

鉄筋ガス圧接部の超音波探傷法の基礎理論 (その1)

—欠陥性状の把握と探傷手法の検討—

斉 藤 鉄 夫
(技術研究所)矢 部 喜 堂
(技術研究所)倉 持 貢
(技術研究所)藤 盛 紀 明
(技術研究所)

§ 1. はじめに

筆者らは、鉄筋ガス圧接部の超音波探傷法について、これまで主に実用化の観点からの研究を行ない、その成果を発表してきた^{1)~4)}。そして、現場での実用化に対しては必要十分なデータが得られ、当探傷法は種々の学協会・団体の仕様書に採用され、社内外で広く使われるようになった。

しかし、当探傷法の理論的な基礎はまだ不備な点が多かった。探傷法が全国的に普及するにつれて基礎理論の構築が要請されるようになった。すなわち、鉄筋ガス圧接部の欠陥の種類と性状、その超音波反射特性、欠陥の圧接面内発生分布そして欠陥エコー高さと引張耐力の相関成立の必然性等である。

今回の一連の報告は、既に実用化を終えた本探傷法について基礎理論の構築という観点から、既往の知見に新たな実験・考察・知見を加えてまとめたものである。

1.1 研究の目的

鉄筋コンクリート構造物の信頼性は、圧縮力を負担するコンクリートの健全性および主に引張力・せん断力を負担する鉄筋の健全性に負うところが大きい。鉄筋の

健全性は、鉄筋素材および接合部の健全性に帰することができる。

鉄筋の接合法にはガス圧接法、重ね継手法、機械継手法などがある。このうち、ガス圧接法は図-1に示すような接合法であり、継手の力学的性状の優秀性・簡便性・経済的な優位性の故に建築・土木の両分野で用いられる中・太径鉄筋の接合法の主流をなしている。特に建築の分野においては、呼び名D22以上の径の鉄筋の接合法のほとんどを占めている。

しかし、鉄筋のガス圧接法は、その品質（継手性能）が圧接工の技量や鉄筋端面の状態等の作業条件に大きく依存しているにもかかわらず、品質を確認する有効な手段がないという問題点を有していた。

本研究は、簡便で信頼性の高い非破壊検査法を確立することによってガス圧接法のもつ問題点を解決し、鉄筋ガス圧接部ひいては鉄筋コンクリート構造物の品質管理に資すること、また鉄筋コンクリート工事の工期短縮に資することを目的としたものである。

1.2 既往の研究

鉄筋ガス圧接部の非破壊検査に関する既往の報告は、筆者らが行なったもの^{1)~4)}以外はない。しかし、鉄筋圧接部に生ずる欠陥に関連したものでは、いわゆる「フラット破面」の生成に関する報告^{5)~12)}がある。フラット破面とは、圧接部の引張試験やノッチ入り曲げ試験における破断圧接面上に見られるものである。これは、圧接面上に生成されたフェライトバンドの一部、もしくは全面においてSi、Mn等の酸化物などを核としてディンプル破壊したものである。以後、フラット破面を生成するフェライトバンドを「フラット部」と呼ぶこととする。

既往の報告の中では、フラット破面生成に及ぼす鉄筋の化学成分・端面つきあわせ等の間隙・風速等の影響が主に述べられており、フラット部の力学的性状や非破壊的検出方法は明らかになっていない。また、フラット部以外の欠陥およびその原因・性状に関する報告はない。

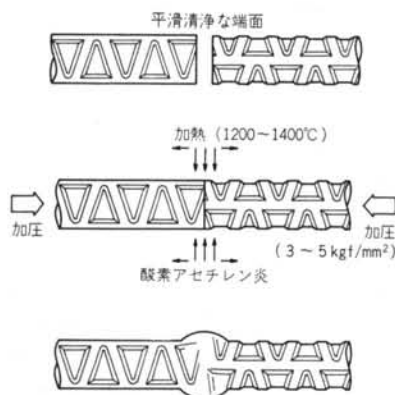
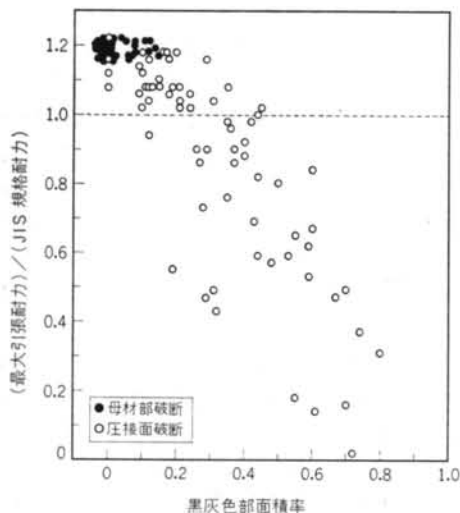


