の機能評価は、目視点検による頭部変状の観察が中心で、適切な測定方法が確立 されていない現状にある。一方、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。

アンカーの残存緊張力の測定方法として実用化に至っているものとしては荷 重計による計測とリフトオフ試験による計測が挙げられる。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点が挙げられる。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。また近年では、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再度引っ張る必要があり、多数のアンカーへの適用には至っ ていない。一方で、荷重計が設置されていないアンカーや新設時の導入力の確認 のために行われるのが、リフトオフ試験である。図1-5にリフトオフ試験の測定 状況を示す。リフトオフ試験では、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 ンカーの性能を精度よく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(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。

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。

#### 1.2 既往の研究

これまでにも簡便にアンカーの緊張力を測定する方法が研究されてきた。

酒井ら 7) 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<sup>8)</sup>」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。

#### 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、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、安価かつ簡便な計測に適しているといえる。 本超音波法については、塩谷らのグループ 97~160により、測定が簡便な超音波法

による緊張力の測定が提案されてきた。具体的には、河合ら ハ~11)により、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が変化するとい う課題を残した。岩本ら 12)~16) はそれを受け、透過法とは別の方法として本研究 の対象である反射法を考案し、先述した透過法も含めて基礎実験および原位置の アンカーを対象にした計測を行い、ナット型、くさび型の両者において超音波法 の適用性を示した。詳細は次章で後述するが、反射法とはアンカーヘッドから支 圧板ヘアンカー軸に対して平行な方向に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ものである。本研究ではこの反射法について、 さらに詳細な計測を行い、アンカーの残存緊張力の推定手法としての精度向上に 関する検討を行う。

本研究では、まず反射法に関して超音波データのさらなる集積を目的として、 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、緊張力と超音波パラメ ータの相関の原位置での適用性を検証する。そして、収集したデータをもとに緊 張力推定手法について考察を加える。最後に今後の展望および課題について明確 にする。

#### 1.4 本論文の構成

本論文の構成は全5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手法および評価パラメータを説明するとと もに、既往研究で得られた知見をまとめる。

第3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を検討、考察する。

第 4 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、 実用化について検討を加える。

第5章では、本研究で得られた知見および今後の展望を示す。

## 第2章 超音波法

#### 2.1 超音波探傷試験

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 20 kHz を越える弾性波(音波)と定義される。超音波は土木の分野に おいては、特に非破壊検査技術の一つとして応用され、中でも超音波探傷試験は 広く普及し実務レベルで活用されている。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。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。本研 究における超音波法は、こ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。

## 2.2 超音波法<sup>17)</sup>

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、各種境界からの反射波など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。本節では、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 て言及し、対象とする波の種類と、解析に用いる際のパラメータである最大振幅 値の解説を行う。

#### 2.2.1 反射と透過(Reflection and transmission)<sup>18)</sup>

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。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 I 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 2-1 に示すように、入射波の粒子速度、応力を vx1、σ1、透過波および反射波のそれらを vx2、σ2、vx3、σ3とすると式(2.1)の境界条件を得る。

$$\begin{cases} \sigma_1 + \sigma_3 = \sigma_2 \\ v_{x1} + v_{x3} = v_{x2} \end{cases}$$
(2.1)

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 (2.2)で表される。

$$\begin{cases} \sigma_{1} = \rho_{1}V_{1}v_{x1} \\ \sigma_{2} = \rho_{2}V_{2}v_{x2} \\ \sigma_{3} = -\rho_{3}V_{1}(-V_{1})v_{x3} \end{cases}$$
(2.2)

ここで、式(2.1)および式(2.2)より、以下の式(2.3)を得る。

$$\begin{cases} \sigma_{x2} = \frac{2\rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} \sigma_{x1} \\ \sigma_{x3} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} \sigma_{x1} \end{cases}$$
(2.3)

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(2.4)を得る。

$$\begin{cases} v_{x2} = \frac{2\rho_1 V_1}{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2} v_{x1} \\ v_{x3} = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1} v_{x1} \end{cases}$$
(2.4)

ここで、Z<sub>1</sub>、Z<sub>2</sub>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(2.3) および式(2.4)の右辺の係数は以下の式(2.5)および式(2.6)となる。

$$\tau = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \tag{2.5}$$

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \tag{2.6}$$

ここで r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<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。

## 2.2.2 超音波法で用いる波のモード

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。P波は最も速い速度で 進行し、S波と続く。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/μ sec となる。

#### 2.2.3 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(2.7)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(2.8)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 Pxは x なる距離を伝播後の音圧、Po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。

$$P_{\rm x} = P_0 e^{-\alpha x} \tag{2.7}$$

$$\alpha = \frac{\eta \varpi^2}{2V^3 \rho} \tag{2.8}$$

#### 2.3 反射法

前節で超音波法について述べたが、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通りの手法が提案されている。前述の ように、本研究では反射波法を対象にしてその適用性の検討を行う。以下に反射 法についての解説を行う。

#### 2.3.1 適用対象のアンカー

図 2-2 に示すように、実際に施工されているアンカーは大きく分けて、ナット 形状のアンカーヘッドで鋼棒を締め付けることにより緊張力を得るナット固定タ イプ(以下、ナットタイプと称す)図 2-2(a)と、円柱型のアンカーヘッド部にく さびを設け、複数のより線を導入し、引張することにより、緊張力を得るくさび 固定タイプ(以下、くさびタイプと称す)図 2-2(b)とに分けられる。今回の超音 波反射法は特例を除き、両者のタイプで有効であることが確認されているが、本 研究では特に後者のくさびタイプのアンカーを対象に論じる。ここで、両者では 超音波信号処理に関する原理は共通しているため、ナットタイプのアンカーにつ いても、今後、原位置での調査を重ねることで検討できると考えられる。

本研究の対象となるくさびタイプのアンカーは、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に、主に施工されている。詳細 には VSL タイプ、SHS タイプなどの分類があるが、アンカーヘッドの形状は類

似しているため、いずれも同様に適用対象となる。図 2-3 に各種くさびタイプの アンカーを示す。同図に示すように、許容荷重の異なる様々な種類が存在し、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 E5-3、E5-4、 E5-5、E5-7 および E5-12 と呼称されており、地域ごとに差はあるものの、E5-4 から E5-7 の間のタイプのアンカーが広く用いられている。

#### 2.3.2 概要

図 2-4 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 境界面など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。既往の研究により、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おり、実際のアンカー での適用性も検討されてきた。次節ではアンカーヘッドと支圧板の接触面からの 反射波と、支圧板底面からの反射波の2種類の反射波に関して、それらの緊張力 変化による反射特性の変動メカニズムと、評価パラメータについて述べる。

### 2.3.3 アンカーヘッドと支圧板の接触面からの反射波

図 2-5 に本手法で観測される反射波の一例として、E5-7 を対象とした 5 MHz のセンサで記録した信号波形を 20 kN、500 kN を比較して示す。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。E5-7 の場合、高さ 55 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、18.6 µsec となる。し たがって図 2-6 に示すように、繰り返し間隔がおよそ 18.6 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、各緊張力の波形を比較 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 れている。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。

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 2-7 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19)。また、前節で述べたように、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(2.6)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。

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

#### 2.3.4 支圧板底面からの反射波

ここで、改めて反射法で得られた波形を検討する。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 2-8 に示すように対象外と 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。 今回実験に用いた支圧板の厚さ 25 mm より、波が支圧板の厚さの往復にかかる 時間は 8.45 µsec であり、これらの波がこの時間間隔で観測されていることを考 慮すると、これらの波は図 2-9 に示すように、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 も先述と同様に、最大振幅値によって緊張力にともなう振幅の変化が評価できる。

