

## 超音波自動探傷検査の実用化に関する研究

工務部 設計課	橋 本 良 之
同 部 同 課	南 莊 淳 郎
同 部 同 課	足 立 幸 郎

### 要 約

近年、当公団の鋼構造物においては、景観や大規模な一括架設の必要性等から、現場溶接やヤード溶接の機会が増大し、それに伴い、合理的な検査手法の開発が急がれている。

このような中、最近技術開発が著しく、記録性や安全性に優れた超音波自動探傷システムに着目して、これを用いた検査方法を確立するため、過去2箇年にわたって委員会を組織して研究を行ってきた。

まず人為的に欠陥を与えた供試体を用いて、放射線透過試験(RT)と超音波自動探傷試験(AUT)の欠陥検出特性について比較した。同時に超音波探傷に関するJIS Z 3060を用いて等級分類を行い、その妥当性について検証した。

また実際に施工された現場溶接箇所においてRTとAUTを用いて検査を行い、検査結果の比較を行った。

以上の室内および現場試験の結果から、AUTについてJISの規定を用いたのではRTと整合しないことが判明した。

そこで欠陥検出感度について検討するとともに、公団独自の等級分類法や鋼床版における抜き取り検査手法について検討を行った。

キーワード：研究、鋼橋、現場溶接、検査手法、非破壊検査、超音波、記録性、自動探傷、等級分類、欠陥

### はじめに

これまで鋼橋の溶接継手部の品質の確認方法としては、記録性に優れた放射線透過試験(RT)による検査が主体として行われ、RT検査ができない箇所のみ、超音波探傷試験(UT)が採用されてきた。

RTは記録性に優れたものの、放射線を使用するため市街地における安全管理上および工程管理

上に問題があった。一方、UTにおいては、自動走行するとともに、従来のRTと同等の記録性を有する超音波自動探傷検査システムが開発され、より信頼性が向上した。

このような状況を受け、阪神高速道路公団では「現場溶接の検査手法に関する調査研究委員会(委員長：堀川 浩甫大阪大学教授)」を平成2、

3年度に組織し、現場および地組立における突合せ溶接継手部に超音波自動探傷試験（A U T）を用いる場合の問題点について検討するとともに、「超音波自動探傷検査要領（案）」についての検討を行ってきた。

本稿は、これらの検討結果として、人為的に欠陥を付与した供試体および現場におけるR TとA U Tとの溶接欠陥検出特性に関する比較検討結果について述べるとともに、欠陥検出感度の設定、等級分類法など、超音波自動探傷検査要領（案）の考え方について報告するものである。

## 1. 室内試験<sup>1)</sup>

### 1-1 試験方法

図-1に示すような約500mm×500mmの人為的に欠陥を発生させた供試体105体を、橋梁メーカー13社において作成した。供試体の厚さは、鋼床版を想定して12mm～14mm、鋼製橋脚を想定して19mm～22mmとした。材質は、SS400,SM490,SM490Y,SM520の鋼材を用いた。供試体の溶接時においては、開先面への塗料の塗布や不適切な溶接条件の設定などを行い、出来るだけ数多くの溶接欠陥を含有するように配慮した。表-1に得られた溶接欠陥の一覧表を示す。万遍なく溶接欠陥を発生させることができた。

このようにして作成された供試体に対して、R T(JIS Z 3104-1988) およびA U T(JIS Z 3060-1986) により溶接欠陥の検出を行った。また、一

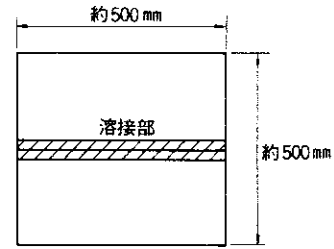


図-1 供試体形状

部の供試体（42体）については、切削試験(WES 2005-1986)を行い実欠陥の性状についての把握を行った

### 1-2 試験結果

供試体105体全部に対して、R TおよびA U Tにより溶接欠陥の検出を実施した。図-2から図-5までに、得られた全ての欠陥の種類（球状・面状・割れ等の欠陥）に対する、実欠陥長さ、R T検査による欠陥像長さおよびA U T検査による欠陥指示長さの相関図について示す。なお、A U T検査は、L線レベルおよびL/2線レベルで欠陥検出を行っている。