図-1 鉄筋のガス圧接工法



写真一 現場圧接体の圧接面破断面例



図一 現場圧接体における黒灰色部の面積率と最大引張耐力の関係

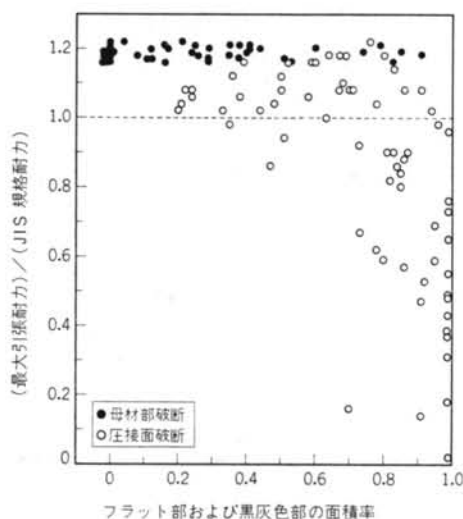
§ 2. 鉄筋ガス圧接部に生ずる欠陥の性状調査

2.1 現場圧接部の破断面調査

従来、鉄筋ガス圧接部の品質確認法として現場からの抜き取り供試体による引張試験が行われてきた。現場抜き取り供試体のうち、引張試験の結果圧接面破断したものの一例を写真一に示す。この破断面には既往の文献に報告のあるフラット破面の他に、黒色もしくは黒灰色の欠陥（以下、黒灰色欠陥ないしは黒灰色部と呼ぶ）が認められる。

現場抜き取り供試体の引張試験において圧接面破断したものの72体および母材部破断したものの45体の計117体について、圧接面のフラット破面および黒灰色部の面積を調べた。ここで、母材部破断したものについては引張試験後圧接面にノッチを入れ、曲げ破断させて調査した。

図二および図三はその結果で、それぞれ圧接面中の黒灰色部の面積の割合（黒灰色部面積率と呼ぶ）と圧接部の最大引張耐力の関係、黒灰色部とフラット破面をあ



図三 フラット部および黒灰色部の面積率と最大引張耐力の関係

わせた部分の面積率と圧接部の最大引張耐力の関係を示したものである。

黒灰色部面積率と引張強度の間に顕著な相関が認められる。フラット部の強度への影響は、黒灰色部に比べ小さいと推定される。

黒灰色欠陥の生成原因として、圧接前の端面条件の不良が考えられる。推定される端面不良条件としては、ガス切断したままの端面、シャー切断のままで極端に間隙が大きいもの、錆の発生した端面などがある。

2.2 黒灰色部、フラット部の引張強度を求める実験

2.2.1 実験の目的

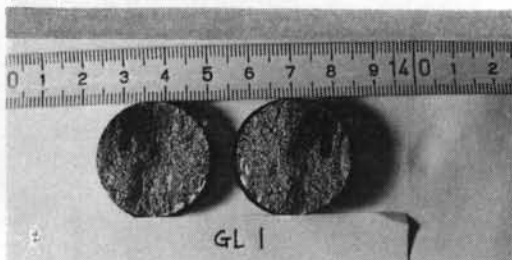
現場圧接体の引張試験および破面観察の結果から、圧接部の欠陥には既往の文献に報告のあるフラット部の他に黒灰色欠陥が存在し、圧接部の引張強度に対しては黒灰色欠陥が大きな影響を及ぼしていることが分かった。黒灰色部およびフラット部の強度をより明確にするために、現場圧接体の破面観察から推定された欠陥発生原因を再現して実験的に試験体を製作し、それを0.7D（D：公称径）の丸棒に切削加工して圧接部のふくらみを削除した状態で引張試験を行ない、上記の2種の欠陥の強度推定を試みた。

2.2.2 試験体の製作

試験体の製作に用いた鉄筋は材質SD35、呼び名D38（公称径38.1mm）の高炉製鉄筋である。試験体製作時の条件を表一に示す。ここで選定した条件は、既往の文献で報告されているフラット部生成要因、もしくは前節において現場圧接体の破面観察から黒灰色欠陥生成の要

試験体 記号	本数	セット間隔 (mm)	圧接端面条件
SN	5	0~3.0	鋸切断面(標準端面)
KM	5	2.0~5.5	// (セット間隔 3±1mm)
KL	5	2.0~5.0	// (セット間隔 5±1mm)
RM	5	1.0~3.0	鋸切断面に全面赤錆発生
GL	5	1.0~4.0	ガス切断面に多少グラインダーがけ
GS	5	1.0~4.0	ガス切断面+鋸切断面
SS	5	0.5~4.0	鋸切断面+シャー切断面
SA	5	2.0~6.5	シャー切断面
SL	5	1.0~5.5	シャー切断面に多少グラインダーがけ