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 2-10 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。 既往研究では、支圧板底面からの反射波に関しては図に示すように、アンカーへ ッドと支圧板の接触面を透過して、底面で一度だけ反射する、もっとも到達時間 の早い波(第一反射波)に着目して検討を行っていたが、これは第一反射波が緊 張力変動を反映しやすい敏感なパラメータであるからである。本研究でも、支圧 板底面からの反射波に関しては第一反射波に着目して、その最大振幅値の緊張力 増加による増加傾向を検証し、必要に応じて、着目するパラメータを第二反射波 以降の底面反射波に拡張して議論する。

これ以降、簡便のために、図 2-11 に示すようにアンカーヘッドと支圧板の接触 境界面を「A面」、支圧板とコンクリート受圧板との接触境界面(支圧板底面)を 「B面」と呼称する。また、アンカーヘッドと支圧板の接触境界面で反射する波 を「A面反射波」、支圧板底面で反射する波を「B面反射波」とする。

#### 2.4 評価パラメータの検討

## 2.4.1 アンカーヘッドと支圧板との接触面からの反射波(A面反射波)に関する 評価パラメータ

過去の実験ではA面反射波の多重反射波の内、第三反射波に着目し、緊張力と の相関を得ているが、これは反射回数を重ねるごとに境界面条件が累乗的に波に 反映されるために緊張力増加による最大振幅値の減少傾向がより顕著に表れると いう考え方に基づくものである。本研究においても、この多重反射波の緊張力増 加による傾向を詳細に検討し、着目するパラメータについて検討を加えるため、 計測点数を2点から8点に増加させて再度検証実験を行った。本実験では、境界 面条件の変化のみの要因を純粋に反映した結果を得るために、アンカーヘッドの 代わりに、荷重の偏心の影響が少ないと考えられる、図 2-12(a)に示すようなア ンカーヘッド部に見立てた中実円柱鋼材を用いた。原位置と同様の反射波を得る ために、その底部に支圧板とコンクリート部材を同様に配置し、0kNから500k Nまで、50kN間隔で単調載荷を行った。図 2-12(b)に載荷時の様子を示す。計測 は、図 2-12(c)に示すように、円柱鋼材の外周に沿って対称な 8 点で行った。図 2-13(a)(b)にA面反射波の最大振幅値の計測結果およびその8点の平均値を示す。 同図が示すように、第一反射波では、載荷荷重の増加に伴う最大振幅値の有意な 変化を確認することはできない。一方で、第二反射波から第五反射波までに関し て、その最大振幅値が載荷荷重の増加に伴い線形的に減少する傾向が確認できる。 これは、先述したように反射回数が増加することで、接触面の反射特性の変化が 累乗的に反射特性に影響したためと考えられる。近似曲線の傾きから考えると、 第 二 反 射 波 と 第 三 反 射 波 で 減 衰 の 絶 対 値 が 大 き い 一 方 、 第 四 、 五 反 射 波 は 減 衰 傾 向が少ない。これは、第四、第五反射波では反射回数と波の伝搬距離の増加によ る 波 の 減 衰 に よ り 、 全 体 的 に 振 幅 が 小 さ く な っ た た め 、 境 界 面 条 件 の 変 化 に よ る 振幅減衰の絶対量も少なくなったためであると考えられる。また、計測点ごとを 比較すると、第三、第四反射波、第五反射波では計測点ごとの観測値にばらつき が小さいのに対し、第二反射波では大きい。これは、反射を繰り返すことで波が 収 束 し て い く が 、 第 二 反 射 波 で は 得 ら れ る 振 幅 値 の 絶 対 値 が 大 き い た め 、 計 測 点 ごとの収束の度合いが大きなばらつきとなって表れているためと考えられる。以 上より、表 2-1 に A 面 からの 各 多 重 反 射 波 の 緊 張 力 推 定 の 評 価 パ ラ メ ー タ と し て の適用検討として、応力増加に伴う減衰傾向の明確さと、計測点毎による値のば らつきという観点から評価を行ったものを示す。これにより、A面からの反射波

に関しては第三反射波が適しているということが確かめられる。本研究では第三 反射波の最大振幅値を中心に、波の減衰率の異なるアンカーに対しては必要に応 じて第二、第四反射波の最大振幅値についても拡張して議論する。

#### 2.4.2 支圧板底面からの反射波(B面反射波)に関する評価パラメータ

過去の実験では、B面での反射波の多重反射波の内、第一反射波に着目し、緊 張力との相関を得ている。前節と同じ波形データに関して、B面からの多重反射 波(第一反射波、第二反射波、第三反射波)に着目し、その最大値振幅値と緊張 力の関係を図 2-14 に示す。載荷荷重の増加に伴い、最大振幅値の線形的な増加 傾向が見て取れ、特に第一反射波、第二反射波ではその傾向が顕著である。一方 で、第三反射波はその傾向が鈍化している。これは、反射回数が増えると、波の 最大振幅値が小さくなってしまうため、荷重の増加が超音波パラメータの振幅値 に反映されにくくなるためであると考えられる。また、線形近似の直線の、振幅 軸(縦軸)における切片が 0.01 を下回っていることから、応力とほぼ比例関係にあ るパラメータであるということができるため、原点を通る線形回帰式を導入する ことで、アンカータイプごとの参照曲線による緊張力評価が行いやすいパラメー タであるということができる。

#### 2.4.3 評価パラメータのまとめ

図 2-15 に、A 面からの反射波と B 面からの反射波を比較して表示したものを 示す。これにより、B 面反射波はA 面反射波に比べて荷重の増加に敏感なパラメ ータであるといえる。また、図 2-16 にA 面第三反射波とB 面第一反射波の場所 ごとの比較を示す。A 面第三反射波はB 面第一反射波に比べ、計測点ごとのばら つきが少ないことがわかる。以上の知見より、A 面反射波とB 面反射波の評価パ ラメータとしての特徴をまとめたものを表 2-2 に示す。本研究では、緊張力増加 にともなう変化特性の異なるA 面反射波、B 面反射波ともに緊張力推定に用いる パラメータとして検討する。

#### 2.5 反射法に関する過去の知見のまとめ<sup>15)</sup>

過去の実アンカーを用いた基礎実験と原位置計測で得られた知見の内、本研究 の対象である、くさびタイプアンカーへの反射法の適用に関するものを以下にま とめる。

(a) 基礎実験

- 緊張力の増加にともないA面からの反射波の振幅が減少する傾向が確認された。基礎実験ではA面第三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、最大で1300 kNの荷重域まで有意な変化傾向を得た。
- 緊張力の増加にともないB面からの反射波の振幅の増加する傾向が確認された。基礎実験ではB面第一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。
- 3. A面第三反射波およびB面第一反射波において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、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、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。
- (b) 原位置計測
- E5-7を対象に行った計測ではA面第三反射波のエネルギーおよびB面第一反 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。
- 2. E5-3 を対象に行った計測では B 面第一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。 A 面第三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 A 面反射では有意な変化が反映されなかったためと考えられる。
- 3. 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。
- 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の劣化が異なるためであると考えら

れた。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。

#### 第3章 原位置計測

#### 3.1 実験概要

本研究では、許容荷重の小さいものから順に E5-4、E5-5、および E5-7 の 3 タ イプのアンカーに関して原位置計測を行った。

超音波の計測は、図 3・1 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 120μsec 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、過去の計測では励 起周波数が 1 MHz、5 MHz および 10 MHz の図 3・2 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ていたが、今回の原位置計測では、一つのアンカーあ たりの計測点を前回の 2 点~6 点から、10 点~24 点と増やす都合で、3 つすべて の周波数での計測は困難であった。そこで、過去の計測で緊張力との最も良い相 関が得られている 5MHz のセンサでの計測を中心に据え、適宜必要に応じて 1MHz と 10MHz についての追加計測も行った。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、図 3・3 に示す、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。