これらの図によれば、R T検査においては、やや実欠陥長さより、過小に欠陥像長さを評価する傾向にあることが示された。また、実欠陥長さをほぼ正確に評価を行っているのは、L/2線レベルで検出を行ったA U T検査であることも示された。

さらに、詳しくこれらのデータの欠陥検出特性

表-1 溶接欠陥一覧表（室内実験）

鋼床版	板厚	材質	欠 陥 種 別						
			単独BH	集中BH	割れ	溶込不足	融合不良	スラグ巻込	合計
	12mm～14mm	SS400～SM520	36	68	28	41	52	14	239
柱・塔	板厚	材質	欠 陥 種 別						
			単独BH	集中BH	割れ	溶込不足	融合不良	スラグ巻込	合計
	19mm～22mm	SS400～SM520	30	75	28	30	23	5	191

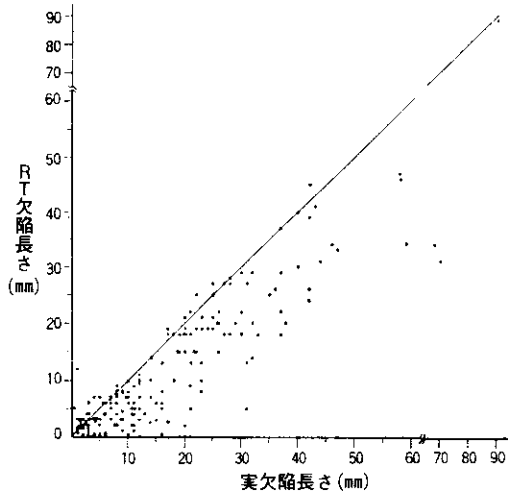


図-2 実欠陥長ささとRT欠陥像長さとの比較  
(形状、面状及び割れ等の欠陥) (室内データ)

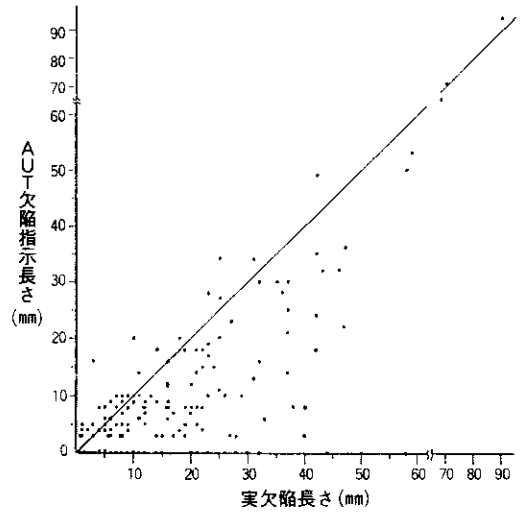


図-3 実欠陥長ささとAUT (L線検出)  
欠陥像指示長さとの比較  
(球状、面状及び割れ等の欠陥) (室内データ)

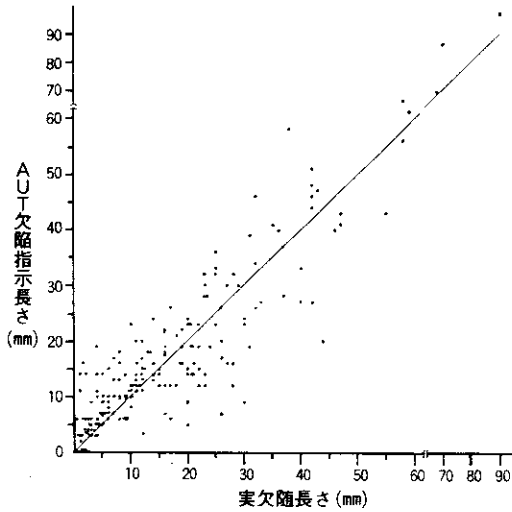


図-4 実欠陥長ささとAUT (L/2線検出)  
欠陥像指示長さとの比較  
(球状、面状及び割れ等の欠陥) (室内データ)