表一 圧接試験体製作の端面条件



写真一 圧接面破断した丸棒試験体例



写真二 ノッチ入り曲げ破断面例

因と推定されたものである。その他の条件は圧接工に一任し、現場作業に近い条件で製作した。製作された圧接体を0.7D(26.7mm)の丸棒に切削加工した。

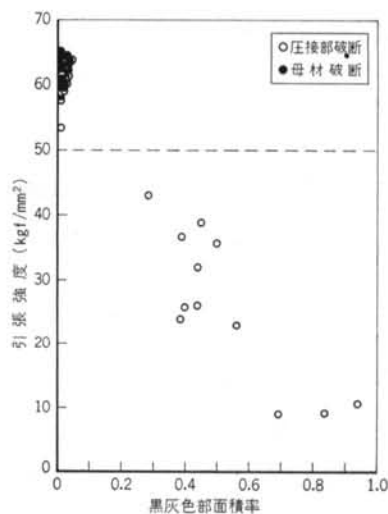
2.2.3 引張試験および破面観察

丸棒に加工後引張試験を行ない、圧接面の強度を求めた。試験体総数45体のうち16体は、最大耐力を示した後に圧接面以外でくびれを生じたので破断前に除荷し、圧接面に深さ3mmのノッチを入れて曲げ破断させた。圧接面破断したものの一例を写真一に、ノッチ入り曲げ破断面の一例を写真二に示す。

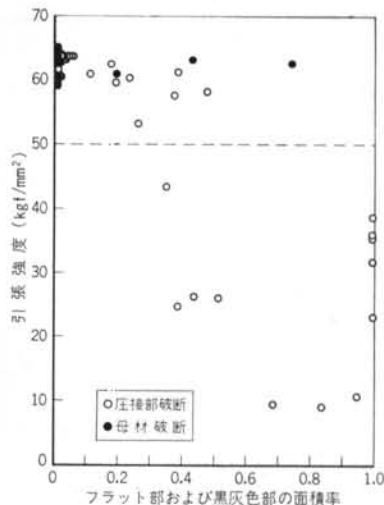
破断面中のフラット破面部および黒灰色部の面積率を求めた。

2.2.4 実験結果および考察

図一は黒灰色部面積率と引張強度の関係を、図二



図一 丸棒試験体での黒灰色部の面積率と引張強度の関係



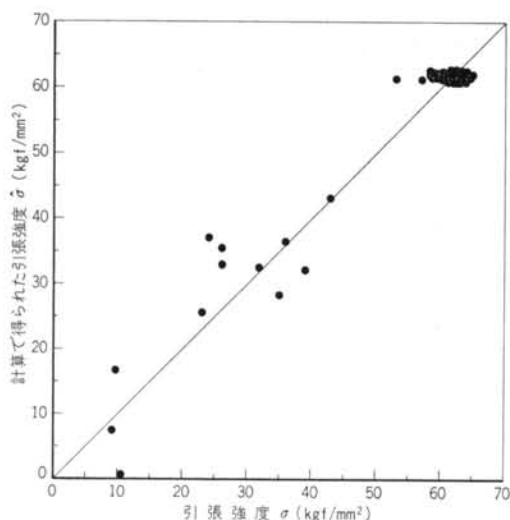
図二 フラット部および黒灰色部の面積率と引張強度の関係はフラット破面部に黒灰色部を合わせた部分の面積率と引張強度の関係を示している。ここで次式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \sigma_M x_M + \sigma_F x_F + \sigma_B x_B \\ x_M + x_F + x_B &= 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

ここで、 σ は最大引張耐力を断面積で除した値であり、 σ_M 、 σ_F 、 σ_B はそれぞれ金属結晶部、フラット部、黒灰色部の引張強度である。また x_M 、 x_F 、 x_B はそれぞれの面積率を示している。金属結晶部の引張強度 σ_M は母材部の強度に等しいと考えられるので、引張試験において母材部でくびれを生じた19体の引張強度の平均値62.2 (kgf/mm²) とする。ここで、 σ 、 x_M 、 x_F 、 x_B は実験によって求める。45体の実験データから重回帰分析によって求めたフラット部の引張強度 σ_F 、黒灰色部の引張強度

σ_B (kgf/mm ²)	σ_F (kgf/mm ²)	寄 与 率	重相関係数
-3.3	61.3	0.91	0.95

表一 2 重回帰分析によって得られた σ_B , σ_F



図一 6 実測した引張強度と式(1)により得られた引張強度の比較

No.	端 面 条 件	すきま (mm)	本数	備 考	記号
1	平滑清浄端面	0	4		○
2	"	3	4		●
3	赤錆発生端面	0	4	潮風中に 10日間放置	□
4	"	3	4		■
5	ペンキ塗布端面 (薄)	0	4	塗 厚 40~100 μm	△
6	" (#)	3	4		▲
7	" (厚)	0	4	塗 厚 80~120 μm	▽
8	" (#)	3	4		▼
9	セメントペースト付着	0	4	塗 厚 100~120 μm	◎
10	"	3	4		⊙
11	ガス切断端面		4	凹凸1.0~2.5mm	×
12	" にグラインド掛		4	凹凸1.0~1.5mm	⊗
13	サンドペーパー挿入	0	4	320番	▣
14	浮錆付着端面	0	4		▲

表一 3 圧接試験体製作のときの端面条件

度 σ_B とその寄与率, 重相関係数を表一 2 に示す。この結果から, 黒灰色部の引張強度は 0 に近いこと, フラット部の引張強度は金属結晶部と同程度であるといえる。