ここで、原位置で得られるくさびタイプアンカーのリフトオフ試験結果の一例 として、後述する原位置計測①の新居浜地区での 282kN における、載荷荷重とア ンカー頭部の変位の関係を図 3-4 に示す。リフトオフ試験により得られる、荷重-変位グラフより、アンカーの残存緊張力や定着部・テンドン部の健全性を予測す ることが可能である。図に示すように、通常、リフトオフ試験では載荷過程と除 荷過程で異なる変位曲線を描く。本研究では、アンカーの健全性の指標の一つで ある、アンカーの残存緊張力を対象とするが、一般に残存緊張力は載荷過程にお ける頭部変位の変曲点(図における点 P)における荷重値により推定されており、 本研究においてもこの値を残存緊張力値として使用する。

### 3.2 原位置計測結果

表 3-1 に、本研究により実施した原位置計測(原位置計測①~③)の概要を示す。 以下に各原位置計測の結果について計測を実施したのり面ごとに示す。

#### 3.2.1 原位置計測①

図 3-5 に対象のり面、およびその他計測概要を示す。場所は愛媛県松山自動車 道、土居 IC から新居浜 IC の区間(KP75.2)に位置するのり面である。アンカーヘ ッドは VSL、E5-5 タイプを対象とし、計 14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、残存緊張力は表 3-1 に示したように、0 kN(引き抜けのアンカー)から 293 kN までである。本のり 面では設計アンカー力は不明であるため、現場では許容アンカー力である 549 kN をもとに、緊張力の残存割合を評価している。今回のアンカーは設計アンカー力 の 0%から 53%の残存緊張力をもつものとなる。センサは 1 MHz、5 MHz、10 MHz の 3種で計測を行った。計測点については図 3-6 に示すように、5 MHz と 10 MHz に関しては、アンカーヘッド外周に沿って対称の 10 点を計測し、1 MHz に関し ては、センサの大きさの都合によりその半分の 5 点での計測を行った。

図 3-7 および図 3-8 に A 面反射波および B 面反射波の最大振幅値の結果を示す。 同図はそれぞれ各計測点の結果およびその平均を示す。また図 3-9 に関しては得 られた波形を示す。

まず、A面反射に関して、すべての周波数において、A面第二反射波、A面第 三反射波、およびA面第四反射波の最大振幅値が大局的に見て緊張力増加により 減少する傾向が確認できる。これは過去の基礎実験で得られた知見と一致する。 特に1 MHzと5 MHzのA面第二反射に関して、その傾向が顕著に見て取れる。 B面反射に関しては5 MHzと10 MHzに関して基礎実験と同じ、緊張力増加に最 大振幅値の増加傾向が確認できる。またその傾向はB面第一反射で最も顕著であ り、B面第二、第三反射と反射回数を重ねるごとに、傾向が鈍化している。一方、 1 MHzの反射波のB面反射の結果に関しては有意な傾向は得られていない。A面 反射に関しては1 MHzで傾向が出ていることを考慮すると、B面反射波は接触面 の応力変化に敏感である、つまり計測点による値の差異が大きなパラメータであ るために、1 MHzのセンサでの計測で、計測点が少なく網羅的に計測できなかっ た影響が反映されている可能性がある。 また、周波数ごとの比較をしてみると、周波数ごとの影響はあまりなく、周波数が異なっても計測結果に一定の傾向が得られることがわかる。

こののり面に関しては、A面反射波、B面反射波ともに有意な傾向が得られたが、 緊張力ごとのばらつきは少なからず存在するために、誤差の少ない緊張力推定を 行うためには、課題が残るといえる。

#### 3.2.2 原位置計測②

図 3-9 に対象となったのり面とアンカーを示す。場所は高知県の高知自動車道、 大豊 IC 横の斜面(KP86.1)に位置するのり面であり、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 E5-7 タイプのアンカー計 5 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表 3-1 に示したよう に、小さいものから順に、348 kN、466 kN、474 kN、537 kN、および 557 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、E5-7 の許容 アンカー力 769 kN より設計アンカー力は 615 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。計測点については、図 3-10 に示すように 5 MHz と 10 MHz に関してはアンカーヘッド外周に沿って 18 点、1 MHz に関しては 6 点で行った。

図 3-11 および図 3-12 にA面反射波およびB面反射波の最大振幅値とリフトオ フ試験荷重との結果を示す。値は先述の原位置計測の時と同様、各計測点の平均 値である。まず、A面反射に関して、すべての周波数において、A面第二、第三、 第四の最大振幅値が緊張力増加により減少する傾向が確認できる。周波数ごとに 見ると、10 MHz でその傾向が特に顕著に表れている。一方B面反射に関しては、 どの周波数帯においても緊張力との相関を見出すことが難しい。しかし、今回の 計測は 300 kN を超える高荷重域のアンカーのみしか対象としていないため、低 荷重域のアンカーも含めた全体的な議論ができないために、その相関の有無の判 断が難しいところである。低緊張力のデータを加えて比較することで相関が得ら れる可能性を残しており、例えば 5 MHz のB面第一反射波の最大振幅においてど のデータでも 0.03 V以上を示していることから、他ののり面に関して 0.03 V以 下を示すのは 200 kN 以下のことが多いことを踏まえると、100 kN 以下などの極 度の低荷重のアンカー群ではないという判断は十分可能であるとして妥当である。

#### 3.2.3 原位置計測③

図 3-13 に計測概要を示す。場所は京都府綾部地区、舞鶴若狭自動車道沿いののり面(福知-20、KP69.1)で、対象となるアンカーは E5-4 タイプの計 11 本である。リフトオフ試験結果より残存緊張力は表 3-1 に示したような、0 kN から 277 kN の各値と推定されている。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 3-14 に示すように 16 点設定した。図 3-15、3-16 にA面反射波およびB面反射波の最大振幅値とリフトオフ試験荷重との結果を示す。今回は実験③と同様、アンカー本数と計測点が多いため、5 MHz のみの計測を行った。

まず、図 3-15 においてA面反射に関しては、先述の原位置計測①、②で 5 MHz の計測において有意な傾向が得られたのに比して、緊張力増加に応じた最大振幅 値の減少傾向が全く確認できない。これは、本のり面におけるアンカーの支圧板 の厚さ(30mm)が、アンカーヘッド部の高さ(60mm)のちょうど半分になっている ことにより、B面反射波とA面反射波が同時刻に重なって観測されるためである と考えられる。

次に図 3-16 において B 面第一反射波から B 面第五反射波のすべてに関して、 基礎実験同様、緊張力の増加にともなって、その最大振幅値が増加する傾向が見 られる。ただし、143 kN のアンカーに関しては極端に値が低く出てしまってお り、これは、図 3-17 に示すように、さびにより頭部状況が極度に悪かったこと に起因すると考えられる。このような計測時の表面条件による観測波への影響に ついても後述する。

#### 3.2.4 原位置計測まとめ

以下に今回の原位置計測で得られた知見をまとめる。

- E5-5 を対象に行った原位置計測①において、A面反射波の最大振幅値は緊張力の増加に伴い減少し、B面反射波の最大振幅値は緊張力の増加に伴い増加する、既往研究による知見と一致する結果が得られた。
- 2. E5-7 を対象に行った原位置計測②において、A面反射波に同様の傾向が得られた一方でB面反射波については有意な傾向が得られなかった。しかしながら、これは緊張力が 300 kN以上の高い値でのデータのみの比較であるので、

低荷重域のデータが加われば、同じく有意な傾向を示す可能性がある。

3. E5-4 を対象に行った原位置計測③において、B面反射波には第一反射波から 第三反射波まで有意な傾向が得られた。一方、A面反射波には有意な傾向が みられなかった。これは、支圧板の厚さがアンカーヘッドの高さの半分とい う特異な条件により、反射波が複数重なって観測されることに起因している と考えられる。

#### 3.3 原位置計測結果の考察

原位置では、室内の理想的環境下での実験と比較して、様々な要因により、計 測精度が低下する。以下に、原位置計測結果を受け、計測をする上で危惧される 問題について検討を加えることで、今後の実用化に向けた計測法の確立を目指す。

