

## 鉄筋の半自動エンクローズ溶接 (NKE 法) 継手への超音波探傷法の適用

矢部 喜堂  
(技術研究所)

小早川 恵実  
(技術研究所)

高見 昌博  
(建築本部)

### § 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物はコンクリートと鉄筋を材料とする複合構造物であり、構造物の強度や品質に占める鉄筋の役割は大きく、構造物の安全性を考えると鉄筋の接合はきわめて重要である。

鉄筋の継手工法には、従来重ね継手とガス圧接が主として用いられてきた。

近年、構造物の大型化に伴い、次第に高強度かつ太径の鉄筋が使用されるようになってきた。さらに、継手の品質の安定化、施工の省力化・高効率化、また構造物のプレファブ化・PCa化の要求に対して種々の鉄筋継手工法が開発され、実用化されている。

最近、このような背景のもとに新しい継手工法として鉄筋の半自動エンクローズ溶接継手工法 (NKE 法) が開発され実用に供されている。NKE 法は、他の継手工法に比較して、①品質が安定した信頼性の高い継手が得られる、②接合する鉄筋のセットが容易である、③施工時の継手部の伸縮が少ない、④すべてのふし形状の鉄筋に使用できる等の利点があることから今後プレファブ工法、PCa工法等に使用される機会が多くなることが予想される。

溶接継手の品質は、半自動といえども溶接作業者の技量に負うところがきわめて大きい。継手の品質の信頼性を確保するためには、現場における品質管理の手段として有効な検査手法が必要となる。現在、鉄筋のガス圧接継手を対象として超音波探傷法による非破壊検査法が開発され、現場における品質管理の手段として広く採用されている。この鉄筋ガス圧接部の超音波探傷法では、鉄筋の一对のリップ上で2個の探触子を用いK走査法によって探傷を行ない、欠陥から反射される最大エコー高さによって圧接部の品質を評価している。

本研究は、ガス圧接部と同様に NKE 溶接継手を対象とした非破壊検査法として、超音波探傷法の適用性を検討したものである。そのために、継手の超音波探傷によ

るエコー高さおよび溶接部の欠陥面積率と継手の引張強さとの関係を調べ、また NKE 溶接継手における超音波探傷の測定精度に関連する諸要因の影響を調べるとともに、実際の建築物に施工される NKE 溶接継手の品質管理の一手法として超音波探傷検査を適用し、その実用性および効果についても調査した。

### § 2. NKE 法の概要

NKE 法は、接合しようとして突合せた鉄筋相互の間に狭い開先を設け、その外周をU型の銅当て金で囲み、細径のソリッドワイヤを用いて半自動ガスシールドメタルアーク溶接により、その空所を溶接金属で充填する鉄筋の突合せ溶接継手工法である。図-1にガスシールドメタルアーク溶接の原理図を、図-2にNKE法の原理図を示す。

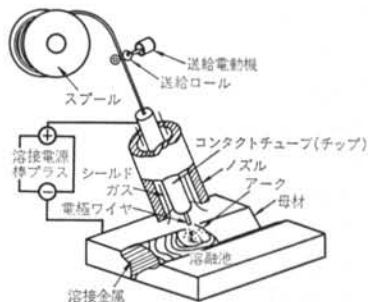


図-1 ガスシールドメタルアーク溶接法の原理

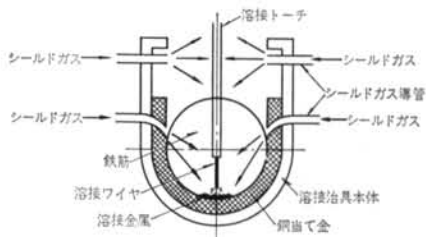


図-2 NKE 法の原理

### § 3. 超音波探傷法の適用

#### 3.1 実験概要

NKE 溶接継手に対する超音波探傷検査の合格判定レベルを得ることを目的として、エコー高さおよび欠陥面積率と継手強度の関係を調べた。

実験に用いた供試鉄筋を表一に示す。鉄筋は JIS G 3112 を満たす高炉鉄筋および電炉鉄筋で、いずれも鋼種は SD35, SD40 である。

本実験における試験項目および表一 供試鉄筋試験方法を表二に、試験体の形状を図一に、溶接条件を表三に示す。NKE 溶接部の強度に及ぼす影響の大きい欠陥の種類としては融合不良が考えられるため、試験体は融合不良を想定した人工欠陥を有する継手と、自然欠陥を有する継手の2種類とした。人工欠陥を有する継手試験体は、一方の鉄筋端面に所定の面積を有する鋼切片を仮付け溶接したまま、この端面に他方の鉄筋を突合せて溶接して、鉄筋端面と鋼切片との間に不溶着部(欠陥)が生ずるように作成したものである。この場合には、突合せた鉄筋相互のリブとの位置関係から図一に示すような4タイプの欠陥位置を設定した。一方、自然欠陥を有する継手試験体は、接合する上下の鉄筋のリブが直交するように突合せて溶接を行ない、溶接作業中の不規則な運棒操作によって意図的に開先のルート部や内部に欠陥を発生させて作成したものである。この場合の欠陥位置は、突合せた鉄筋の両側から超音波探傷によって推定し、人工欠陥の場合と同様に便宜的に4種類に分類した。

