

土木研究所資料

鉄筋溶接継手の信頼性向上 に関する研究

2012年3月

独立行政法人土木研究所
材料資源研究グループ
基礎材料チーム

Copyright © (2012) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

鉄筋溶接継手の信頼性向上 に関する研究

基礎材料チーム 上席研究員 渡辺 博志
総括主任研究員 森濱 和正
研究員 伊佐見 和大*

要 旨：

溶接継手鉄筋の検査は、現在、ガス圧接継手用の超音波探傷試験（JIS Z 3062）が用いられているが、溶接継手に生じるキズは圧接継手の場合と異なり、溶接初層部（溶接断面の外周部）に生じやすいため、現在の検査では溶接部破断につながる欠陥の検出精度に問題がある。

そのため、外周部を探傷できる新たな超音波探傷方法について検討した。はじめに人工キズを入れた試験片などによって外周部の探傷が可能かなどについて検討し、ほぼ理論どおりに伝搬し、外周部を探傷できることを確認した。次に、溶接継手試験片に新たな超音波探傷方法を適用し、探傷精度が高くなることを確認した。

キーワード：異形棒鋼，溶接継手，超音波探傷，JIS Z 3062 (JIS 法)，日本鉄筋継手協会規格 JRJS 0005 (JRJS 法)

* 2011年4月から、寒地土木研究所耐寒材料チーム

目 次

1 章	まえがき	1
1.1	継手協会との共同研究（1996～1998 年）	1
1.2	溶接継手の表面 SH 波法の検討と問題点（2001～2006 年，継手協会）	3
1.3	新たな探傷方法の提案と検討（2007 年以降，継手協会）	4
1.4	新たな探傷方法検討の背景と目的（2009～2011 年，土木研究所）	4
2 章	鉄筋継手の超音波探傷検査に関する用語と探傷方法	8
2.1	用語の整理	8
2.2	探傷方法と基準レベル，判定基準	8
2.2.1	JIS 法の探傷方法と基準レベル，判定基準	8
2.2.2	JRJS 法の探傷方法と基準レベル，判定基準	9
2.2.3	直角タンデム走査法の探傷方法と基準レベル	10
2.2.4	斜めタンデム走査法の探傷方法と基準レベル，判定基準	11
3 章	鉄筋周面からの反射が透過パルス（音圧）に及ぼす影響	13
3.1	実験目的	13
3.2	透過パルス測定方法による周面反射の影響に関する実験方法	13
3.2.1	実験概要	13
3.2.2	走査用治具	14
3.2.3	各透過パルス測定方法のビーム路程	16
3.3	周面反射の影響に関する実験結果	16
3.3.1	走査用治具による測定結果	16
3.3.2	側面の節と腹の反射の影響	16
3.3.3	透過パルスと基準レベル	18
3.3.4	ビーム路程，腹とリブの反射の影響	18
4 章	人工キズ試験片による探傷方法の検討	20
4.1	実験目的	20
4.2	人工キズ試験片	20
4.3	実験方法	21
4.4	実験結果	22
4.4.1	JIS 法の結果	22

4.4.2	JRJS 法の結果	26
5 章	溶接継手試験片による探傷実験	31
5.1	実験目的	31
5.2	実験の手順	31
5.3	試験片の作製	31
5.4	X線透過法によるキズ位置，面積の推定	32
5.5	各種透過パルス測定方法による基準レベルの測定	34
5.5.1	各種透過パルスの測定方法	34
5.5.2	透過走査の測定結果	34
5.5.3	そのほかの透過パルス測定結果	34
5.5.4	補正值の検討	36
5.6	代表的なキズ試験片による詳細な探傷実験	37
5.6.1	代表的な試験片の選定	37
5.6.2	詳細な探傷実験の方法	38
5.6.3	詳細な探傷実験の結果	39
5.7	キズの位置・面積と各探傷方法適用性の検討	45
5.7.1	実験方法	45
5.7.2	実験結果	45
6 章	引張試験結果と超音波探傷試験結果の対応	48
6.1	実験目的	48
6.2	引張試験結果	48
6.2.1	引張試験	48
6.2.2	キズの状態およびキズ面積の測定	48
6.2.3	キズ面積率と引張強度の関係	48
6.3	引張試験結果と超音波探傷試験結果の関係	51
6.3.1	エコー高さと引張強度の関係	51
6.3.2	キズ位置と探傷位置の関係	53
7 章	まとめ	56
資料		59

1 章 まえがき

以前より基礎材料チームにおいて鉄筋継手の性能および検査に関する検討を行なってきた。これまでの研究経緯と、本研究において溶接継手の超音波探傷検査に関する検討を実施することとなった経緯を以下に整理する（表 1.1）。

表 1.1 鉄筋継手に関する研究の経緯

期間	土木研究所	日本鉄筋継手協会
1996 ～ 1998	土木研究所と日本鉄筋継手協会（当時は日本圧接協会）の共同研究 ・ガス圧接継手の各種引張状態に対する継手性能の確認 ^{1) 2) 3) 6)} ・非破壊検査（表面 SH 波法による超音波探傷，熱間押抜き法）に関する検討 ^{4) 7) 8)}	
	溶接継手，機械式継手に関する継手性能についても別途検討 ^{5) 6)}	
2001 ～ 2006		協会内に非破壊検査小委員会設置（土研からも参加） ・ガス圧接の表面 SH 波法による超音波探傷を継続して検討 ・新たに溶接継手についても表面 SH 波法による超音波探傷についても検討 ・機械式継手の表面 SH 波法による鉄筋挿入長さ検査方法の検討
2007 ～		協会・非破壊検査小委員会 ・溶接継手の斜めタンデム走査法，斜め K 走査法の検討 ・ガス圧接継手についても斜めタンデム走査法，斜め K 走査法の検討
2009 ～ 2011	溶接継手の斜め K 走査法（JRJS 法）に関する検討	・機械式継手の表面 SH 波法による鉄筋挿入長さの精度向上に関する検討

1.1 継手協会との共同研究（1996～1998 年）

ガス圧接継手の性能，検査に関して日本鉄筋継手協会（当時，日本圧接協会。2010 年から日本鉄筋継手協会。以下，継手協会と呼ぶ）と共同研究を実施した。また，機械式継手，溶接継手についても関連する機関・メーカーの協力により，それらの継手性能の検討も行なった。

はじめに，継手の性能に問題がないかどうかを確認するため，ガス圧接継手，溶接継手，機械式継手について高速載荷，低温時の引張試験，弾塑性の交番繰返し引張試験などさまざまな厳しい条件における載荷実験を行なった。その結果，継手協会が定めている標準仕様書や，メーカーが定めている施工要領書などに基づいて施工された継手は，いずれも継手部から破断することはなかった^{1) 2) 3) 6)}。

継手の施工が確実に行われれば継手性能には問題ないことが確認されたものの，現場においては施工に及

ばすさまざまな外乱要因があることから、今後とも継手の信頼性を確保していくためには、欠陥を生じにくい施工の検討と、施工後の検査が重要と考えられた。施工に関しては、以前から継手協会でも検討されており、鉄筋の直角切断機の開発、火口の多いバーナーの使用などにより信頼性の向上が図られつつある。土木研究所では、発注者の立場から検査が重要と考え、熱間押抜法、表面 SH 波法による超音波探傷に関する検討を行なった^{4) 7) 8)}。熱間押抜法は、本研究が対象としている溶接継手の検査方法とは関係ないので割愛し、表面 SH 波法に関する検討の概要を説明する。

ガス圧接継手鉄筋の超音波探傷検査は、JIS Z 3062（鉄筋コンクリート用異形棒鋼ガス圧接部の超音波探傷試験方法及び判定基準）（以下、JIS 法と呼ぶ）が 1988 年に制定されている。しかしこの方法には、探傷可能な範囲と、キズを生じやすい位置とが異なっているという問題がある。ガス圧接継手のふくらみは、鉄筋の中心に近いほど急激に広がって形成される。そのため、キズはふくらみの外周部に形成されやすいことがわかっている。一方、JIS 法は二探触子 K 走査法と呼ばれる方法であり、**図 1.1**のように両方のリブに探触子を配置して走査することによって探傷する方法である。送信探触子から送信され、圧接界面から反射して受信探触子で受信できる範囲は、断面図のように鉄筋中央部のリブを結ぶ線（以下、リブ軸と呼ぶ）上を長軸とする楕円状の範囲に限られる。すなわち、圧接中央部のキズの探傷には優れているが、キズを生じやすい外周部の探傷はできないという問題がある。

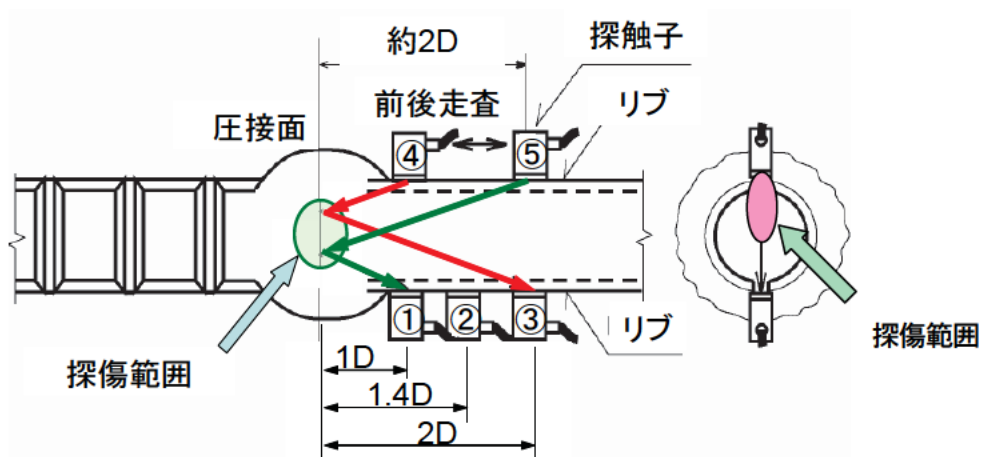


図 1.1 JIS 法の探傷方法

そこで、共同研究では外周部の探傷を行うために、表面 SH 波法による探傷実験を行なった。表面 SH 波法とは、**図 1.2**のように表面に沿って伝搬する横波を用いる。この方法により JIS 法よりも外周部の探傷精度が高いことが確認された^{4) 7)}。

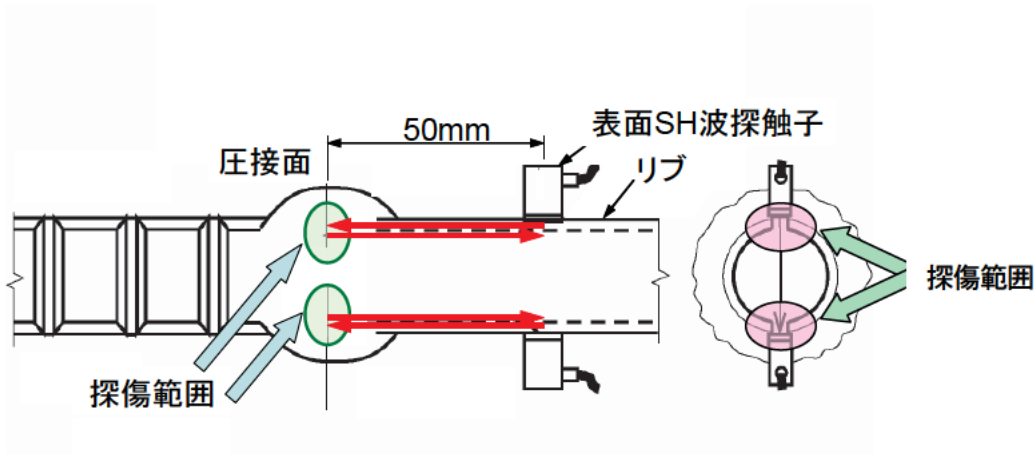


図 1.2 表面 SH 波法の探傷方法

1.2 溶接継手への表面 SH 波法の検討と問題点（2001～2006 年，継手協会）

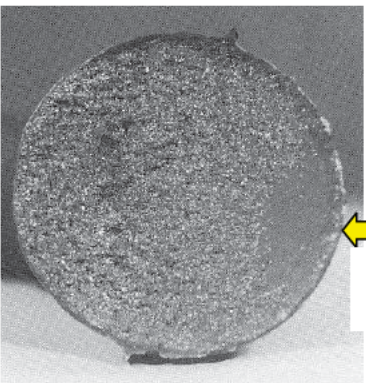
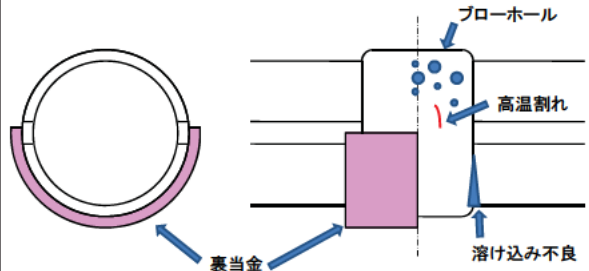
共同研究の後，継手協会において引き続きガス圧接継手の表面 SH 波法の検討が行われるとともに，溶接継手への適用も検討されるようになった。

溶接継手の検査も JIS 法が準用されているが，表 1.2 のようにガス圧接継手と溶接継手ではキズの種類や生じる位置が異なっており，JIS 法を適用することには問題があることから，表面 SH 波法の検討が行われた。

溶接継手には多くのキズの種類があるが，JIS 法の適用を困難にしている初層部の溶込み不足，融合不良によるキズが多いことから，これらのキズを対象にした表面 SH 波法の検討が行われた。

しかし，表面 SH 波法は探触子をリブ上に配置し，リブに沿って超音波を送信し，リブに沿ったエコーを受信することによって探傷するため，リブから離れた位置に生じた初層部のキズを探傷しにくいことが明らかになった⁹⁾。

表 1.2 ガス圧接継手と溶接継手のキズの違い

	ガス圧接継手	溶接継手
継手外観とキズの発生しやすい位置と種類	鉄筋軸方向と直角方向の継手断面図 圧接界面のフラット破面  フラット破面	鉄筋軸方向と直角方向の継手断面図 初層部の溶込み不良，融合不良，高温割れ，ブローホールなど  ブローホール 高温割れ 溶け込み不良 裏当金

1.3 新たな探傷方法の提案と検討（2007年以降、継手協会）

その後、継手協会では、溶接継手の外周部全周を探傷する方法として、斜めタンデム走査法と斜めK走査法の検討が行われるようになった¹⁰⁾。

斜めタンデム走査法については、2章および3章で検討するとおり、探傷が複雑であること、基準レベルが低いことから、現場での適用には極めて難しいものと考えられたことから、それ以降の検討は行なっていない。

斜めK走査法は、**図1.3**のように探触子を鉄筋軸に対して20度首振りを行なって走査することによって、溶接部断面図のように超音波が外周部を伝搬することから、外周部の探傷が期待されている方法である。多くの検討の結果、2008年度に規格JRJS 0005が制定されており、以下、斜めK走査法をJRJS法と呼ぶこととする。

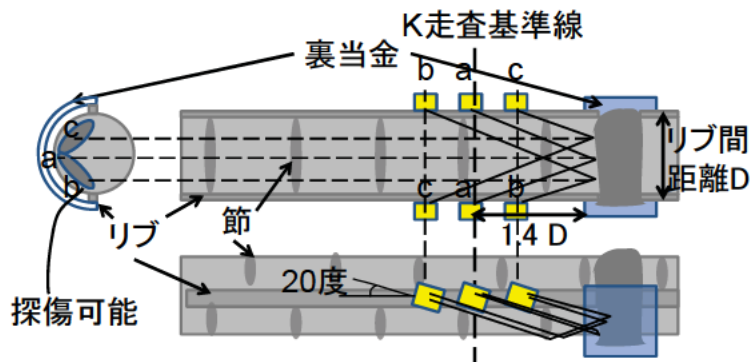


図 1.3 JRJS 法の探傷方法

1.4 新たな探傷方法検討の背景と目的（2009～2011年、土木研究所）

溶接継手に関しては、上記のとおり、現在使用されているJIS法による超音波探傷検査では不十分であると考えられる。

また、JIS法による超音波探傷結果は、ガス圧接継手のように力学的特性を表しているのかという問題がある。溶接継手、ガス圧接継手、機械式継手を抜き取りによって引張試験した結果について、最近の3年間の結果を**表1.3**に示す^{11)、12)、13)}。ガス圧接継手と溶接継手の結果を比較すると(**表1.4**)、降伏点の規格値以下のものは、ガス圧接継手にはないが、溶接継手にはわずかにある。引張強さの規格値以下は、ガス圧接継手は0.4%以下、SD490は施工方法が異なるため、これを除くと0.2%以下であるが、溶接継手は1%程度ある。さらに問題なのは、継手部で破断する率であり、ガス圧接継手は0.3%以下(SD490を除く)であるが、溶接継手はほとんどの場合3%以上であり、10%以上の場合もある。溶接継手の超音波探傷検査に関する信頼性とも関連するものと考えられるが、溶接継手の力学的特性に問題があることは明白である。

表 1.3 鉄筋継手部の引張試験結果

年度	継手の種類	鉄筋の種類	データ数 (本)	降伏点の 規格値未満 の率 (%)	引張強さの 規格値未満 の率 (%)	継手部 * の破断率 (%)
2008	ガス圧接 継手	SD295A	17	0.0	0.0	0.0
		SD345	18569	0.0	0.1	0.1
		SD390	6888	0.0	0.1	0.3
		SD490	23	0.0	0.0	0.0
	突合せ溶接 継手	SD295A	46	0.0	0.0	0.0
		SD345	1375	0.0	0.4	3.3
		SD390	1411	0.2	0.9	7.4
		SD490	18	0.0	0.0	0.0
	機械式 継手	SD295A	39	0.0	0.0	0.0
		SD345	597	0.0	0.0	1.5
		SD390	228	0.0	0.0	3.9
		SD490	36	0.0	0.0	0.0
2009	ガス圧接 継手	SD295A	3	0.0	0.0	0.0
		SD345	14913	0.0	0.0	0.1
		SD390	3975	0.0	0.2	0.3
		SD490	65	0.0	0.0	3.1
	突合せ溶接 継手	SD295A	30	0.0	0.0	0.0
		SD345	1052	0.0	1.1	4.4
		SD390	531	0.0	0.4	7.5
		SD490	414	0.0	0.0	3.9
	機械式 継手	SD295A	15	0.0	0.0	0.0
		SD345	554	0.0	0.0	2.7
		SD390	492	0.0	0.0	0.6
		SD490	15	0.0	0.0	0.0
20120	ガス圧接 継手	SD295A	3	0.0	0.0	0.0
		SD345	13979	0.0	0.0	0.1
		SD390	6321	0.0	0.0	0.3
		SD490	235	0.0	0.4	3.4
	突合せ溶接 継手	SD295A	46	0.0	0.0	10.9
		SD345	2050	0.2	1.6	4.6
		SD390	630	0.0	1.1	6.7
		SD490	72	0.0	0.0	5.6
	機械式 継手	SD295A	36	0.0	2.8	11.1
		SD345	407	0.0	0.0	0.5
		SD390	299	0.0	0.0	0.3
		SD490	43	0.0	0.0	0.0

* ガス圧接、突合せ溶接継手は、圧接面、溶接面からの破断。機械式継手は、カップラーの破断またはカップラーからの抜け出し。薄い網掛けは 0.3%以下、濃い網掛けは 0.4%以上。

表 1.4 鉄筋継手部の引張試験結果 (表 1.3 の概要)

確認項目	判断基準	ガス圧接継手	溶接継手
降伏点	規格値以下	なし	わずかにある
引張強さ	規格値以下	0.4%以下 SD490 を除くと 0.2%以下	ほとんど 1%程度
破断位置	継手部	SD490 を除くと 0.3%以下	ほとんど 3%以上 10%以上の場合もある

このようなことから、信頼性の高い溶接継手の検査方法を検討する必要があるものと考えた。

検査方法の検討にあたって、①超音波探傷のほか、②X線透過法、③磁粉探傷、④浸透探傷などの適用性などについても検討した。しかし、溶接継手に生じるキズの位置、種類はさまざまであり、溶接内部に生じるキズもあるため、③、④の方法は適用できない。コストや配筋されている実現場を考えると②の適用も難しい。残るのは①の超音波探傷であるが、上記のとおり、JIS法、表面SH波法を溶接継手に適用することには問題が多い。しかしながら、超音波探傷はこれまでも用いられてきたことから、超音波探傷による検査技術者がいること、継手協会の提案しているJRJS法は溶接継手によって生じるキズの種類・位置などに対して適用できる可能性の高い検査方法と考えられたことから、この方法について検討することとした。

JRJS法については、継手協会によって多くの検討が行われてはいるものの、まだ不足していることもある。例えば、JRJS法は、鉄筋の周面を反射しながら伝搬するという仮定に基づいており、鉄筋内の伝搬経路は複雑である。対象も異形棒鋼であり、鉄筋周面には節、リブがあることから、周面の反射波はそれらの影響を受けるはずである。また、キズの位置・大きさなどによって超音波がキズに当たる場合、当たらない場合などが考えられる。あるいは、キズに超音波が当たったとしても、その反射波を受信探触子が受信するためには、どの位置に探触子を配置しなければならないか、などの問題が考えられた。

このような問題認識のもとに、次の項目について検討することとした。

(1) 基準レベルに及ぼす周面反射の影響

合否判定のための基準レベルは、キズを探傷するときの伝搬経路（送信探触子⇒キズ⇒受信探触子）を考慮して送信・受信探触子を設置し、鉄筋内を透過するパルスの最大値を求めることになる。その際、JRJS法は、斜め透過走査を行うことが基本であり、その場合の最大値を検出する。このとき、送信・受信探触子の位置関係によっては、反射位置が節の場合と、節と節の間になる場合が考えられる。このような場合の影響を確認し、基準レベルを求めるための適切な探触子配置などを検討する必要がある。

(2) 人工キズによる伝搬経路の推定、キズの位置・大きさの影響

ドリル穴によって鉄筋断面の位置関係を変化させたり、ドリル径を変化させることによってキズの大きさを変化させた人工キズを設けた試験片による探傷を行い、送信・受信探触子の位置関係、キズからのエコー高さなどから、JRJS法の伝搬経路の推定や、キズの位置・大きさの影響などを確認する。

(3) 溶接継手試験片による探傷実験

(1)、(2)による基礎的な検討の後、実際に溶接継手を作製し、探傷精度などを確認する。そのために、溶接

部には位置・大きさを変化させたキズを入れた試験片を作製して、探傷実験を行う。

(4) 溶接継手試験片の引張試験による強度、破断面の状態と探傷結果

溶接部に設けたキズの状態と探傷結果に対応関係があるのか、探傷結果が継手強度をどの程度保証できるのかを確認するために、探傷実験の後で引張試験を行い、引張強度と溶接部破断面のキズ面積率の測定を行う。

参考文献

- 1) 河野広隆, 森濱和正ほか: 鉄筋のガス圧接継手に関する共同研究報告書(1) 載荷速度の影響, 共同研究報告書第 188 号, 1997.8
- 2) 河野広隆, 森濱和正ほか: 鉄筋のガス圧接継手に関する共同研究報告書(2) 温度および繰返し載荷の影響, 共同研究報告書第 196 号, 1998.3
- 3) 河野広隆, 森濱和正ほか: 鉄筋のガス圧接継手に関する共同研究報告書(3) ガス圧接継手を有するはり供試体の正負交番繰返し載荷実験, 共同研究報告書第 226 号, 1999.3
- 4) 河野広隆, 森濱和正ほか: 鉄筋のガス圧接継手に関する共同研究報告書(4) ガス圧接継手の非破壊検査, 共同研究報告書第 227 号, 1999.3
- 5) 河野広隆, 森濱和正: 鉄筋の機械式継手および溶接継手の挙動に関する調査報告書, 土木研究所資料第 3608 号, 1998.12
- 6) 森濱和正, 河野広隆, 加藤俊二: 各種鉄筋継手の力学特性, 土木技術資料, Vol.41, No.3, pp.44-49, 1999.3
- 7) 森濱和正, 河野広隆, 加藤俊二: ガス圧接継手の非破壊検査に関する検討, 土木技術資料, Vol.41, No.11, pp.60-65, 1999.11
- 8) 森濱和正: 熱間押抜法によるガス圧接継手鉄筋の検査の精度に関する検討, 土木技術資料, Vol.44, No.4, pp.62-67, 2002.4
- 9) 森濱和正, 池ヶ谷靖, 吉野次彦: 鉄筋のガス圧接継手, 溶接継手の超音波探傷検査に関する検討, 日本非破壊検査協会シンポジウム「コンクリート構造物への非破壊検査の展開」, Vol.2, pp.237-242, 2006.8
- 10) 倉持貢, 森濱和正: 鉄筋エンクローズ溶接継手の超音波斜角探傷検査法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.685-690, 2008.7
- 11) 平成 20 年度工事用材料試験結果の集計, GBRC, Vol.34, No.3, pp.44-46, 2009.7
- 12) 平成 21 年度工事用材料試験結果の集計, GBRC, Vol.35, No.3, pp.56-58, 2010.7
- 13) 平成 22 年度工事用材料試験結果の集計, GBRC, Vol.36, No.3, pp.40-42, 2011.7

2章 鉄筋継手の超音波探傷検査に関する用語と探傷方法

2.1 用語の整理

まず、超音波探傷検査に重要な用語について整理する。用語の説明は、JIS Z 2300（非破壊試験用語）をもとに、本研究を考慮したものとしている。

本研究は、超音波探傷試験方法の検討と、その結果から合格か不合格かを判定する検査方法の検討を目指している。判定するためには判定基準が必要となる。判定基準を決めるためには、ベースとなる基準レベルも必要となることから、これらの用語について整理する。

超音波探傷試験は、超音波を試験体中に伝搬させたときに試験体の示す音響的性質（本研究では、エコー高さ）を利用して試験体のキズや材質を調べる方法である。

判定基準は、非破壊試験によって検出した結果（エコー高さ）を用いて、要求水準を満足しているかを決める基準である。一般には要求水準（破壊強度など）とエコー高さの関係を実験的に求めて決められる。

基準レベルは、JIS Z 2300 では「キズ検出感度の調整とキズからのエコー高さの評価のときの基準とするエコー高さ」となっているが、JIS Z 3062（鉄筋コンクリート用異形棒鋼ガス圧接部の超音波探傷試験方法及び判定基準）では「透過走査で求められる透過パルスの最大値」と定義されているとおり、鉄筋継手の探傷検査においては、ここでは探傷方法に応じた伝搬経路を考慮した透過パルスの最大値とする。

キズ（JIS Z 2300 では「きず」）と欠陥についても整理しておく。

キズとは、非破壊試験の結果から判断される不完全部分または不連続部分であり、合格となるものと不合格となるものがある。つまり、非破壊試験によって画像、数値など（総称して「指示」）が表示されたもののすべてがキズである。

欠陥は、規格、仕様書などで規定された判定基準を超え、不合格となるキズである。

2.2 探傷方法と基準レベル、判定基準

次に、本研究で対象とする探傷方法と、探傷方法に応じた基準レベル、判定基準について整理する。

2.2.1 JIS法の探傷方法と基準レベル、判定基準

まず JIS 法の探傷方法と基準レベルについて整理する。

図 2.2.1 に鉄筋断面の中心にキズがある場合の伝搬経路を示す。(a) 図は側面からの伝搬経路、(b) 図は 90 度回転させ上から見た状態（平面）の伝搬経路を示している。(a) 図、(b) 図の左に鉄筋断面を示す。

JIS 法で用いる探触子の屈折角は 70 度であり、図 2.2.1 (a) のとおり中心のキズの場合、理論的にはキズから 1.4D（D：リブ間距離であり、リブの頂点から頂点までの距離である）の位置の送信探触子から送信され、キズで反射して、1.4D の位置の受信探触子で受信される。送信探触子からキズ、キズから受信探触子までの距離を併せると 2.8D となる。探触子を走査することによって超音波ビームの中心は断面図のようにリブ軸を伝搬するので、キズが中心だけでなくリブ軸上にある場合、送信探触子からキズまでの距離と、キズから受信探触子までの距離の和は、理論的には常に 2.8D となる。

判定のための基準レベルは、鉄筋内を同程度の伝搬距離を透過したときのパルスの最大値であり、**図 2.2.1** の場合、キズがないとすると破線のように直進し、送信探触子から $2.8D$ の反対側のリブに達する、この状態のときの透過パルスの最大値が JIS 法の基準レベルとなる (**図 2.2.2**)。この方法を透過走査と呼ぶ。

JIS 法の判定基準は、ガス圧接継手における超音波探傷試験結果と引張試験結果から定められている。JIS G 3112 (鉄筋コンクリート用棒鋼) の引張強さの規格値を保証するものとなっているおり、基準レベルから -24 dB が判定基準になっている¹⁾。

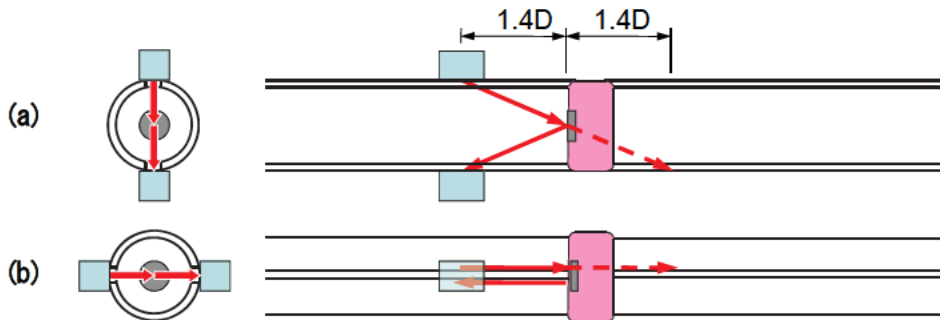


図 2.2.1 JIS 法による探傷 (上：側面と断面, 下：平面と断面)