#### 3.3.1 センサ計測点の表面条件の問題

今回原位置にて計測を行ったアンカーはその全てにおいて、図 3-18 に示すよ うに、アンカーヘッド部が防食用の油で覆われていたため、比較的アンカー頭部 の表面条件が良好のものが多かった。しかし、中には図 3-17 に示したように、 アンカー表面がさびており、さびにより表面に微小な凹凸があるものが存在した。 本項では、アンカー表面条件の計測波形への影響を検討する。図 3-19 に前述し た原位置計測③福知-20の143kNのアンカーにおいてさびありの部分とさびなし の部分で計測した記録波形を比較して示す。同図のように表面にさびが存在する 場合は計測波形の全体的な振幅が明らかに小さくなっていることがわかる。この 原位置計測③の 143 kN のアンカーに関しては、表面条件の影響から B 面反射波 の値が小さく出いる箇所が多く存在し、全計測点の平均値も小さくなっていたも のと考えられる。このように表面条件が明らかに悪い場合は計測点を避けること を余儀なくされる。中程度の表面劣化の場合は、波の振幅が小さくなるものの、 その B 面反射波が大きくなる場合などは、貴重な計測点のデータとして使用する ことが望まれる。この場合は表面条件によって波の振幅の絶対値が小さくなって いるため、A面第一反射波の通常に比べた減衰率に応じて補正をすることが望ま れる。また、今回の原位置計測ではそれほど多くはなかったが、アンカー表面条 件が極端に悪いアンカーが多いのり面での計測では、計測点ごとに第一 A 面反射

波の最大振幅値を用いた、各反射波の最大振幅値の正規化が必要であると考えられる。

#### 3.3.2 センサの接触圧の問題

本超音波調査では、原位置にて調査員によりセンサ探触子をアンカーヘッドに 接触させて計測を行うため、計測員自身のセンサの押しつけ圧や、計測員ごとの 感覚の違いによる計測値の変動が危惧される。そこで、センサの接触圧について 検討する。図 3-20 に、同一計測点において、センサを置いただけの場合(押し つけ圧力なし)と、センサを軽く押しつけた場合と、強く押しつけた場合の3通 りの場合に関しての観測波形を示す。これを見ると、センサを置いただけでは、 波の振幅が不十分だが、軽く押しつけた場合と強く押し付けた場合がほぼ同じ波 形で B 面第一反射波の最大振幅値も概ね同じ値を示している。したがって、セン サの接触圧は計測の際に観測データに大きく影響しないと考えられる。

#### 3.3.3 より線ごとの緊張力の差異に起因する問題

本研究対象のくさびタイプのアンカーヘッドは複数のより線によって緊張力 を与えているが、原位置では図 3-21 の模式図に示すように、それらすべてが均 等の緊張力を有していない可能性が考えられる。そこで E5-4 タイプのアンカー により線ごとの荷重を計測しながら載荷を行った。計測方法は図 3-22 に示すよ うに、各より線穴4か所にくさびをかました金属棒を挿入し、4本の金属棒を同 時に載荷するとともに、金属棒に取り付けたひずみゲージで金属棒のひずみを測 定することで、荷重の偏りを測定した。表 3-2 に各金属棒のひずみ量を、図 3-23 にその時の B 面 第 一 反 射 波 の 最 大 振 幅 値 を ア ン カ ー ヘ ッ ド 上 に 計 測 点 ご と に カ ラ ーマップで表示したものを示す。この結果より、金属棒のひずみが大きい箇所(荷 重が大きい場所)付近でB面反射波が大きく観測されている傾向がわかる。また、 本実験では 4%程度のわずかな荷重の差異であっても微小な応力分布の差異が生 じ、それが評価パラメータに大きく反映されている。原位置においても、各より 線 どうしで 緊 張 力 の 差 異 が 全 く な い 状 況 は 考 え に く く 、 理 論 上 は 、 支 圧 板 と テ ン ドンが完全に垂直に配置されない限りは荷重の偏心が生じてしまうと考えられる。 最 小 で も 、ア ン カ ー ヘ ッ ド 外 周 に 位 置 す る よ り 線 の 本 数 分 の 計 測 点 数( E5-4 で は 4 点、E5-7 では 6 点など) での計測をすることが望まれる。

#### 3.3.4 支圧板とアンカーヘッドの相対的位置関係のずれに起因する問題

支圧板への応力伝達の問題から、アンカーヘッドは支圧板の中央に位置してい ることが設計上望まれるが、原位置でのアンカーにおいては施工時に支圧板の完 全な中心にアンカーヘッドが位置していることは希であり、図 3-24 に示すよう に、支圧板とアンカーヘッドの相対的位置関係が中心からずれていることが多い。 支圧板には、各より線を通すために確保された穴が中央に開いているが、前述し た支圧板とアンカーヘッドのずれにより、この穴とアンカーヘッドの相対的位置 関係がずれる。これにより、図 3-25 の模式図に示すように、計測値にばらつき が生じる可能性が考えられ、以下にこの点について検討する。

図 3-26 に前述した原位置計測③福知-20ののり面に関して、アンカーヘッドと 支圧板の穴の位置関係を示す。これは、アンカーヘッドの支圧板の端からの距離 と、支圧板の穴の直径から求めたものである。支圧板の穴の直径に関しては、原 位置では目視で確認できないため、本研究で用いた超音波計測機器を使用し、図 3-27 に示すように、支圧板側面から、穴の位置する支圧板中心部に向かって波を 励起し、反射する波の到達時間から推定したものである。図 3-26 よりアンカー ごとに、ずれ具合に差があることが見て取れる。こののり面ではアンカーヘッド の外周16点だけでなく、その内周16点も合わせた計32点での計測を実施した。 その各点における B 面第一反射波の最大振幅値を先ほどの図 3-26 にカラーマッ プで表示したものを図 3-27 に示す。図の各点における小円の直径は、実際のセ ンサ(5 MHz)の超音波の送信(受信)部と同じ縮尺で表示したものである。こ の図をみると、支圧板の穴が直下に位置する計測点では、青色の表示、つまりB 面反射波が観測されていないことが読み取れる。これは、支圧板の穴が直下にあ る計測点では、図 3-29に示すように、アンカーヘッド下が空気層になるために、 底面に向けて送信された波は、アンカーヘッドと空気層の固有インピーダンス値 の差から強く反射するため、B面まで到達しないからであると考えられる。穴が 大 き く ず れ て い る 場 合 は 外 周 に 沿 っ て 計 測 を 行 っ て い て も 計 測 点 直 下 に 穴 が 位 置 する状況が生じる。仮に緊張力が高いアンカーでも、アンカーヘッドのずれによ り、このように直下に穴の空気層が位置する計測点では B 面反射波は小さく、A 面反射波は大きく観測されるため、計測値に大きなばらつきを生む要因の一つに なると考えられる。また、図 3-30 に、室内において、E5-7 タイプのアンカーに

関して、同じ 300 kN の載荷条件において、アンカーヘッドの相対的位置を 0 **mm**(ずれなし)、5 mm、10 mm と変化させた時のそれぞれにおける各計測点の B 面第一反射波の最大振幅値の値を示す。これより、アンカーヘッドのずれが大き くなるにつれて各計測点での観測値のばらつきも大きくなることがわかる。また、 ずれが大きくなるにつれ、波の最大振幅値も大きくなっていることから、この値 のばらつきは、直下に穴がある位置での計測の要因に加えて、A面でのアンカー ヘッドと支圧板の接触面の形状が非対称になることによる、応力分布の偏りに起 因するものであると考察できる。また、図 3-31には、福知-20の5 MHzのデー タについて、この支圧板の穴の影響を除外するために、直下に穴が位置する計測 点を除外して平均値をとり直した、B面第一反射波の最大振幅値の緊張力との相 関を、除外前のものと比較して示す。これらを比較すると、穴の位置の値の除外 後は線形近似の相関係数が上昇していることから、穴の位置の除外は精度向上に 有効であると考えられる。しかし、実用計測において穴の位置を詳細に考慮する 手法は、その労力に比べて得られる精度の向上のプロフィットが少ないというこ ともできる。実務においては、アンカーヘッドのずれ具合が目視ですぐにわかる 計測治具を用いて、ずれている側の計測点 2、3 点を除外して、できる限りアン カーヘッドの外側に沿って計測するという手法が最も効率的かつ実務的であると 考える。