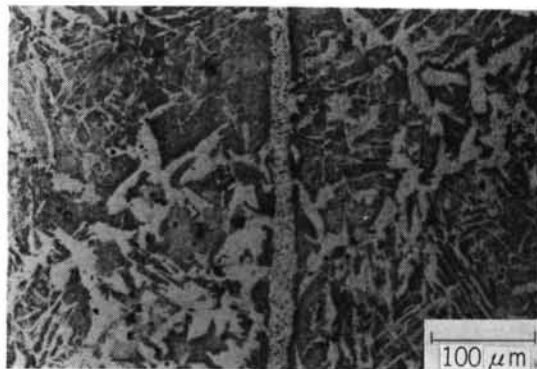
図一 5 は実測した圧接面全体の引張強度 σ と, 重回帰分析で得られた値 σ_B , σ_F と式(1)を用いて計算した引張強度 $\hat{\sigma}$ を比較したものである。表一 2 に示した σ_B , σ_F は, 実測した圧接面全体の引張強度をよく説明していることが分かる。

2.3 圧接面近傍縦断面のミクロ観察

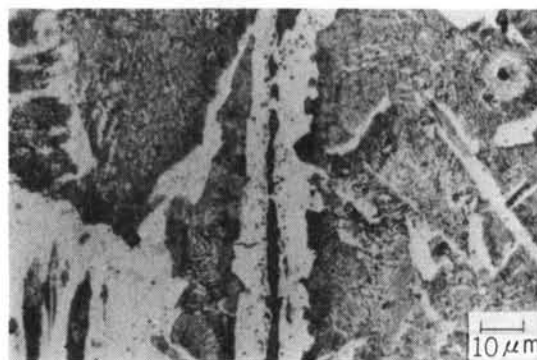
2.3.1 試験体の製作

圧接部の強度に大きな影響を及ぼす黒灰色欠陥の鉄筋軸方向の状態を観察するために, その生成の原因と考えられる鉄筋端面条件を再現して試験体を製作した。

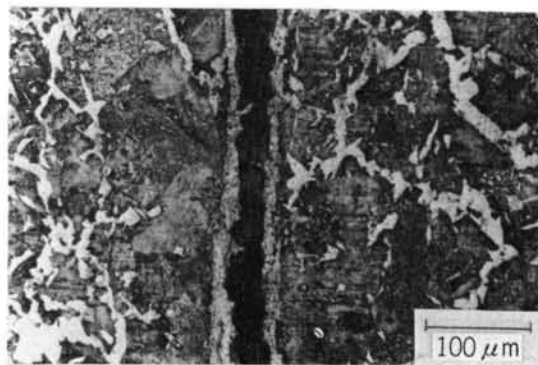
実験に使用した鉄筋は, SD35, 呼び名 D29 の高炉製



写真一 4 発錆発生端面で圧接した試験体の圧接面近傍縦断面 (×400)



写真一 5 ペンキ塗布端面で圧接した試験体の圧接面近傍縦断面 (×400)



写真一 6 ガス切断面で圧接した試験体の圧接面近傍縦断面 (×100)

鉄筋である。表-3 に試験体製作時の端面条件、圧接条件を示す。圧接後、圧接面をその中央を含む $22\phi \times 35\text{mm}$ の円柱状部分を切り出し、中心軸に沿って切断しミクロ観察用の試験体とした。

2.3.2 観察結果

ミクロ観察用の試験体の縦断面に対してナイトール腐食液を用い、光学顕微鏡・X線マイクロアナライザによるミクロ観察を行なった。写真-4, 5, 6 に圧接面近傍の光学顕微鏡写真を示す。清浄な端面で施工された健全な圧接部は、完全な金属結合をしていた。写真-4 は発錆端面で圧接したものであり、白色の層が存在する。写真-5 はペンキ塗布端面、写真-6 はガス切断面で圧接したもので、白色層の中に黒灰色の層が存在する。これらの層の厚さは白色層が $17 \sim 22 \mu\text{m}$ 、黒灰色層が圧接前の端面条件によって異なり、 $2 \sim 100 \mu\text{m}$ である。