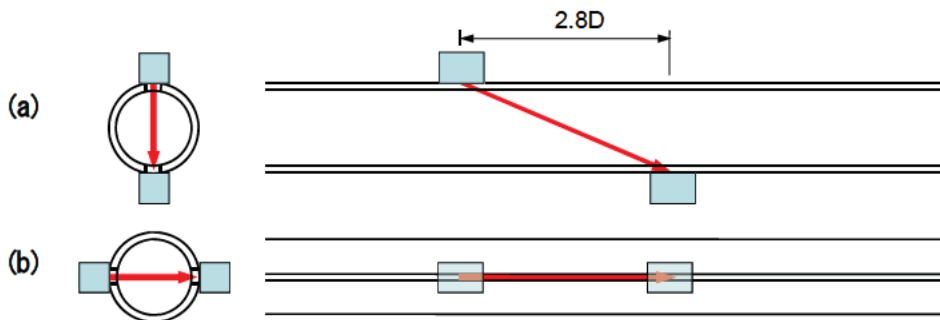


図 2.2.2 透過走査 (上：側面と断面, 下：平面と断面)

2.2.2 JRJS 法の探傷方法と基準レベル, 判定基準

JRJS 0005 の斜め K 走査法 (JRJS 法) の場合も、JIS 法と同様に**図 2.2.3** と **図 2.2.4** によって探傷方法と基準レベルの求め方を示す。

JRJS 法は、平面図のように探触子を鉄筋軸に対して 20 度首振りして走査する方法である。この場合、**図 2.2.3** の断面図のように側面で反射して伝搬する。キズが反射位置にある場合、側面は JIS 法 (**図 2.2.1**) と同じ伝搬経路となるが、平面の経路はキズから反射して反対側のリブで受信され、断面図のように折れ曲がった経路となる。

キズがない場合、**図 2.2.3** の破線のように伝搬することから、基準エコーは**図 2.2.4** のように側面で 1 回反射させたときの透過パルスの最大値となる。

判定基準は、溶接継手の JRJS 法による探傷試験結果と引張試験結果から、JIS 法の考え方と同じく JIS の引張強さの規格値が保証できるように、基準レベルから -18 dB となっている²⁾。

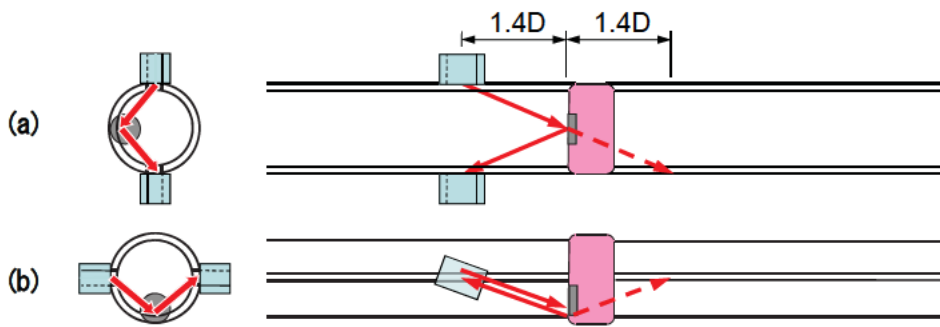


図 2.2.3 JRJS 法による探傷（上：側面と断面，下：平面と断面）

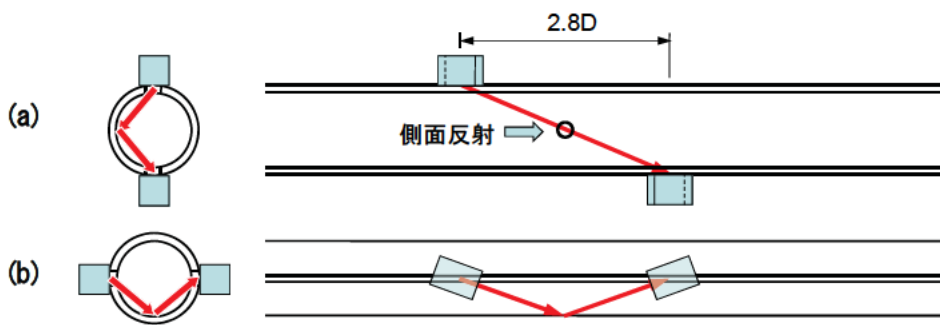


図 2.2.4 斜め透過走査（上：側面と断面，下：平面と断面）

2.2.3 直角タンデム走査法による探傷方法と基準レベル

JRJS 0005 には、JRJS 法のほかに、次項で説明する斜めタンデム走査法についても規定されている。斜めタンデム走査法の前にタンデム走査法についても説明する。JIS 法と同じく、リブ軸上のキズが対象になることから直角タンデム走査法と呼ぶ。

一般的なタンデム走査法とは、図 2.2.5 のように同じ屈折角をもつ探触子 2 個以上を同一面に配置して探傷する方法である。送信探触子から送信された超音波はキズで反射し、探触子を配置した面の対面で反射し、受信探触子で受信される経路をとる。

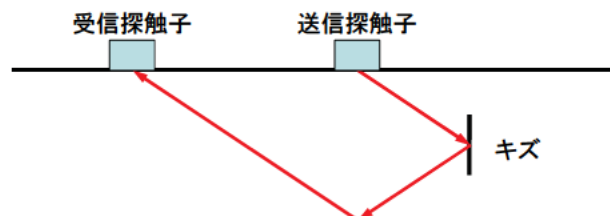


図 2.2.5 タンデム走査法

鉄筋の場合は図 2.2.6 のようにリブ上に探触子を配置し、超音波ビームを鉄筋軸方向に向ける。そうすると図 2.2.5 と同様の伝搬経路が得られ、リブ軸上のキズを探傷することができる。

キズがない場合、図 2.2.6 の破線のように伝搬することから、基準レベルは図 2.2.7 のように送信探触子から 2.8D の位置のリブで 1 回反射させ、さらに 2.8D 伝搬、併せて 5.6D 伝搬させて受信したときの透過パルスの最大値をとることになり、JIS 法、JRJS 法に比べ 2 倍の伝搬距離が必要になる。この基準レベルの求め方を V 透過走査と呼ぶ。

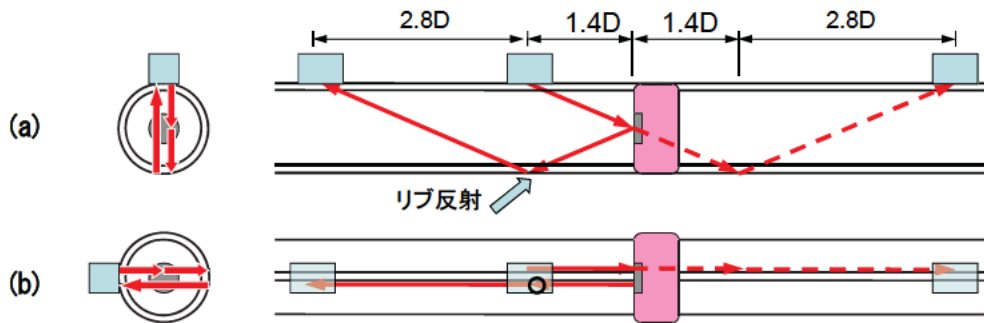


図 2.2.6 直角タンデム走査法による探傷方法（上：側面と断面，下：平面と断面）

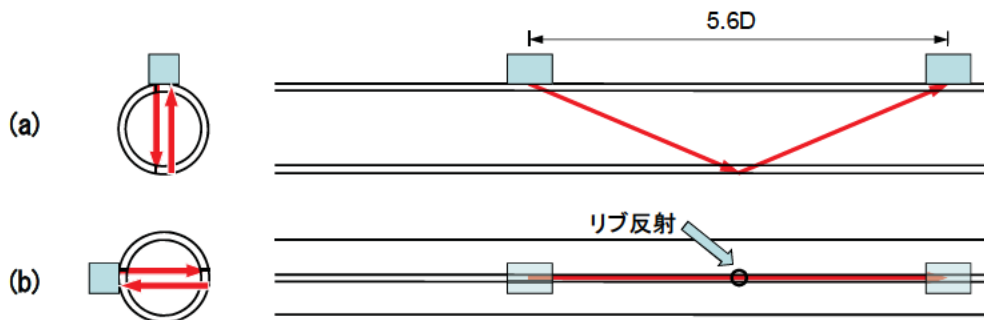


図 2.2.7 V 透過走査（上：側面と断面，下：平面と断面）

JIS 法と直角タンデム走査法を比較すると、JIS 法は相対するリブに探触子を配置する必要があるが、直角タンデム走査法は同一のリブに配置できるという長所があるが、同じ範囲を探傷するには直角タンデム走査法は 2 倍の走査距離が必要になり、リブの位置で反射を伴うという短所がある。

2.2.4 斜めタンデム走査法による探傷方法と基準レベル、判定基準

斜めタンデム走査法は、図 2.2.8 のように JRJS 法と直角タンデム走査法を合わせた探傷方法である。キズで反射した超音波はリブ、側面でも反射し、受信探触子に受信される。断面図のように菱形の経路を伝搬する。

キズがない場合は図 2.2.8 の破線のように伝搬することから、基準レベルは図 2.2.9 のように側面、リブ、側面を反射しながら菱形で、らせん状に伝搬したときの透過パルスの最大値をとる。この基準レベルの求め

方を斜めV透過走査と呼ぶ。

判定基準は、JRJS法の考え方と同じく、基準レベルから-18 dBとなっている²⁾。

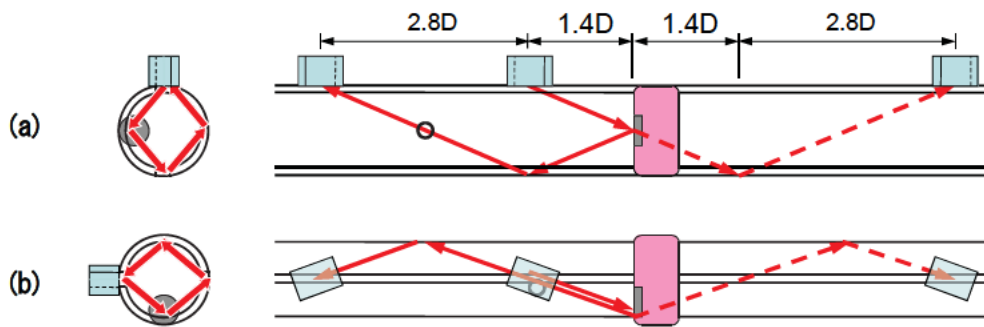


図 2.2.8 斜めタンデム走査法による探傷方法（上：側面と断面，下：平面と断面）

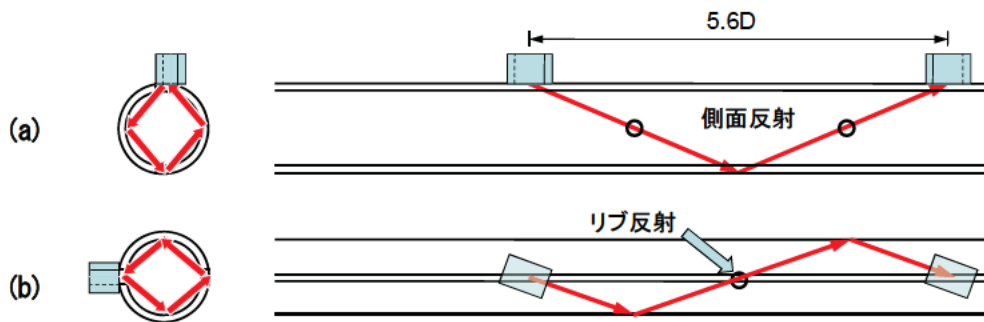


図 2.2.9 斜めV透過走査（上：側面と断面，下：平面と断面）

参考文献

- 1) (社)日本鉄筋継手協会：鉄筋継手工事標準仕様書 ガス圧接継手工事（2009年），pp.67-70，2009.9
- 2) (社)日本鉄筋継手協会：鉄筋継手工事標準仕様書 溶接継手工事（2009年），pp.36-40，2009.9

3章 鉄筋周面からの反射が透過パルス（音圧）に及ぼす影響

3.1 実験目的

2章で紹介したとおり溶接継手の超音波探傷に適用できる可能性がある方法は数種類ある。探傷方法ごとに伝搬経路が異なり、鉄筋周面の反射位置・回数が異なるため、これらの影響を検討しておく必要がある。

JIS法はキズからの反射を仮定して探傷を行う（図2.2.1）が、そのほかの探傷方法は、キズ以外に鉄筋周面での反射を伴う（図2.2.3, 図2.2.6, 図2.2.8）。鉄筋の周面を図3.1.1および表3.1.1のように呼ぶこととすると、反射の位置はリブまたは側面、側面は節または節と節の間の腹である。探傷方法ごとの反射位置と回数は表3.1.2のとおりであり、これらの位置・回数の反射の影響について検討する。

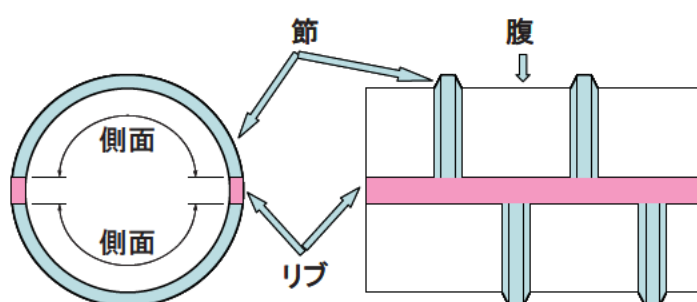


図3.1.1 鉄筋の形状と周面の呼び方

表3.1.1 鉄筋周面の呼び方

周面の名称		摘要
リブ	—	—
側面 (リブ以外の面)	節	—
	腹	節と節の間

表3.1.2 反射位置と回数

探傷方法	基準レベルの測定方法 (透過パルス測定方法)	反射位置と回数 (回)	
		リブ	側面 (節または腹)
JIS法	透過走査	—	—
JRJS法	斜め透過走査	—	1
直角タンデム走査法	V透過走査	1	—
斜めタンデム走査法	斜めV透過走査	1	2

3.2 透過パルス測定方法による周面反射の影響に関する実験方法

3.2.1 実験概要

探傷方法ごとの伝搬経路と周面反射の影響の確認は、キズからの反射の影響を受けないように、基準レベ

ルを求める方法（透過パルス測定方法）によって行う。

透過パルス測定方法は図 3.2.1～図 3.2.4 のとおりであり、反射位置と回数は表 3.1.2 のとおりである。

JIS 法の透過パルス測定方法である透過走査は周面の反射がない。そのほかの透過パルス測定方法は周面反射を伴うことから、透過走査と比較検討する。

超音波探触子は JIS Z 3062 に規定されている 5Z5×5A70 を使用した。探触子の接触面は、探触子を回転できるように平面のものである。接触媒質は 80%グリセリン水溶液を用いた。鉄筋は SD345-D32 を用いた。

透過パルスの測定は、透過パルスの高さを表示器目盛の 50%となるように探傷器のゲイン調整器を調整して行なった。測定には次項で説明する走査用治具を用いた。

3.2.2 走査用治具

測定は微小な音圧の変化を求めることになるため、測定条件ができる限り一定になるように走査用治具（写真 3.2.1 と図 3.2.5）を作製した。走査用治具は、写真のように鉄筋を台に水平に配置し、探触子をリップに一定圧力で接触できるようにばねで押し付けるようにしている。また、探触子を押し付けた状態で鉄筋軸方向に走査できるように探触子固定部を磁石によって自立させている。斜め走査を実施するには探触子を首振り状態にする必要があることから、探触子が回転できる機構にしている。

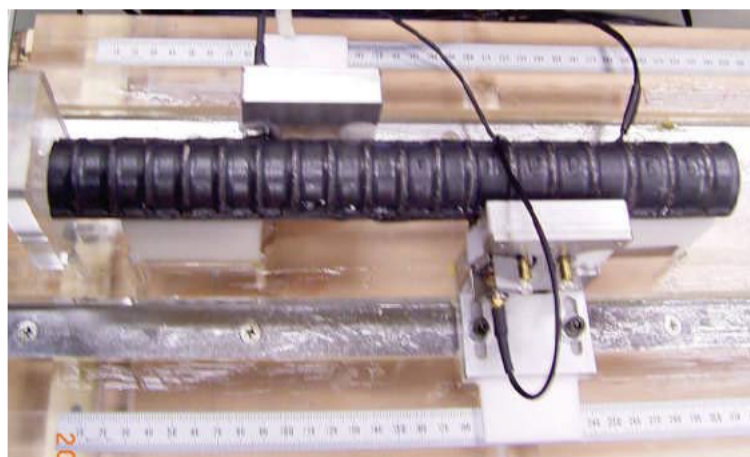


写真 3.2.1 走査用治具

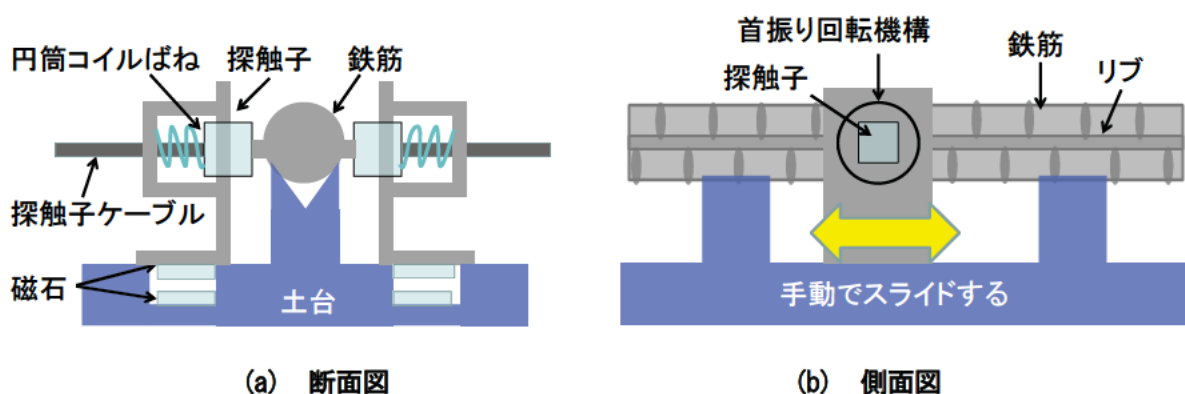


図 3.2.5 走査用治具の機構

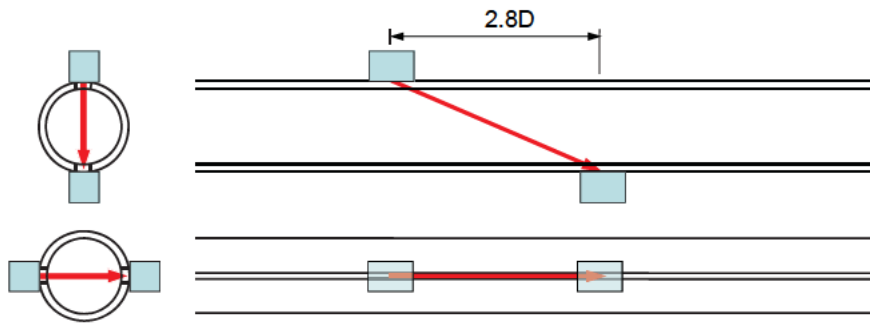


図 3.2.1 透過走査

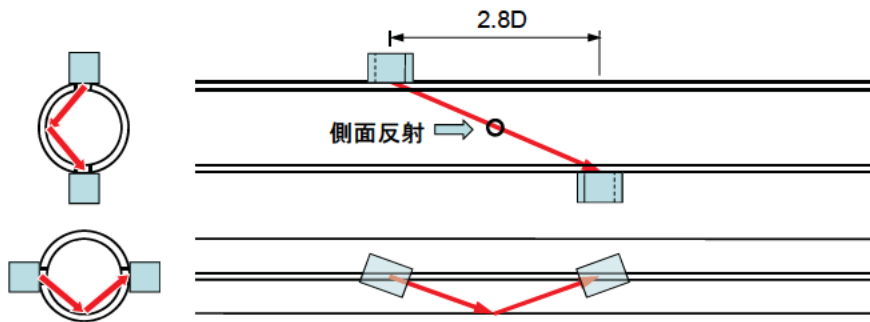


図 3.2.2 斜め透過走査

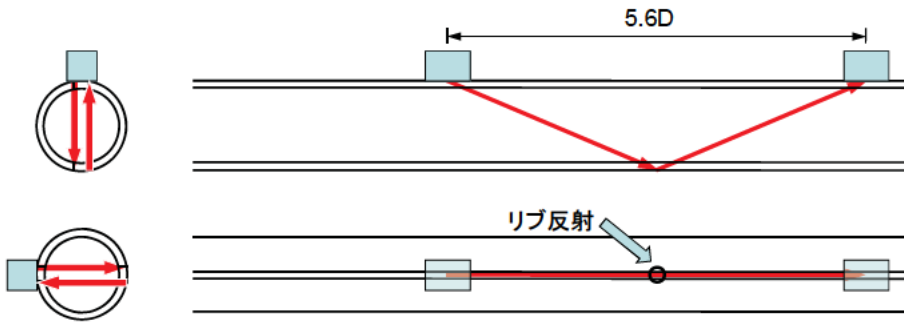


図 3.2.3 V透過走査

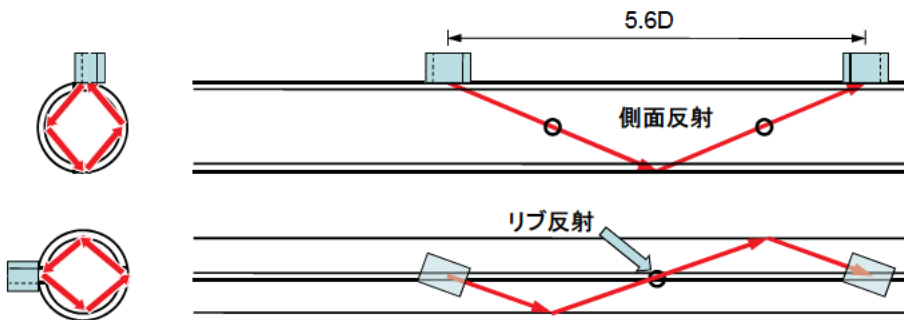


図 3.2.4 V透過走査

3.2.3 各透過パルス測定方法のビーム路程

まず、透過走査について、**図 3.2.1** のように送信・受信探触子を 2.8D 離して配置し、鉄筋軸方向に双方の探触子を 2mm ずつスライドさせて音圧を測定した。その時のビーム路程（送信点から受信点までの最短距離）は**表 3.2.1** のとおり 2.97D である。

同様に斜め透過走査についても、**図 3.2.2** のように 20 度首振りを行なった送信・受信探触子を 2.8D 離れた状態で、両探触子を 2mm ずつスライドさせて音圧を測定した。鉄筋軸方向に対して斜めに送信・受信するため、ビーム路程は 3.14D となり、透過走査よりも 6%長くなる。また、側面反射する（**表 3.1.2**）。透過走査と比較すると、ビーム路程は 6%長くなるだけであり、それに伴う減衰はわずかと考えられが、リブに斜めに送信・受信されることと、側面反射を伴うことによって音圧にどの程度影響するのかを把握する必要がある。

V 透過走査は、**図 3.2.3** のように送信・受信探触子を 5.6D 離れた状態で、両探触子を 2mm ずつスライドさせて音圧を測定した。透過走査と異なるのは、ビーム路程が 2 倍になることと、リブ反射することである。これらが音圧にどの程度影響するのかを把握する。

斜め V 透過走査は、**図 3.2.4** のように 20 度首振りを行なった送信・受信探触子を 5.6D 離れた状態で、両探触子を 2mm ずつスライドさせて音圧を測定した。透過走査と異なるのは、斜めに送信・受信することと、そのためにビーム路程が 2.11 倍になること、リブ反射 1 回と側面反射が 2 回となることである。ビーム路程は 6.27D となり、斜め透過走査の 2 倍、斜め V 透過走査よりも 11%長くなり、反射回数も増えていくことにより音圧にどの程度影響するのかを把握する。

表 3.2.1 各透過パルス測定方法のビーム路程

透過パルス測定方法	送信・受信探触子の鉄筋軸方向の距離	ビーム路程	$\frac{\text{各走査のビーム路程}}{\text{透過走査のビーム路程}}$
透過走査	2.8 D	2.97 D	—
斜め透過走査	2.8 D	3.14 D	1.06
V 透過走査	5.6 D	5.95 D	2.00
斜め V 透過走査	5.6 D	6.27 D	2.11

3.3 周面反射の影響に関する実験結果

図 3.3.1 に透過音圧測定方法ごとの音圧分布測定結果を示す。横軸は送信探触子の鉄筋軸方向の位置を示しており、原点は鉄筋端面である。キズ面位置から測定しているため、20mm から測定が始まっている。

3.3.1 走査用治具による測定結果

走査用治具を用いた音圧の測定結果は、各透過音圧測定結果がほぼ一定の音圧の範囲に治まっており、走査用治具を用いることにより一定条件のもとで異形棒鋼のリブからの音圧が得られているものと考えられる。周面反射の影響などの評価に利用できるものと考えられる。

3.3.2 側面の節と腹の反射の影響

各音圧分布測定結果は、鉄筋軸方向に約 15mm 程度の周期が見られた。この周期は節間距離と一致しているため、探傷時の異形棒鋼のリブでの走査において測定される音圧は節の影響を受けているものと考えられる。特に斜め透過走査では、**図 3.3.2** より双方の探触子が 2.8D (D=33.5mm, 2.8D=94mm) 離れているた

め、鉄筋軸方向におよそ節間距離 (=15mm) で6個分離れていることになり、双方の探触子が節の近くにあるときの音圧が低くなっている。この理由は、図 3.3.2 より双方の探触子が節の近くにあるとき、斜め透過走査における側面の反射点が節になることから、超音波ビームが散乱するためであると考えられる。

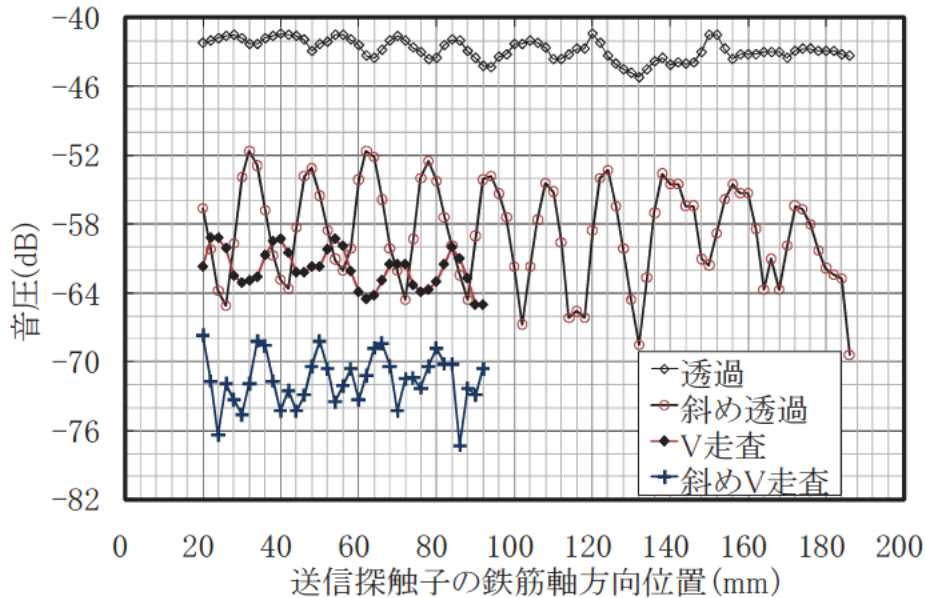


図 3.3.1 透過パルス測定方法ごとの探触子をスライドさせたときの音圧分布

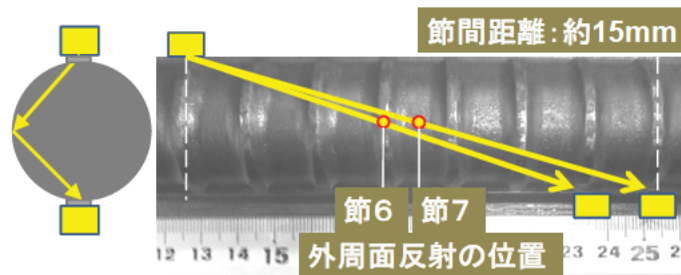


図 3.3.2 送信・受信探触子位置と反射点の関係

そこで、側面反射における節の影響を検討するため、図 3.3.2 のように双方の探触子の間隔を鉄筋軸方向に節間距離で7個離れた斜め透過走査も行なった。節間距離7個にすると、双方の探触子が節にある場合は反射点が腹になり、双方の探触子が腹にある場合は反射点が節になることから、節間距離6個離して行なった上述の結果と比較すると音圧分布の位相が180度ずれることが推定される。

両者の結果を図 3.3.3 に示すとおり、推定どおり節6個の場合と7個の場合では位相が180度ずれていることから、鉄筋軸方向の音圧分布の周期は側面反射における節と腹の反射の影響であることが確認できた。

なお、節7個の音圧のほうに8dB程度も低くなっている。これは、主ビームの屈折角と測定したときの送信・受信探触子の距離が異なっているためである。用いている探触子の屈折角は70度であり、そのときの送信・受信探触子の距離は約2.8Dであり、節6個分に相当するが、ここでは節と腹の反射の影響を確認するために探触子間隔を節1個分増やして7個にして測定したために、屈折角が70度より大きくなり、音圧が低くなったものであり、絶対値の比較はできない。