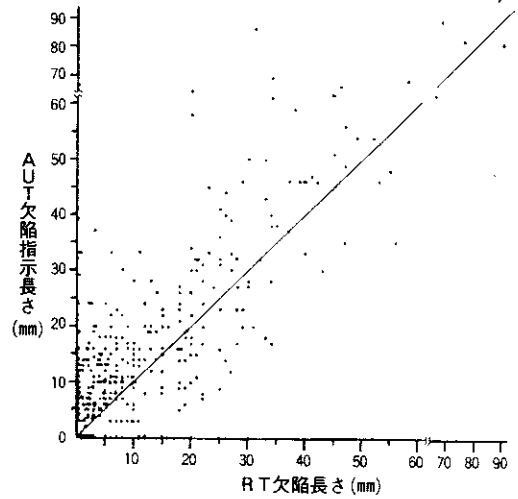


図-5 RT欠陥像長ささとAUT (L/2線検出)  
欠陥像指示長さとの比較  
(球状、面状及び割れ等の欠陥) (室内データ)

および等級分類特性を解析をするために、切削試験を行った42体より得られたデータの中で、切断試験によって測定された長さが20mm以下のもの118個の溶接欠陥について、以下に示す解析を実施することとした。ここで、実欠陥長さが20mm以下の欠陥の対象としたのは、橋梁の現場溶接において実際に発生しうる欠陥を考えた場合、あまりにも大きな欠陥を含めた解析を実施しても実際的でないと判断したためである。

ここでは、以下のような要領で欠陥検出特性、等級分類特性を探ることとした。

- ①放射線透過試験結果……JIS Z 3104-1988に基づき等級分類を実施。
- ②超音波自動探傷試験結果……JIS Z 3060-1986に基づき等級分類を実施。ただし、検出レベルはL線レベルおよびL/2線レベルとする。
- ③切断試験結果……大きさ、欠陥長さ等を、JIS Z 3104-1988の要領に準じて等級分類を実施。

まず、これらのデータに関して、欠陥検出特性について検討を行った結果を表-2に示す。RT検査においては、欠陥判定員の技術力等によって欠陥検出特性は左右されることが考えられるが、ここでは、割れ等の欠陥に対しては83%、ブローホール(BH)等の欠陥に対しては87%の検出率しか得られなかった。これは、RTの欠陥判定法自体が、欠陥の判断作業に個人差が生ずること、また、欠陥像の鮮明度によって結果が左右されることが原因と考えられる。さらに、AUTによって得られたデータを、L線検出レベルで判定した場合は、ブローホール等の欠陥において、著しく検出率が低下することがわかった。しかし、AUTにおいても、感度をL/2線レベルまであげると著

表-2 溶接欠陥検出特性 (室内実験)

実欠陥名称	検査手法	検出率
ブローホール等の欠陥	RT検査	87%
	AUT (L/2線検出) 検査	90%
	AUT (L線検出) 検査	34%
割れ等の欠陥	RT検査	83%
	AUT (L/2線検出) 検査	100%
	AUT (L線検出) 検査	73%

しく検出率が向上し、ブローホール等の欠陥においては、ほぼRTと同等の検出率、割れ等の欠陥においては実欠陥をほぼ全数検出できることがわかった。

次に等級分類特性について図化したものが図-6である。これにおいても、AUTにおけるL/2線検出レベル採用の優位性が示されている。しかし、現在整備されている手探傷による超音波探傷検査(MUT)による欠陥等級判定要領(JIS Z 3060-1986)において、L/2線レベルを採用したのみでは、RTによる等級分類結果および切断試験による等級分類結果と同等の評価が得られないことが、この結果より得られた。

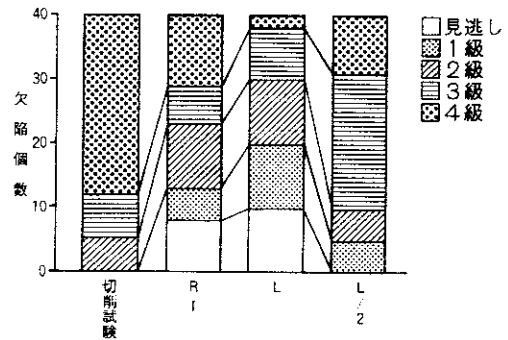


図-6. 1 欠陥等級分類特性 (割れ等の欠陥、室内データ) (RT-JIS Z 3104、AUT-JIS Z 3060 L/2、L線)