#### 3.3.5 原位置計測結果の考察のまとめ

以下に原位置計測結果の考察のまとめを記す。

- アンカーヘッドの表面条件がさびなどにより劣悪である場合、波の振幅値が 小さくなる。ただし、A面第一反射波の振幅値を用いて補正することは可能で ある。
- センサの接触圧は通常に使用している限り、特に計測結果に影響を及ぼさない。
- 各より線の緊張力の差異が、計測結果に影響する。その影響を緩和するため
  に、計測点は最低でも外周のより線本数と同じ数以上は必要である。
- アンカーヘッドの支圧板との相対的な位置関係が計測結果に影響する。穴の 位置の影響を軽減するために、できるだけアンカーヘッドの外側に沿って計 測することが望まれる。

## 第4章 実用化の検討

本章では、計測結果から得られた知見をもとに、超音波反射法による緊張力推定手法の実用化を検討する。

#### 4.1 計測点ごとの平均値を用いた参照曲線での評価

原位置での実験結果から緊張力推定を行うために、反射波の最大振幅値と緊張 力の関係を示す回帰式の導入が必要となる。本研究では、原位置計測で安定して 増加傾向が示された、B面第一反射波の最大振幅値に関して、この後の議論を行 う。既に前章までにおいて、計測結果を線形近似を用いて評価検討しているが、 垂直荷重と超音波パラメータの相関について再度確認し、回帰式の種類を決定す る。既往の研究では、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B面からの反射波の最大振幅値が線形的に増加することが検証された。この検 証結果と、垂直荷重に比例して真実接触面積が増加するという知見とを合わせて 考えることで、垂直荷重とB面反射波の間に線形関係があると推測された。加え て、第2章で前述した本研究での基礎実験結果からも垂直荷重とB面反射波に相 関の高い線形関係が確認されている。よって計測点ごとのB面第一反射波の最大 振幅値の平均値と緊張力の線形関係を利用し、回帰式の導入を行う。

#### 4.1.1 アンカー規格による分類と異なるのり面への汎用性に関する考察

表 4-1 にくさびタイプのアンカーヘッドに関する既往研究での計測も含めた全 計測の概要を示す。同表に示すように、E5-4、E5-7、E5-12 などについては過去 に同じタイプのアンカーについて計測を行っており、回帰式の導入に際しては、 これら既往研究で行われた計測のデータも用いることが望ましい。しかしながら、 計測に使用するセンサ(センサ径)を途中で変更した都合により、変更前後でデ ータの互換性が失われているという問題がある。(具体的には、センサ径が大きい 方が B 面反射波が小さくなる傾向がある。これは、センサ固有の問題である可能 性が高く、実用化に際しては同一規格のセンサを用いる必要があると考えられる。) そこで、本項ではセンサ変更後のデータに絞り、検討を加える。図 4-1(a)に回帰 式の導入に用いる計測データのB 面第一反射波の最大振幅値と緊張力との関係を まとめて示す。同図の E5-7 や E5-3 では、アンカーヘッドの規格と、参照曲線(線 形近似直線)の勾配に対応関係が見られる。E5-4 とそれに形状寸法の類似した E5-5 に関しても、E5-7 や E5-3 ほどではないが、その参照曲線の勾配が一定の範 囲内におさまっていることがわかる。これより、同じアンカー規格であれば、施 工場所、条件に大きく左右されずに、異なるのり面であっても、一定の勾配をも つ線形近似直線を参照曲線として用いることができると考えられる。

#### 4.1.2 異なるアンカー規格への汎用性に関する考察

前項において、緊張力と超音波パラメータの参照曲線の勾配は、のり面ごとの施工・地盤条件によらず、近しい値をとることがわかった。しかしながら、アンカー規格が異なると、参照曲線の勾配は異なる。本項では、緊張力(荷重)ではなく、応力に着目し、全アンカー規格に共通したアプローチを検討する。具体的には、緊張力を、A面におけるアンカーヘッドと支圧板の接触面積で除した、平均応力(kN/cm<sup>2</sup>)を用いる。

表 4-2 に先述のアンカーの寸法とA面における接触面積(アンカーヘッド面積 から支圧板の穴の面積を引いたもの)を示す。この接触面積の値を用いて、図 4-1(a)をA面での平均応力により表示し直したものを図 4-1(b)に示す。先ほどに 比べてアンカーヘッドの各々の規格間で、線形近似直線の勾配が近づいているこ とがわかる。これは、超音波パラメータが、応力に依存して増減するものである という性質から説明できる。熊本と山口のデータが多少小さめに出ているが、こ れらはこの中では最も初期の計測であるため、3章で前述した、センサ配置の影響 (外端に沿って計測)、表面のさびの影響などにより、反射波が観測されにくい 状況であった可能性がある。平均応力による評価はイレギュラーな施工がされた アンカーや、ナットタイプアンカーの緊張力推定にも応用できる可能性があると 考えられる。以上より、本項で得られた知見をまとめる。

- アンカー規格が同じであれば、のり面固有の条件によらず、緊張力と B 面第 一反射波の最大振幅値に共通の参照曲線(線形近似直線)を用いることがで きる。
- アンカー規格が異なっている場合でも、緊張力の代わりに平均応力を用いる ことで、全アンカー規格に共通の参照曲線を導入できる可能性がある。

#### 4.2 超音波法の用途

図 4-2 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。現状はこれらの検討に際しては、主 に目視点検が行われているが、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。この際に本超音波手法を適用することで目視点検よりも高い精度で残存緊 張力の推定が可能となる。

そして、これらの多数ののり面での検討の結果、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 力が測定されている。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。この健全 性調査で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。のり面全体の安 定性検討の際には、高い精度で広範囲に評価するためにより高いデータ密度が望 まれるが、現状では、コスト、時間の関係でリフトオフ試験を行うのは全アンカ ー本数の 10%程度にとどまる。残りの 90%を一定水準の精度で容易に評価するこ とができれば、多数の計測箇所でのデータによる補完が可能になり、より高い精 度でののり面の評価が可能となる上、超音波計測の精度次第では、現状のリフト オフ試験の本数を減らし、計測時間の短縮化を図ることも可能である。

前節で検証したようにアンカータイプが類似していれば、超音波計測の値をの り面ごとの共通の絶対値として評価に用いることも可能であるが、のり面の健全 性調査の段階では、リフトオフ試験結果により超音波パラメータの参照曲線の傾 きに補正を加えることで、さらに精度の高い緊張力推定が可能になると考えられ る。

さらに、健全性調査を実施する際には、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 を対象とした検討が行われる。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が、本検討に際しても、超音波計測を用いるこ とで、あらかじめアンカーの健全度を推定し、マクロ的に優先順位づけを行った 上で、リフトオフ試験を実施することで、より効率の良い試験が可能となると考 える。以上の内容から、以下に超音波手法の適用が期待される場面をまとめる。 1. アンカー維持管理における、初期点検、日常点検、定期点検において、目視

- での点検に加えて本手法を適用することで、追加健全性調査の対象となるの り面のスクリーニングをより精度高く行うことが可能となる。
- 2. 一のり面を対象とした健全性調査に関して、現状のリフトオフ試験と併用して本手法を適用することで、リフトオフ試験を実施していない箇所のデータ補完によるのり面地山評価の精度向上が可能となるとともに、必要となるリフトオフ試験本数の減少に貢献することで、計測時間の短縮化が可能となる。加えて、事前に超音波計測を行い、リフトオフ試験箇所の優先順位づけを行うことで、試験の効率化に寄与することが可能になる。