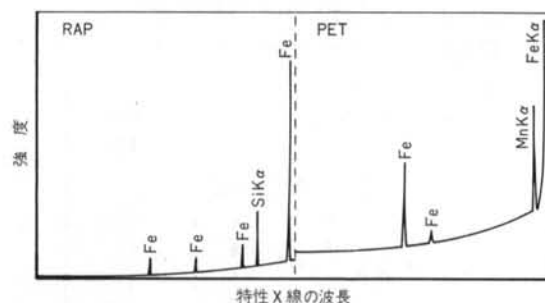


図-7 不連続部外の定性分析結果

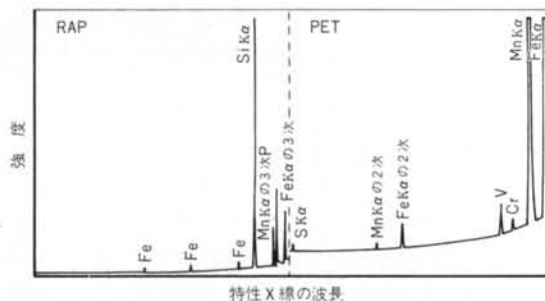


図-8 白色層の定性分析結果

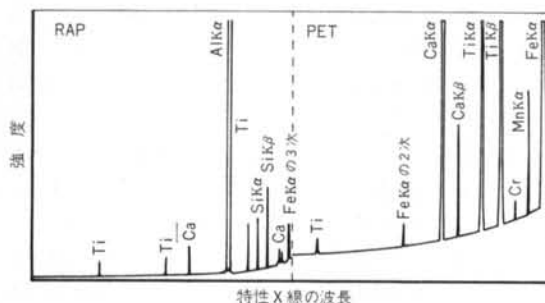


図-9 黒灰色層の定性分析結果

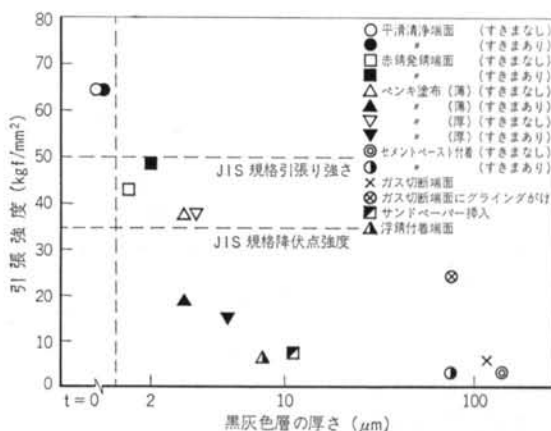


図-10 黒灰色層の厚さと引張強度との関係

これらの層の成分を調べるため、X線マイクロアナライザによる定性分析を行なった。各層の分析結果を図-7, 8, 9 に示す。図-7 は白色層、黒灰色層外の点の定性分析結果でその領域が鋼であることを、図-8 は白色層の分析結果で、その領域は Si, Mn 等の氧化物などが核となって初折フェライトを成長させたフェライトバンド、すなわち既往の報告にあるフラット部と推定されることを示している。図-9 は黒灰色部の分析結果である。この領域の成分は端面条件によって異なり、ペンキ塗布端面で圧接した試験体からはペンキの成分が、ガス切断端面で圧接した試験体からは主に Si が検出された。この Si は観察面の研磨時に研磨材が入り込んだものと考えられる。

図-10 は黒灰色部の厚さと引張強度の関係を示したものである。黒灰色部の強度は、層の厚さの増大とともに減少することが分かる。表-2 で求めた黒灰色部の引張強度は層の厚さ $10 \mu\text{m}$ 以上に相当するものと考えられる。ここで、ガス切断端面に多少グラインダがけした状態で圧接した試験体(⊗記号)の黒灰色層の厚さが $100 \mu\text{m}$ 程度あるにもかかわらず、その引張強度が $20 (\text{kgf}/\text{mm}^2)$ もあるのは黒灰色層が一様に広がっておらず、金属結合している部分が存在するためと考えられる。

赤錆発生端面、ペンキ塗布端面での圧接は黒灰色部が存在するが、その層厚は $2 \sim 10 \mu\text{m}$ 程度で、 $10 \sim 50 (\text{kgf}/\text{mm}^2)$ の引張強度がある。

§ 3. 最適探傷法・探傷条件の究明

3.1 非破壊検査手法の検討

薄層状で平面的に広がる内部欠陥の検出には超音波が

有効であると考えられるので、薄膜による超音波反射特性について考察した。

第1に、フェライトバンドが圧接面に分布したフラット部からの超音波の反射は存在しない、もしくは非常に小さいと考えられる。すなわち、写真—4～6に明らかなように圧接面以外においてもフェライトはパーライトを囲んで広がっている。一般に鋼の熱影響部における超音波の減衰は、主に結晶粒による散乱によるもので0.1～1 dB/cm 程度であり¹³⁾、個々のフェライトからの反射は非常に小さいと考えられる。したがって、圧接面に広がるフラット部からの反射も非常に小さいものと考えられる。

第2に黒灰色部の超音波反射特性について考察する。音響インピーダンス z_1 の鋼中に音響インピーダンス z_2 で厚さ t の黒灰色層が存在し、超音波が垂直に入射する場合を考える。厳密には任意の角度で入射した場合について考察し、その反射特性を定量的に表現しなければならないが、ここでは反射波の有無およびその大きさを定性的に議論するのであるから、垂直入射について考えれば十分であろう。平面波が垂直に入射するとき、その音圧反射率 $P(t)$ は層内での多重反射の効果から次式で表わされる。ここで、薄層中の波長を λ とする。

$$P(t) = \frac{z_2 - z_1}{z_1 + z_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{4 \cot^2 \left(\frac{2\pi t}{\lambda} \right) + \left(\frac{z_2 + z_1}{z_1 + z_2} \right)^2}} \quad \dots\dots(2)$$