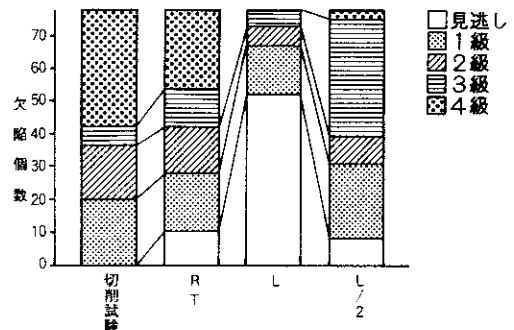


図-6. 2 欠陥等級分類特性 (BH等の欠陥、室内データ) (RT-JIS Z 3104、AUT-JIS Z 3060 L/2、L線)

### 1-3 考察

基本的なAUTの欠陥検出特性の把握のため、人為的に欠陥を発生させた供試体を用いて室内でAUTとRTとの比較試験を行った。その結果、RTと同等の欠陥検出率を得るためには、従来のJISに示されているような、L線検出レベルでは十分な検出特性が得られないことが示された。さらに、JISの超音波探傷検査に関する欠損等級判定法では不十分な事も示された。しかし、これは板厚が約25mm以下の供試体に関する実験結果からの結論であり、さらに一般化した結論を得るためには、これらより厚い板厚に対する考察が必要である。次項でさらに、この点にも着目して検討した結果を述べる。

## 2 現場実験

### 2-1 概要

室内実験のように、人為的に発生させた欠陥では、実際の施工時に発生する欠陥と、欠陥種比率や欠陥の性質が、まったく同じであるとは考えにくい。このような、ある種のバイアスがかかったデータのみでは、基準作成における検討資料として、不十分と考えられる。従って、実際の施工時において発生している溶接欠陥に対しても解析をすすめ、実施工におけるデータを収集する必要がある。

ここでは、前項の室内実験を受け、現場において実際に施工された現場溶接部において、室内試験同様のRT-AUT比較試験を行い。現場データの収集および解析を行った結果について報告するものである。

### 2-2 試験方法

試験は、3工区にわたって実施した。できるだけ数多くのデータを違った施工条件のもとで得るために、鋼製橋脚の柱・梁部現場溶接部、鋼床版ヤード溶接部及び鋼製橋脚及び鋼箱桁ヤード溶接部を対象として試験を行った。その内、鋼製橋脚でデータ収集を行った試験施工延長約300m、フィルム換算で1197枚のデータに対する解析を行った。

試験対象溶接部の板厚は、薄いもので16mmから、厚いもので50mm厚さであった。

データ解析は室内試験と同様、下記に示す様な方法で解析をすすめた。切断試験については、実構造物であるため行っていない。

- ①放射線透過試験結果……JIS Z 3104-1988 に基づき等級分類を実施
- ②超音波自動探傷試験結果……JIS Z 3060-1986 に基づき等級分類を実施、検出レベルはL線レベルおよびL/2線レベルとする

### 2-3 試験結果

図-7および図-8に、RT等級とAUT等級の比較表を示す。AUT等級は、L線およびL/2線で検出した2通りの結果を示す。この結果によれば、現場試験においても、RTによる等級分類とJISを用いたAUT等級分類とは、あまり一致せず、RTによる等級分類に比べて、JISを用いたAUT等級分類は厳しい判定をする傾向にあることがわかった。

AUT等級分類	4級	28	6	1	0	2
	3級	21	4	0	0	4
	2級	86	17	2	1	3
	1級	167	19	4	1	4
	ND	756	58	5	1	7
データ数	ND	1級	2級	3級	4級	
1197 個	RT等級分類					

図-7 欠陥等級分類特性 (現場データ)  
(RT-JIS Z 3104、AUT-JIS Z 3060、L線)

AUT等級分類	4級	103	16	2	0	6
	3級	89	16	3	2	3
	2級	113	12	2	0	4
	1級	376	40	3	1	3
	ND	376	21	2	0	4
データ数	ND	1級	2級	3級	4級	
1197 個	RT等級分類					

図-8 欠陥等級分類特性 (現場データ)  
(RT-JIS Z 3104、AUT-JIS Z 3060、L/2線)