超音波探傷は、ガス圧接部の場合と同様に、溶接継手の両側においてそれぞれの鉄筋の一对のリブ上で2探触子によるK走査法で行なった。探触子は 5Z5×5A70、接触媒質は濃度98%以上のグリセリン水溶液を用いた。基準レベルは、溶接継手の一方の鉄筋を用いた透過法によるエコーの最大値とし、探傷結果は溶接継手の両側の鉄筋でそれぞれ探傷して得られたエコー高さのうちの高い方の値を用いた。

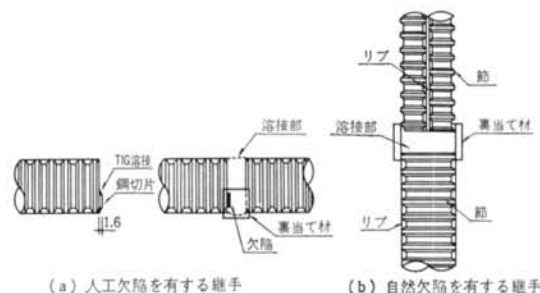
各試験体とも、超音波探傷後引張試験を行ない、継手の引張強さを調べた。引張試験において強度が母材の最大耐力に達しても溶接部で破断しなかった試験体については、母材のネッキングを確認した後直ちに除荷し、超音波探傷結果から推定される欠陥位置にノッチを入れ、

材質・呼び名	機械的性質			化学成分						
	降伏点 (kgf/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)	C (×10 <sup>2</sup> )	Si (×10 <sup>2</sup> )	Mn (×10 <sup>2</sup> )	P (×10 <sup>3</sup> )	S (×10 <sup>3</sup> )	C+ $\frac{Mn}{6}$ (×10 <sup>2</sup> )	
人工欠陥	SD40・D32	44	66	22	25	15	111	28	29	44
	SD35・D38	39	58	30	25	40	141	20	18	49
自然欠陥	SD40・D41	45	66	21	25	23	120	31	28	45
	SD35・D51	38	56	32	24	43	148	16	16	49
自然欠陥	SD35・D38	41	59	30	22	41	141	16	9	46
	SD40・D41	45	66	21	25	23	120	31	28	45

表一 供試鉄筋

試験項目	試験体	数量	試験方法
超音波探傷試験	人工欠陥を有する継手	SD35 D38	54
		SD35 D51	54
	自然欠陥を有する継手	SD40 D32	45
		SD40 D41	45
引張試験	自然欠陥を有する継手	SD35 D38	90
		SD40 D41	137

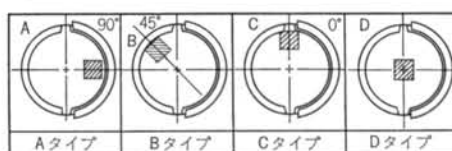
表二 試験項目および試験方法



図一 試験体の形状

継手形状	開先ルート間隔 (mm)	電流 (A)	電圧 (V)	シールドガス
				(CO <sub>2</sub> , l/min)
I形	12	220~240	28~31	50

表三 溶接条件



図二 欠陥位置

再度引張荷重を行なってノッチ部で破断させ、露出した欠陥の面積を測定して欠陥面積率を算出した。

## 3.2 実験結果および考察

### 3.2.1 人工欠陥の場合

#### (1) エコー高さと引張強さとの関係

エコー高さと引張強さとの関係の一例を、図-5に示す。本実験の範囲内では、実際の継手溶接部に発生すると考えられるB, C, Dタイプの試験体の場合にエコー高さがほぼ-15 dB程度以上になると、引張強さがJIS規格値を下回るものが見られるようになる。図中に破線で囲んだAタイプの試験体の引張強さは、他のタイプの試験体に比べて低いエコー高さ(ほぼ-30 dB)でJIS規格値を下回っている。これは、欠陥がリブから最も遠く離れた位置にあるため超音波がこの欠陥に当たりにくく、他のタイプの試験体に比べてエコー高さが低くなること、欠陥位置が裏当て材の直近であるために、裏当て材側の溶込みが不十分で表面に開口した欠陥となり、

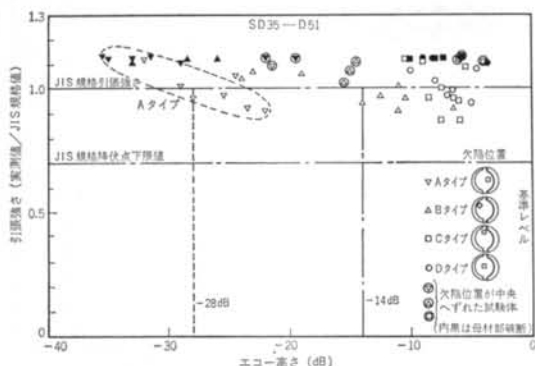


図-5 人工欠陥を有する継手試験体のエコー高さと引張強さの関係 (SD35・D51 の場合)