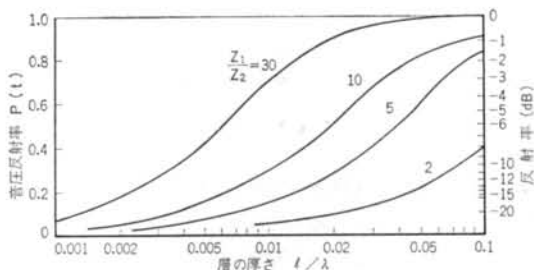
黒灰色層の音響インピーダンスは未知であり、一義的に反射波の大きさを求めることはできないが、その成分から考えて鋼に比べてかなり小さいと考えられる。図—11は、 (z_1/z_2) を 30, 10, 5, 2 としたときの音圧反射率を示している。この図から、黒灰色層の音響インピーダンスが鋼の $1/2$ 程度以下であれば、波長を適当に選ぶことによって検出可能な反射波を得ることができるといえる。つまり、黒灰色層については超音波の反射法で検出できる可能性がある。

3.2 最適探傷条件を求める実験

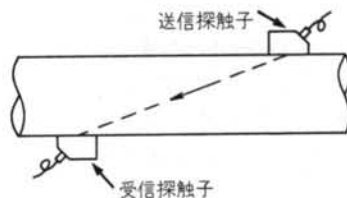
3.2.1 実験

前節において、黒灰色層については超音波の反射によって検出できる可能性があることが分かったので、その可能性を実験的に検証し、かつ最適な探傷条件を求める。実験室的に製作した欠陥を有する圧接供試体について、振動様式・周波数・入射角度（探触子の屈折角）をパラメータとして反射波の有無および大きさを調べた。

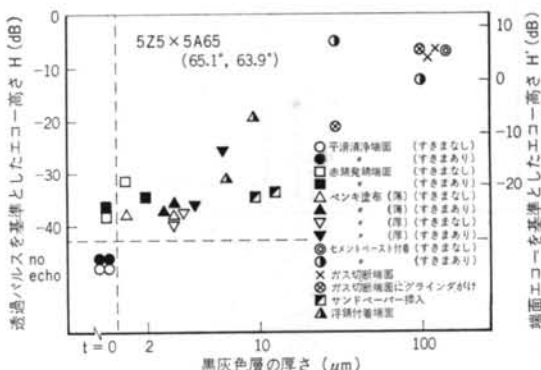
ここで振動様式とは、垂直探傷における縦波および斜



図—11 薄層からの音圧反射率



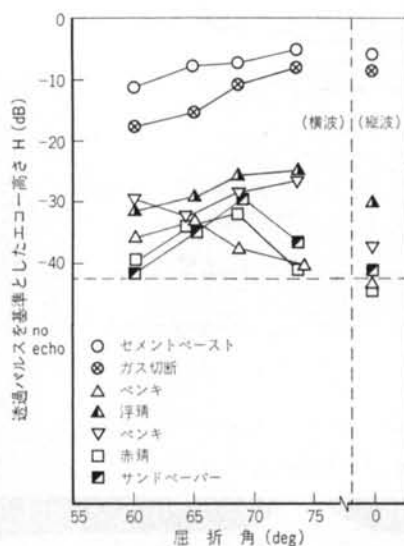
図—12 透過パルス高さによる基準感度の設定



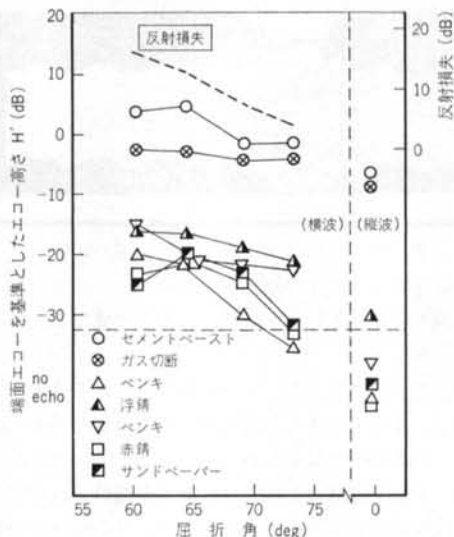
図—13 黒灰色層の厚さとエコー高さの関係

角探傷における横波の2種類である。試験体製作に用いた鉄筋はSD35、呼び名D29の高炉製鉄筋で、端面条件、圧接条件は表—3に示されたものと同一である。圧接後圧接部周辺を22φにけずり斜角2探触子K走査法の試験体とした。また、一部は圧接面を中心として22φ×60mmの円柱状に切り出して垂直探傷法の試験体とした。用いた周波数は、斜角探傷（横波）で2, 5, 7 MHz, 垂直探傷（縦波）で2, 5, 10 MHzの3水準である。また、斜角探傷に用いた探触子の屈折角は60°, 65°, 70°, 75°の4水準である。

斜角探傷に対しては、図—12に示す透過パルス高さおよび端面エコー高さの2種類を基準感度とし、それぞれについて欠陥からのエコー高さを求めた。垂直探傷に対しては端面エコー高さを基準感度とした。これらはいずれも使用する周波数、入射角度について同一条件で、その都度求めた。