また、さらにこの傾向は、RTによる欠陥像長さ $とAUTによる欠陥指示長さとの相関にも表れている。板厚が25mm以上の板厚のものに発生した溶接欠陥に対して、溶接欠陥像及び溶接欠陥指示長さ（L線及びL/2線検出）を比較したものを、それぞれ図-9および図-10に示す。板厚25mm以上においては、AUTにおいてはL線検出レベルで溶接欠陥を検出したほうがRTと良い相関を示すことが得られている。$

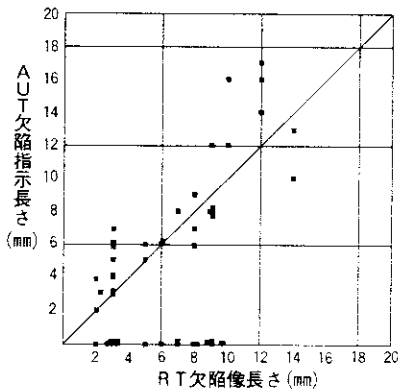


図-9 RT欠陥像長さ $とAUT（L線検出）欠陥像指示長さとの比較（現場データ）$

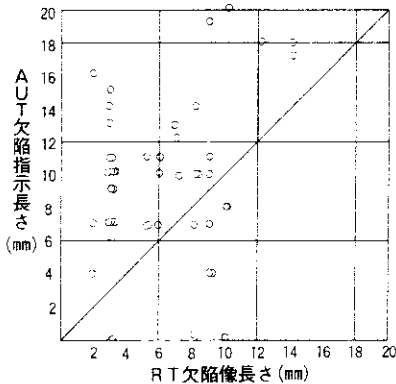


図-10 RT欠陥像長さ $とAUT（L/2線検出）欠陥像指示長さとの比較（現場データ）$

#### 2-4 考察

室内実験に加えて現場でのデータの収集につとめ、実施工において発生した溶接欠陥及び25mm以

上の板厚に対して発生した溶接欠陥に対してRTとAUTの欠陥検出特性の相関について検討した。その結果、板厚25mm以上においては、AUT検査においてL線検出レベルで検出を行うとRT検査と比較的良好な相関が得られることが示された。

### 3 超音波自動探傷検査要領の検討<sup>2)</sup>

#### 3-1 目的

本章までの、人為的に欠陥を付与した供試体による室内実験の結果および、現場におけるRTとAUTの検査結果より、橋梁の実情に即した判定基準の必要性が明らかとなった。要領の策定においては、その方向性が重要である。溶接欠陥像の等級分類を行うには、溶接欠陥像と継手部の疲労耐力との関係を明らかにした上で等級分類を行い、疲労設計と関連づけた要領の策定が理想的であると考えられるが、そこまで言及することは大変な作業となるとともに、多くの時間を要することとなる。従って、ここでは、現在橋梁の溶接部の検査において広く用いられているRT検査（JIS Z 3104）とほぼ同等の評価、ほぼ同等の等級分類が行えることを目的として、要領の策定を行うこととした。本章においては、要領の策定にあたって行った解析について触れるとともに、基本事項についても述べるものである。

#### 3-2 欠陥検出感度の検討

人為的に欠陥を与えた室内試験のデータ（対象板厚12mm～22mm）では、UTに関するJIS（JIS Z 3060）において規定されるL線では、かなりの欠陥を見逃すことになる事がわかった。しかし、現場で得られたデータによれば、板厚が25mm以上においては、L線レベルでのAUT検査結果はRT検査結果より厳しい結果を与えること、また、RTに関するJIS（JIS Z 3104）においては、板厚25mmを超えるものについては欠陥の評価が緩和されている点も考慮し、板厚25mm以下では欠陥検出レベルをL/2線とし、25mmを越えるものについてはL線とすることとした。

### 3-3 等級分類の検討

等級分類は、エコー高さおよび欠陥指示長さをパラメータにとり、JIS Z 3104によるRT検査結果とほぼ同等の等級分類が行える値についてパラメトリックな検討を実施した。ここでは、室内実験のデータと共に、現場における実測データ（RTフィルム換算1197枚）を対象として解析を実施した。その結果の1例を図-11、12、13に示す。図-11には、エコー高さ、欠陥指示長さとの等級分類の関係、図-12には図-11の等級分類を用いた現場実験データの等級分類とRTの等級分類（JIS Z 3104）との比較結果、図-13には室内実験データの等級分類とRTの等級分類（JIS Z 3104）との比較結果を示す。現場実験データを用いた分類結果によれば、図-11に示す等級分類手法においてはAUTはRTに対して若干厳しめの結果を与えているが、逆に室内実験データを用いた分類結果によれば、この等級分類手法はRTがAUTに対して厳しめの結果を与えることとなった。一義的な等級分類は難しいものの、図-11に示す等級分類手法をもって、RTの等級分類手法とほぼ同等の評価を行うことができるものと判断した。