前節で述べたように、超音波計測手法により、そのB面第一反射波の最大振幅値 を評価に用いることで、前述の適用場面 1、2 ともに十分適用可能であると考え られる。次節では、本手法に加えて新たな手法として、計測点の平均ではなく、 平均をとる前の、各計測点の値に着目し、閾値を用いた評価手法を提案すること で、より実用度の高い超音波手法の確立を目指す。

#### 4.3 閾値を用いた評価

#### 4.3.1 評価手法の概説と適用可能性の検証

前節 4.1 では、アンカー評価に用いる指標として、形状寸法の類似したアンカ ータイプごとに各計測点の平均値に線形回帰式を導入することで、残存緊張力の 推定を行った。本節では、超音波試験のより実用度の高い適用手法として、計測 点ごとの各値に着目し、閾値による区分を導入した評価手法を提案する。前節ま では、超音波パラメータは、複数計測点の平均値を用いてきた。しかし、特にB 面反射に代表されるパラメータは緊張力変化に比較的敏感であるというメリット の反面、計測点ごとのばらつきが大きくなるというデメリットが存在し、平均値 での議論では、3.3 節で考察したように、荷重が極端に集中している場合に、そ の計測点を計測の際に拾うか否かで平均値に大きなばらつきが出てしまう可能性 がある。

図 4-3 に、前述した、原位置計測③(福知-20)でのB面第一反射での全計測点 の値を表示する。このグラフを見ると、計測点ごとの値のばらつきが大きいアン カーと小さいアンカーがあることがわかる。これは、前述したように、より線ご との緊張力の差異という力学的な偏りと、アンカーヘッドのずれという幾何的な 偏りによる、境界面における応力分布のばらつきによるものであると考えられる。 ここで、図 4-4(a)に 132 kN と 239 kN のアンカー結果を抽出したものを示す。 132 kNのリフトオフ試験結果のアンカーに関しては、最小値は 0.015 V なのに 対し、最大値は 0.353 V、標準偏差値は 0.086 V、一方、 239 kN のリフトオフ試 験結果のアンカーに関しては、最小値は 0.024 V、最大値 0.125 V、標準偏差値 は 0.026 V と 132 kN のアンカーは 239 kN のアンカーに比べて計測点ごとの値 のばらつきが大きい。これは、先述したように、支圧板の穴のずれや、より線ご との緊張力の違いにより、132 kN のアンカーの方が、境界面でのミクロ的応力 分布に偏りがあるからであると考えられる。(実際に、132 kN と 239 kN のアン カーの中心位置からのずれは、13 mm、8 mm と、132 kN の方が大きいという計 測 結 果 が あ る 。) こ の 2 つ の ア ン カ ー は 実 際 の 緊 張 力 に 107 kN の 差 が あ る に も か かわらず、B面第一反射波の最大振幅値の計測点ごとの平均値は、図 4-4(b)に示 すように、ほぼ同じ値を示してしまい評価が難しい。これは、平均値では 132 kN のアンカーの部分的な偏心による荷重が集中した計測点の情報を、平均値という 指標ではでは過大評価してしまうからであると考えられる。ここで、もう一度、 図 4-4(a)の値を分析してみると、132 kNのアンカーで 0.05 V を超えている計測 点は2点しかないのに対し、239 kNのアンカーはその計測点のほとんどが 0.05 V を超えており、その最小値も大きくなっていることがわかる。これは、緊張力が 大きくなれば、偏心により応力が小さかった計測点での応力も全体的に底上げさ れることによるものであると考えられる。この事実より、ある閾値を超える計測 点が全計測点のうち何割を占めているかを評価することで、平均値での評価の際 に過大評価されていたと考えられる偏心の影響を、軽減した緊張力推定ができる 可能性があると考えられる。そこで、閾値を 0.02 V、0.05 V、0.1 Vの3種類に 関して、全計測点数(x0)に占める、その閾値以上の値が計測された計測点数(x1) の割合 x1/x0をそれぞれのアンカーに関して検討したものを図 4-5に示す。まず、 閾値を 0.02 V に設定した時は閾値が低すぎてその大部分の計測点で閾値を超え

る値がえられるため、x1/x0の値はどの緊張力でも1に近い値を示してしまう。 実際に先述の議論の中で取り上げた、132 kN と 239 kN に関しても同じ値1をと り、その差異を評価できない(図の赤点)。一方、閾値を 0.1 V に設定した時は、 今度は閾値が高すぎるために全体的に低い値を示し、差異の検討が難しく、132 kN と 239 kN を比較しても、132 kN の方が大きな値をとってしまっており、 偏 心の影響を軽減できていない。他方、閾値をそれらの間の 0.05 V に設定した時は、 緊張力の増加に伴い、x1/x0の値が増加する傾向が得られ、132 kNと239 kNに ついても、132 kNが 0.16、239kNが 0.71 と、緊張力に応じた変化がよみとれる。 これより、閾値は 0.05 付近の採用が有効であることがわかる。図 4-6 に閾値を 0.04、0.05、0.06と変化させたものを示す。いずれも同様に低緊張力から高緊張 カにかけての段階的評価が可能であることがわかる。また、図4-7にこれら3つ の閾値での値の平均を示す。また、図 4-8 に平均値での評価とこの手法を用いた 評価の比較を示す。これより、平均値を用いた評価の際には同じパラメータの値 で推定緊張力に大きな誤差があったのに比べ、より高い精度での緊張力推定が可 能であると判断できる。また、この手法を前節で比較に用いた新居浜地区の E5-5 タイプと室内実験の E5-4 タイプにも用いた結果を図 4-9 に示す。閾値は前述し た福知-20の時と同じ、0.04 V、0.05 V、0.06 V で図にはその閾値の時の x1/x0 の平均値を示す。また、図 4-10 に全 2 測点の平均値を用いた評価手法の際との 比較を示す。この結果より、新居浜地区の E5-5 タイプおよび、室内実験の E5-4 タイプともに、閾値を用いた本手法が有効であるとわかる。また、これら3種の 計測の結果を同時に表示したものを図 4-11 に示す。これにより、閾値を用いたパ ラメータ x1/x0 は、のり面ごとのばらつきが少なく、のり面ごとの影響を検討せ ずに絶対値として評価可能なパラメータであるといえる。これらの結果に線形近 似により、回帰式を導入し、その回帰式にもとづいて緊張力を推定した結果を、 表 4-3 に示す。これをみると、ほとんどの計測点で概ね誤差±100 kNの範囲で推 定が可能である。また、100 kN以下の低緊張力に関しては、±30 kNの精度での 推定が可能となっている。これらの推定誤差の絶対値の平均は 52 kN、標準偏差 は 37kN である。また、表 4-4 には平均値を用いて評価したの推定緊張力を、ま た、図 4-12 には平均値を用いて評価した緊張力と、閾値を用いて評価した緊張 力との比較を示す。平均値用いた評価での推定緊張力の誤差の絶対値の平均は67 kN、標準偏差が 70 kN であるので、閾値を用いた評価はより精度の高い緊張力