図一14 屈折角とエコー高さの関係（透過パルス高さを基準とした場合）



図一15 屈折角とエコー高さの関係（端面エコーを基準とした場合）

探傷終了後、2.3と同様な方法で黒灰色層の厚さ、および圧接部の引張強度を求めた。

3.2.2 欠陥検出能の検証

図一13は、検出された圧接面からのエコー高さと黒灰色層の厚さの関係の一例で、周波数5MHz、屈折角65°の探触子を用いた斜角探傷の結果である。ここで、林状エコーレベルは透過パルスのレベルを基準として-42dBである。

周波数・屈折角などの探傷条件の差によってエコー高

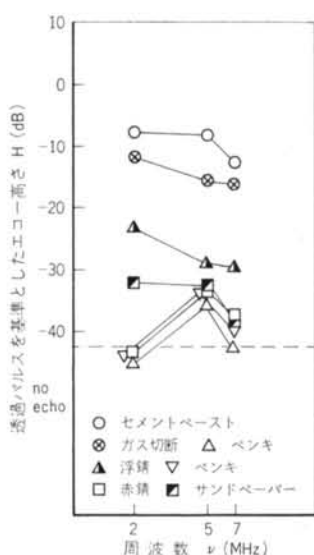
さは異なるが、いずれも図一13のように黒灰色層の厚さの増加によってエコー高さが増加する。これは、図一11に示された薄層内の多重反射効果による反射であると判断できる。前節で考察したように、黒灰色層については薄層内の多重反射効果によって検出可能であると結論づけられる。赤錆端面で圧接した試験体のように黒灰色層のないフェライトバンド層（フラット部）からのエコー高さは、いずれの探傷条件においてもほとんど検出されないが、検出されても林状エコーレベルより数dB高いだけであった。また、ベンキ塗布端面で圧接した試験体のように黒灰色層の厚さの小さい（2~10μm）ものに対しても、エコー高さは林状エコーレベルより数dB高いだけで非常に小さいものであった。フラット部の有無、および2~10μmの厚さの黒灰色層については超音波による検出は困難であるといえる。

3.2.3 振動様式、屈折角と欠陥検出能

図一14、図一15は探触子の屈折角とエコー高さの関係を、それぞれ透過パルスを基準とした場合、端面エコーを基準とした場合について示したものである。ここで、使用周波数は5MHzである。

図中の屈折角0°とは垂直探傷（縦波）のことである。縦波によるエコー高さは、斜面探傷（横波）に比べ小さい。特に、黒灰色層の厚さが小さい（10μm以下）場合にエコー高さが横波に比べ小さくなる。これは、縦波の波長が横波に比して大きいため図一11の(t/λ)が小さくなり、反射波が小さくなったためであると考えられる。この結果から、同一周波数では縦波よりも横波の方が欠陥検出能が高いといえる。

斜角探傷において基準感度の設定方法として端面エコー、透過パルスのいずれを選んでも欠陥検出能に基本的な差異はない。図一14と図一15でエコー高さと屈折角との関係が異なるのは、透過パルスを基準とした場合には平面反射の際のモード変換による反射損失の効果を含んでいるためである。屈折角が大きくなるに従って反射損失の大きさが小さくなるので、同一欠陥からのエコー高さが徐々に大きくなっていく。屈折角75°の場合、黒灰色層の厚さの小さい（2~10μm）ものから、エコー高さがこの傾向に反して小さくなっている理由は明らかでない。端面エコーを基準とした場合、反射損失の効果は予め除外されるので、同一欠陥からのエコー高さは屈折角によらず一定となるはずである。しかし、図一15において屈折角が大きくなるに従ってエコー高さが徐々に小さくなっているのは、屈折角 θ の増加に伴って黒灰色層の見掛けの厚さ($t/\sin \theta$)が減少し、図一11の薄層内の多重反射効果によるエコー高さが小さくなるためであると



図一16 周波数とエコー高さの関係（斜角探傷，屈折角70°）
考えられる。

結論として，横波で屈折角60°～70°の場合に黒灰色層の検出能が最も高くなるといえる。

3.2.4 周波数と欠陥検出能

図一16は，斜角探傷（入射角70°）の場合の周波数とエコー高さの関係である。黒灰色層の厚さが大きい欠陥に対して，周波数が大きくなるに従ってエコー高さが小さくなっている。他の角度や垂直探傷の場合でも同様な傾向を示す。これは，図一13に示す薄層内の多重反射効果の知見と矛盾する。この現象は，欠陥表面の凸凹による散乱に起因すると考えられる。波長が短くなるに従って凸凹の影響を強く受け，薄層内の多重反射効果を打ち消してエコー高さが低くなったものと考えられる。