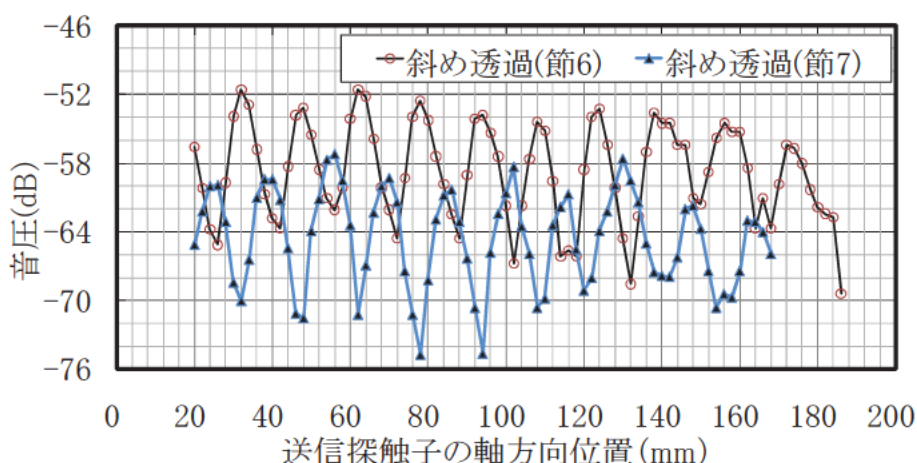


図 3.3.3 斜め透過走査における送信・受信探触子距離を節 6 個と 7 個にした場合の結果

3.3.3 透過パルスと基準レベル

各透過パルス測定方法は、各探傷方法ごとの基準レベルを求める方法とほぼ同じ方法としている。ただし、JRJS 0005 では、基準レベルは透過パルスの最大値を求めることになっているが、今回は送信・受信探触子の距離を一定にしており、基準レベルを求めているものではないが、参考にはなるものと考えられるので、各透過パルスによる今回の測定結果の最大値を表 3.3.1 に示す。表には、JRJS 0005 の感度補正值も示している。この補正值は、斜め透過走査と斜め V 透過走査に基づいて設定することが基本になっているが、両走査法ともに透過パルスを適正に識別して、その最大値を検出するには経験と訓練が必要になることから、透過走査で設定した基準レベルを補正することによって、各探傷方法の基準レベルが求められるようにした数値である。補正值は、透過走査と斜め透過走査、斜め V 透過走査によって得られた透過パルスの最大値の差から求められた値である。

今回の測定結果は、受信・送信探触子距離を一定 (2.8D) にしており、本来、透過パルスの最大値を求める方法とは若干異なっていた。そのため、透過走査との差は、JRJS 0005 の感度補正值よりも大きくなったものと考えられる。

表 3.3.1 透過パルスと JRJS 0005 の補正值

透過パルス測定方法	透過パルス (今回測定した最大値) (dB)	透過走査との差 (dB)	JRJS 0005 の 感度補正值 (dB)
透過走査	-42	-	-
斜め透過走査	-52	10	6
V 透過走査	-59	17	-
斜め V 透過走査	-68	26	16

3.3.4 ビーム路程、腹とリブの反射の影響

透過パルスの測定は、測定方法によってビーム路程、反射の影響などを受けていることから、表 3.3.1 の

結果からそれらがどの程度影響しているのかを、透過走査をベースに、透過走査との差を用いて検討する。

まず、斜め透過走査は、透過走査と同じく相対するリブに送信・受信探触子を 2.8D 離して測定しているが、異なっているのは 20 度の首振りを行なっていることから、超音波が細いリブから斜めに送信され、側面で反射し、細いリブを斜めに伝搬されてきたものを受信している。透過パルスが低下する原因は、斜めに伝搬していることから、ビーム路程は 5.5%長くなっていること、細いリブからの送信・受信、側面からの反射であり、これらの原因によって透過パルスが 10dB 低下したものと考えられる。

次に、斜め V 透過走査は、リブ反射を介して斜め透過走査が 2 回行われていることになる。そのため、斜め V 透過走査による透過パルスの低下は式 (3.3.1) で表わされる。

$$\text{斜め V 透過走査による透過パルスの低下} = \text{斜め透過 (10dB)} + \text{リブ反射} + \text{斜め透過 (10dB)} = 26\text{dB} \quad (3.3.1)$$

式 (3.3.1) より、リブ反射による透過パルスの低下は 6dB と考えられる。

最後に、V 透過走査は、リブを介して透過走査が 2 回行われていることになる。1 回目の透過走査は、単に透過走査を行なったことと同じであるから、V 透過走査による透過パルスの低下は式 (3.3.2) となる。

$$\text{V 透過走査による透過パルスの低下} = \text{リブ反射 (6dB)} + \text{透過} = 17\text{dB} \quad (3.3.2)$$

式 (3.3.2) より、2.8D の距離の透過走査による透過パルスの低下は 11dB となる。しかし、同じ距離を斜め透過走査した場合の低下は 10dB であり、それよりも低下するということは考えにくい。これらの測定は距離を一定に固定した状態において、1 回だけの結果である。今後何回かの測定や、他の鉄筋の測定などが必要であるが、以上の結果をまとめると表 3.3.2 のとおりである。

表 3.3.2 各種要因ごとの透過パルスの低下

透過パルス低下の要因	透過パルスの低下
距離 2.8D 間の透過パルスの低下	(11dB)
距離 2.8D 間斜め透過 (リブを斜めに送・受信, 側面反射, ビーム路程が 5.5%長くなることを合わせた影響) による透過パルスの低下	10dB
リブでの反射による低下	6dB

4章 人工キズ試験片による探傷方法の検討

4.1 実験目的

3章においては、各探傷方法に応じて基準レベルを求める透過パルス測定方法によって、鉄筋周面を反射しながらほぼ理論どおりに伝搬している可能性を確認した。キズの探傷は、伝搬経路の途中にキズがあり、そこからのエコーをどのように受信するのかという問題がある。JIS法は原理も簡単であり、多くの研究があるが、JRJS法は伝搬経路が複雑であるため、溶接継手による探傷実験の前に、人工キズにより伝搬経路などの確認実験を行なった。

4.2 人工キズ試験片

異形棒鋼D32および丸鋼 ϕ 32mmの切断面に、先端が直角なドリルにより、鉄筋軸方向に深さ20mmの円形平底穴を加工した。図4.2.1および図4.2.2のように円形平底穴の位置と形状を示す。

鉄筋断面の中心には、直径が3mm、6mm、9mmの3種類のドリル穴を設けたものを作製した（以降、中心キズと呼ぶ）。

外周部には、鉄筋断面の中心を原点とし、送信側探触子を接触させるリブ位置を0度とし、右回りに0度、45度、90度の位置に直径が6mmのドリル穴を加工した（以降、0度キズ、45度キズ、90度キズと呼ぶ）試験片を作製した。また、90度の位置においては直径が3mmと9mmの試験片も作製した。キズの位置は、図4.2.1および図4.2.2のように、異形棒鋼は鉄筋中心から13.5mmの位置（外周面から1.8mm）に、丸鋼は15mmの位置（外周面から1mm）に接するように加工した。

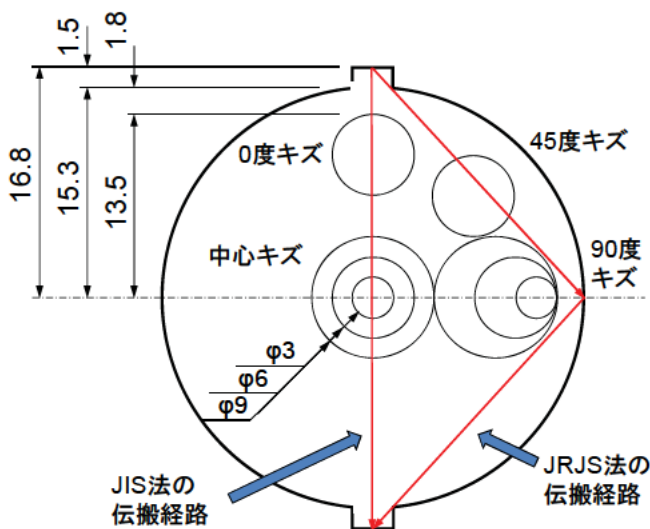


図4.2.1 異形棒鋼の人工キズの位置・大きさと伝搬経路

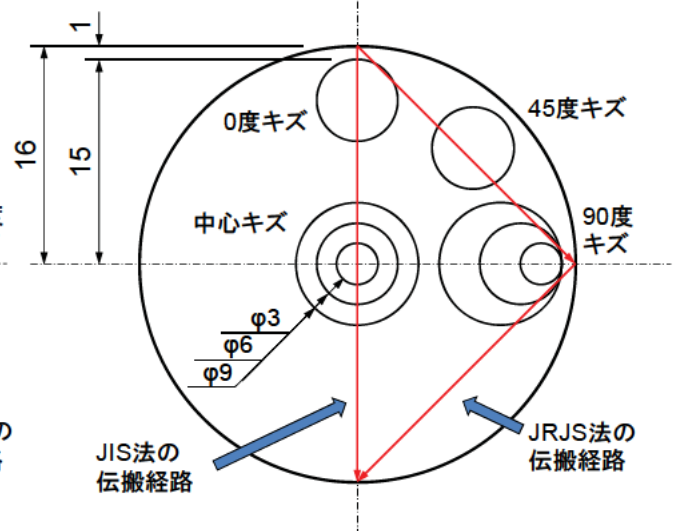


図4.2.2 丸鋼の人工キズの位置・大きさと伝搬経路

4.3 実験方法

異形棒鋼、丸鋼の各人工キズからのエコーの測定は、JIS法、JRJS法ともに図4.3.1のように送信探触子を理論上キズの中心で反射する位置に設置し、受信探触子は理論上最大のエコーが得られる位置の前後を数点ずつ測定した。各キズと送信探触子設置位置、最大エコーが得られる受信探触子位置は、送信探触子とキズまでの距離と、キズから受信探触子までの距離の比で求められることから、最大エコーが得られると考えられる両探触子のキズからの距離は、表4.3.1のとおりとなる。JIS法、JRJS法とも同じである。

外周部のキズ試験片は、図4.2.1、図4.2.2のように0度、45度、90度の3種類しか作製していないが、送信・受信探触子を入れ替えることにより135度、180度の測定も行なった。

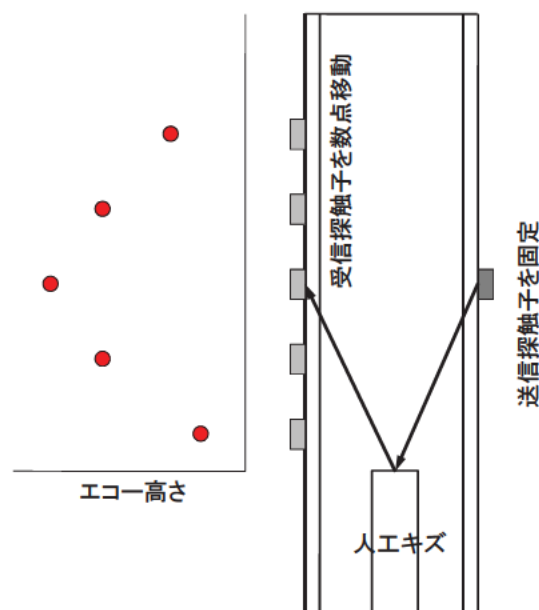


図 4.3.1 人工キズのエコーの測定方法

表 4.3.1 送信探触子固定位置，最大エコーが得られる受信探触子位置

キズの種類	送信探触子固定位置	最大エコーが得られる 受信探触子位置
中心キズ	1.4D	1.4D
0度キズ	0.35D	2.45D
45度キズ	0.65D	2.15D
90度キズ	1.4D	1.4D
135度キズ	2.15D	0.65D
180度キズ	2.45D	0.35D

4.4 実験結果

4.4.1 JIS法の結果

中心キズと90度キズの、キズの径3mm, 6mm, 9mmの測定結果を図4.4.1と図4.4.2に示す。外周部の0度～180度までの、キズの径が6mmの結果は図4.4.3のとおりである。1.4Dの縦線は、中心キズと90度キズの理論上の最大エコーが得られる受信探触子位置、図4.4.3のそのほかの縦線は、各キズの中心位置で反射すると仮定したときに最大エコーが得られる受信探触子位置(表4.3.1)を示している。

(1) 中心キズ, 90度キズの結果

図4.4.1の中心キズの結果は、高いエコー高さが得られており、最大エコーを測定した受信探触子位置はほぼ理論どおりの位置に得られていることから、ほぼ理論どおりに探傷できていることを示している。図4.4.2の90度キズのエコー高さは低く、JIS法は外周部のキズの探傷が難しいことを示している。

中心キズの径と最大エコー高さの関係を図4.4.4に示す。キズの径が大きくなるほどエコー高さが高くなる傾向がある。異形棒鋼のエコー高さは丸鋼よりも低くなっているが、キズの径が大きくなるほどその差は小さくなっている。

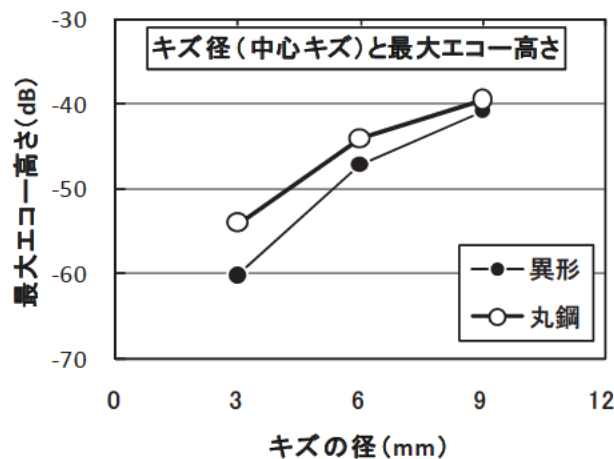


図4.4.4 中心キズの径と最大エコー高さの関係

(2) 外周部のキズの結果

図4.4.3の外周部のキズの結果は、0度と180度のエコー高さは高いことから探傷できる可能性があるが、そのほかのキズからのエコー高さは低く探傷しにくいことを示している。図4.2.1, 図4.2.2の伝搬経路とキズ位置の関係のように、JIS法の伝搬経路はリブ軸と重なっており、リブ軸に重なるキズの探傷は可能だが、それ以外のキズの探傷は難しいことを示している。

リブ軸に重なっている0度, 180度キズと、中心キズの最大エコー高さは図4.4.5のようにほぼ同じである。異形棒鋼は丸鋼よりも4dB程度低くなっている。この低下は、異形棒鋼と丸鋼の伝搬経路を比較すると、細いリブから超音波が送信・受信される影響と考えられる。

以上の実験結果は、JIS法で仮定されている探傷予測と一致しており、本研究の目的としている外周部の探傷にJIS法は適用できないことを示している。

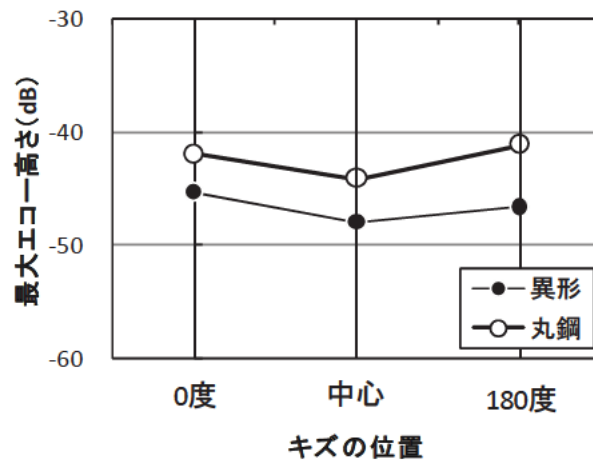


図 4.4.5 リブ軸のキズと最大エコー高さ

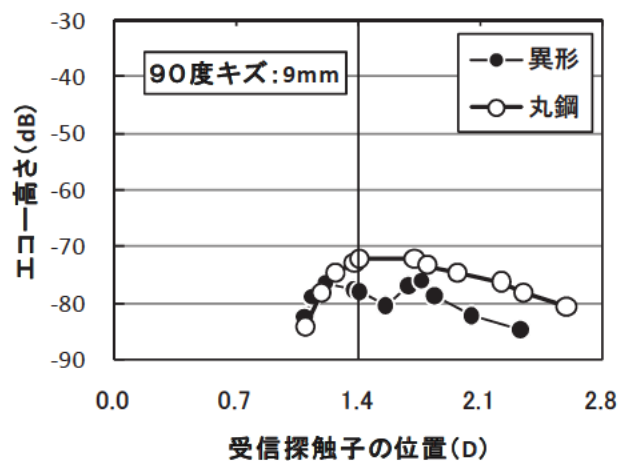
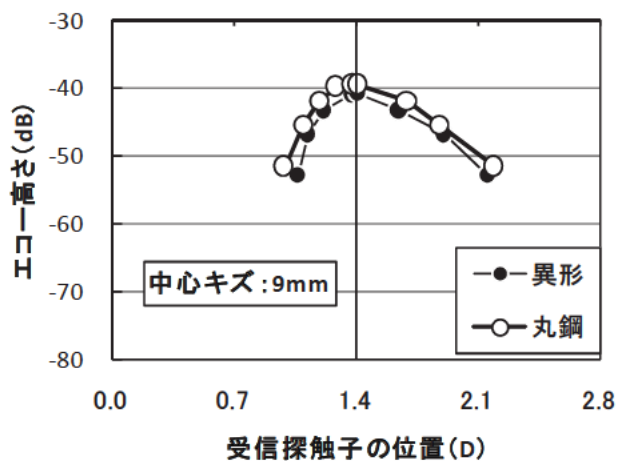
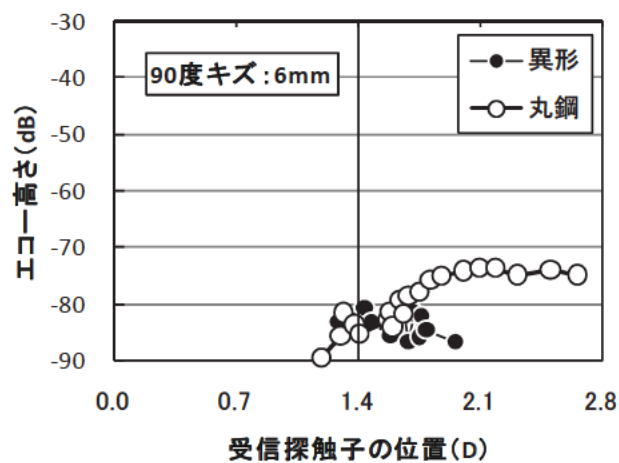
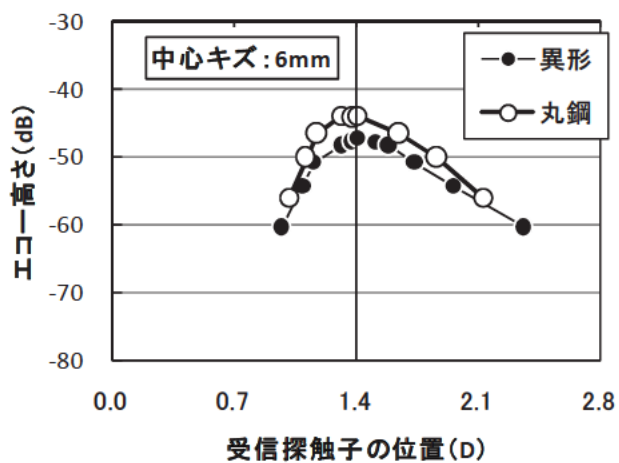
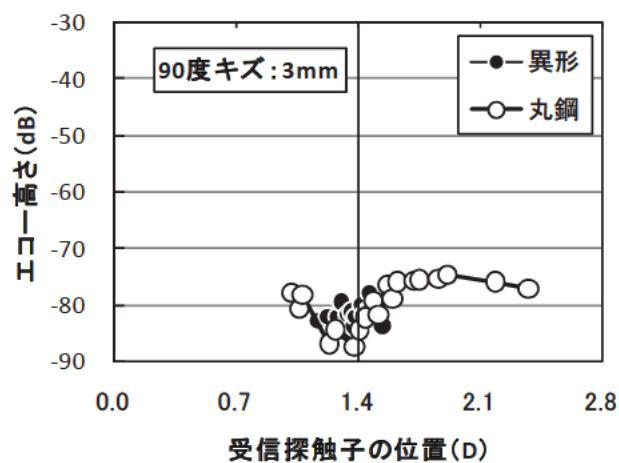
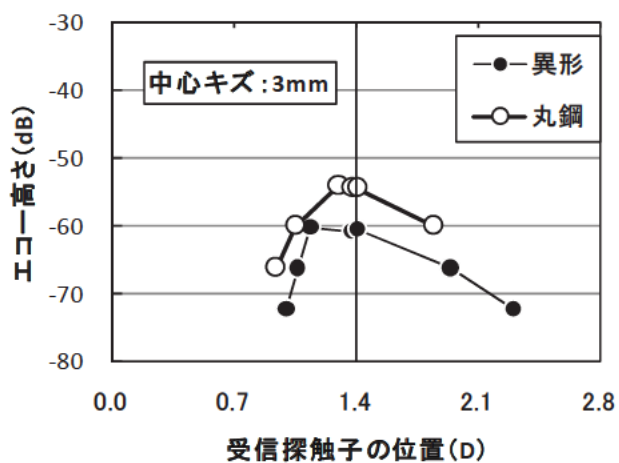


図 4. 4. 1 JIS 法による中心キズの測定結果
(上から 3mm, 6mm, 9mm キズ)

図 4. 4. 2 JIS 法による 90 度キズの測定結果
(上から 3mm, 6mm, 9mm キズ)

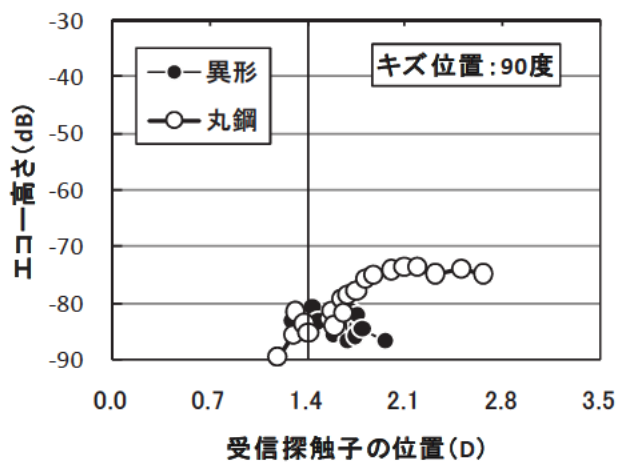
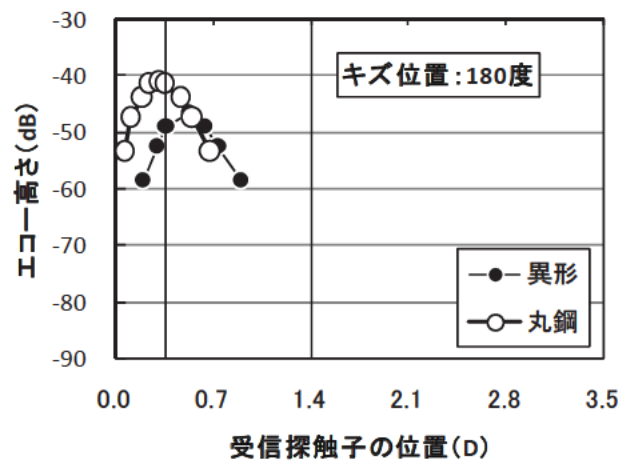
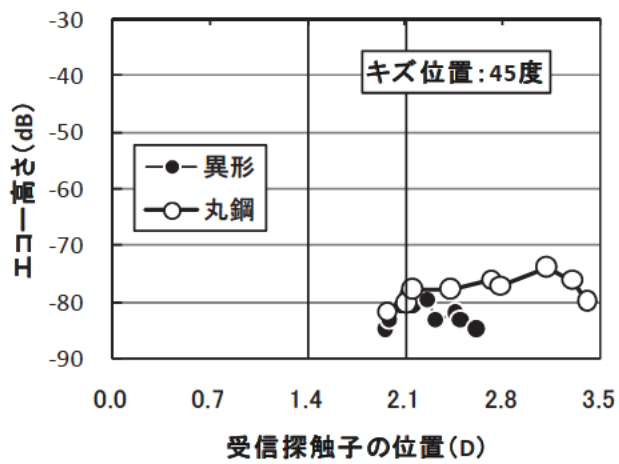
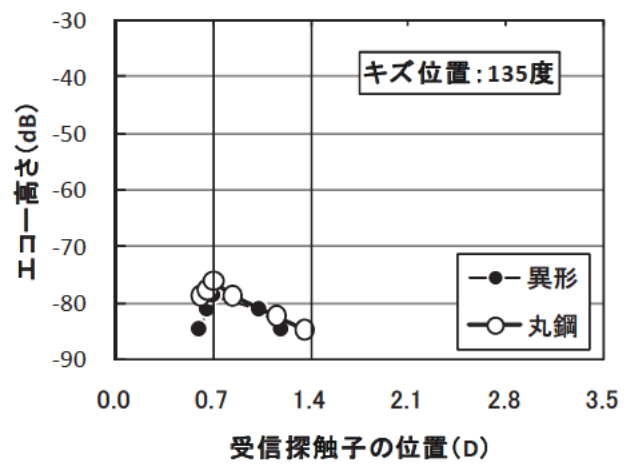
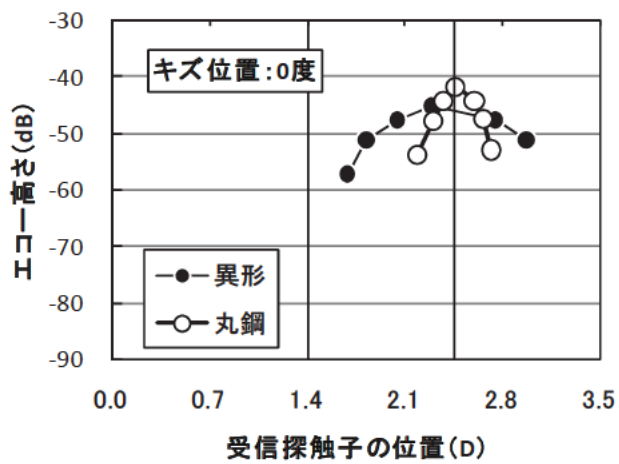


図 4. 4. 3 JIS 法による外周 (0 度~180 度) キズの測定結果

4.4.2 JRJS 法の結果

中心キズと 90 度キズの、キズの径 3mm, 6mm, 9mm の測定結果を図 4.4.6 と図 4.4.7 に示す。丸鋼の中心キズについては理論どおり測定できるので、ここでは測定していないため図 4.4.6 に結果は載っていない。外周部の 0 度～180 度までの、キズの径が 6mm の結果は図 4.4.8 のとおりである。1.4D の縦線は、中心キズと 90 度キズの理論上の最大エコーがえられる受信探触子位置、図 4.4.8 のそのほかの縦線は、各キズの中心位置で反射すると仮定したときの最大エコーがえられる受信探触子位置(表 4.3.1)を示している。

(1) 中心キズ, 90 度キズの結果

中心キズの結果は、JIS 法では明確なエコーが得られていたが、JRJS 法の場合は図 4.4.6 のようにエコー高さは低く、明確なピークは得られていない。図 4.2.1, 図 4.2.2 の伝搬経路とキズの関係のように、JRJS 法の伝搬経路は外周部を伝搬し、中心部を伝搬しないためである。

逆に図 4.4.7 の 90 度キズの結果は、ほぼ理論上の受信探触子の位置に明確なピークが得られている。しかし、異形棒鋼の最大エコー高さは中心キズの場合とそれほど大きな違いがなく、エコー高さは低い。この原因は、図 4.2.1, 図 4.2.2 の JRJS 法の伝搬経路とキズの関係のように、異形棒鋼のキズは伝搬経路からわずかに外れており、中心キズとは大きな違いがないエコー高さになったものと考えられ、伝搬経路に重ならないキズの探傷は難しいことが予想される。

(2) 90 度キズの径と最大エコー高さ

90 度キズの、キズの径と最大エコー高さの結果を図 4.4.9 に示す。キズの径にかかわらずほぼ一定のエコー高さとなっている。丸鋼の中心キズの場合、JIS 法(図 4.4.4)のようにキズの径が大きくなるとエコー高さも高くなる傾向とは異なっている。この原因は、図 4.2.2 の丸鋼のキズと伝搬経路の関係のように、両者が何とか重なっている程度であり、キズの大きさの影響をほとんど反映していないためと考えられる。

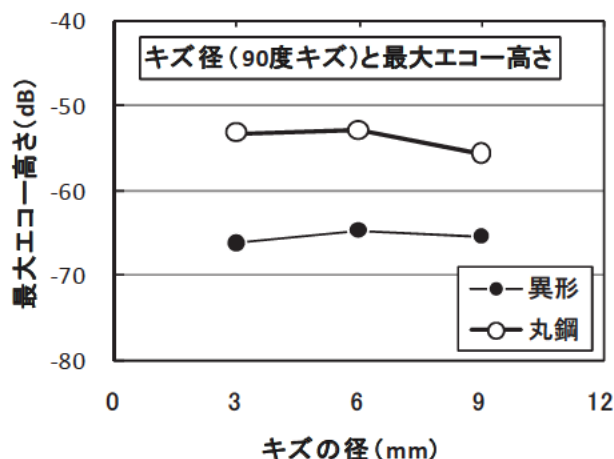


図 4.4.9 90 度キズの径と最大エコー高さの関係

図 4.4.9 より、異形棒鋼は丸鋼よりも 12dB 程度低くなっている。この原因は、図 4.4.4 の JIS 法の中心キズの場合も異形棒鋼と丸鋼では数 dB の違いがあったように、異形棒鋼は細いリブから送信・受信することに加え、図 4.2.1 のように伝搬経路とキズの位置がわずかに外れていることによるものと考えられる。