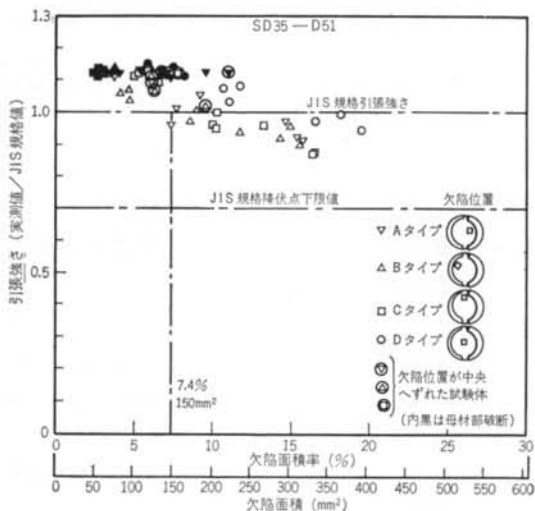


図-6 人工欠陥を有する継手試験体の欠陥面積率と引張強さの関係 (SD35・D51 の場合)

切欠効果によって継手強度が低下したことによるものである。なお、このような欠陥については実際の継手溶接部に生じることは稀であると思われる。

#### (2) 欠陥面積率と引張強さとの関係

欠陥面積率と引張強さとの関係を図-6に示す。SD35・D51, SD40・D41の場合とも、いずれのタイプの試験体についても欠陥面積率が大きくなるにつれて継手強度は徐々に低下する傾向にあり、欠陥面積率がほぼ7%程度以上になると引張強さはJIS規格値を下回るものが見られるようになる。その中でも、欠陥が継手断面の中央部にあるDタイプの試験体は、欠陥が周辺部にある他のタイプの試験体に比べて同一の欠陥面積率に対して強度の低下は少ない。

#### (3) 欠陥面積率とエコー高さとの関係

欠陥面積率とエコー高さとの関係を図-7に示す。A, Bタイプの試験体は欠陥面積率とエコー高さはほぼ比例関係にあり、欠陥面積率が大きくなるにつれてエコー高さは高くなる傾向にある。なお、Aタイプの試験体は前述したように、同一の大きさの欠陥に対するエコー高さは他のタイプの試験体に比べて低いことが分かる。C, Dタイプの試験体は欠陥面積率によってエコー高さはほとんど変化せず、欠陥面積率が小さいものでも高いエコーが得られる。このように、欠陥面積率が大きいにもかかわらずエコー高さは低い場合があり、また欠陥面積率が小さいにもかかわらず高いエコー高さが得られる

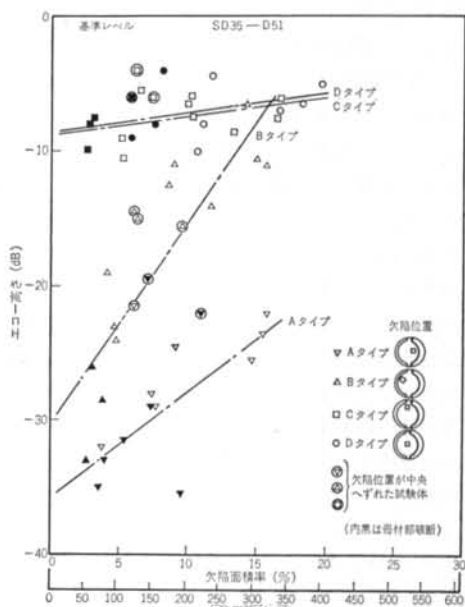
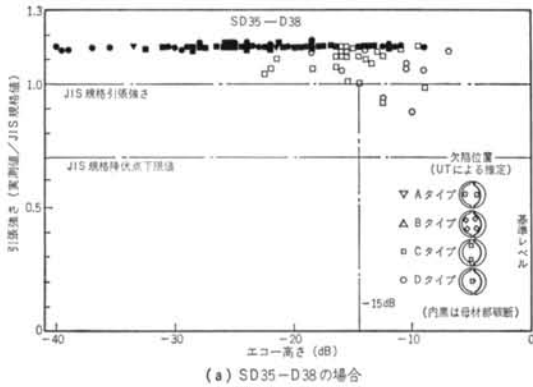
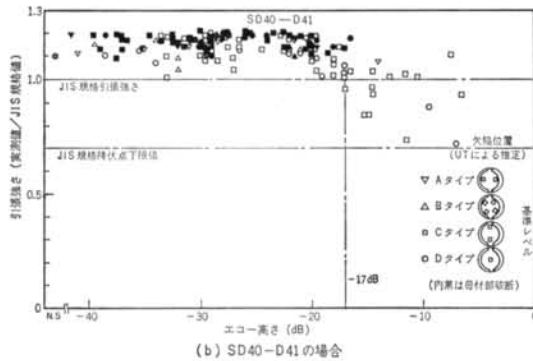


図-7 人工欠陥を有する継手試験体の欠陥面積率とエコー高さの関係 (SD35・D51 の場合)