### 3-4 抜き取り検査の実施

道路橋示方書においては、鋼床版のデッキプレート現場溶接部の検査において、抜き取り検査を行えることとなっている。<sup>2)</sup> そこでこの要領においても、溶接部の検査はワークマンシップに対する検査であると位置付け、鋼床版において抜き取り検査を実施出来るものとした。しかし、AUT検査は連続検査が有利であるため、本要領（案）では、RT検査の抜き取り率とほぼ同等の抜き取り率として40%という数値を設定し、この範囲内において溶接線の始末端部、また10mを超える溶接線においては中間部も含めて抜き取り検査を実施することとした。万一不合格欠陥が発生した場合には、隣接検査部までを追加検査することとしている。

### 3-5 使用機器の認定及び操作員の資格

使用機器の認定においては、人工欠陥供試体お

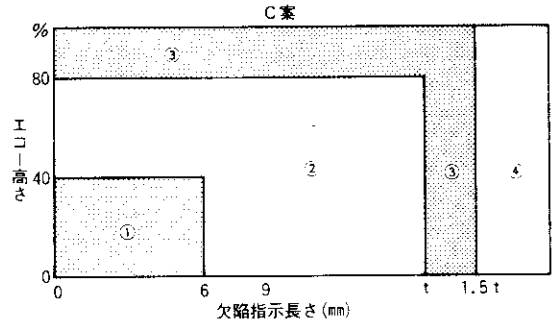


図-11 等級分類法

AUT等級分類	4級	23	6	0	0	3
	3級	38	8	0	0	3
	2級	73	11	1	1	5
	1級	265	26	5	0	2
	ND	260	10	1	0	4
データ数	ND	1級	2級	3級	4級	
745個	RT等級分類					

図-12. 1 等級分類結果（現場データ）

( $t < 25\text{mm}$  L/2線検出レベル)

AUT等級分類	4級	4	0	0	0	1
	3級	4	2	0	0	0
	2級	41	6	3	1	0
	1級	90	16	2	0	1
	ND	256	23	1	1	1
データ数	ND	1級	2級	3級	4級	
452個	RT等級分類					

図-12. 2 等級分類結果（現場データ）

( $t \geq 25\text{mm}$  L線検出レベル)

AUT等級分類	4級	9	3	1	1	4
	3級	35	7	7	7	14
	2級	23	6	6	3	8
	1級	53	27	10	7	9
		合計	43	24	18	35
データ数		1級	2級	3級	4級	
118個	RT等級分類					

図-13 等級分類結果（室内データ）

よび人為的に発生させた欠陥入供試体を用いた探傷試験を行い、その結果によって使用機器を認定することを考えている。

また、操作員の資格は、特別な資格を必要とせず、社団法人日本非破壊検査業協会の認定する超音波探傷検査技師の資格でよいこととしている。

## あしがき

鋼橋の現場溶接部において超音波自動探傷システムを用いた検査を可能とするため、人為的に欠陥を与えた供試体による室内試験と、実際の溶接施工箇所における現場試験を行い、放射線透過試験と同等の評価を与えられる検査要領の検討を行い、一定の成果を納める事ができた。

最後に、供試体の作成にご協力をいただいた阪神高速道路公団鋼構造物検討委員会参加各社の皆様、現場において厳しい工期のなかでデータ収集にご協力頂いた施工業者の皆様、そして「現場溶接部の検査手法に関する調査研究委員会」において数々の貴重な御意見、御指導を頂いた、大阪大学溶接工学研究所堀川教授をはじめとする研究会委員の皆様感謝する次第であります。

- 1) 阪神高速道路公団：現場溶接部の検査手法に関する調査研究報告書，平成3年3月
- 2) 阪神高速道路公団：現場溶接部の検査手法に関する調査研究（その2）報告書，平成4年3月
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書，同解説Ⅱ鋼橋編，平成2年2月