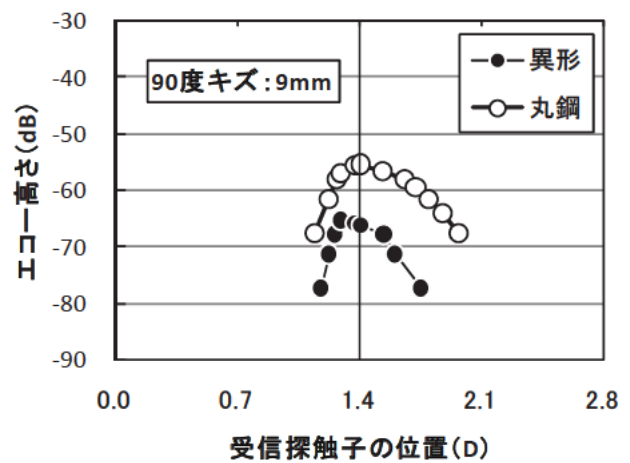
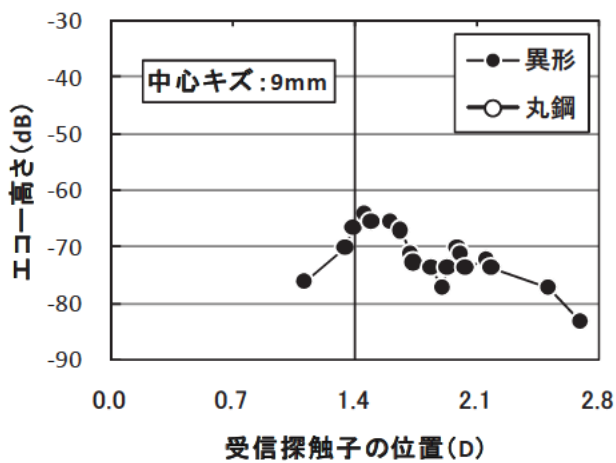
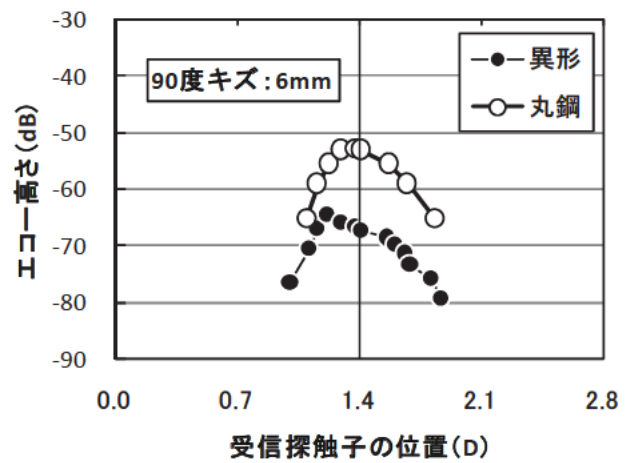
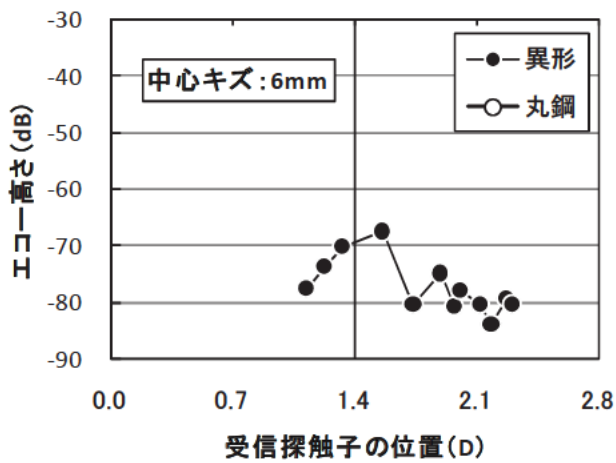
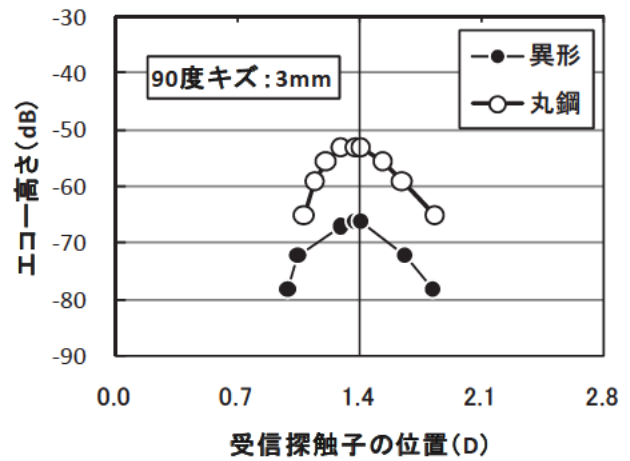
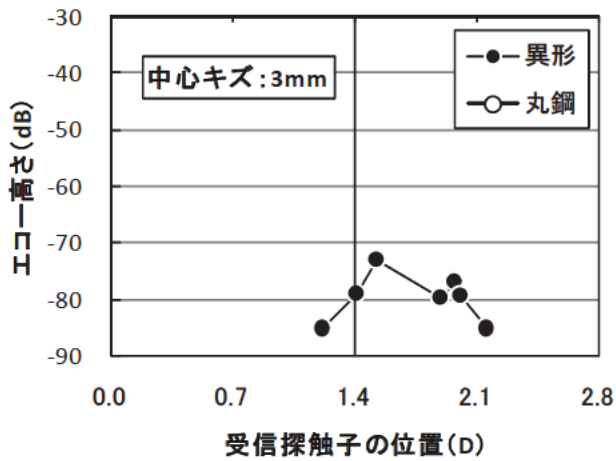


図 4.4.6 JRJS 法による中心キズの測定結果
(上から 3mm, 6mm, 9mm キズ)

図 4.4.7 JRJS 法による 90 度キズの測定結果
(上から 3mm, 6mm, 9mm キズ)

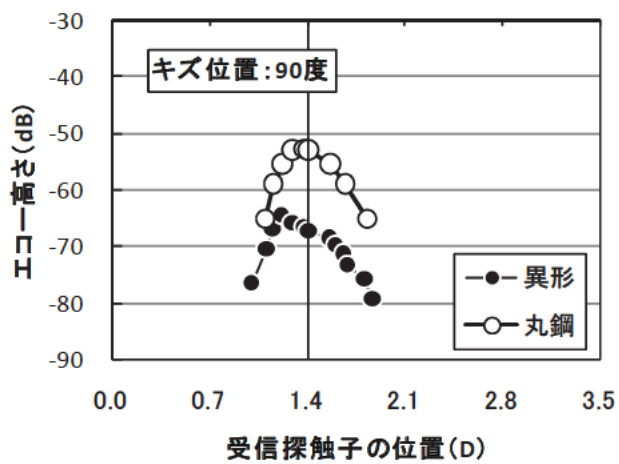
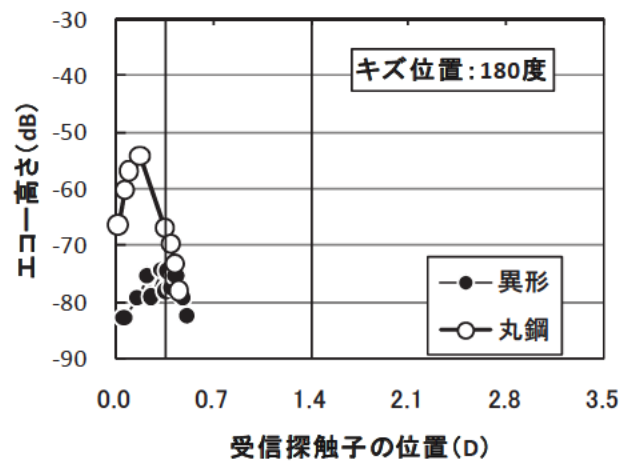
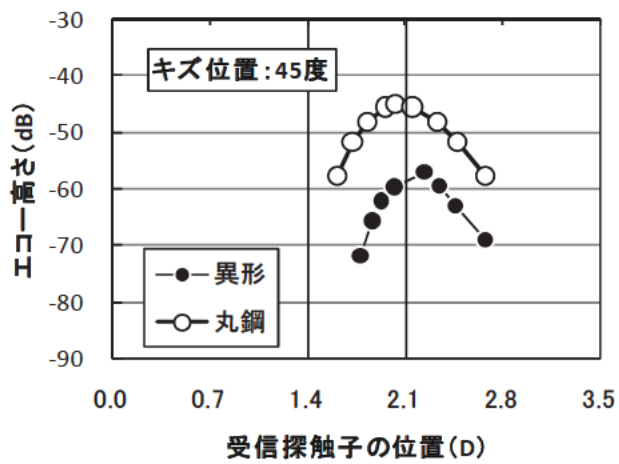
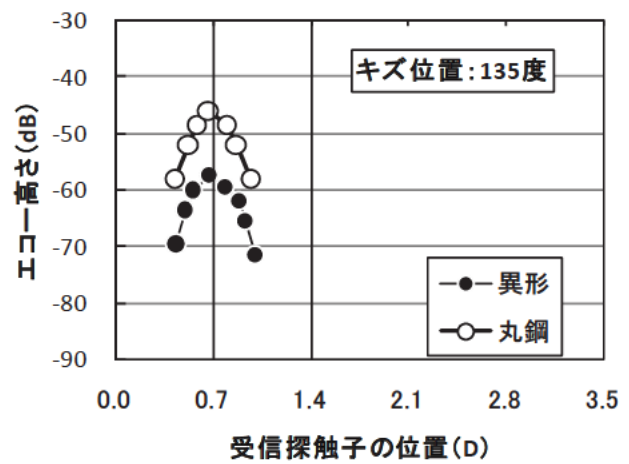
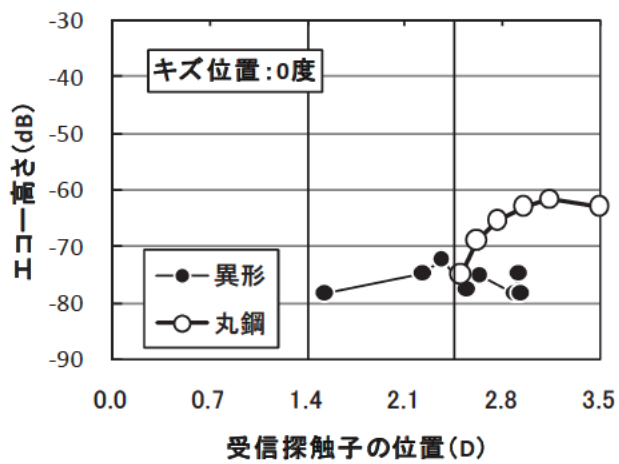


図 4.4.8 JRJS 法による外周 (0 度~180 度) キズの測定結果

(3) 外周部のキズの結果

図 4.4.8 には外周部の 0 度～180 度キズの結果を示している。45 度、90 度、135 度のキズはほぼ理論上の受信探触子位置に高いエコーが得られており、JRJS 法は外周部が探傷可能なことを示している。

異形棒鋼の 0 度と 180 度キズは、エコー高さが低く探傷できていない。これは図 4.2.1 のように伝搬経路とキズが重なっていないためと考えられる。

丸鋼の 0 度と 180 度キズは、エコー高さは高いが、最大エコーが得られた受信探触子位置は理論上の位置をはずれており、詳細に検討する。キズ、伝搬経路、反射点の関係を図 4.4.10 に示す。(b) 図のキズ面の横断面図には、キズの中心で反射すると事前に仮定した反射点（キズ中心からの一点鎖線と伝搬経路の交点）と、(a) 図のように固定していた送信位置と、最大エコーを測定した受信位置から逆算して求めた反射点（(b) 図のキズ外周と伝搬経路が接しているところの小さい丸印）の位置を示す。

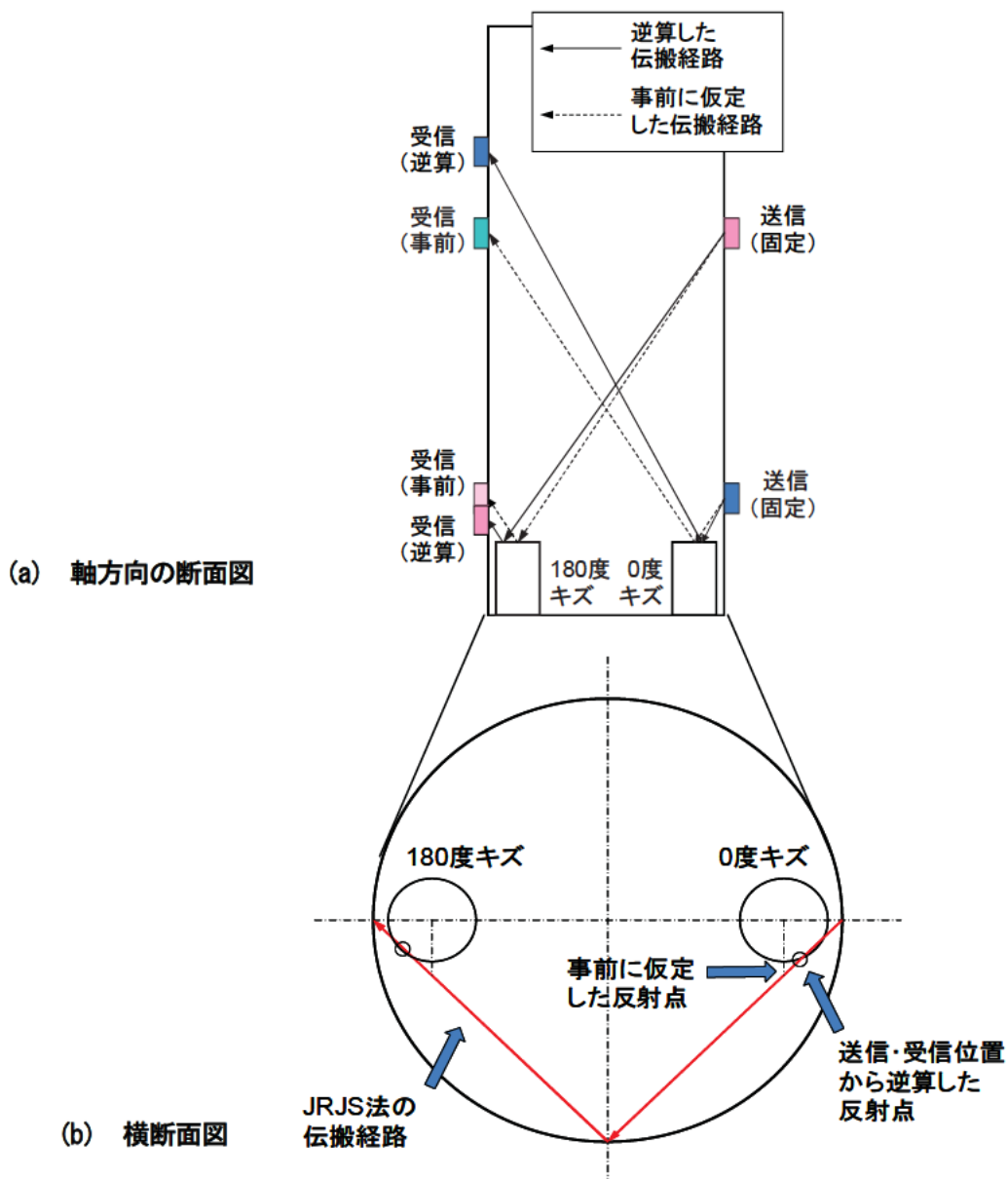


図 4.4.10 丸鋼の 0 度キズ、180 度キズの伝搬経路と反射点

(b)図より、事前に仮定したようにキズの中心で反射すると考えると、JIS法と同じく、横断面図上では探触子間を直線で伝搬していることになる。JRJS法は20度の首振りを行なっているために超音波の中心は伝搬経路上であり、JIS法の伝搬経路上にはビーム中心から20度ずれた極めて弱い超音波がでていただけであり、図4.4.8のような結果にはならない。JRJS法は図4.4.10のようにきわめて厳密に理論上の経路を伝搬しているものと考えられる。

(4) 外周部キズの位置と最大エコー高さの関係

JRJS法による異形棒鋼と丸鋼の外周部キズの位置と最大エコー高さの関係を図4.4.11に示す。45度と135度キズのエコー高さは高い結果が得られている。これは、図4.2.1、図4.2.2のとおり伝搬経路がキズのほぼ中心を通っていることから、ほぼ仮定どおりキズの中心付近で反射したことから得られたのと考えられる。この結果より、異形棒鋼と丸鋼のエコーの違いについて検討する。

異形棒鋼と丸鋼の45度、135度キズのエコー高さの違いはほぼ12dBである。ビーム路程はほぼ同じであり、キズ面のほぼ中心で反射し、最大エコーが受信され位置もほぼ理論どおりであることから、エコー高さの違いは、異形棒鋼の細いリブから超音波が斜めに送信・受信されることの影響と考えられる。その影響によりエコー高さが12dB程度低下したのと考えられる。

3.3.4の考察の結果も、斜め透過の場合は10dBの低下が測定されていることから、細いリブから超音波が斜めに送信・受信されることによって10dB程度低下するものと考えられ、その影響はかなり大きい。

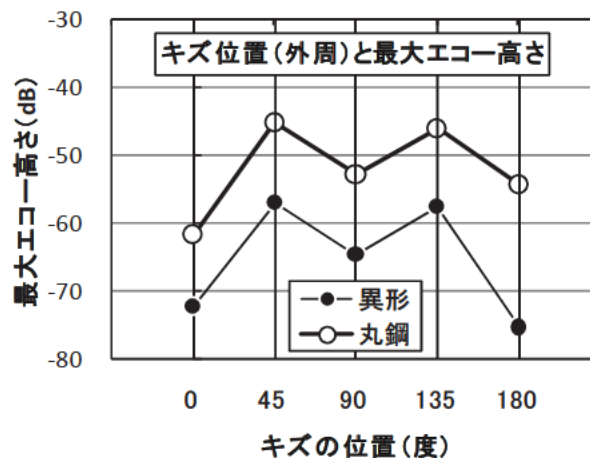


図4.4.11 外周部のキズの位置と最大エコー高さの関係

5章 溶接継手試験片による探傷実験

5.1 実験目的

4章では、人工キズ試験片を用いて、鉄筋内を超音波が理論どおりに伝搬していることを確認し、JIS法は鉄筋中央部のキズの探傷しかできないこと、JRJS法は本実験の目的としている外周部のキズの探傷に適していることが確認できた。

5章では、実際に溶接継手試験片を作製し、JIS法、JRJS法による探傷実験を行なった。試験片にはあらかじめ溶接部に、溶接に伴って生じるキズに近い状態のものを入れた。キズは、鉄筋断面に対して位置、大きさを変化させ、4章の人工キズ試験片の場合と同じように、JIS法は溶接断面中央部のキズの探傷、JRJS法は外周部のキズの探傷ができるかの確認実験を行なった。探傷前には各種基準レベルも測定した。

5.2 実験の手順

実験は次の手順で行なった。

- (1) 試験片の作製
- (2) X線透過法によるキズ位置、面積の推定
- (3) 各種透過パルス測定方法による基準レベルの測定
- (4) 代表的なキズの詳細な探傷実験
- (5) キズの位置・面積と各探傷方法適用性の関係

以下、項目ごとに実験方法および実験結果を示す。

5.3 試験片の作製

試験片は、SD345のD19、D25、D32、D38、D51の5種類の鉄筋を用いて作製した。

溶接は、ルートギャップを10mm確保し、炭酸ガスシールドアーク溶接を行なった。

溶接部には図5.3.1のようにキズを入れた。キズは、鉄筋断面の中央、0度、90度（リブ位置から右回りの角度で呼ぶ）の3箇所に入れるように計画した。

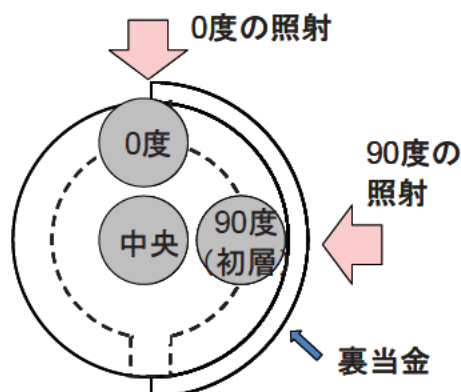


図 5.3.1 キズの位置と X 線透過方向

D32 は、中央、0 度、90 度の 3 箇所、大中小 3 種類の大きさのキズを入れることを計画した。キズの位置 3 箇所×キズの大きさ 3 種類の 9 種類であり、1 種類当たりの試験片の本数は 10 数本ずつ、全部で 163 本作製した。

D19, D25, D38, D51 も中央、0 度、90 度の 3 箇所、大中小 3 種類の大きさのキズを入れることを計画した。D32 と異なるのは、1 種類当たりの試験片の本数であり、1 種類当たり 2~3 本ずつとした。各鉄筋は、全部で D19 24 本、D25 21 本、D38 21 本、D51 22 本作製した。

キズは、運棒操作により計画した位置・大きさの溶け込み不良、融合不良となるようにした。キズを入れた鉄筋を A 側、その開先面を A 面、もう一方の鉄筋を B 側、その開先面を B 面とした (図 5.3.2)。

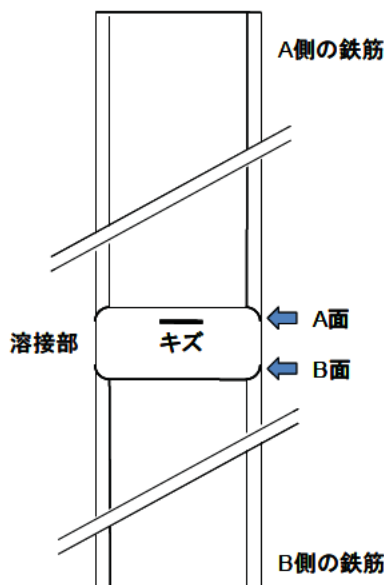


図 5.3.2 鉄筋とキズの位置関係と呼び方

5.4 X線透過法によるキズ位置、面積の推定

超音波探傷前に、実際に生じたと考えられるキズの位置と面積を推定するため、図 5.3.1 のように 0 度と 90 度の方向から X 線を透過させ、図 5.4.1 のようにフィルムに写ったキズの長さを測定した。キズの位置は、図 5.3.1 のように中央、0 度、90 度 (初層部) に 3 分類した。

キズの面積は、0 度と 90 度の X 線写真から測定したキズの長さを長軸、短軸とする楕円と仮定して求めた。鉄筋の公称断面積に対するキズ面積の比率「キズ面積率」を求めた。キズの位置は、図 5.4.1 のように楕円を描いて求めた。

キズの位置ごとのキズ面積率の範囲は表 5.4.1 のとおりであった。D32 は、163 本の中からキズ位置ごとに 30 本ずつ選定した結果である。そのほかの鉄筋は、すべて測定した。

D51 のキズ面積率の範囲にカッコがついているのは、太いためにキズが鮮明に映っていないものがあったためである。面積を求めるためには 0 度と 90 度の二方向の測定結果が必要であるが、片側しか映っていないものが 5 本のうち 2~3 本あった。カッコ内は、二方向の測定が可能であったのは、中央キズは 2 本、0 度キズは 3 本、90 度キズは 3 本であった。

D51は、一方向しか映っていないにもかかわらず位置の分類をしているのは、他の鉄筋のキズ位置がほぼ計画どおりの位置に入っていたことから、D51についても計画どおりにキズが入っているものとして、分類している。

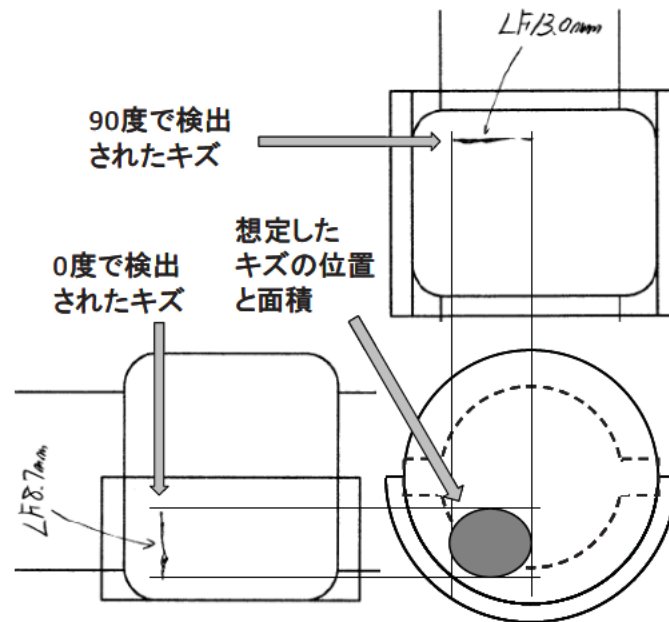


図 5.4.1 溶接部キズの位置・面積の推定方法

表 5.4.1 キズ面積率の範囲

鉄筋	X線透過試験 全本数	キズ なし 本数	キズの位置と試験片本数, キズ面積率の範囲					
			中央		0度		90度	
			本数	キズ面積率の 範囲 (%)	本数	キズ面積率の 範囲 (%)	本数	キズ面積率の 範囲 (%)
D19	24	11	6	10.0~43.3	6	5.0~27.7	1	10.0
D25	21	4	6	11.8~27.0	6	8.5~41.0	5	1.4~22.1
D32	90	0	30	7.1~31.6	30	2.0~41.0	30	2.7~47.3
D38	21	4	6	5.0~25.0	4	5.5~18.9	7	0.8~27.7
D51	22	7	5	(1.0~17.8)	5	(0.2~12.5)	5	(2.2~10.8)

5.5 各種透過パルス測定方法による基準レベルの測定

5.5.1 各種透過パルスの測定方法

基準レベルは、3章の測定に用いた4種類の透過パルスの測定方法(図3.2.1～図3.2.4)によって求めた。透過走査は、超音波探傷を行なった全試験片の、溶接した両側の鉄筋について測定した。斜め透過走査、V透過走査、斜めV透過走査は、5本ずつの測定である。

測定には走査用治具を用いた。3章では、送信・受信探触子距離を2.8Dまたは5.6Dに固定して測定したが、ここでは基準レベルの本来の測定方法である、送信・受信探触子距離を2.8Dまたは5.6Dの近くで走査して最大のパルスを得るようにした。ゲインは90%に設定した。

5.5.2 透過走査の測定結果

JIS法の基準レベルとなる透過走査の測定結果は表5.5.1のとおりであった。

表 5.5.1 透過走査の結果 (dB)

	単位	D19	D25	D32	D38	D51
試験片数	本	48	42	60	42	44
平均	dB	51.4	51.1	50.4	50.3	53.8
最大	dB	57.3	52.4	55.1	53.5	59.1
最小	dB	48.4	49.4	47.1	47.0	50.9
標準偏差	dB	2.0	0.8	1.6	1.4	1.7

5.5.3 そのほかの透過パルス測定結果

斜め透過走査、V透過走査、斜めV透過走査と透過走査の差を表5.5.2に示す。鉄筋径ごとにグラフに表すと図5.5.1のように、鉄筋径が大きくなるほど基準レベルは大きくなっている(実際にはマイナスの値であり、小さくなっている)。

D32の斜め透過の平均値は-5.7dBである。3章、4章の結果から、斜め透過は細いリブを送信・受信することなどから-10dB程度と予測されたが、それよりも小さい値となっている。この原因は、探触子を走査して最大値を求めたことによるものと考えられる。V透過は-10.5dBとなっている。3章では17dBであったが、これも測定方法の微妙な違いによるものと考えられる。斜めV透過は-26.3dBになっており、3章の結果とほぼ同じであった。

表 5.5.2 透過走査のパルスの大きさに対する各透過走査の差 (dB)

	D19		D25		D32		D38		D51		JRJS 0005 補正值
	平均	標準 偏差	平均	標準 偏差	平均	標準 偏差	平均	標準 偏差	平均	標準 偏差	
斜め透過	8.3	4.6	5.7	2.2	5.7	2.9	9.7	4.0	13.3	2.0	6
V透過	7.2	2.4	11.5	3.0	10.5	3.8	11.9	5.9	20.6	5.6	—
斜めV透過	14.7	2.1	18.6	2.9	26.3	5.6	27.1	3.0	31.5	3.6	16

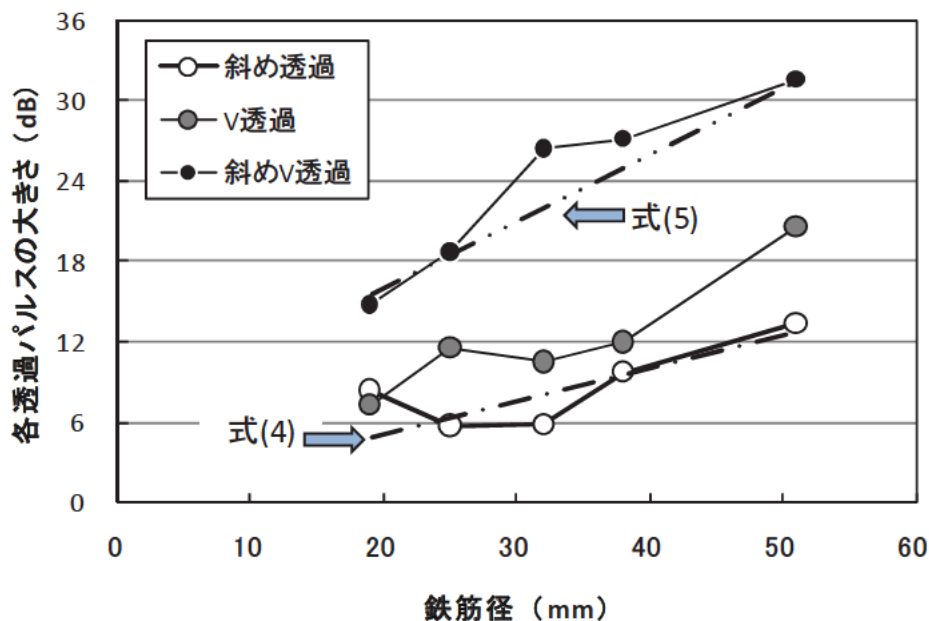


図 5.5.1 鉄筋径と各透過パルスの大きさの関係

以上の結果は、走査用治具を用いて測定した結果であり、リップの状態に応じた微妙な調整を行うことができていないため、D32 について、別途、JRJS 0005 に準じて手動によりゲインを 50% に設定して測定した。その結果を表 5.5.3 に示す。測定した試験片の数は 6 本である。

平均値は表 5.5.2 とほぼ同様の結果であるが、標準偏差は手動のほうがかなり小さくなっている。この結果より、走査用治具を用いた測定結果は微妙な調整を行うことができないため、ばらつきが大きくなったものと考えられる。各透過走査によるパルスの大きさは、透過走査との相対的な関係であることから、平均値は手動、走査用治具と用いた場合とも、ほぼ同じになったものと考えられる。

この結果より、走査用治具を用いた表 5.5.2 の結果は問題ないものと考えられ、各透過走査の結果は鉄筋径によって異なるものと考えられる。

表 5.5.3 手動による各透過走査の測定結果 (D32) (dB)

		斜め透過走査	V 透過走査	斜め V 透過走査
透過走査との差	平均	5.4	11.3	28.2
	標準偏差	1.1	1.7	1.0

表 5.5.2 の結果はほぼ妥当と判断されたことから、表の右端の JRJS 0005 の補正值と比較すると、斜め透過は D19, D25, D32 はほぼ一致しているが、D38, D51 は大きくなっている。斜め V 透過は、全体に径が太くなるほど大きくなっているものの、D19 と D25 は補正值程度であるが、それ以上は径が太くなるほど補正值よりもかなり大きくなっている。補正值は、鉄筋径によって変える必要があるものと考えられる。