(a) SD35-D38の場合



(b) SD40-D41の場合

図-8 自然欠陥を有する継手試験体のエコー高さと引張強さの関係

場合がある。したがって、NKE 溶接継手を超音波探傷で評価するときに、このことを十分に留意して継手の合否判定レベルを検討する必要がある。

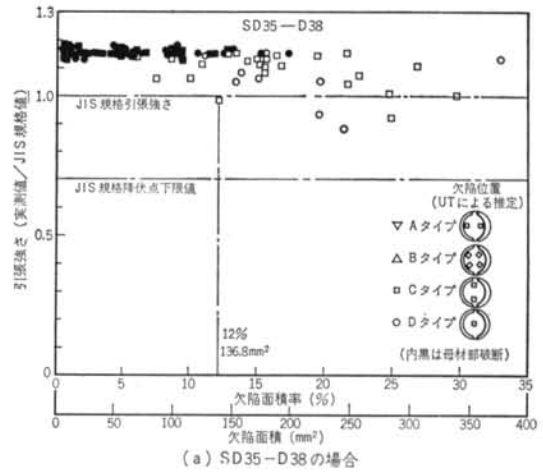
### 3.2.2 自然欠陥の場合

#### (1) エコー高さと引張強さとの関係

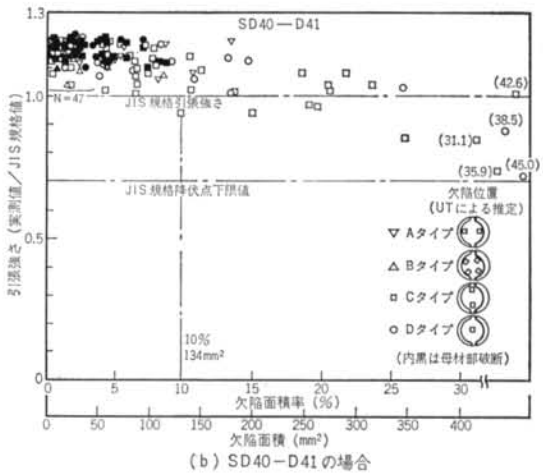
エコー高さと引張強さとの関係を図-8に示す。自然欠陥を有する継手試験体の場合も人工欠陥を有する継手試験体の場合とほぼ同様の傾向を示し、SD35・D38の場合エコー高さが-15dB以上、SD40・D41の場合エコー高さが-17dB以上になると引張強さがJIS規格値を下回るものが見られるようになる。自然欠陥を有する継手試験体の場合には、人工欠陥を有する継手試験体の中のAタイプのようにエコー高さが低いにもかかわらず強度が低くなるような特異な欠陥は見られなかった。

#### (2) 欠陥面積率と引張強さとの関係

欠陥面積率と引張強さとの関係を図-9に示す。SD35およびSD40とも欠陥面積率が約10%以上になると、引張強さがJIS規格値を下回るようになる。この引張強さの低下し始める欠陥面積率は、人工欠陥を有する継手試験体の場合とほぼ同等であるといえるが、これらの値の若干の差異は、人工欠陥と自然欠陥とでは試験体の



(a) SD35-D38の場合



(b) SD40-D41の場合

図-9 自然欠陥を有する継手試験体の欠陥面積率と引張強さの関係

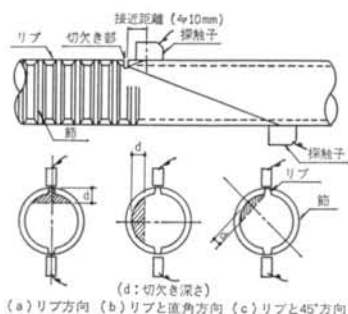
作成条件の相違によって欠陥の切欠き先端の形状、靱性等が異なるためであると考えられる。

## § 4. 超音波探傷の測定精度に及ぼす諸要因の影響

### 4.1 実験概要

NKE 溶接継手の超音波探傷検査における合否判定レベルを設定するに当たり、超音波探傷の測定精度に及ぼす諸要因の影響を調べておく必要がある。

本実験では①探傷可能領域——超音波探傷による継手断面内の欠陥検出可能領域を調べる、②妨害エコー——超音波探傷で発生する可能性のある妨害エコーの種類とその判別方法を調べる、③探傷技術者による探傷のばら



図一10 探傷可能領域の調査における探傷方法

つき—同一欠陥について複数の探傷技術者によるエコー高さのばらつきを調べる、④専用探傷器と汎用探傷器による測定値の相関—現在広く普及しているガス圧接部の専用探傷器を用いて探傷した測定値と、ブラウン管付きのパルス反射式Aスコープ探傷器（以下、汎用探傷器という）による測定値の相関を調べ、専用探傷器の使用の可否を検討することとした。

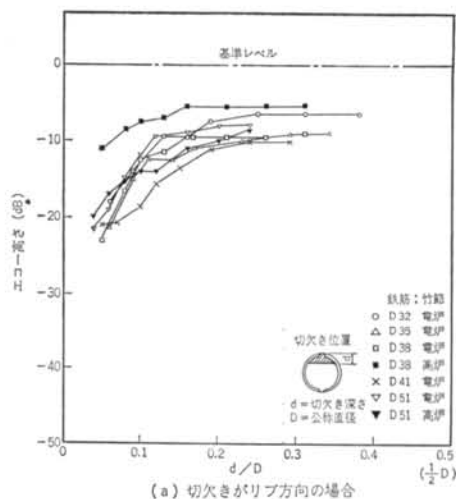
使用した鉄筋は、JIS G 3112 を満たす高炉鉄筋および電炉鉄筋で、いずれも SD35, SD40 である。