推定が可能な手法であるといえる。

#### 4.3.2 実務における計測手法の提案

前節で閾値を用いた評価手法の有用性を確かめることができた。この手法は、 閾値を超えているかどうかの判断のみとなるので、より実務に適した手法である ということができる。具体的には、今回の計測で実際に用いた可搬型超音波探傷 器(Pocket UT)の計測時画面において実際に目視により、B面第一反射波の振 幅を確認し、閾値を超えている計測点がどの程度の割合であるのかを計測員が把 握する、比較的簡易な作業となる。全計測点の平均値をとる手法では、作業の効 率化には、追加の計測機器、プログラムや手法の改善が望まれるのに比較して、 より簡便かつ実用的であり、本研究の目的に合致する。今回の計測では、全波形 を記録し解析に使用するために、計測機器が記録可能な最大振幅値を受信波形の 振幅値が越えないよう(サチュレーションが生じないよう)、ゲイン値を低く設定 していたために B 面第一反射波の振幅値は小さく出ているが、実際の計測時には ゲイン値を上昇させることで、十分目視できる範囲で閾値を超えているかどうか の判断が可能になる。今回本手法の検討に用いたアンカー3種類(E5-4、E5-5を 含む)に関しては B 面第一反射波の最大振幅値の閾値として 0.05 V 付近の値を 用いることで有効であることがわかった。(ただし、この値は今回の使用計測機器 において Gain 値=-6 で計測を行った値である。) ほかのタイプのアンカーについ ても閾値の検討をすることで、本手法が適用可能であると考える。

## 第5章 結論と今後の課題

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 カの評価手法として超音波法について検討した。以下に本研究で得られた成果を 列挙する。

- 原位置計測において、一つのアンカーあたりの計測点を増やしたことにより、より精度の高いデータを得ることができた。
- 超音波試験による計測値にばらつきをもつ原因を特定することにより、計 測法の改良を提案することができた。具体的には、より線ごとの緊張力の 差異を軽減するために、計測点数をより線本数以上にすること、アンカー ヘッドのずれによる影響を軽減するために、アンカーヘッドのできる限り 外周に沿って計測することが必要であると考えられる。
- データサンプルの少なさから、参照曲線の作成にはのり面ごと及びアンカー規格ごとの分類が必要であると結論付けられていた既往の研究と比較して、のり面が異なっても一定の線形近似回帰式により評価可能であり、さらに平均応力を用いることで、全アンカー規格に共通した参照曲線の作成が可能であることを示すことができた。
- 4. より実務に有効な手法として、閾値を用いた評価を提案し、平均して±50kNの精度にての緊張力推定が可能であることがわかった。

以下に今後の課題を示す。

本研究での未検討の事項として温度変化による影響の問題がある。既往の研究 <sup>15)</sup>により、外気温の変化によるアンカーヘッド部の温度変化の超音波計測への影響の可能性が指摘されている。これは温度上昇にともなうアンカーヘッド部の微 視的な膨張により、境界面における応力が増加し、仮想的に高緊張力状態が発生 する可能性があると考えられるからである。本研究での原位置計測はすべて冬季 に実施したため、外気温変化による影響の検討には至らなかったが、今後は加熱 器具を用いて異なる温度環境の下で、追加計測を行うことにより温度変化の考察 を行う必要があると考えられる。

今回はくさびタイプのみの検討にとどまった。今後、ナットタイプのアンカー についても、過去の計測結果の解析と原位置でのデータ集積に努めることで、適 用可能性の検証を行っていきたいと思う。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10]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.

[11]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.

- [12]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.
- [13]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.
- [14] 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.
- [15] 岩本勲哉,塩谷智基,大津宏康:グラウンドアンカー緊張力の超音波による非 破壊評価
- [16] 岩本勲哉,塩谷智基,大津宏康: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
- [17] 中村僖良:超音波,コロナ社, pp. 1-2, 2003.
- [18] 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.

[19] 松岡宏:摩擦の物理,表面科学, Vol.24, No. 6, pp. 328-333, 2003.
#### 謝辞

最後になりましたが、本論文を作成する上で、お世話になった方々に感謝の意 を表します。

まず研究生活の場所を提供していただくと共に、ご多忙の中においても熱心に 指導していただいた京都大学・大津宏康教授に心から感謝いたします。ゼミの場 におきましては、研究を進める中で自分の研究の方向性を考え直すきっかけとな る的確なご指摘を度々いただきました。心より厚くお礼申し上げます。

京都大学・塩谷智基准教授には、本研究に関して多岐にわたってご指導してい ただきました。ご多忙にもかかわらず、密に指導していただいたこと、深く感謝 いたします。本論文の作成にあたりましても、先生の的確なご指導により書き上 げることができました。心より感謝申し上げます。

京都大学・木元小百合准教授には、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。先生のご助言により、本論文をより充実したものとする ことができました。心より感謝致します。

京都大学・大島義信准教授には、本研究における室内実験の手配をしていただ きました。実験や計測手法に関するご助言もいただき、本研究に生かすことがで きました。心より感謝申し上げます。

西日本高速道路株式会社の藤原優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。

また、大津研究室の先輩方、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、特 に高田さんと大澤さんには、同じ系列の研究をしている先輩として、研究に行き 詰まった時いつも的確な助言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、刺激し合いながら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、本研究だけに留まらず、大学 で勉強できるという環境を与えてくださった両親をはじめとする家族のおかげで あります。心から感謝の意を表します。

33

#### 表2-1 A面多重反射波の評価パラ メータとしての適用検討

	応力の増加にともなう 値の減少傾向がみられ るか	計測点毎の値のばら つきがあるか
A面第一反射波の最大振幅値	×	少ない
A面第二反射波の最大振幅値	0	ある
A面第三反射波の最大振幅値	0	少ない
A面第四反射波の最大振幅値	Δ	少ない
A面第五反射波の最大振幅値	Δ	少ない

#### 表2-2 A面反射波とB面反射波の最大振幅値の 評価パラメータとしての適用検討

	荷重増加による変化 傾向	傾向の顕著さ	計測点毎の値の ばらつき
A面反射波の最大振幅値 (第二、第三、第四)	荷重増加により線形 減少	0	小さい
B面反射波の最大振幅値 (第一、第二)	荷重増加により線形 増加	Ø	大きい

表3-1	原位置計測①~	・③の概要
------	---------	-------

	地区	対象のり面	アンカー規格	リフトオフ 本数	超音波計 測本数	計測点	表面状態
原位置計測①	愛媛県新居浜	松山自動車道 KP75.155~75.255	VSL <b>E5-5</b>	15本	14本	1MHz:5点 5,10MHz:10点	良好、紙やす りで研磨
	残存緊張力:0、11、16、53、146、170、187、192、206、235、255、282、290、293 kN						-
原位置計測②	高知県大豊	高知自動車道大豊 IC裏	VSL <b>E5−7</b>	5本	5本	1MHz:6点 5,10MHz:18点	良好、紙やす り、グライン ダーで研磨
残存緊張力:348、466、474、537、557 kN							
原位置計測③	京都府綾部	舞鶴若狭自動車道 (福知−20)KP69.10	SHS <b>E5−4</b>	15本	11本	5MHz:16点	良好、紙やす り、グライン ダーで研磨
残存緊張力:0、68、112、132、143、151、193、239、243、252、277 kN							

表3-2 金属棒のひずみ量(E5-4、200kN載荷時)

	場所①	場所②	場所③	場所④
金属棒ひずみ(2点平均)	2552 με	2603 με	2576 με	2656 με
ひずみ量より算定した荷重	48.9 kN	49.8 kN	49.4 kN	50.9 kN

# 表4-1 くさびタイプ全計測概要

	規格	計測日	計測 本数	計測点	使用セン サ径(mm)	備考
	E5-4	2011/10/03-08	-	4	15(旧)	
基礎実験	E5-7	2011/10/03-08	-	4	15(旧)	アバットメントによる試験
	E5-12	2011/10/03-08	-	4	15(旧)	
	E5-7	2011/11/25	4	2	15(旧)	
ШП	E5-12	2011/11/25	2	2	15(旧)	計測点不足
佐賀	E5-3	2012/9/18-21	9	6	15(旧)	Gainが他と異なる
熊本	E5-3	2012/9/26-27	6	6	10(新)	ー部ジョイントプレート型の施工
山口(徳山)	E5-3	2012/10/15-16	11	12	10(新)	
大阪	E5-1	2012	4	12	10(新)	頭部の損傷が激しい
愛媛(新居浜)	E5-5	2013/11/14-15	15	10	10(新)	※本論文内原位置計測①
高知(大豊)	E5-7	2014/1/17	5	18	10(新)	※本論文内原位置計測②
京都(福知−20)	E5-4	2013/12/3	11	16	10(新)	※本論文内原位置計測③
愛媛(新居浜)	E5-12	2014/1/16	5	24	10(新)	
	E5-4	2014/1/18	-	16	10(新)	各より線にかかる荷重も測定
	E5-7	2014/1/18	-	12	10(新)	支圧板の穴がない場合
室内実験	E5-7	2014/1/18	-	12	10(新)	穴ずれ0mm、20mmで各々実施
	E5-7	2014/1/18	-	12	10(新)	穴ずれ0mm、5mm、10mmで 各々実施
	円柱鋼材	2014/1/18	-	8	10(新)	2.3.4で前述