5.5.4 補正值の検討

上記のとおり、補正值は鉄筋径によって変える必要があることが明らかになった。以上の結果を用いて補正值を検討する。

まず、鉄筋径ごとの各透過パルスの結果を直線回帰すると、式(1)~(3)のようになった。

$$\text{斜め透過} \quad y=0.196x+2.0 \quad r^2=0.59 \quad (1)$$

$$\text{V透過} \quad y=0.370x+0.1 \quad r^2=0.85 \quad (2)$$

$$\text{斜めV透過} \quad y=0.527x+6.3 \quad r^2=0.91 \quad (3)$$

ここに、 y ：各透過パルスと透過走査の差（補正值）

x ：鉄筋径

式(1)、(2)の y 切片は小さく、鉄筋径と透過パルスはほぼ比例するものと想定されることから、斜め透過を原点を通る直線で回帰すると式(4)が得られた。

斜めV透過は、斜め透過を2回とリブ反射する（図3.2.4参照）。式(3)と式(4)の傾きを比べると、斜めV透過は斜め透過のほぼ2倍になっている。また、式(3)の y 切片は約6である。3章のリブ反射の影響の検討の結果も6であり（表3.3.2参照）、両者はほぼ一致している。これらのことから、斜めV透過の補正值は、ほぼ式(5)のようになるものと考えられる。

$$\text{斜め透過（原点）} \quad y=0.25x \quad r^2=0.54 \quad (4)$$

$$\text{斜めV透過} \quad y=0.5x+6 \quad (5)$$

式(4)、(5)を図5.5.1に示すとおり、測定結果とほぼ一致している。

基準レベルの補正值については、今後、各種鉄筋の測定を行う必要があるが、鉄筋径を考慮する必要があること、その値は式(4)、(5)程度にすべきものと考えられる。

JRJS 0005には斜めタンデム走査法による探傷も規定されている。斜めタンデム走査法による判定基準を求める方法が斜めV透過走査である。透過走査の結果から斜めV透過走査によるその結果を求めるための補正值が式(5)で求められるとすると、超音波探傷は6dB小さくなるごとに振幅が $1/2$ になるので、18dB（図5.5.1または式(5)によるD19、D25）で $1/8$ 、D32、D38は24dB程度になり $1/16$ 、D51は30dB程度であり $1/32$ 程度になることから、D32以上はノイズとの判別はつきにくいものと考えられることから、斜めタンデム走査法は実用上、適用は難しいものと考えられる。

5.6 代表的なキズ試験片による詳細な探傷実験

5.6.1 代表的な試験片の選定

キズの位置と送信・受信探触子の位置関係を確認するための詳細な探傷実験を行うため、各径の鉄筋について、全試験片の中から表 5.6.1 の探傷予測のもとに、中央部のキズ 1 本、0 度と 90 度のキズそれぞれについて大きさ「小」と「中」の 1 本ずつ、合計 5 本の試験片を選定した。選定した試験片のキズの位置と、超音波伝搬経路の予測は、図 5.6.1 のとおりである。表 5.6.1、図 5.6.1 は、D32 の場合である。

キズの位置・大きさごとの探傷予測は、4 章の検討結果から、表 5.6.1 のとおり超音波の伝搬経路上にキズがある場合は探傷可能 (○)、そうでない場合は探傷不可能 (×) とした。具体的には、一般に、中央のキズは、JIS 法では探傷可能であり、JRJS 法は不可能である。逆に 90 度 (初層) のキズは、JRJS 法は探傷可能であるが、JIS 法は基本的には不可能である。ただし、キズの大きさが「中」のとき JIS 法が△になっているのは、キズの広がりを中心部付近まで達している場合は探傷が可能な場合もあり得ることを示している。0 度のキズの場合、JIS 法はキズの大きさが「中」のとき探傷可能であるが、「小」のとき JIS 法が△になっているのは、探触子を溶接部に近づけてキズ面に超音波が当たる場合は探傷できる可能性があることを示している。JRJS 法は、キズが超音波の伝搬経路まで広がっている場合は探傷できる可能性があることを示している。表 5.6.1 のカッコは、図 5.6.1 の X 線透過試験結果から予測しなおした結果である。

表 5.6.1 キズの位置・大きさと探傷予測 (D32 の場合)

キズ位置	中央	0 度		90 度 (初層)	
キズ面積率	12.9%	2.4% (小)	11.8% (中)	9.8% (小)	19.1% (中)
JIS 法	○ (△)	△ (×)	○ (○)	× (×)	△ (×)
JRJS 法	× (△)	△ (○)	△ (○)	○ (△)	○ (○)

凡例 ○：探傷可能，△：条件によって探傷可能か不可能か異なる，×：探傷不可能

() 内は、図 5.6.1 の X 線透過試験から予測されるキズの位置・面積と探傷の可能性。

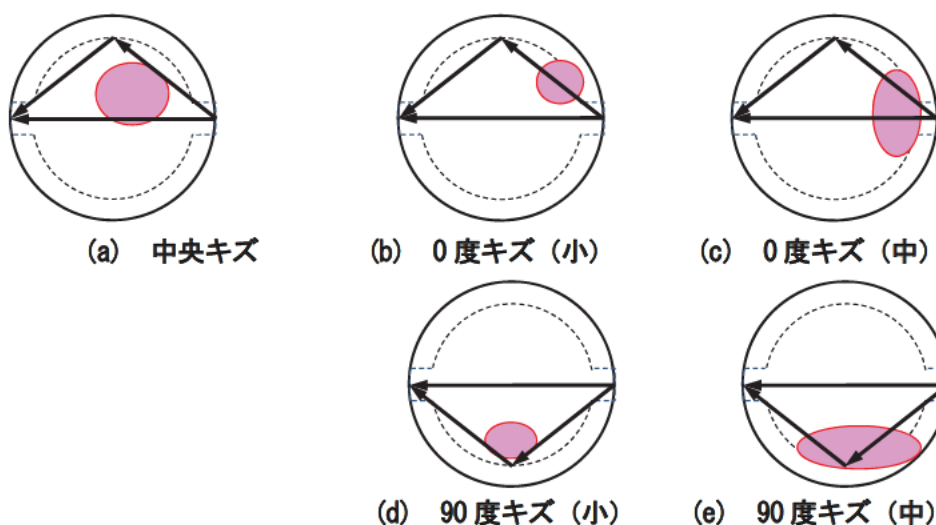


図 5.6.1 キズ位置・大きさと超音波伝搬経路 (D32 の場合)

5.6.2 詳細な探傷実験の方法

試験片の A 側および B 側から JIS 法および JRJS 法を適用して、次の 2 つの探傷実験を行なった。

(1) 探触子走査位置ごとのエコー高さ測定

探触子走査位置ごとのエコー高さ測定は、**図 5.6.2** のように行なった。キズの位置、大きさは X 線透過試験によって予測できていることから、キズの中心に超音波ビームが当たると予測される位置に送信探触子を固定し、受信探触子は最大のエコーが受信されると予測される位置に対してその前後を 2mm ずつ探触子を移動させてエコー高さを測定した。また、逆に最大のエコーが受信されると予測される位置に受信探触子を固定し、送信探触子をキズの中心に超音波ビームが当たると予測される位置に対してその前後を 2mm ずつ探触子を移動させてエコー高さを測定した。

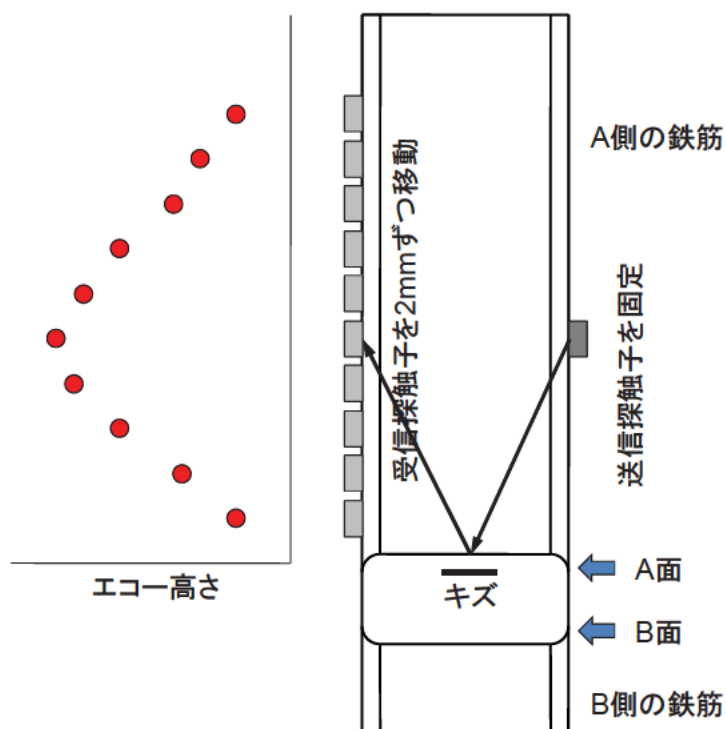


図 5.6.2 走査位置ごとのエコー高さ測定（送信探触子固定の場合）と、結果の模式図

(2) 走査基準線ごとの探傷

実際の探傷は、キズ位置がわからないため、次のように行う。JIS 法によってリブ間の中心に超音波が当たる位置、JRJS 法によってリブ間の中心に直角方向の外周部に超音波が当たる探触子位置は、溶接部から $1.4D$ (D : リブ間距離) の距離となる (**図 5.6.3**)。この位置を基準（走査基準線をけがいておく）に、送信探触子を溶接部に近づける（遠ざける）場合、受信探触子を遠ざける（近づける）ように連動させて探傷し、エコーの最大値を求める。

実験では、送信・受信探触子の位置関係が明確になるように、また、(1)の結果より、キズの状態などにより送信・受信探触子とキズの位置が理論通りにならない可能性があることから、 $0.7D$ 、 $2.1D$ にも走査基準

線をけがいておき、送信探触子を 0.7D 位置に固定した場合、受信探触子を 2.1D の距離に移動し、その近くを走査し、最大エコーが得られたときのエコー高さ、探触子距離を記録した (図 5.6.3(a))。この操作を走査基準線ごとと、溶接部に最も近づけられる位置において行なった。また、受信探触子を走査基準線ごとに固定し、送信探触子を走査しながら同様の測定を行なった (図 5.6.3(b))。

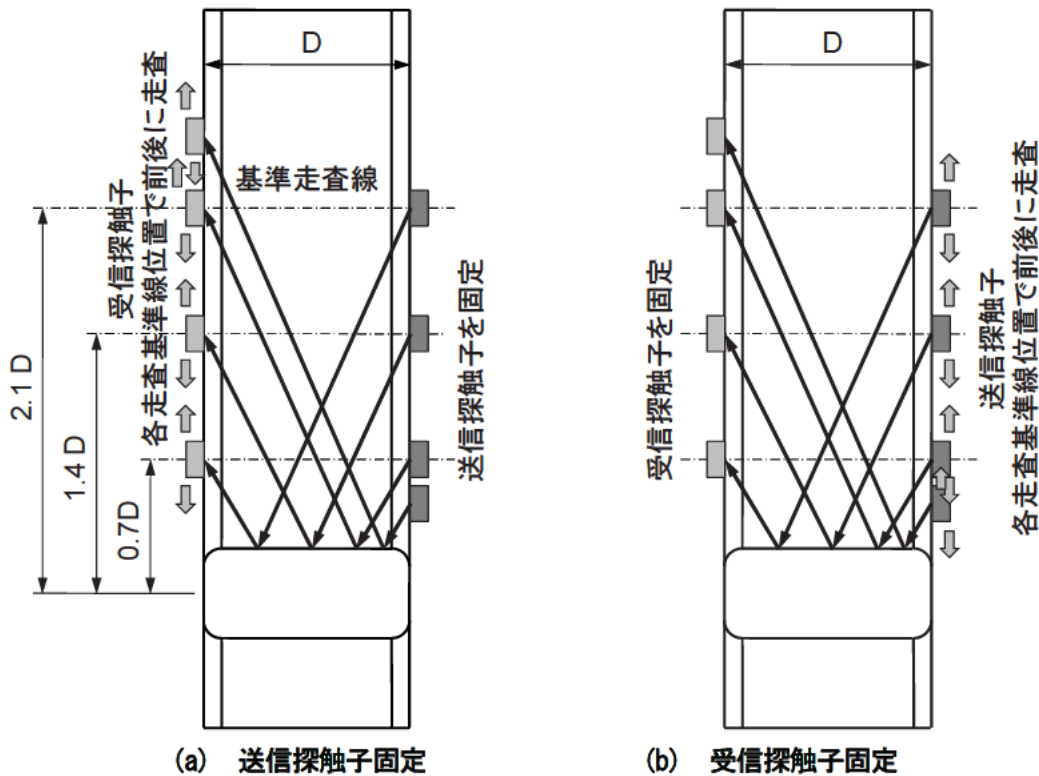


図 5.6.3 走査基準線ごとの探傷実験

5.6.3 詳細な探傷実験の結果

(1) 探触子走査位置ごとのエコー高さ測定結果

送信・受信探触子の溶接部からの距離とエコー高さ測定結果の一例を図 5.6.4 に示す。この結果より、エコーの最大値とそのときの距離を、最大値の測定結果の前後数点ずつを三次曲線で回帰して求めた。

最大エコー高さが測定された送信・受信探触子の距離を図 5.6.5 に示す。屈折角 70 度の探触子を使用しているため、JIS 法、JRJS 法とも、送信探触子からキズまでと、キズから受信探触子までの距離の和は、理論的には $2.8D$ となる。図 5.6.5 の斜めの線は両者の和が $2.8D$ になり、この線付近にプロットされるはずであるが、結果はかなりばらついている。これは、各走査基準線ごとに最大のエコーが得られたときの送信・受信探触子位置をプロットしたものである。同じキズであっても、キズには広がりがあり、またキズの中の状態が異なっていることなどから最大のエコーを受信できる探触子の位置関係が異なるものと考えられる。

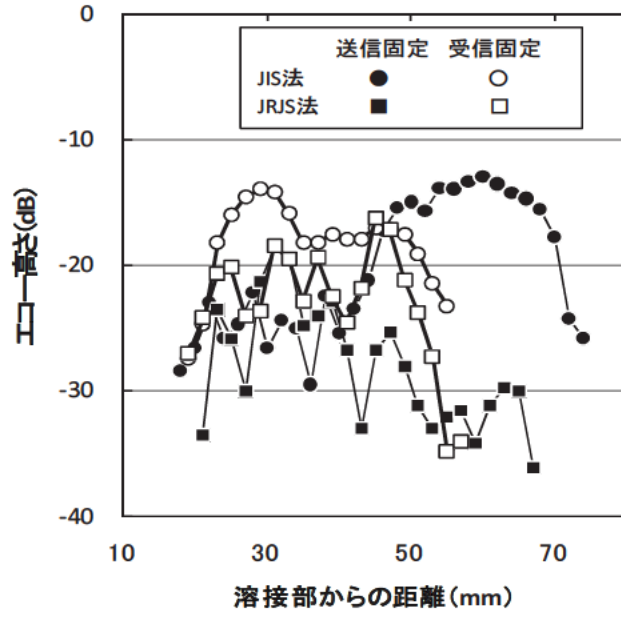


図 5.6.4 溶接部の距離とエコー高さ (キズ: D3 の中央キズの例)

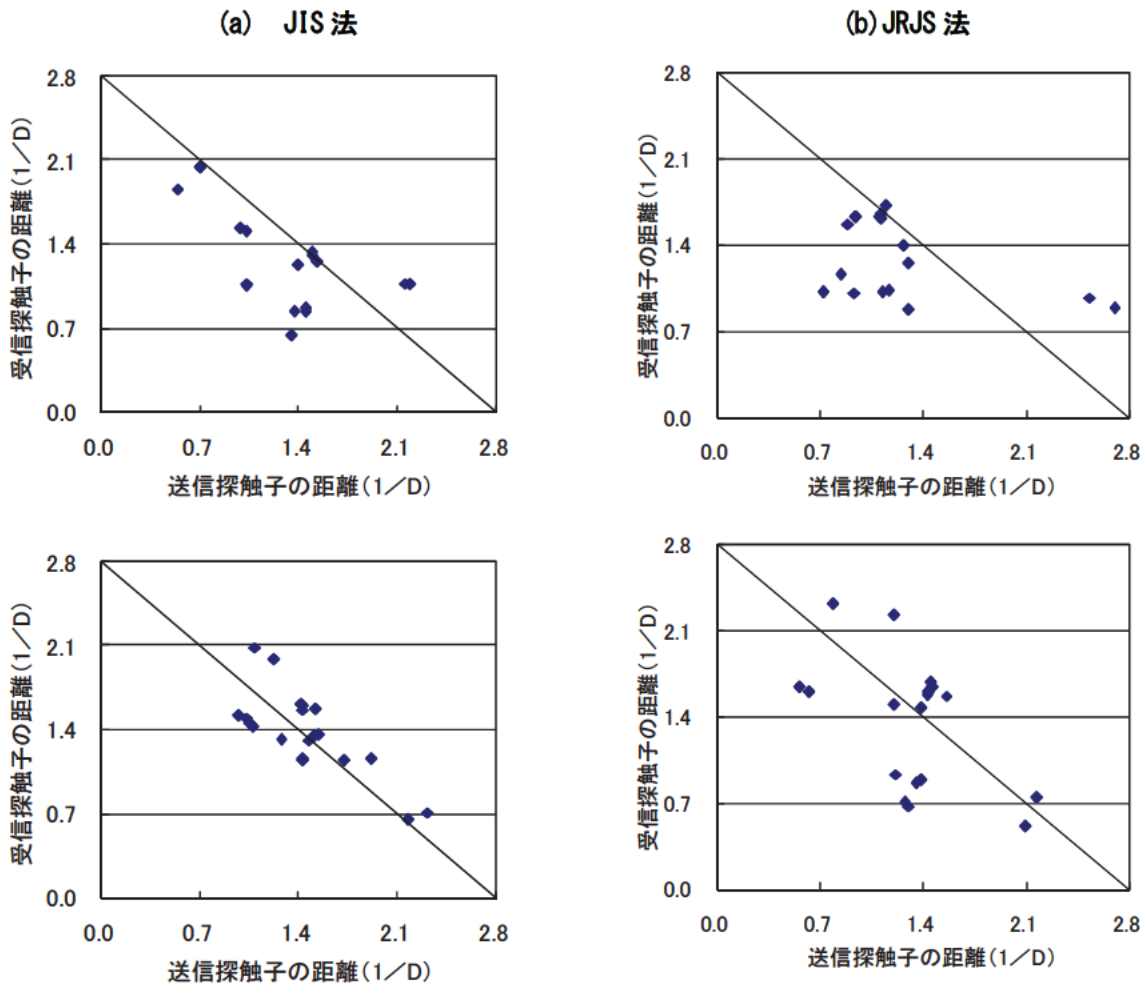


図 5.6.5 最大エコー高さを受信したときの送信・受信探触子の溶接部からの距離 (その 1)

上: D19, 下: D25

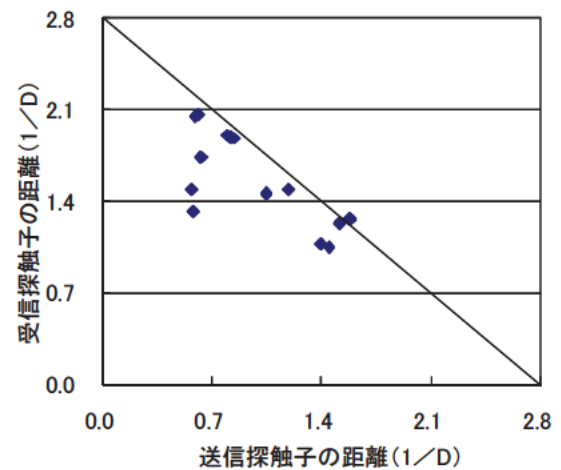
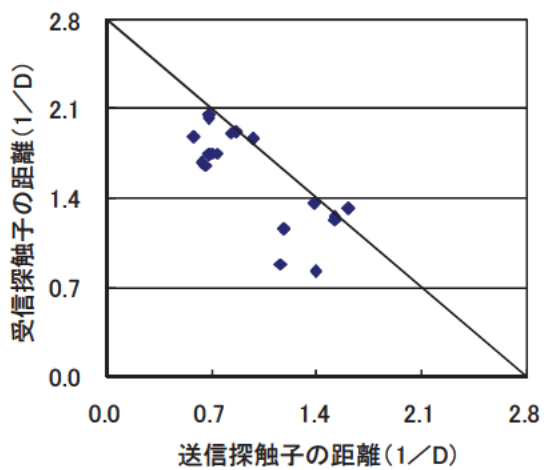
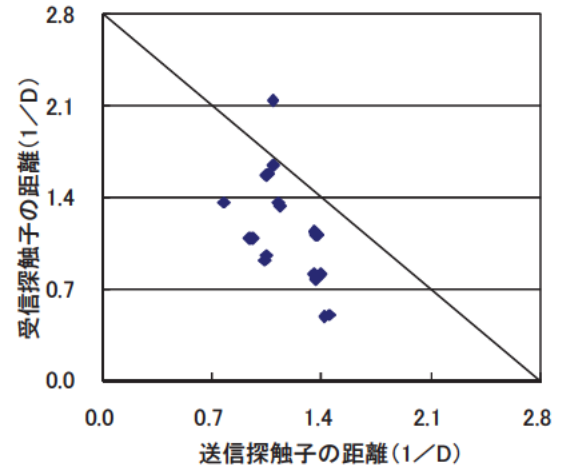
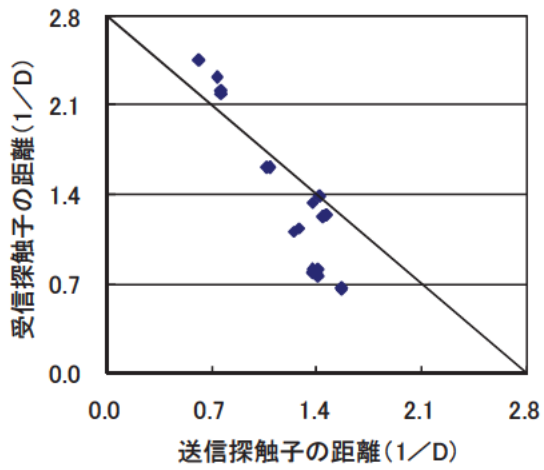
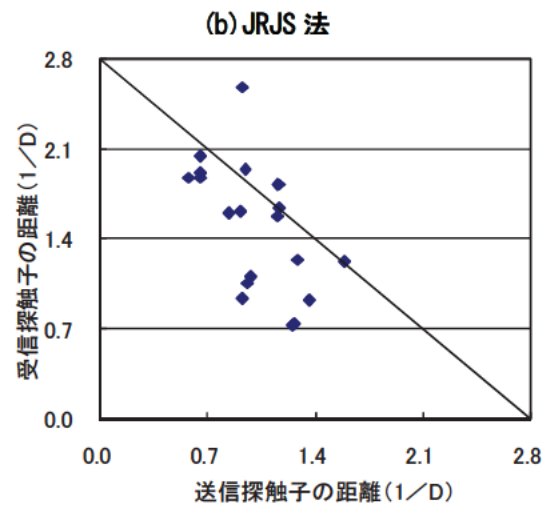
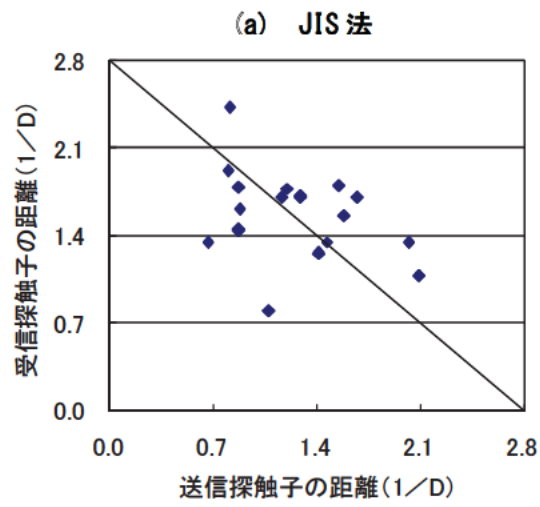


図 5.6.5 最大エコー高さを受信したときの送信・受信探触子の溶接部からの距離 (その 2)

上 : D32, 中 : D38, 下 : D51

キズの位置ごとの最大エコー高さを図 5.6.6 に示す。図中の一点鎖線は JRJS 0005 の判定基準である。透過走査による基準エコーから判定基準を求めているため、JIS 法は -18dB、JRJS 法は -24dB が判定基準となる。キズ位置、伝搬経路と、エコー高さの関係について検討する。測定したキズの位置、キズの大きさは、鉄筋径によって異なっているため、記号の数は異なっている。

JIS 法は、中央のキズは判定基準よりも大きい。0 度のキズ「中」も判定基準より大きいですが、そのほかは判定基準よりも小さく、表 5.6.1 の予測と一致している。

JRJS 法についても 0 度のキズ「小」の A 側からの測定以外は判定基準以上であり、予測と一致している。JIS 法と比較しても、中央のキズのエコー高さは小さく、90 度のキズは大きくなっており、JRJS 法の特徴を表している。

A 側、B 側からの探傷結果を比較すると、キズを付けていない B 側からのエコー高さ（白抜き記号）のほうが高い傾向がある。実現場においては、どちらの面にキズができていたかは不明であり、両側からの探傷が必要であることを示している。

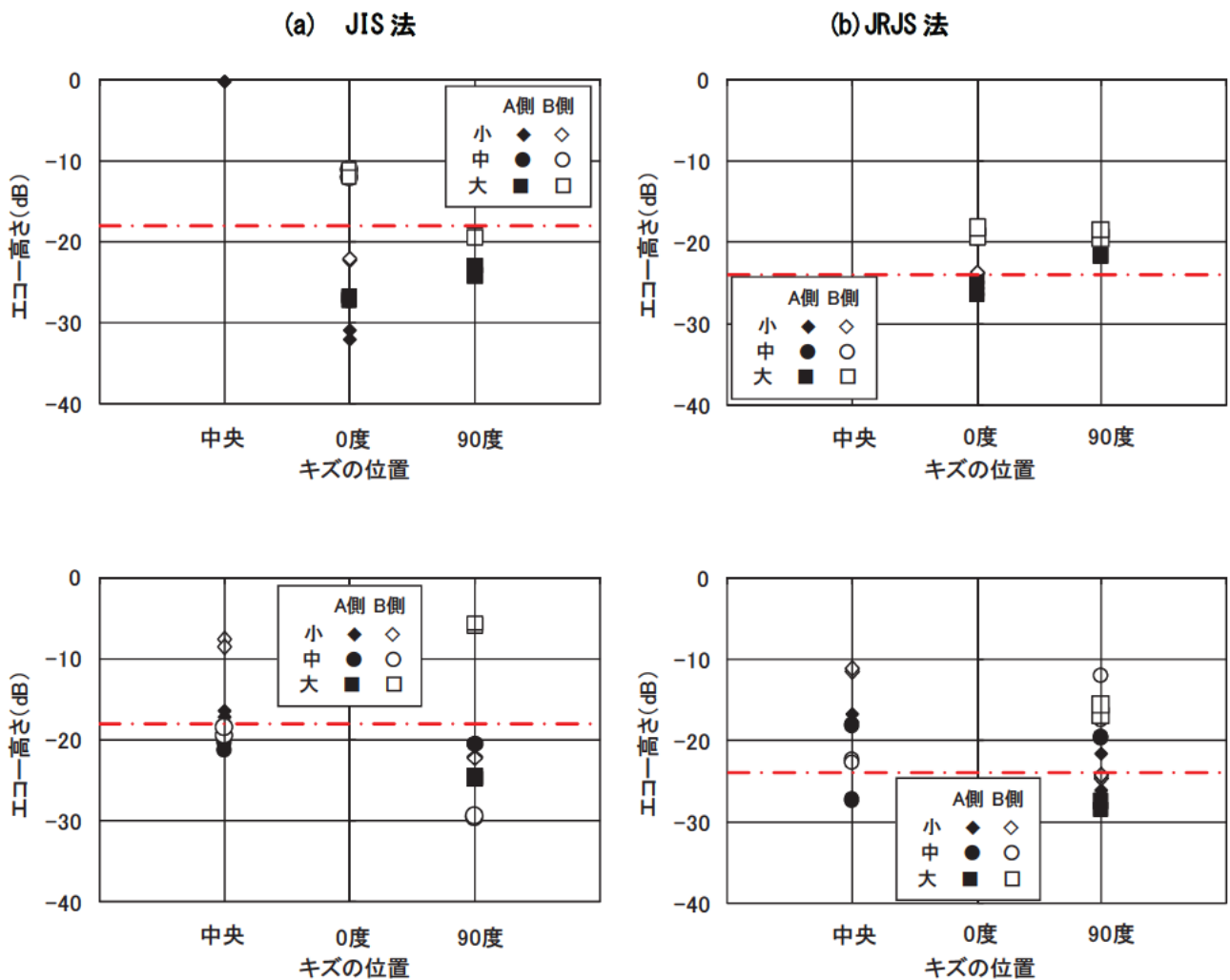


図 5.6.6 キズ位置とエコー高さの関係（その 1）

上：D19，下：D25

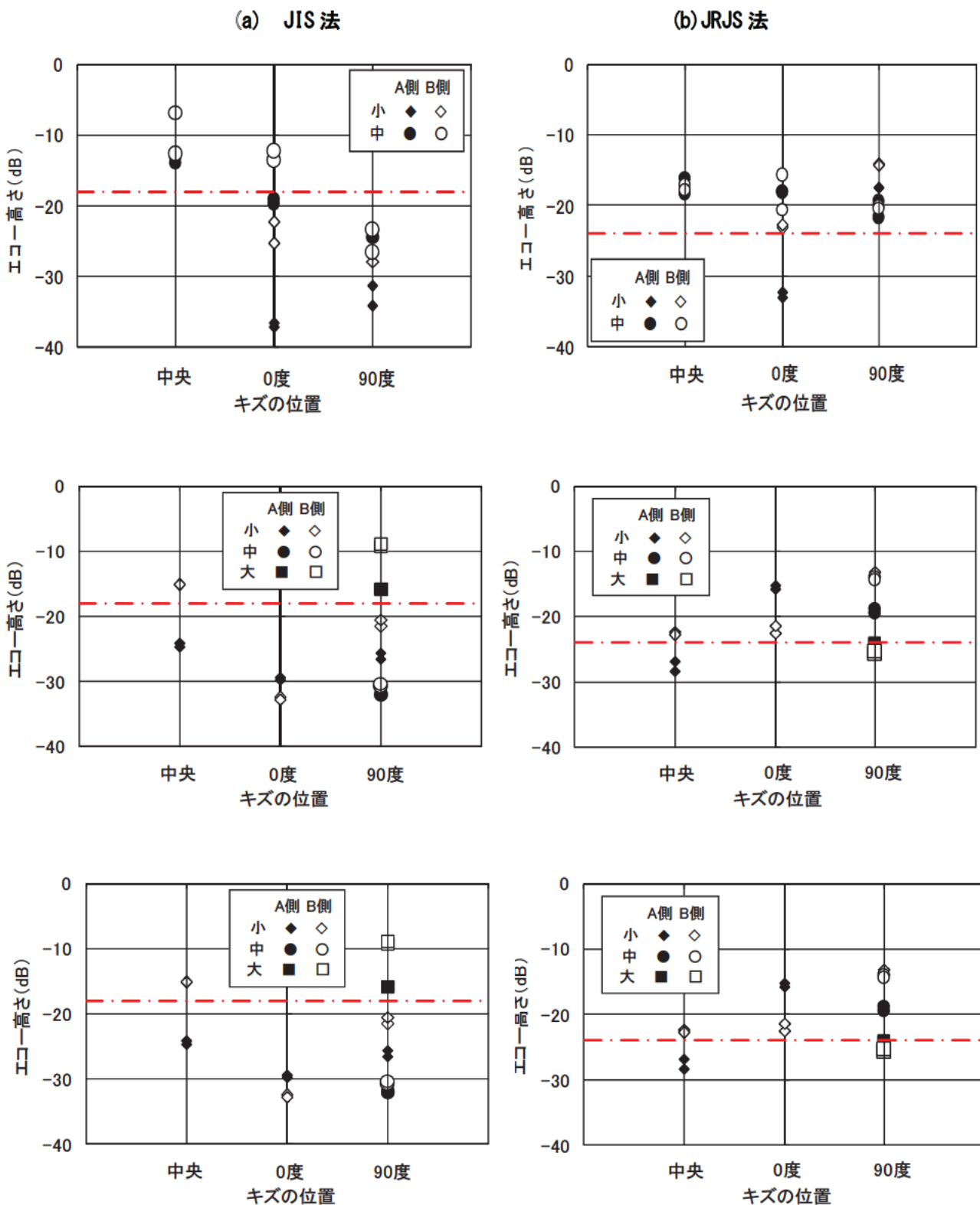


図 5.6.6 キズ位置とエコー高さの関係 (その 2)