#### 4.2 探傷可能領域

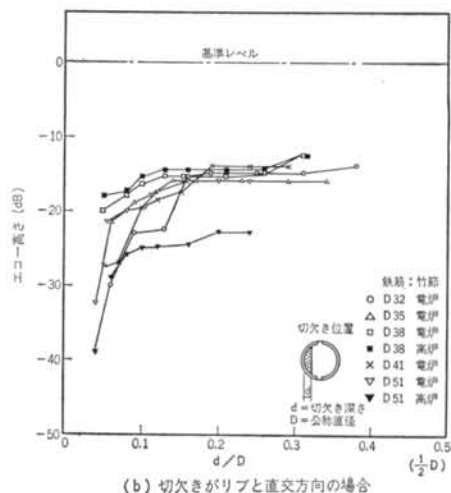
本実験では、図一10に示すように鉄筋のリブに対して3方向から鉄筋の表面に種々の深さの切欠きを入れ、この切欠きを2探触子法で探傷し、切欠きの深さとエコー高さとの関係を調べた。

切欠き深さとエコー高さの測定結果の一例を図一11に示す。同図(a), (b)の場合エコー高さは、切欠き位置に関係なく切欠き深さが大きくなるにつれて高くなるが、一定の切欠き深さで飽和する。なお、同図(c)のように切欠きがリブと45°方向にある場合、いったん一定の切欠き深さで飽和するが、さらに切欠きが深くなるとリブに切欠きがかかり、リブ直下の切欠き部からエコーが返るため、同図(a)と同等のエコー高さで飽和ようになる。同一寸法の切欠き深さに対するエコー高さは、切欠き位置の違いによって差異が生じ、リブの直下に切欠きがある場合に最も高く、リブと直交方向の位置に切欠きがある場合に最も低くなる。

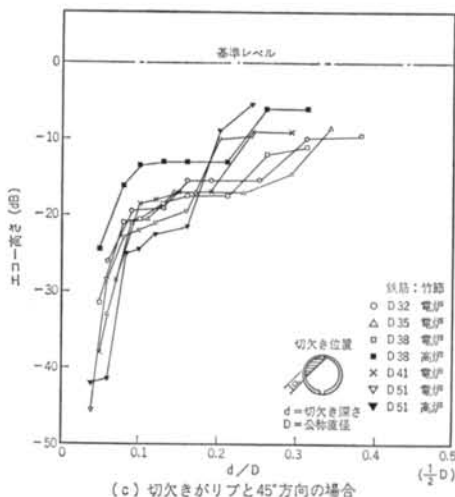
探傷感度と欠陥面積率との関係を図一12に示す。超音波探傷の探傷感度を  $-20 \sim -30\text{dB}$  とした場合、欠陥の検出が可能な領域は図一13に斜線部で示す部分であり、鉄筋断面積の約65~75%となる。ただし、探傷感度を  $-15\text{dB}$  とすると、鉄筋によっては欠陥を検出できる探傷可能領域が狭くなる場合もある。



(a) 切欠きがリブ方向の場合



(b) 切欠きがリブと直交方向の場合



(c) 切欠きがリブと45°方向の場合

図一11 鉄筋の切欠き深さとエコー高さの関係

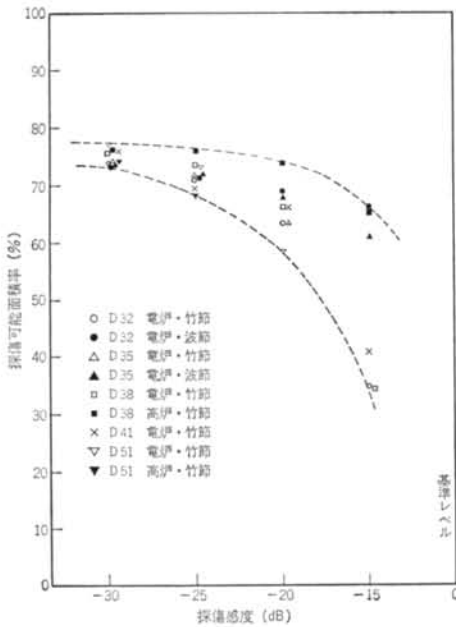


図-12 切欠きを有する鉄筋の探傷感度と探傷可能面積率の関係

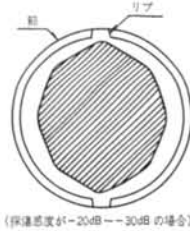


図-13 探傷可能領域

### 4.3 妨害エコー

本実験では、NKE 溶接継手の超音波探傷によって認められた妨害エコーは4種類であった。これらの妨害エコーとその発生経路およびエコー高さを図-14に示す。

いずれも、妨害エコーのエコー高さは  $-25 \sim -40\text{dB}$  と低い値を示しているものが多く、欠陥エコーの合否判定にはほとんど支障とはならない。また、これらの妨害エコーは専用探傷器、汎用探傷器とも2個の探触子の位置関係から、欠陥エコーとの判別は可能である。