# 表4-2 各アンカーの情報

	規格	アンカーヘッド直径 (mm)	支圧板の穴の直径 (mm)	A面におけるアン カーヘッドと支圧板 の接触面積(cm2)
熊本	E5-3	75	50	25
山口(徳山)	E5-3	75	50	25
京都(福知−20)	E5-4	88	65	27.6
室内実験E5−4	E5-4	95	70	32.4
愛媛(新居浜)	E5-5	95	70	32.4
高知(大豊)	E5-7	106	73	46.37
室内実験E5-7①	E5-7	110	0	94.99
室内実験E5-7②	E5-7	110	70	56.52
室内実験 (円柱鋼材試験体)	円柱鋼材	49	0	17.5

表4-3 リフトオフ結果と閾値を用いた 評価の推定値の比較

リフトオフ	超音波法による	推定値-リフト
試験結果	推定値	オフ試験結果
0	0	64
0	0	0
0	0	0
11	0	-11
16	0	-16
50	19	-30
53	32	-21
68	79	11
100	79	-21
112	45	-67
132	79	-53
143	0	-143
146	222	76
150	109	-41
151	185	34
170	222	52
187	119	-68
192	159	-33
193	275	82
200	139	-61
206	198	-8
235	113	-122
239	283	44
243	370	127
250	276	26
252	357	105
255	317	62
277	387	110
282	212	-70
290	222	-68
293	212	-81
300	333	33
		標準偏差:37

#### 表4-4 リフトオフ結果と平均値を 用いた評価の推定値の比較

リフトオフ	超音波法による	推定値-リフト
試験結果	推定値	オフ試験結果
0	7	7
0	63	63
0	8	8
11	1	-10
16	7	-9
50	44	-6
53	89	36
68	140	72
100	97	-3
112	110	-2
132	226	94
143	85	-58
146	297	151
150	224	78
151	129	-21
170	270	100
187	190	3
192	260	68
193	311	118
200	187	-13
206	122	-113
235	225	-14
239	483	240
243	241	-9
250	562	310
252	192	-63
255	403	126
277	160	-122
282	201	-89
290	216	-77
293	277	-23
300	388	38
		標準偏差:70

(単位:kN)

(単位:kN)





図1-1 グラウンドアンカーの概要

図1-2 アンカーの施工実績



図1-3 アンカーの損傷事例(アンカーの引き抜け)



### 図1-4 建設投資額の推移(土木分野)



図1-5 リフトオフ試験状況



図2-1 境界面に垂直に入射した縦波の透過と反射



(a)ナットタイプ (b)くさびタイプ

図2-2 アンカータイプの大別



E5-3







#### 図2-5 緊張力ごとの観測波形の例(E5-7の5MHzセンサの場合)



図2-6 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



図2-7 接触の模式図



図2-8 波形データ



図2-9 支圧板底面での反射波



図2-10 反射のメカニズム



### 図2-11 境界面の呼称



(a)円柱鋼材



(b)載荷時の様子



(c)計測点(8か所)

#### 図2-12 実験概要



図2-13(a) A面からの反射波の最大振幅値と垂直応力の関係 (励起周波数:5MHz)



図2-13(b) A面からの反射波の最大振幅値と 垂直応力の関係(励起周波数:5MHz)



図2-14(a) B面からの反射波の最大振幅値と垂直応力の関係 (励起周波数:5MHz)



図2-14(b) B面からの反射波の最大振幅値と垂直応力の関係 (励起周波数:5MHz)



図2-15 A面反射波とB面反射波の最大振幅値の比較(励起周波数:5MHz)



#### 図2-16 A面第三反射波とB面第一反射 波の全計測点(各8点)での比較



図3-1 可搬型超音波探傷器 (Pocket UT)



図3-2 センサ (左から直径 \$\phi15 mm、10 mm、10 mm、 高さh17 mm、14 mm、15 mm)



図3-3 接触媒質



図3-4 リフトオフ試験による荷重変位曲線の一例 (新居浜、282kN)

56





(a)対象のり面

(b)対象アンカー



(c)計測時の様子

図3-5 原位置計測①計測概要





1MHz

2 図3-6 センサ計測点



# 図3-7 A面反射波の最大振幅値



図3-8 B面反射波の最大振幅値







図3-9 観測波形 PocketUTにて計測 Gain値 1MHz:05MHz:010MHz:15





(a)対象のり面

(b)対象アンカー







5MHz、10MHz

1MHz





図3-11 A面反射波の最大振幅値



図3-12 B面反射波の最大振幅値





(a)対象のり面

(b)対象アンカー

### 図3-13 原位置計測③計測概要



# 図3-14 センサ計測点



#### 図3-15 A面反射波の最大振幅値



図3-16 B面反射波の最大振幅値





図3-17 福知-20、143kNのアンカー (さびが激しい)

図3-18 アンカーの防食処理



図3-19 表面条件による波の振幅の変化(対象:福知-20 143kN)



図3-20 センサの接触圧と観測波形



図3-21 各より線の緊張力の差異と接触面での応力分布



図3-22 室内実験計測時の様子(E5-4)



図3-23 B面第一反射波の最大振幅値 (E5-4、200kN載荷時、5MHzのセンサ)



図3-24 アンカーヘッドのずれ(図では下にずれている)



図3-25 アンカーヘッドと支圧板の相対的位置のずれと 接触面における応力分布


図3-26 アンカーヘッドと支圧板の穴の位置関係 (赤点線が支圧板の穴を示す)



## 図3-27 支圧板の穴の直径の測定方法



図3-28 B面第一反射波の各計測点における値と穴の位置の関係





## 図3-29 計測点とB面反射波の観測値の関係

図3-30 アンカーヘッドのずれとB面第一反射波の最大振幅値の関係



図3-31 直下に穴がある計測点を除外したデータと除外前 のデータの比較(B面第一反射波、5MHz)



図4-1(a) 荷重とB面第一反射波の最大振幅値の関係



74



図4-2 アンカーの維持管理フロー



図4-3 福知20のB面第一反射波の 最大振幅値の全計測点のデータ



図4-4(a) 132kNと239kNの比較



図4-4(b) 132kNと239kNの比較 (赤点:平均値)







閾値0.1V



図4-5 B面第一反射波の閾値による評価の検討(閾値0.02、0.05、0.1V) 対象:福知-20







図4-7 B面第一反射波の閾値による評価の 検討(閾値0.04、0.05、0.06Vの平均値) 対象:福知-20 E5-4



図4-8 平均値を用いた評価と閾値を用いた評価との比較 対象:福知-20 E5-4



対象:新居浜 E5-5



対象:室内実験 E5-4

図4-9 B面第一反射波の閾値による評価の 検討(閾値0.04、0.05、0.06Vの平均値)



対象:新居浜 E5-5

対象:室内実験 E5-4

図4-10 平均値を用いた評価と閾値を用いた評価との比較 対象:新居浜E5-5、室内実験E5-4



図4-11 3か所における閾値を用いた評価



図4-12 平均値による評価と閾値による評価の推 定緊張力の比較