上 : D32, 中 : D38, 下 : D51

② 走査基準線ごとの探傷から得られた最大エコー高さ測定結果

(1)の走査位置ごとの測定結果から得られた最大エコー高さを比較対象に、走査基準線ごとに探傷を行なった結果から得られた最大エコー高さとの関係を、D32 の場合について図 5.6.7 に示す。両者には±6 dB 程度のばらつきがあるものの、ほぼ対応関係がある。そのほかの鉄筋についてもほぼ同様の傾向であった。

以上の結果より、図 5.6.3 のように走査基準線ごとに探触子を移動し、その近くを走査することによってほぼ探傷できるものと考えられる。

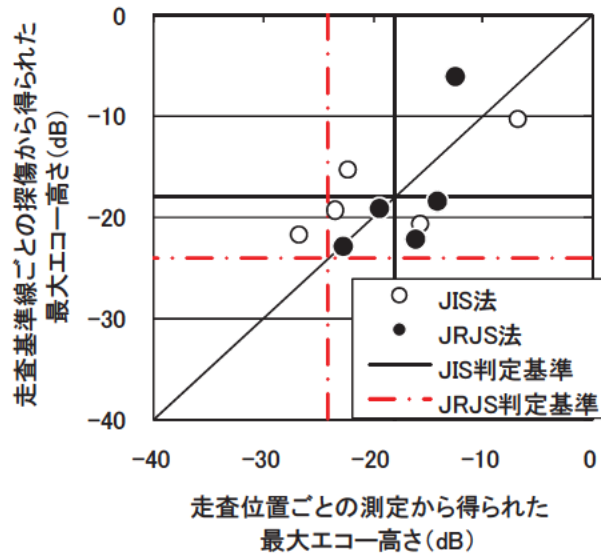


図 5.6.7 走査位置ごとと、走査基準線ごとの探傷による最大エコー高さの比較 (D32)

5.7 キズの位置・面積と各探傷方法適用性の関係

5.7.1 実験方法

試験片本数の多い D32 については、キズ位置を中央、0 度、90 度に分類した 30 本ずつの試験片について、**図 5.6.3** と同様な探傷実験を行い、JRJS 法、JIS 法のエコー高さの高い方を求めた。また、そのときの送信・受信探触子と溶接中心位置までの距離を測定した。

5.7.2 実験結果

探傷結果は**図 5.7.1** のとおりである。黒丸は JRJS 法のエコー高さが JIS 法よりも高かった結果、白丸は JIS 法が高かった結果であり、キズの位置、大きさに対して探傷しやすい方法を示している。太い実線は JIS 法の判定基準、一点鎖線は JRJS 法の判定基準であり、白丸と実線、黒丸と一点鎖線が対応している。

JIS 法による中央部キズの探傷は、仮定されているとおりであり、探傷精度が高いことを示している。また、キズ面積率 7% 以上の場合、ほぼ判定基準以上であった。

0 度のキズは、リブに近い小さいキズ（キズ面積率 数%）の 3 点の黒丸は JRJS 法によって検出できている。JIS 法では、キズがリブ軸を外れた位置に形成されていたために検出できなかった。キズ面積率 20～30% あたりの 3 点の黒丸は、リブ軸に直交した細長いキズであり、リブから中心に数 mm 程度のキズであったため、JIS 法では超音波が当たりにくく、JRJS 法のほうが高いエコーが検出されたものである。そのほかのキズは JIS 法のほうが高い。

90 度（初層）位置のキズは、キズ面積率 20% 以下はすべて JRJS 法のエコー高さが高く、キズが大きくなり（今回の結果は 30% 以上）、鉄筋中心に達するような場合は JIS 法のエコーが高くなっている。キズ面積率 20～30% の作製ができていないため JRJS 法と JIS 法の検出限界は明確ではないが、キズを円と仮定した場合、25% のとき鉄筋径の 1/2 の円、つまりキズが鉄筋の中心に接することから、90 度位置のキズ面積率 20% 程度を超える大きいキズは JIS 法によるほうが探傷しやすくなるものと考えられるが、それ以下のキズや、リブ軸を越えないキズは JRJS 法のほうが探傷しやすいものと考えられる。

エコー高さと判定基準の関係は、JIS 法、JRJS 法ともキズ面積率が 10% 程度を超えるとほとんど判定基準を上回っている。

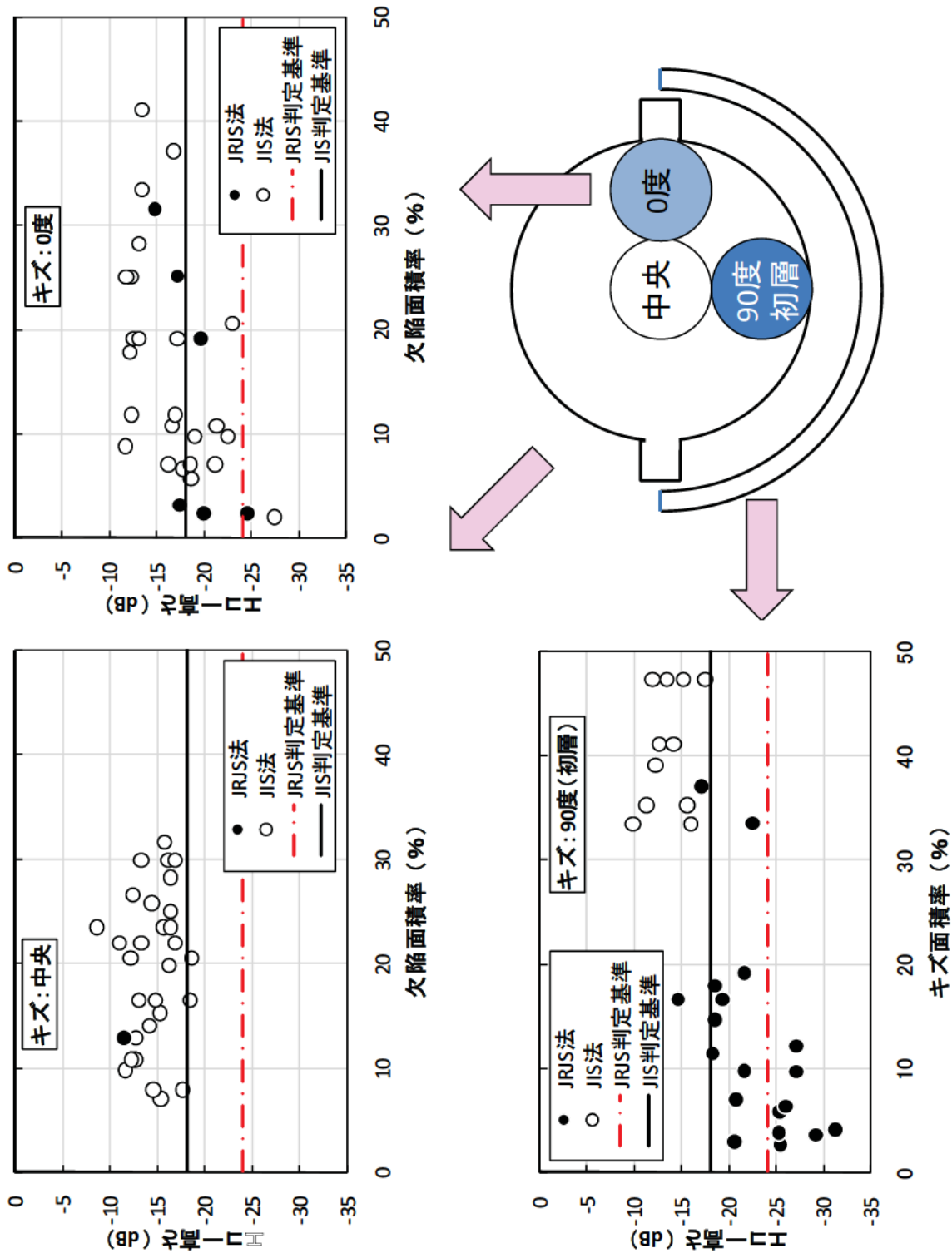


図5.7.1 傷の位置・面積と各探傷方法適用性の関係

最大エコーが得られた時の送信探触子 T までの距離（送信距離）と、受信探触子 R までの距離（受信距離）の関係を図 5.7.2 に示す。測定の起点は、ルートギャップの中央である。送信距離、受信距離は鉄筋径 D で除している。図 5.7.2 の斜めの線は図 5.6.5 と同じであり、送信距離、受信距離の和が 2.8D になるときを表す線である。

図 5.7.2 の結果は、図 5.6.5 とは異なっている。試験片ごとに各走査基準線（今回は、送信探触子を溶接部に一番近づけた位置と、0.7D、1.4D、2.1D の 4 点）に探触子を配置してその前後を走査するまでは同じであるが、図 5.7.2 には 4 点のうちの最大エコーが得られたときの距離で示している。この場合は、図 5.6.5 ほどばらついてはおらず、JIS 法、JRJS 法とも試験片の最大エコーが得られる送信・受信探触子の距離は理論値に近くなっていることから、図 5.6.3 のように各走査基準線ごとに探触子を配置し、その前後で走査することによってほぼ理論どおりの探傷ができているものと考えられる。

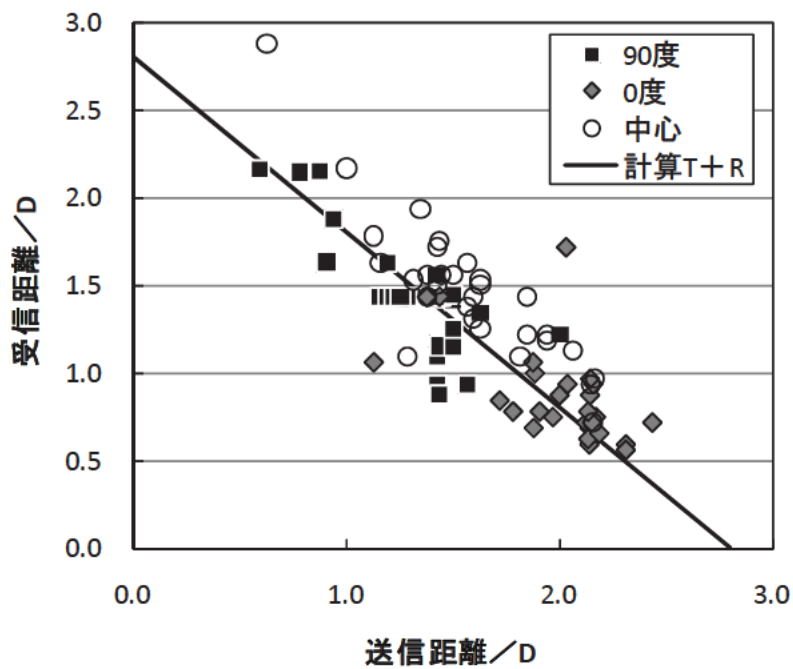


図 5.7.2 送信距離と受信距離の関係

6章 引張試験結果と超音波探傷試験結果の対応

6.1 実験目的

本研究の目的は、超音波探傷試験結果がキズの位置に応じて推定できることと、引張強度をどの程度保証できるかを確認することである。

5章では、溶接面に平行な2方向からX線透過試験によってキズの位置・面積を推定しておくことにより、探傷の位置を確定し、詳細な探傷実験を行なった。その結果、キズの位置・面積と探傷結果はほぼ対応していることは確認できた。しかしながら、溶接面に平行なX線透過試験はキズの長さが得られるのみである。また、2方向からのキズの長さから、キズの形状を楕円と仮定してキズ面積を求めるなど、実際のキズの状態を表しているのかわからない。また、探傷結果が引張強度をどの程度保証できているのかについては、引張試験を行なって強度を求めなければわからない。

このようなことから超音波探傷を行なった後、引張試験を行い、引張強度、実際のキズ位置・面積を求め、探傷結果の比較を行なった。

6.2 引張試験結果

6.2.1 引張試験

D32は超音波探傷を行なった90本のうちの約1/3、D19、D25、D38、D51は20数本のうちの約1/2の引張試験を行い、引張強度、破断面の観察、キズ面積の測定を行なった。

6.2.2 キズの状態およびキズ面積の測定

引張試験により溶接部で破断した破断面を写真撮影した。母材破断した試験片は、溶接部分で切断し、X線透過試験を行い、キズの状態をスケッチした。これらを資料に示す。

キズ位置は、計画したとおりほぼ鉄筋断面の中央、0度（リブ位置）、90度（初層部）に分類できる。ただし、面積は、大、中、小の3段階に分けるように計画したが、以下の結果のとおりほぼ連続的に分布している。

資料の各鉄筋の若い番号（1～数番まで）はキズを入れない計画であったが、ほとんど溶接部で破断した。写真を見ると、裏当金に沿った初層部の浅いキズがあることがわかる。

キズ面積は、裏当金がついていないほうの破断面について、写真を撮影し、画像解析によって求めた。キズ面積を鉄筋の交渉断面積で除すことにより、キズ面積率を求めた。

6.2.3 キズ面積率と引張強度の関係

全試験片の結果を図6.2.1に、鉄筋径ごとのキズ面積率と引張強度の関係を図6.2.2に示す。両図は、キズの位置ごとに分けて表示している。

図6.2.1より、キズ面積が大きくなるほど強度は低下している。キズの位置ごとにみると、90度キズ（黒い記号）、0度キズ（灰色）、中央キズ（白）の順に左側に寄っている、つまりキズ面積が小さくても強度低下が大きい傾向がある。鉄筋径ごとの傾向をみるため、図6.2.2に鉄筋径ごとのキズ面積率と引張強度の関係を示している。

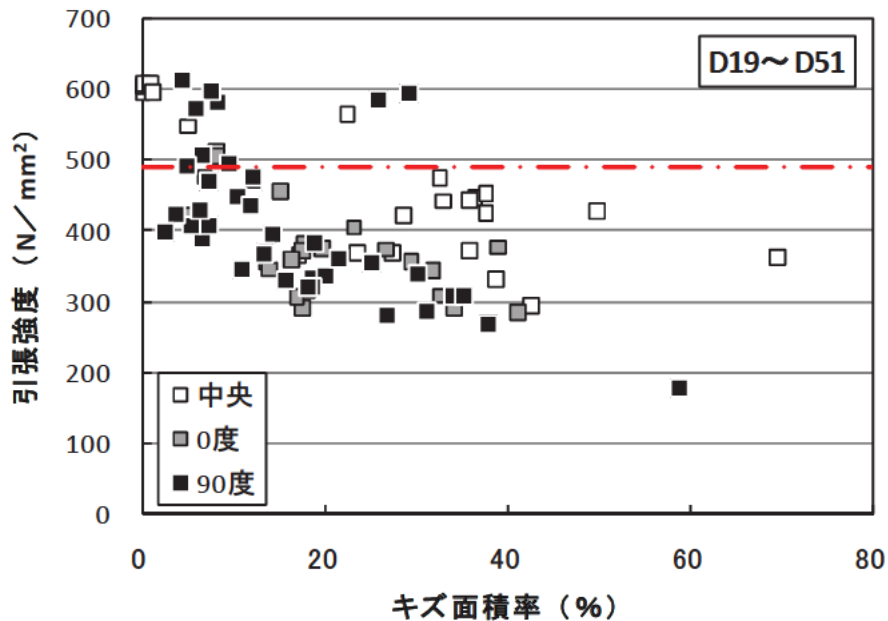


図 6.2.2 全試験片のキズ面積率と引張強度の関係

JRJS 0005 では、超音波探傷の判定基準は、鉄筋の引張強さの規格値を保証しており、引張強度が規格値を下回るのは、キズ面積率 10%以上であるといわれている。そこで、図 6.2.1 には、規格値とキズ面積率 10%の点と、母材強度を結び、引張強度ゼロまで伸ばした線を入れている。ただし、今回、母材強度が得られたのは、D19 が 1 本、D32 が 5 本であった。その引張強度は 610～620N/mm² であった。通常、規格値 490N/mm² (図中の一点鎖線) の 1.2～1.3 倍の引張強さのものが製造されている。今回得られた母材強度は 610～620N/mm² であったことから、図中には母材強度を 600N/mm² と仮定して引いた線(太い斜めの実線)である。

D19～D32 のほとんどの結果は、斜めの実線より上にある。キズ面積率 10%以下で、引張強さの規格値以下の引張強度は、D19 と D25 にはない。D32 は、わずかに下回るものもあるが、D32 以下はキズ面積率 10%以下であれば引張強さの規格値をほぼ満足しているといえる。

しかし、D38 と D51 は、すべて斜めの実線を下回っており、キズ面積率 10%以下でも引張強さの規格値を下回っている。それらのほとんどは 90 度キズまたは 0 度キズであり、外周から生じているキズによる強度低下は大きい。

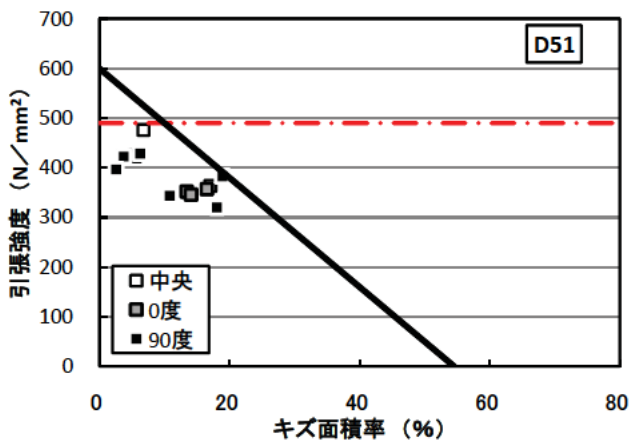
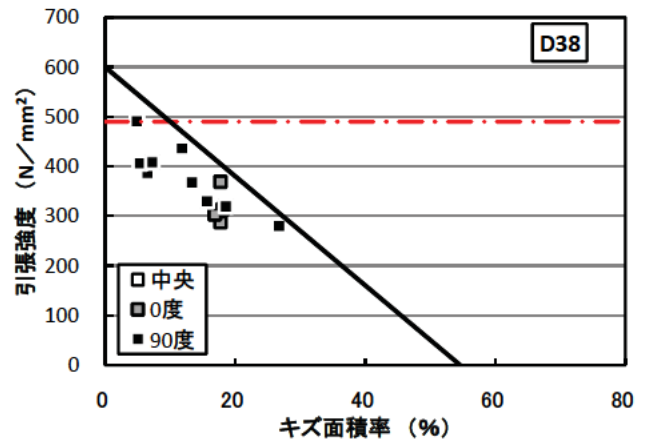
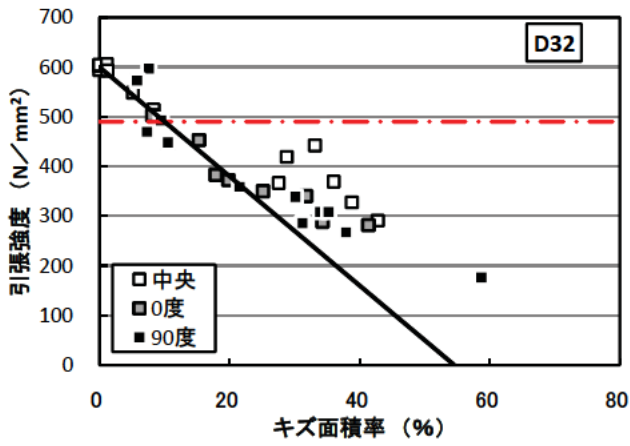
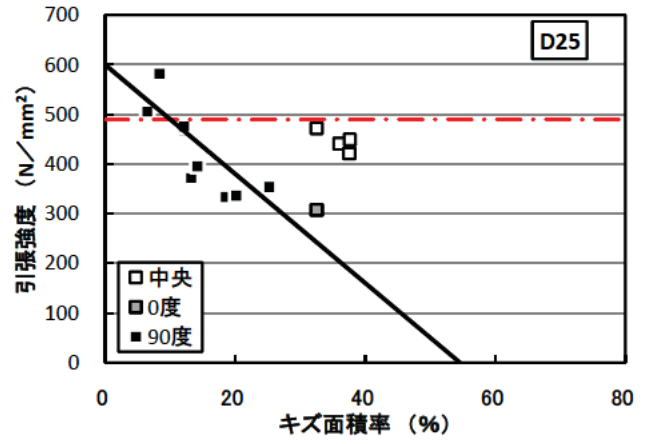
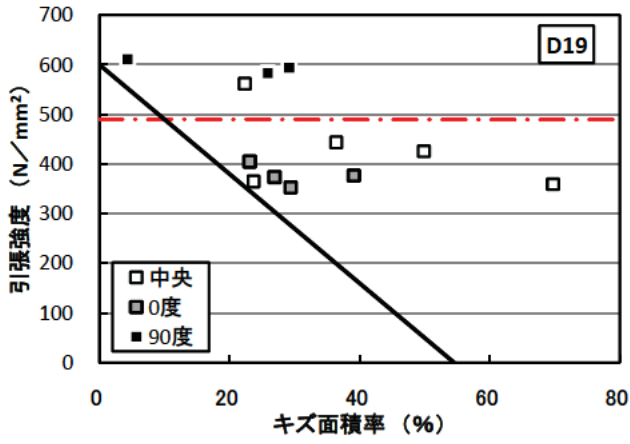


図 6.2.1 鉄筋径ごとのキズ面積率と引張強度の関係

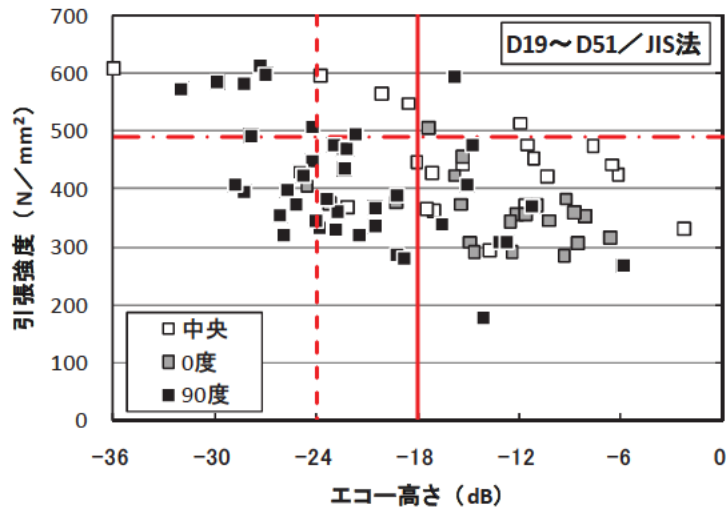
6.3 引張試験結果と超音波探傷結果の関係

5章の探傷結果と引張試験結果の関係について検討する。

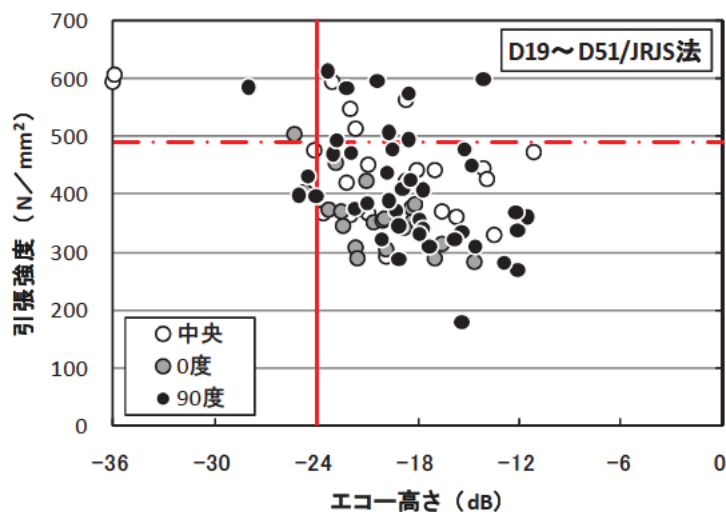
6.3.1 エコー高さ と引張強度の関係

引張強度と探傷結果の関係を図6.3.1に示す。(a)図がJIS法、(b)図がJRJS法である。横の一点鎖線は引張強さの規格値、縦の太い実線はJRJS 0005が規定している判定基準である。左のJIS法には、JRJS法のエコー高さと比較しやすいように-24dBにも破線を入れてある。

引張強さの規格値と、判定基準で区切られた部分の右上を第1象限に、左回りで第2象限、第3象限、第4象限とすると、第1象限は強度が規格値を上回っているにもかかわらず超音波探傷の判定基準を下回っており、「安全側の誤判定」である。第2象限は強度、探傷結果とも合格で一致、第4象限は強度、探傷結果とも不合格で一致していることを示している。第3象限は、強度は不合格にもかかわらず超音波探傷では合格と判定する「危険側の誤判定」となる。



(a) JIS法



(b) JRJS法

図6.3.1 探傷結果と引張強度の関係 (全数)

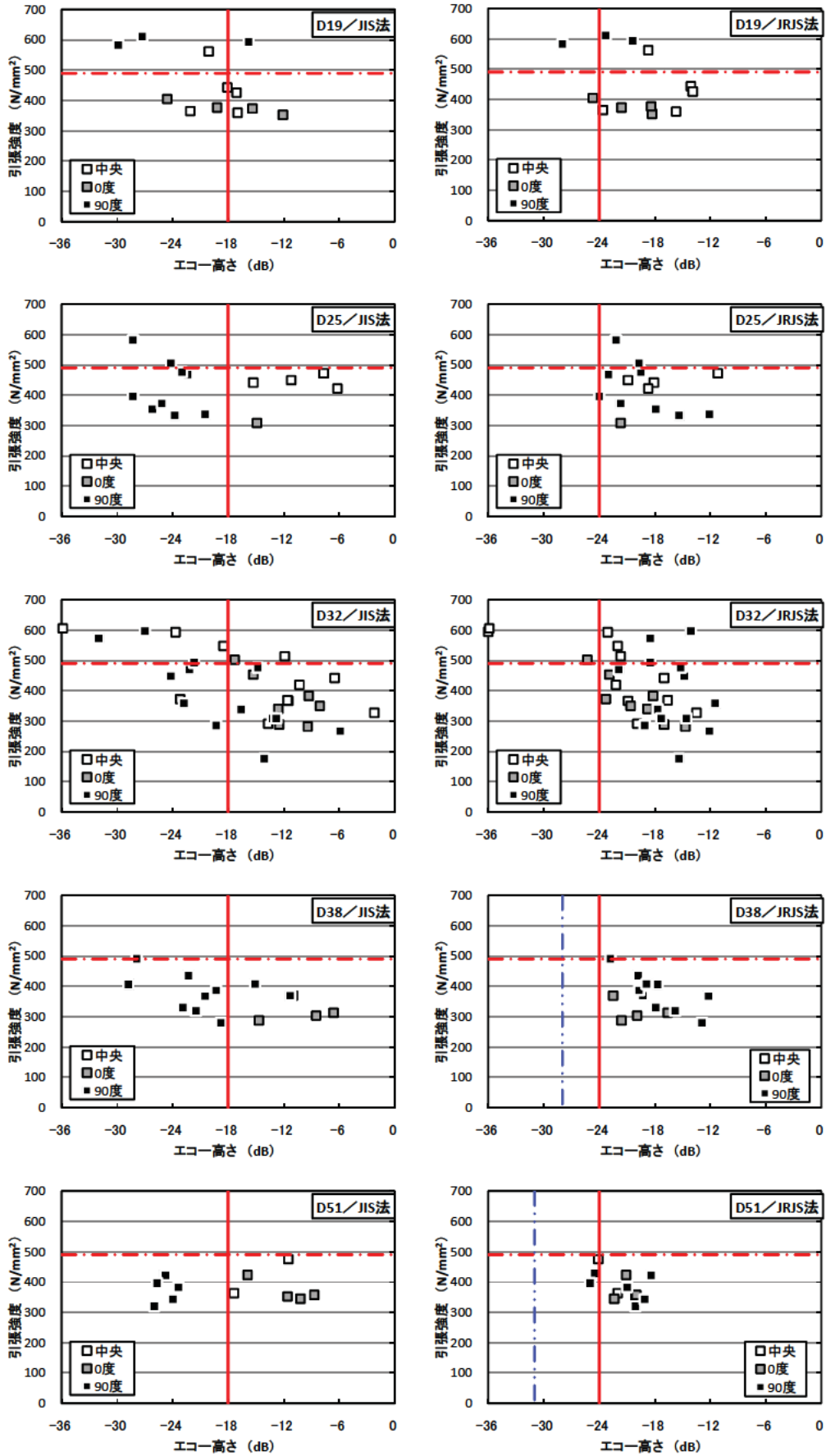


図 6.3.2 探傷結果と引張強度の関係 (鉄筋径ごと)