### 4.4 探傷技術者による探傷のばらつき

超音波探傷技術者3名によって、同一試験体の欠陥を探傷して得られたエコー高さの平均値を、その試験体の真のエコー高さとした。各試験体の真のエコー高さを6dBの範囲に分類し、それぞれの範囲に入るすべての試験体の各探傷技術者の探傷データをまとめ、エコー高さの平均値とばらつきを求めた。試験体の真のエコー高さ

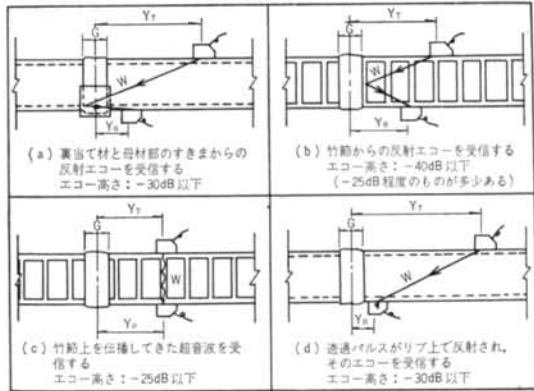


図-14 妨害エコーの種類

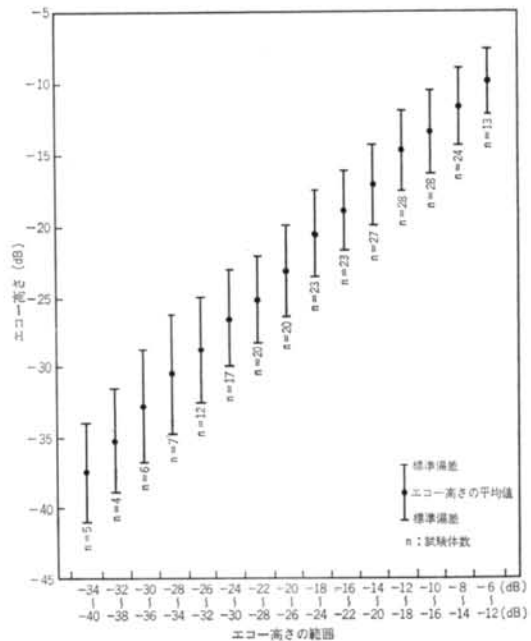
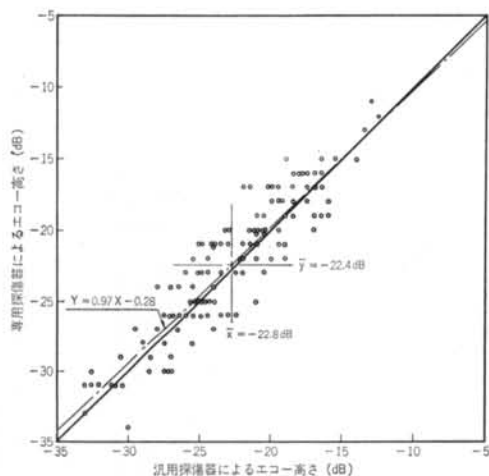


図-15 探傷技術者のばらつき

の範囲ごとのエコー高さのばらつきを調べた結果を、図-15に示す。探傷技術者間での同一欠陥に対するエコー高さのばらつきは、標準偏差で2~4dB程度である。したがって、超音波探傷の合否判定レベルの設定に際しては、不良欠陥の見逃しを避けるために探傷技術者によるエコー高さのばらつきがこの程度あり、不良欠陥を見逃すこともあり得ることを認識しておく必要がある。

### 4.5 専用探傷器と汎用探傷器による測定値の相関

本実験に使用した専用探傷器を写真-1に、超音波探傷結果を図-16に示す。専用探傷器によるエコー高さと汎用探傷器によるエコー高さとの間の一次回帰直線は、両者が1:1で対応する45°の直線とほとんどよく近似



図一16 汎用探傷器と専用探傷器による測定値の相関 (D32の場合)

しており、エコー高さの低いレベルから高いレベルの範囲にわたって専用探傷器と汎用探傷器との差異はないといえる。したがって、NKE 溶接継手の超音波探傷に、ガス圧接部の超音波探傷に用いられている専用探傷器を用いても探傷上支障がないといえる。

#### 4.6 合否判定レベルの試案

鉄筋継手の性能評価項目の一つとして引張強さをとりあげるとき、その評価基準が JIS 規格値以上であることは一般的に認められるところであろう。NKE 溶接継手についても、引張強さが JIS 規格値以上であることを超音波探傷検査で保証するための合否判定レベルは、引張強度とエコー高さの関係から基準レベルに対して鉄筋 SD35 で  $-15\text{dB}$ 、SD40 で  $-17\text{dB}$  と考えることができる。しかし、さらに探傷技術者によるばらつきがあることを考慮して、見逃しを防止するために慎重に合否判定レベルを設定するなら、それぞれ  $-18\text{dB}$ 、 $-20\text{dB}$  とする方法も考えられる。