両図ともエコー高さが高くなるほど引張強度が低くなる傾向を示しているものの、JRJS法はキズ位置に関係なくほぼひと塊りになっているが、JIS法は90度キズ(黒)、0度キズ(灰色)、中央キズ(白)の順に左に寄っており、キズの位置によってエコー高さが異なっている。90度キズの多くは「危険側の誤判定」となっている試験片が多数ある。中央キズはJIS法で探傷しやすい位置であるが「危険側の誤判定」がわずかにある。

対するJRJS法は、わずかに「危険側の誤判定」があるが、JIS法に比べると探傷精度は極めて高い。

「危険側の誤判定」になりやすい状態を確認するために、**図 6.3.2**に鉄筋径ごとの結果を示す。左がJIS法、右がJRJS法の結果である。JRJS法の判定基準は、**5.5.4**の検討では補正值が、D19は5dB、D25は6dB、D32は8dB程度となるが、わずかであり**図 6.3.2**の右側のJRJS法は6dBのままとしており、JIS法の-18dBに対して、-24dBである。D38の補正值は10dBであり、判定基準は-28dB、D51の補正值は13dBであり、判定基準は-31dBになり、二点鎖線で入れている。

JIS法は、鉄筋径にかかわらず90度キズの多くは「危険側の誤判定」であり、90度キズの探傷には適していないことは明確である。

JRJS法は、補正值を6dBとし、判定基準を-24dBとした場合、D19で1点、D51で3点、わずかであるが「危険側の誤判定」になっている。D51は、**5.5.4**の検討に基づき補正值を13dBとし、判定基準を-31dBにすると、「危険側の誤判定」のすべては不合格と判定され、強度が規格値以下であることと一致する。

6.3.2 キズ位置と探傷位置の関係

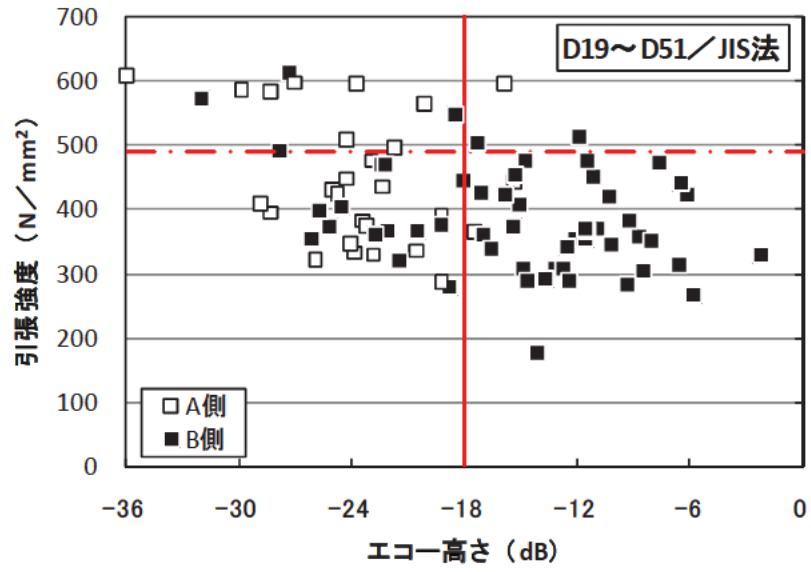
溶接継手のキズ位置は、断面内と、溶接面間のルートギャップ内がある。**6.3.1**では断面内の位置について検討した。ここでは、溶接面と探傷の位置関係について検討する。この検討については、**5.6.3**でも検討しているが、実際のキズに基づいて再度検討する。

この一連の実験では、**図 5.3.2**のようにキズを入れた側の鉄筋をA側の鉄筋とし、溶接面をA面とした。もう一方を、同様にB側の鉄筋、B面とした。A面のキズの探傷を行うには、A側の鉄筋で探傷を行うほうがいいのか、B側のほうがいいのかを検討した。

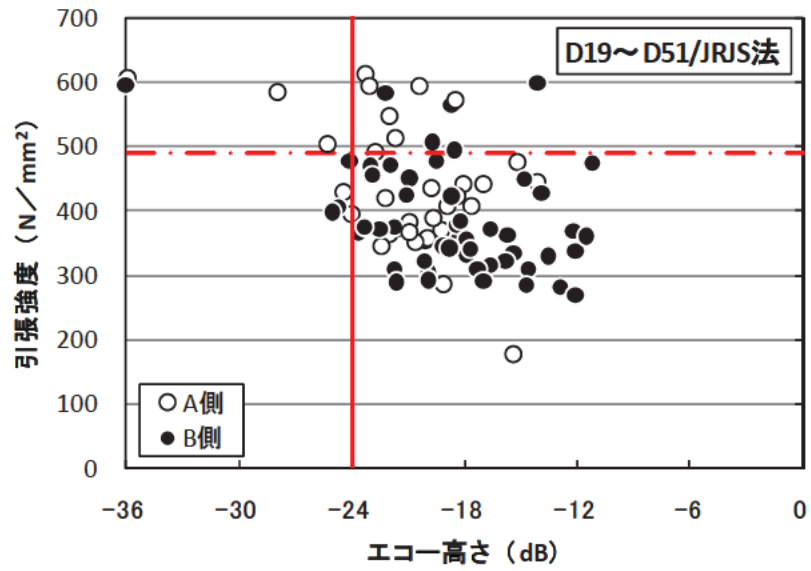
A側で探傷した最大エコーと、B側で探傷した最大エコーを引張強度との関係で示したのが**図 6.3.3**である。**図 6.3.4**には鉄筋径ごとに示した。左がJIS法、右がJRJS法である。

両図より、JRJS法は、A側、B側からの探傷結果とも、大きな違いは見受けられないが、JIS法の違いは明確である。キズ面のあるA側からの探傷(白)よりも、反対側のB側から(黒)からのほうがよく探傷できており、**5.6.3**の結果と同じであった。

実際には、キズがどのように入っているのかわからないため、両側からの探傷が必要である。



(a) JIS法



(b) JRJS法

図 6.3.3 測定側の違いと探傷結果

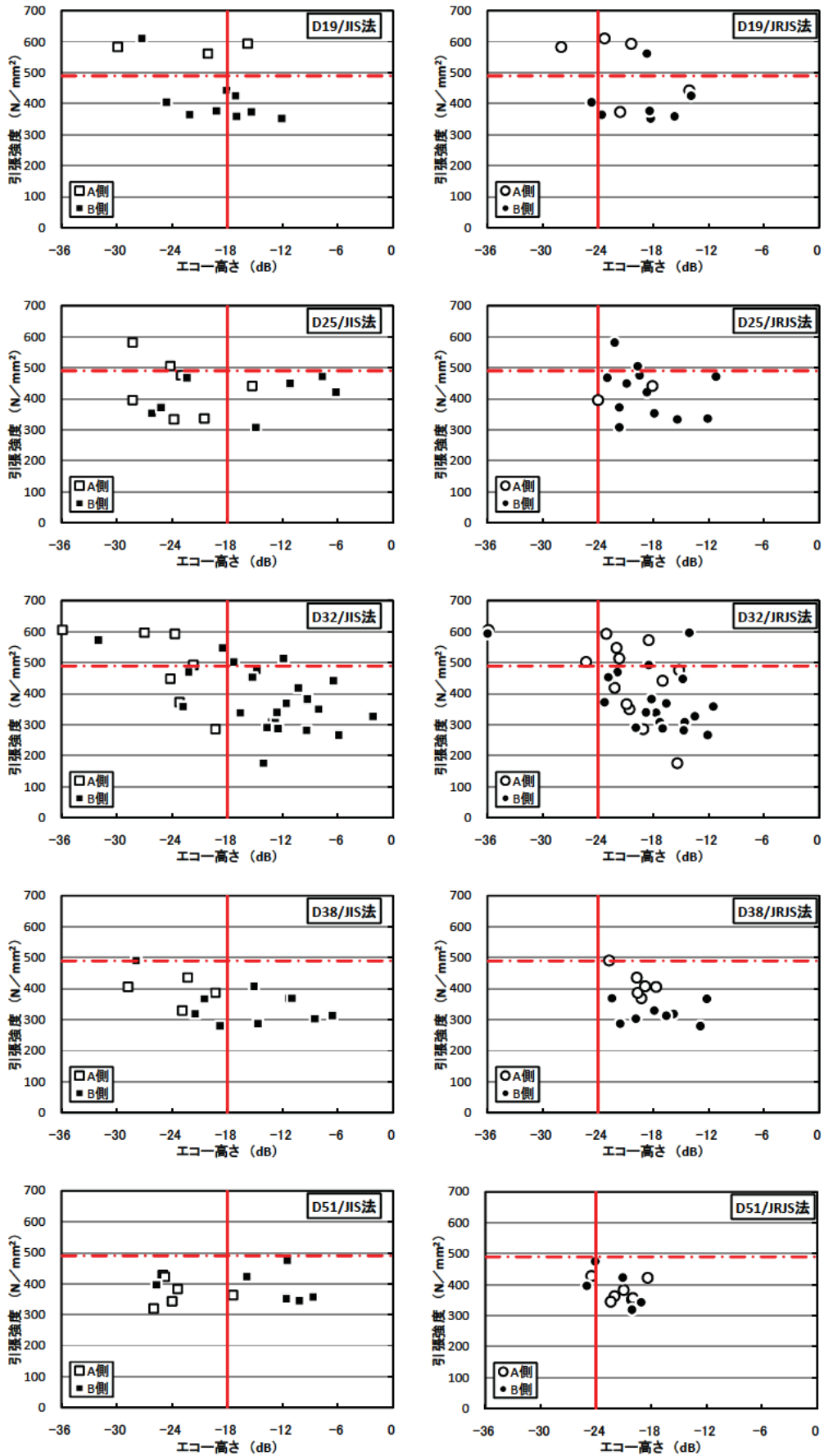


図 6.3.3 測定側の違いと探傷結果（鉄筋径ごと）

7章 まとめ

溶接継手鉄筋の精度の良い探傷方法の検討を行なった。

最初に、溶接継手に適した探傷試験方法を検討し、溶接継手に発生しやすいキズに対しては超音波探傷試験が適していること、ただし、現在でも JIS 法に準じた超音波探傷試験が行われているが、キズを生じやすい位置と探傷できる範囲が異なっているため、新たな超音波探傷方法を導入する必要があることを示した。

溶接継手に生じやすいキズは、溶接部の初層部（外周）に生じる溶け込み不良であることから、外周部の探傷ができる方法が必要であることを明らかにした。外周部の探傷については、以前から表面 SH 波法による検討も行われていたが、溶接継手では探傷できない部分がまだ多いことが明らかにされている。このようなことから、最近、継手協会より斜め K 走査法（JRJS 法）が提案されている。この方法は、探触子を首振り状態にして走査することにより外周部を伝搬するというものである。ただし、継手協会の検討結果では、まだ JRJS 法の伝搬経路などについての検討が不十分であることから、その詳細について検討することとした。

検討した内容は、JRJS 法が鉄筋周面を反射しながら伝搬することを仮定しており、仮定どおりに伝搬すると鉄筋断面から見ると菱形状に伝搬する。実際にこのように伝搬しているのか、あるいは鉄筋の周面での反射などによって超音波がどのような影響を受けるのかなどについて、人工キズ試験片などを用いた基礎的な検討を行なった。

次に、実際に溶接継手試験片による探傷実験を行なった。探傷前に、合否を判定するための判定基準の検討を行なった。

最後に JIS 法、JRJS 法による探傷を行なった後、引張試験を行い、引張強度などとの関係を検討し、探傷精度を求めた。

これらの検討の結果、次のことが明らかになった。

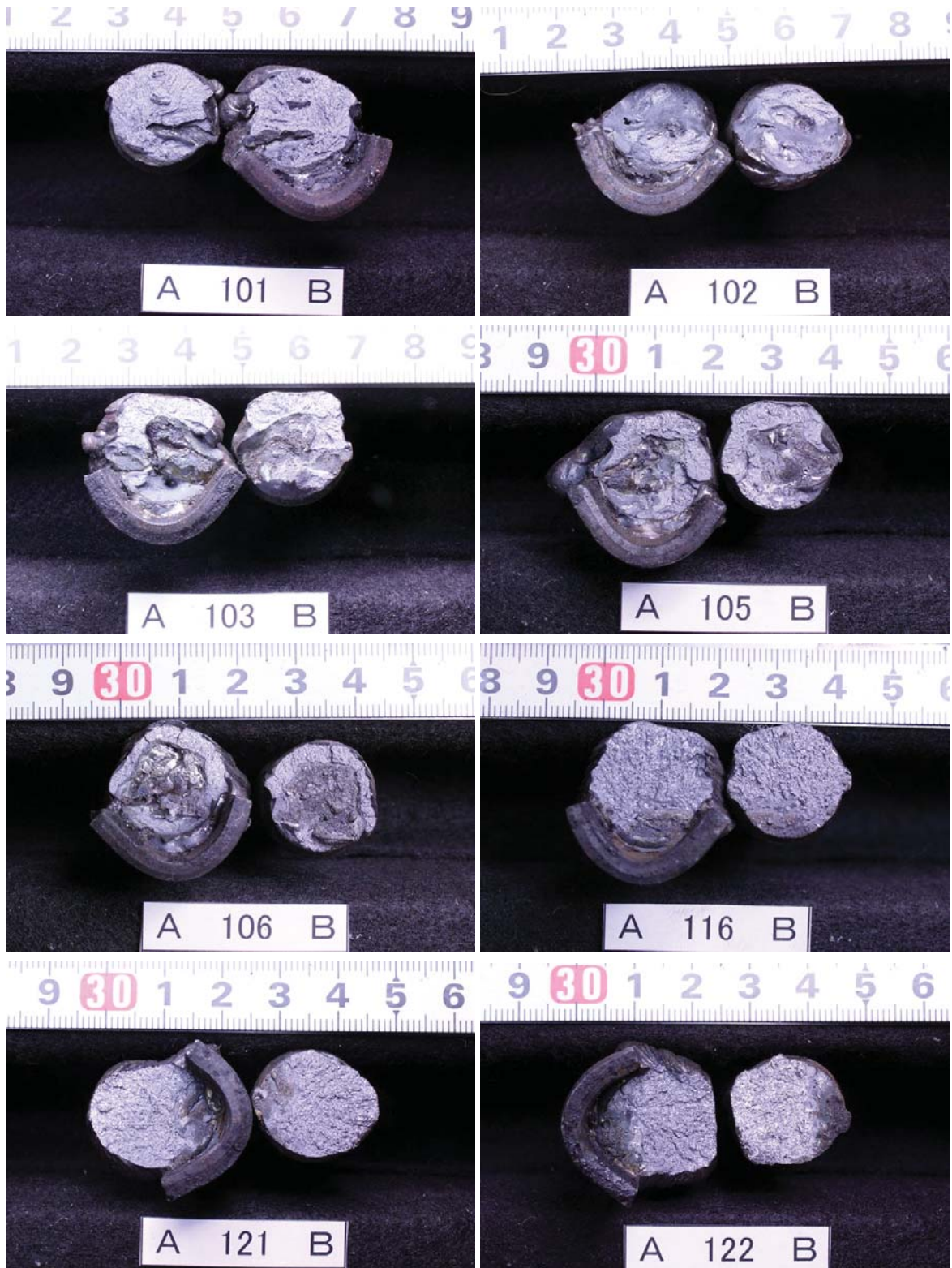
- (1) JRJS 法は、仮定した経路である溶接部の外周をかなり厳密にひし形状に伝搬しているものと推定された。よって、キズが伝搬経路上にあれば、精度良く探傷できる可能性があることがわかった。その伝搬経路は、リブに対して斜めに超音波を送信し、キズと鉄筋側面で反射して、リブで斜め受信される。リブを斜めに送信・受信し、鉄筋側面で反射することによるエコーの低下は大きい。
- (2) 合否判定のための判定基準は、JRJS 0005 では、JIS 法の透過走査によって求めた透過パルスに対して感度の補正值として一定値が与えられていることから、その補正值を求めた。その結果、補正值は鉄筋径によって決める必要があることが示唆された。鉄筋径を x とすると、補正值 y (dB) は、 $y=0.25x$ 程度になることを示した。
- (3) 溶接継手試験片による探傷実験の結果、溶接のキズは広がりがあり、その中でも状態が異なるため、最大のエコー高さが求められる送信・受信探触子の位置は、理論上求められる位置とはある程度異なる場合もあることから、そのことを想定した探触子の走査方法を検討する必要がある。
- (4) 現段階では、走査基準線ごとに探触子を配置し、その前後を走査することによってかなり精度は向上する可能性があることを示した。

- (5) 超音波探傷試験の後、引張試験を行い引張強度、キズ面積率を求め、両者の関係について検討した。JRJS 0005 では、キズ面積率 10%以下であれば引張強さの規格値を満足することが示されているが、今回の試験結果では、D32 以下はほぼそのような結果が得られたが、D38, D51 はキズ面積率 10%以下でも引張強さの規格値を下回った。
- (6) 引張強度と探傷結果の検討の結果、JIS 法は初層部のキズの探傷がほとんどできないことを再確認した。それに対し、JRJS 法は初層部のキズに対して精度良く探傷できることが明らかになった。判定基準の補正値を JRJS 0005 のとおり 6dB とすると、D51 で数本の「危険側の誤判定」があったが、鉄筋径を考慮した補正値を用いることによって、「危険側の誤判定」をなくすことができた。
- (7) 以上の結果より、JRJS 法は、伝搬経路が複雑であり、得られるエコーが低いことから、キズの有無を見分けることは難しく、探傷には高い技量をもった、経験豊富な技術者が必要である。JRJS 法の普及を図るにあたっては、技術者の養成が重要である。

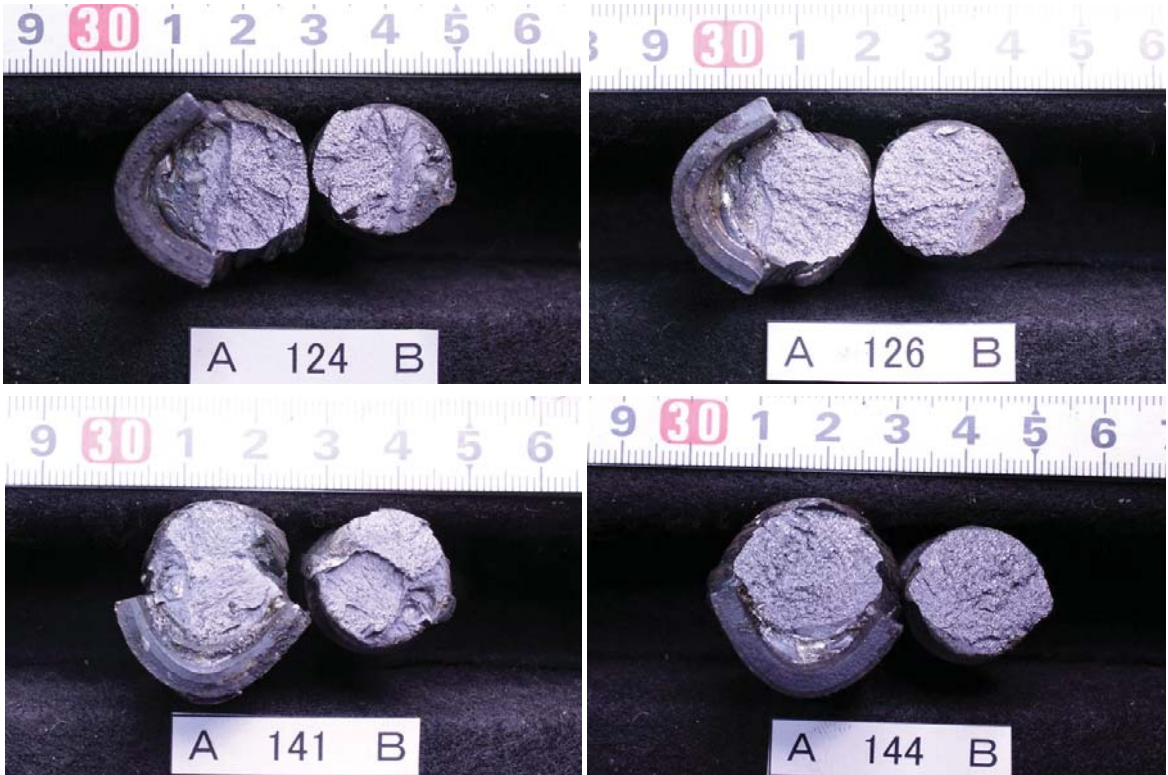
溶接継手試験片の引張試験の結果、特に太径鉄筋の引張強度は、わずかなキズでも引張強さの規格値を満足できていなかった。しかし、今回の検討結果によると、超音波探傷試験によってこのようなキズを確実に検出することは、現状ではかなり困難である。従って、太径鉄筋の継手としては機械式継手を検討する、D32 以下の鉄筋の場合では、継手位置を断面力の大きな位置からずらす必要があるものと考えられる。

資 料

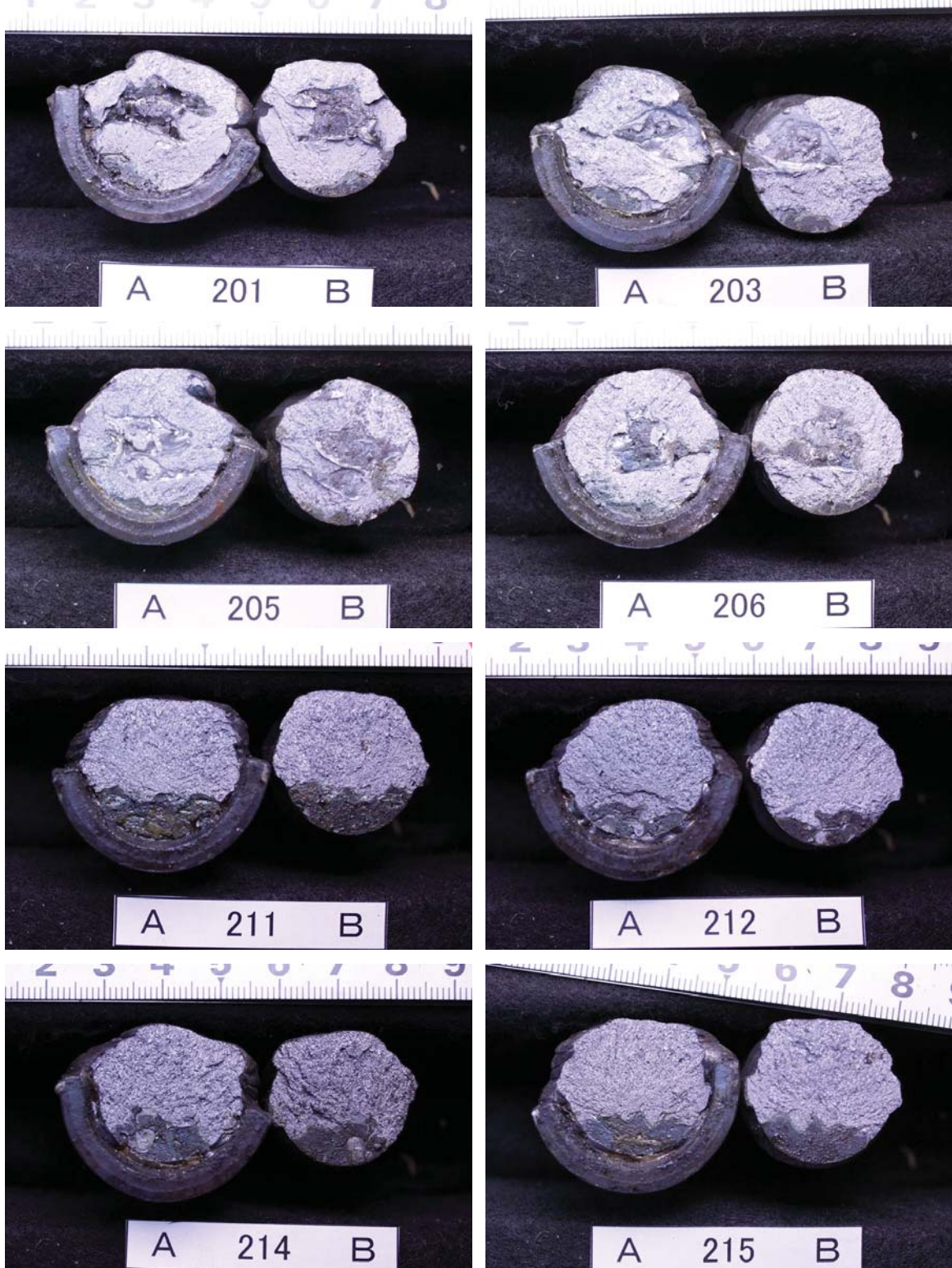
引張試験破面写真 呼び名: D19(その1)



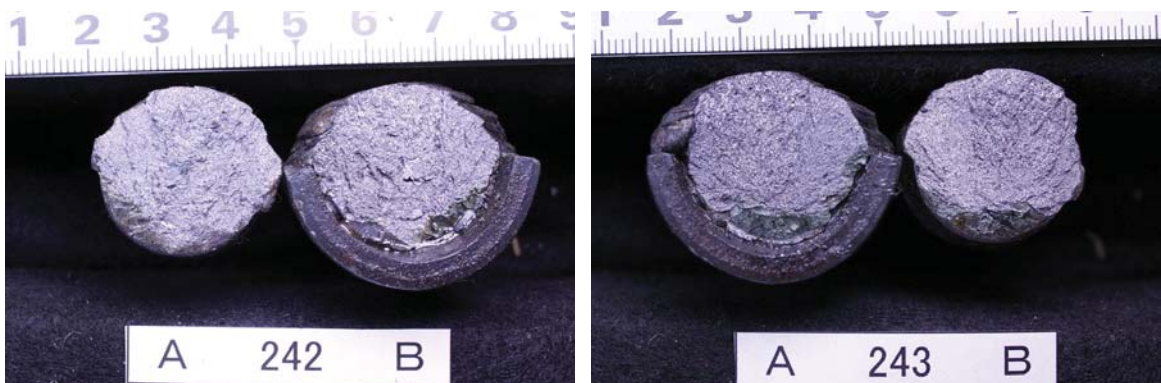
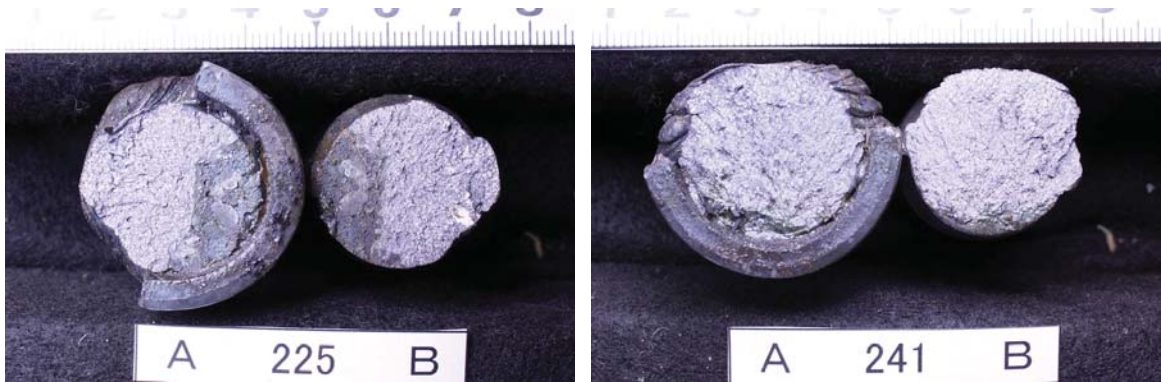
引張試験破面写真 呼び名: D19(その2)