### § 5. 超音波探傷法の建築現場への適用

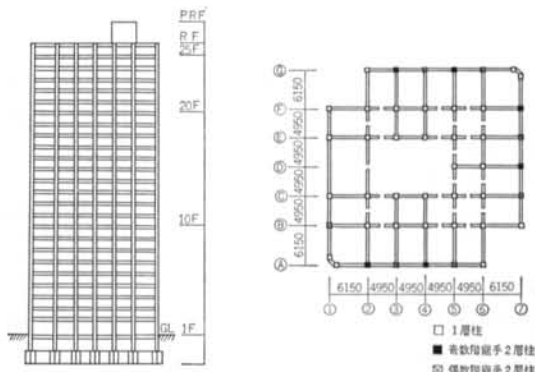
#### 5.1 建築物の概要

鉄筋の継手工法として NKE 法を採用した建築物の概要を図一17に示す。建物規模は地下1階、地上25階、塔屋1階で軒高75m、最高高さ80.46mの鉄筋コンクリート造の共同住宅(3棟)である。

NKE 溶接の対象とした鉄筋の種類を表一4に示す。鉄筋の材質は SD40、呼び名は D29~D41 である。溶



写真一1 専用探傷器



図一17 建築物概要

材質	鉄筋の呼び名	組み合わせ
SD 40	D29, D32	D29+D29, D32+D32
	D35, D38	D35+D35, D32+D35
	D41	D38+D38, D35+D38
		D41+D41, D38+D41

表一4 鉄筋の種類

鉄筋径 (呼び名)	水平鉄筋			鉛直鉄筋		
	開先の形状寸法		溶接条件 (電流, 電圧)	開先の形状寸法		溶接条件 (電流, 電圧)
	形状	ルート間隔 (G)		形状	ルート間隔 (G)	
D29, D32	I型	8~12mm (10±2)	220~250 A (150~170 A) 29~31 V	I型	10~14mm (12±2)	200~250 A (150~170 A) 28~31 V
D35, D38						
D41						

(注) 溶接条件欄における ( ) 内の低い電流値は、ビードの形を整える時に用いる。

表一5 標準溶接条件

接箇所数は柱筋が47,336箇所、はり筋が27,734箇所である。現場の標準溶接条件を表一5に示す。

現場における溶接継手の検査フローを図一18に示す。本工事では、溶接作業者ごとに1日の溶接作業前に現場の作業条件を加味した模擬試験体を継手箇所600本につ

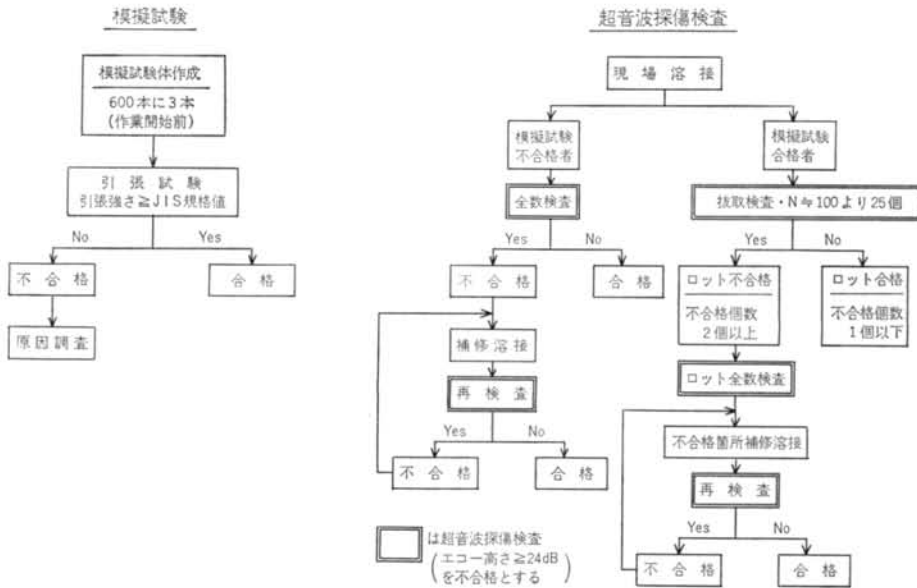


図-18 現場の超音波探傷検査フロー

き3本の割合で作成し、引張試験によって模擬試験の合格が調べられた。模擬試験における不合格者がその日のうちに既に溶接した継手については超音波探傷による全数検査とし、不合格箇所については補修溶接した後超音波探傷で再検査し、継手の良否が確認された。模擬試験における合格者が溶接した継手については、継手約100箇所を1ロットとして、1ロットより25個をサンプリングする1回抜取り検査が行なわれた。合格判定個数は1であり、不合格箇所数が1以下の場合合格、2箇所以上の場合不合格とし、不合格ロットについては全数検査が行なわれた。

ここで、NKE 溶接継手の超音波探傷検査における合格判定レベルは、既に実用化されているガス圧接部の超音波探傷との対応を把握するため基準レベルに対し-24dBとして、試案の合格判定レベルより厳しい検査とした。

## 5.2 検査結果

検査結果を図-19に示す。柱筋継手およびはり筋継手ともに、現場における工事工程の初期段階では超音波探傷検査によって不合格となる継手箇所が多く検出され、特にB1階の柱筋では超音波探傷検査数1,820箇所に対して不合格数が167箇所、不良率はほぼ10%となった。不合格ロットについては全数検査が行なわれ、不合格箇所は手直しの後再検査を受けたため、この時点での検査率はほぼ70%にもなった。これらの不合格溶接部の発生原因を調べた結果、溶接作業者が建築現場の溶接作業に

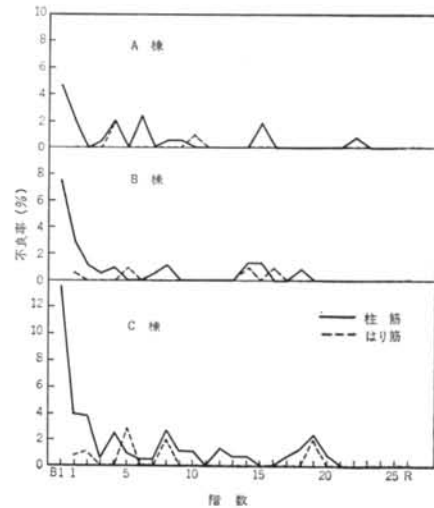


図-19 現場の超音波探傷検査結果

不慣れな場合に不合格が発生し易いことが分かった。また、溶接装置の移動時に溶接ケーブルに曲がりが生じ、溶接ワイヤの供給に支障が生じて欠陥の原因となったこともある。対策としては、以後現場溶接作業者の選別を行ない熟練者で行なうこととし、また装置の移動は十分な注意をして行なうこととした。対策を講じた後の溶接継手では不合格の発生は少なくなり、不良率はきわめて低くなっている。最終的には、超音波探傷検査数は柱筋継手の場合14,985箇所で当該継手箇所数の31.7%、はり筋継手の場合8,156箇所です当該継手箇所数の29.4%である。不良率は柱筋継手で1.9%、はり筋継手で0.2%とな



り、当初に比べて不合格の発生はきわめて少なくなっている。現場における NKE 溶接継手の品質管理手段として、超音波探傷検査がきわめて有効であることが実証されたものとする。

## § 6. あとがき

一般に、溶接継手の品質は溶接作業者の技量に負うところが大きく、継手の品質管理の一手法としての非破壊検査法が望まれる。

本報では、NKE 溶接継手について超音波探傷法の適用性を検討し、実際の建築物で施工される現場における NKE 溶接継手に対して超音波探傷法が効果的であることが確認された。

NKE 溶接継手では、超音波探傷検査における合否判定レベルとして欠陥と強度との関係から、SD35 の場合  $-15\text{dB}$ 、SD40 の場合  $-17\text{dB}$  とする考え方もできる。一方では、探傷技術者によってエコー高さのばらつきが標準偏差で  $3\text{dB}$  程度あることを考慮に入れると、SD35 の場合  $-18\text{dB}$ 、SD40 の場合  $-20\text{dB}$  を合否判定レベル

とするのが合理的と考えられる。

今後、さらに実際の現場で発生した不合格継手に見られる真の自然欠陥についての探傷データおよび引張試験データを蓄積することにより、さらに明確な合否判定レベルを設定することができる。

実際の建築物の NKE 溶接継手の施工において継手の品質管理に超音波探傷法を採用した結果、要求される品質レベルが確保され、品質管理にきわめて効果的であることが確認できた。

本研究は、清水建設㈱、日本鋼管㈱、日本鋼管工事㈱の共同研究によるものである。

**謝辞** 本研究の実施に当たり終始懇切なご指導をいただきました。東京工業大学名誉教授・神奈川大学教授藤本盛久博士に深甚なる謝意を表します。さらに、研究に当たって種々ご協力いただいた、東京電力㈱の方々に謝意を表します。超音波探傷の現場への適用に当たっては、SNT 団地設計事務所内部に組織された「鉄筋コンクリート施工検討委員会」でご討議いただいた。また、現場データの提供に当たりご理解とご協力をいただいた、三菱地所㈱、新宿西戸山団地共同企業体の方々に深い感謝の意を表します。

### <参考文献>

- 1) 土木学会編：“鉄筋継手指針（その2）鉄筋のエンクローズ溶接継手” コンクリート・ライブラリー 第55号（昭和59年9月）
- 2) 日本圧接協会編：“鉄筋ガス圧接部の超音波探傷検査規準 NAKS 0001—1983”（昭和58年12月）
- 3) 藤本盛久、高見昌博、矢部喜堂、関口健次、原沢秀明、森三郎：“鉄筋半自動エンクローズ溶接（NKE 法）の継手性能に関する研究（その1、太径鉄筋（D38、D41）鉛直継手における開先形状の検討）” 日本建築学会大会学術講演梗概集（1983年10月）
- 4) 藤本盛久、高見昌博、矢部喜堂、小早川恵実：“鉄筋半自動エンクローズ溶接（NKE 法）の継手性能に関する研究（その6、超音波探傷法の適用性）” 日本建築学会大会学術講演梗概集（1983年10月）
- 5) 藤本盛久、高見昌博、矢部喜堂、小早川恵実、中西啓二：“鉄筋半自動エンクローズ溶接（NKE 法）の継手性能に関する研究（その7、超音波探傷の測定精度に及ぼす要因の影響）” 日本建築学会大会学術講演梗概集（1983年10月）