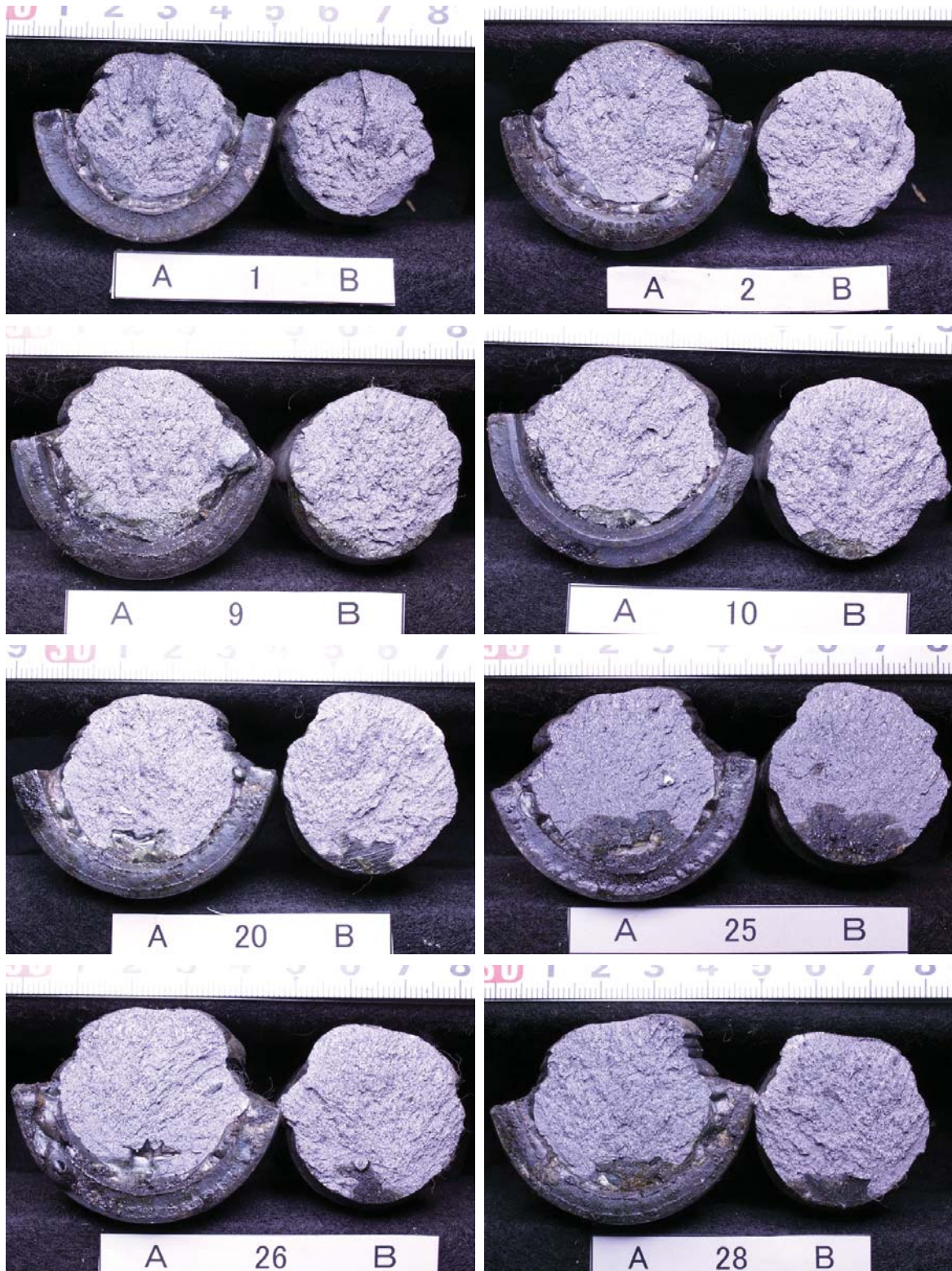
引張試験破面写真 呼び名: D25(その1)



引張試験破面写真 呼び名：D25(その2)



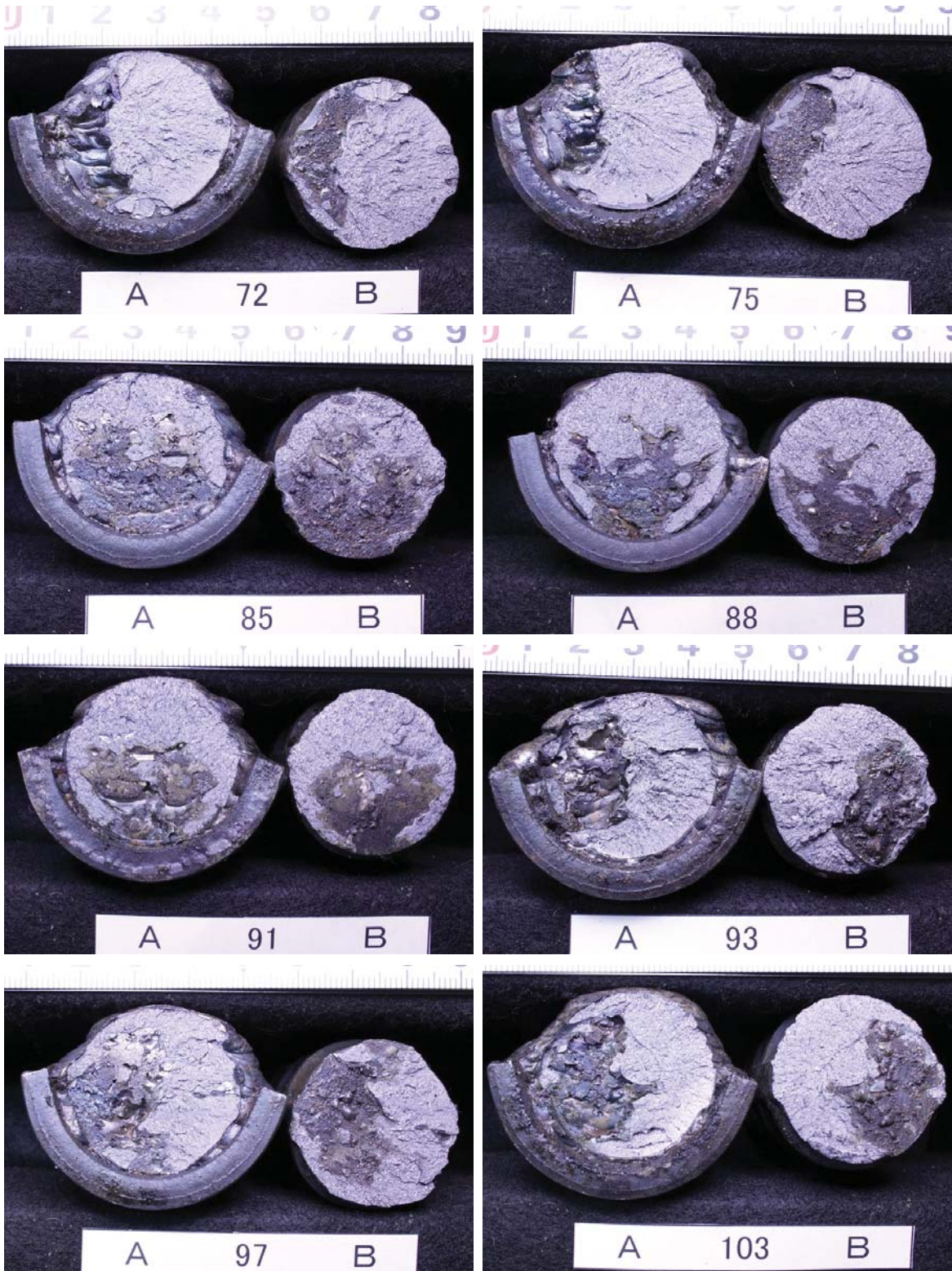
引張試験破面写真 呼び名: D32(その1)



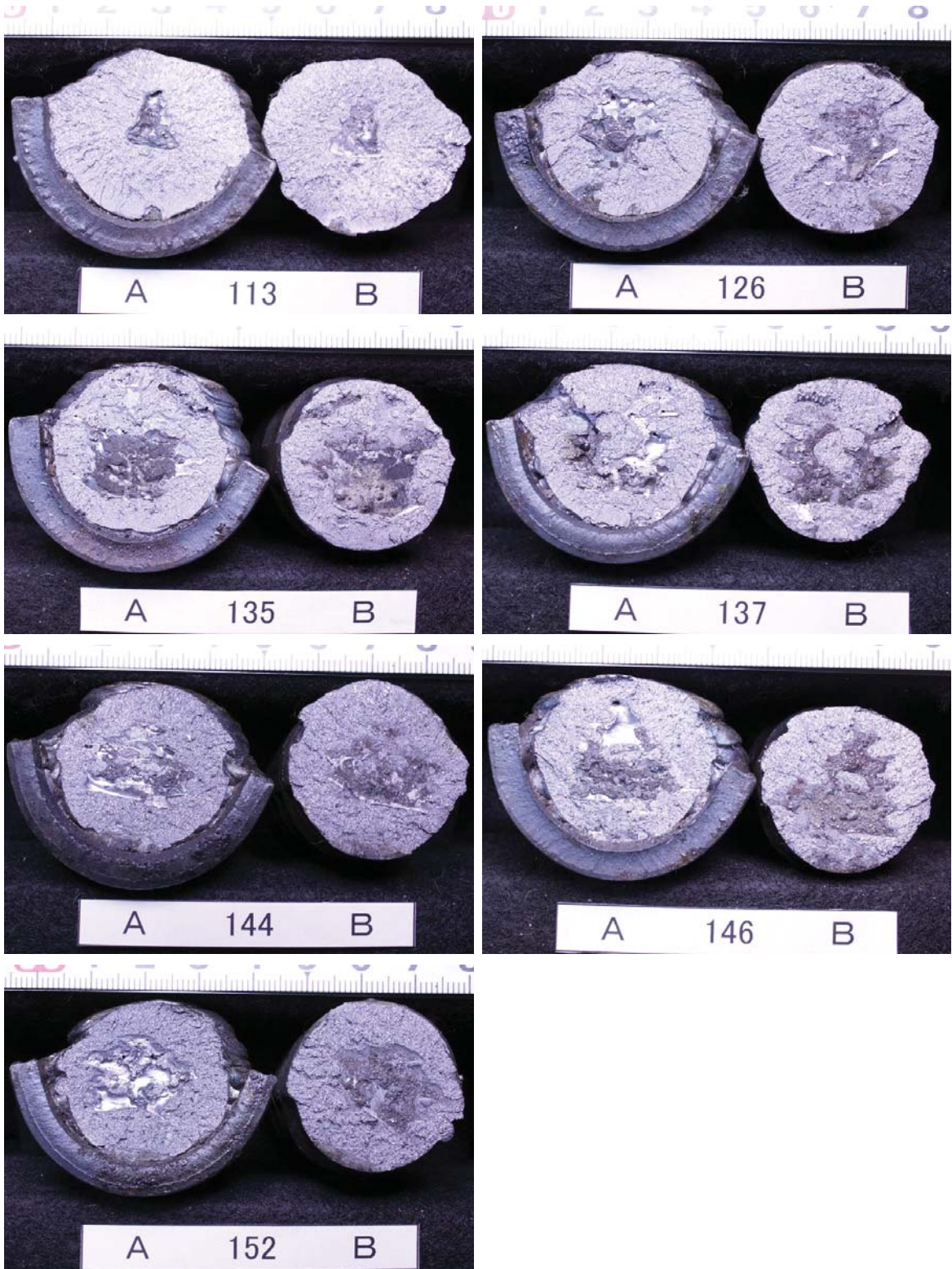
引張試験破面写真 呼び名: D32(その2)



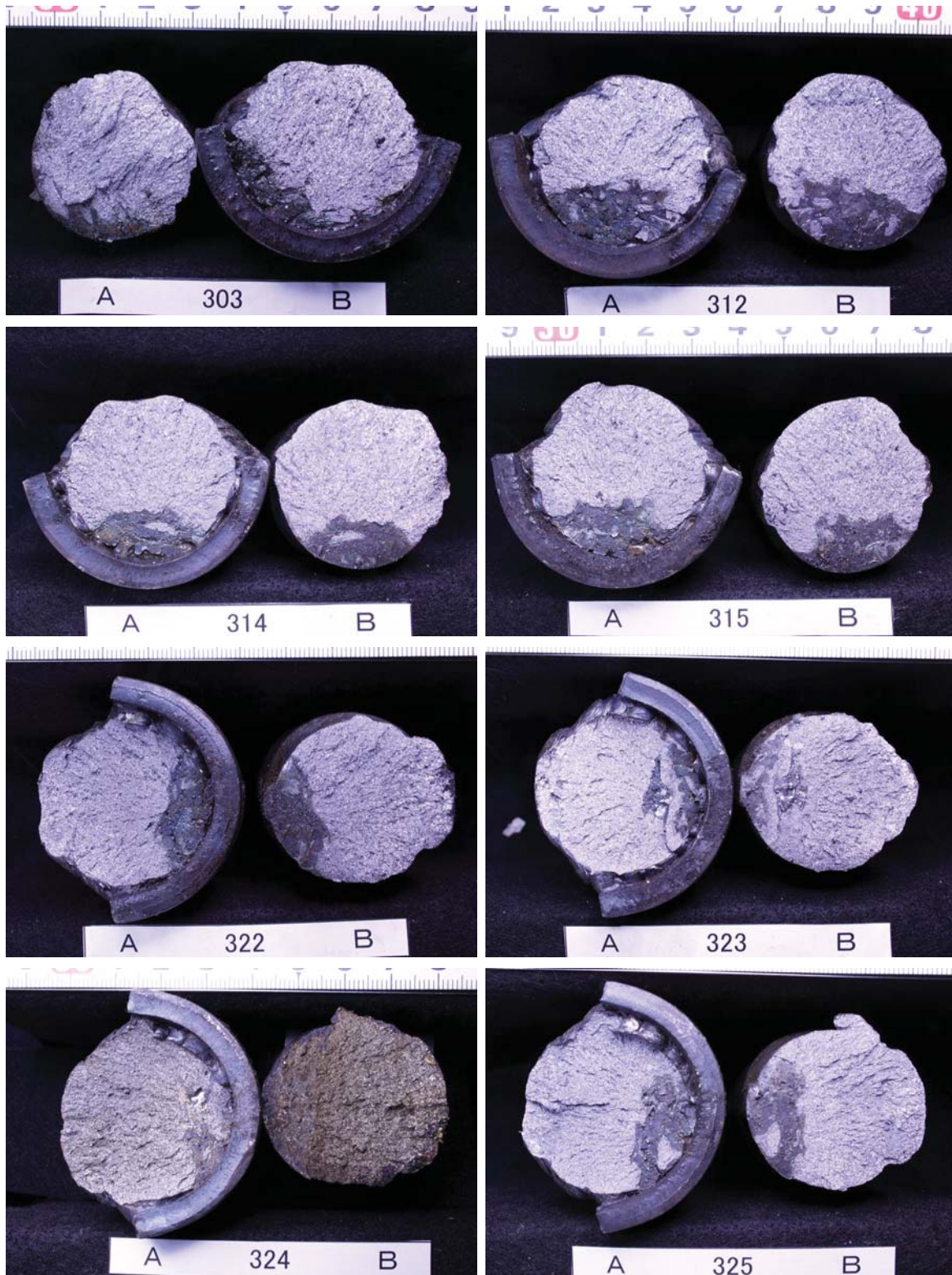
引張試験破面写真 呼び名: D32(その3)



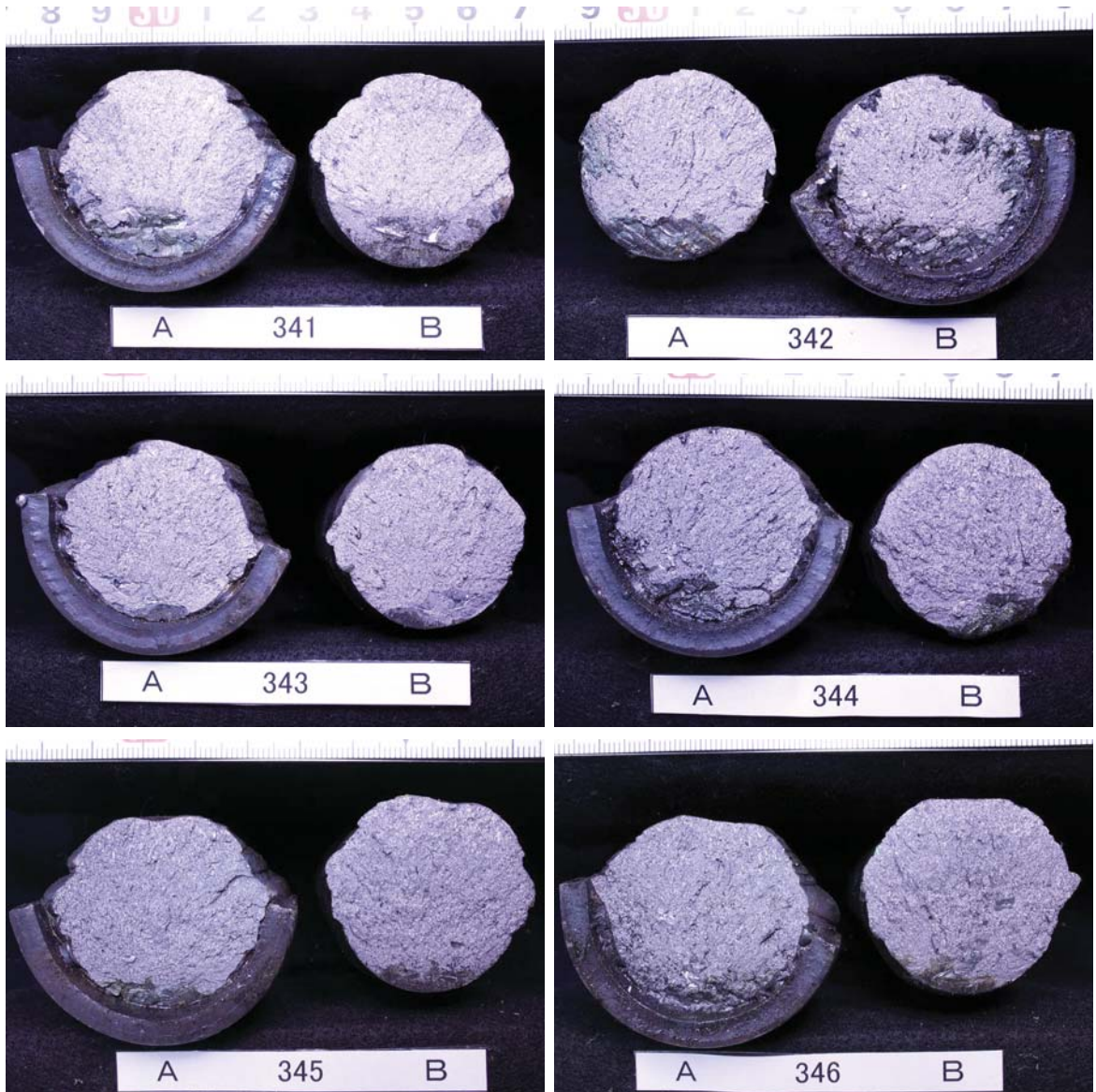
引張試験破面写真 呼び名: D32(その4)



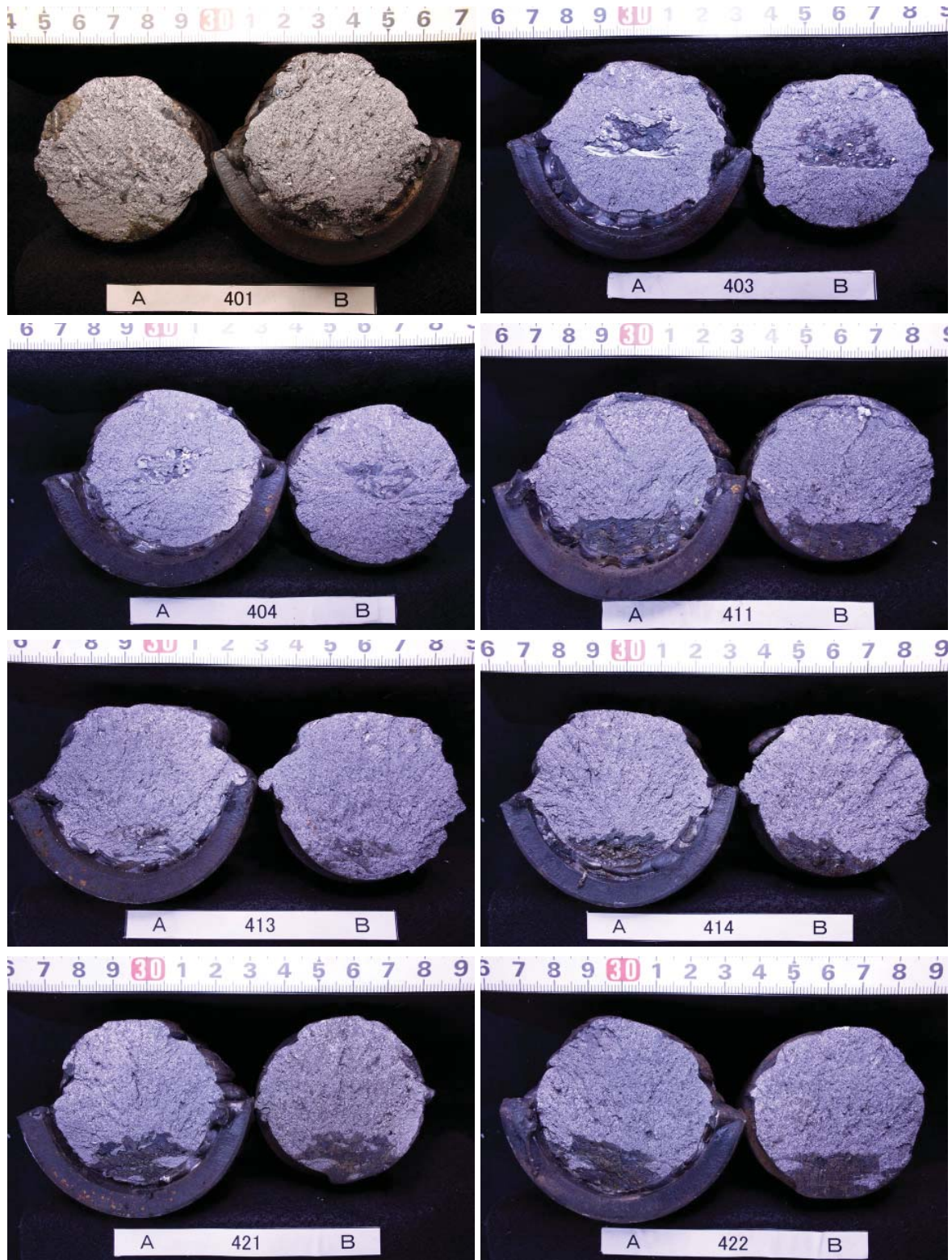
引張試験破面写真 呼び名: D38(その1)



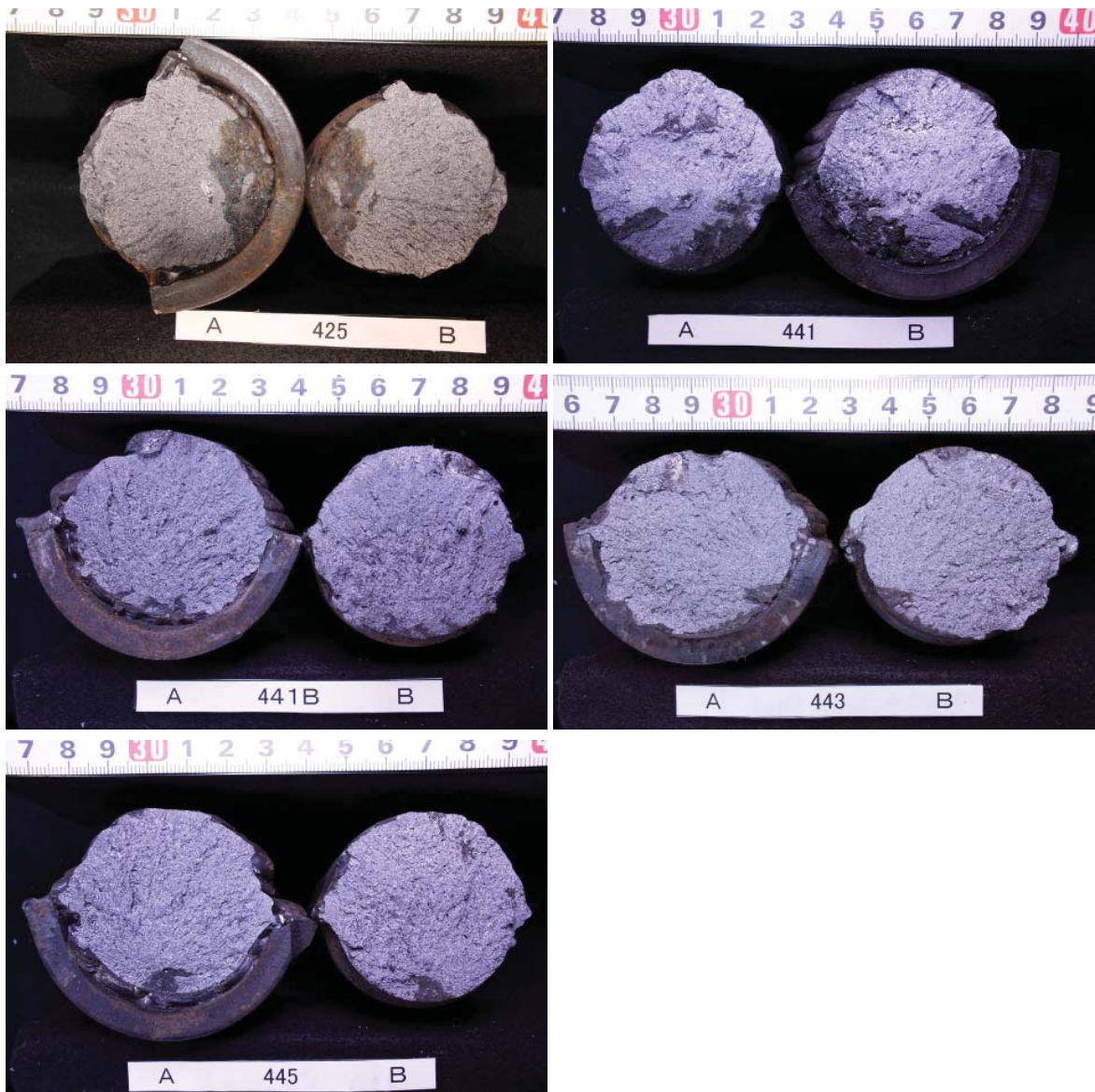
引張試験破面写真 呼び名: D38(その2)



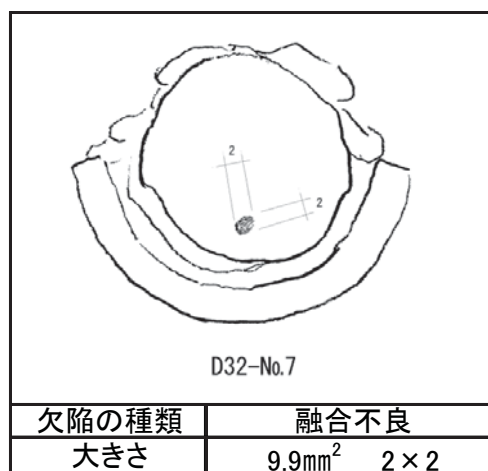
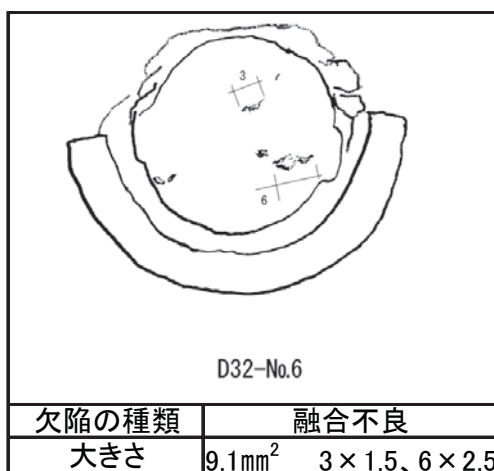
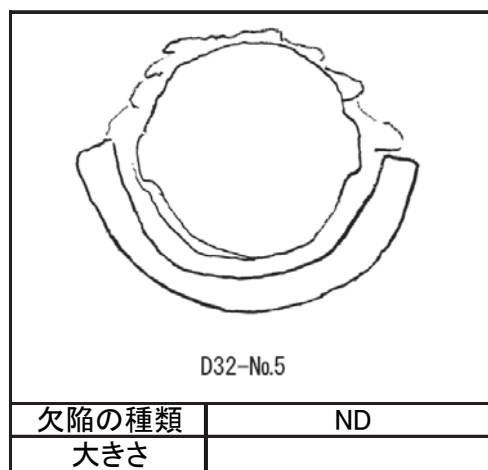
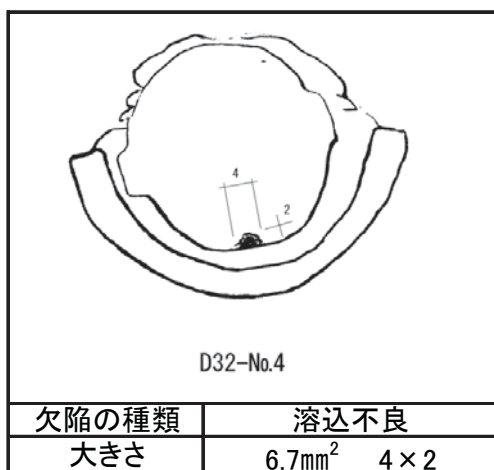
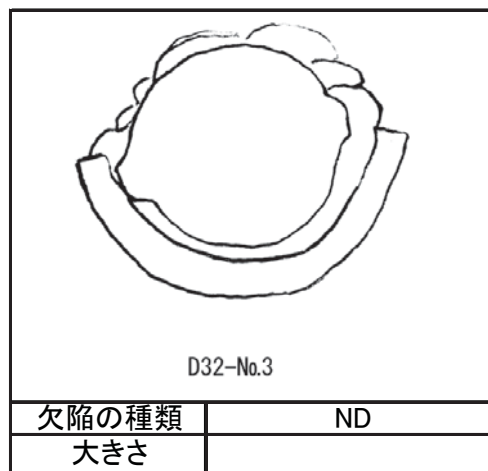
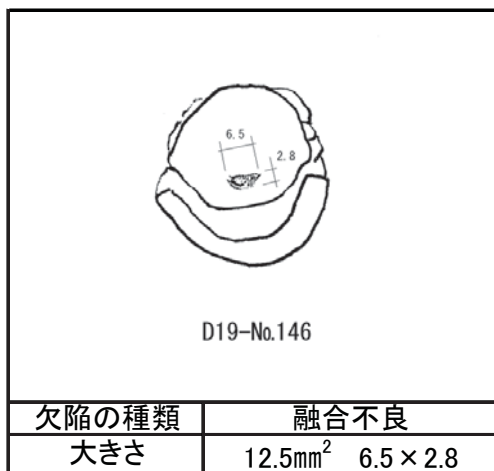
引張試験破面写真 呼び名: D51(その1)



引張試験破面写真 呼び名: D51(その2)



母材破断引張試験片の溶接部放射線透過写真スケッチ



土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4220 March 2012

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754