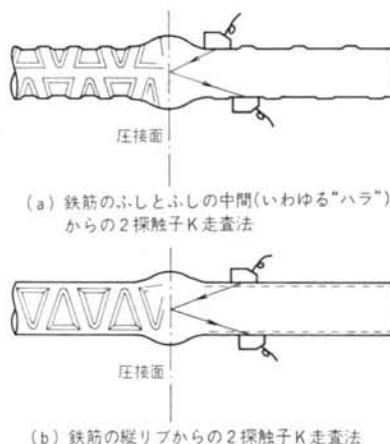
黒灰色層の厚さが10 μm以下の場合，周波数5 MHzを用いたときエコー高さが最も大きくなる。まず，2 MHzと5 MHzの比較では図一11の薄層内の多重反射効果により5 MHzの方が高いエコー高さを示し，5 MHzと7 MHzの比較では上述したような欠陥表面の凸凹による散乱効果により5 MHzの方が高いエコー高さを示していると考えられる。黒灰色層の厚さの小さい欠陥に対して検出能が高い横波の5 MHzが最適であると考えられる。

3.3 探傷方法の検討

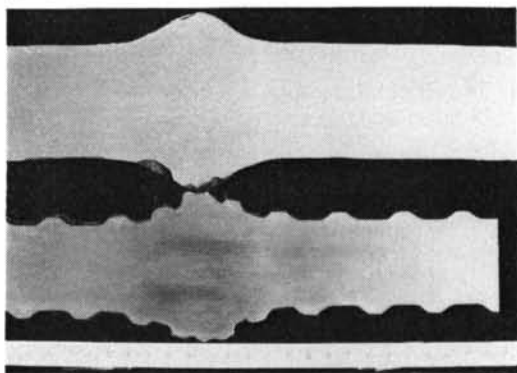
3.3.1 探傷方法

現場で探傷が可能となる条件として，以下の4点が挙げられる。

- i) 鉄筋の加工を伴わない



図一17 考えられる探傷方法



写真一7 D51の「ハラ部」および縦リブ部の縦断面

- ii) 細径から太径まで探傷ができる
- iii) 種々のリブ形状（メーカーによって異なる）に対応できる
- iv) 圧接面のできるだけ広い領域の探傷ができる

上記 i) の条件を考慮した場合垂直探傷は適用が不可能であり，斜角探傷によるしかない。また，平面状に広がる欠陥に対して超音波が斜めに入射する場合には探触子法では反射超音波を受信できないので，2探触子法でなければならない。斜角2探触子法として考えられる探傷方法として，図一17(a)に示す鉄筋のふしとふしの中間（いわゆる「ハラ」）からの2探触子K走査法，および図一17(b)に示す縦リブからの2探触子K走査法の2つがある。

写真一7は，市販されている鉄筋のうち最も径の大きい，呼び名D51の鉄筋の「ハラ部」および縦リブ部の縦断面である。

「ハラ」からの2探触子K走査法は，探触子を配置できるだけの「ハラ」を有するのは太径の限られたメーカーの鉄筋だけであること，探触子走査の範囲が小さく圧接面の極めて限られた領域しか探傷できない等の欠点がある。

呼び名	鉄筋種類数	リブ幅				リブ間距離			
		範囲	平均	σ		範囲	平均	σ	
D22	9	4.0~5.1	4.4	0.40		24.1~25.9	24.7	0.55	
D25	10	4.5~6.6	5.3	0.75		27.1~29.0	28.3	0.71	
D29	10	4.9~5.2	5.1	0.14		30.1~30.8	30.4	0.19	
D32	2	3.9~4.1	4.0	—		34.6~35.8	35.2	—	
D51	7	8.4~8.6	8.5	0.06		57.5~60.5	58.9	0.89	

表—4 リブ幅とリブ間距離についての調査結果

ある。縦リブからの2探触子K走査法は、縦リブが細径から太径までのすべての鉄筋に存在するので、径やメーカーにかかわらずすべての鉄筋に適用可能である。また、縦リブ上を前後走査させることにより「ハラ」からの探傷よりも圧接面の広い領域を探傷することが可能である。上記の4条件を満足させる方法として、縦リブからの2探触子K走査法を挙げることができる。

しかし、縦リブからの2探触子K走査法でもなお、圧接面の全領域を探傷できないという欠点が存在する。この欠点については、この欠点に起因する探傷法の信頼性の低下を定量的に検討し、その上で現場適用の可否を論じなければならない。それは後の報告で述べるとして、現段階では縦リブからの2探触子K走査法が現場で利用できる探傷法として最適であると結論できる。用いる周波数、探触子の屈折角は前節で得た知見より、それぞれ5 MHz、70°が最適であると判断される。ここで、欠陥検出能が同等である屈折角60°~70°の範囲で特に70°を選んだのは、圧接面の中より広い領域を探傷範囲とするためには屈折角の大きい方が望ましいからである。

3.3.2 感度設定法

鉄筋の縦リブの形状は径、メーカーによって異なる。

表—4に市販されている鉄筋の縦リブの幅、2つの縦リブ面間の距離（リブ間距離と呼ぶ）の調査結果を示す。

縦リブの形状が異なれば鉄筋内に入射される超音波音圧も異なると考えられるので、感度設定法は標準試験片方式より被検体の鉄筋を用いた対比試験片方式が適当である。対比試験片方式として、ひとつは端面のエコー高さを基準とする方法、ひとつは縦リブ間の透過パルスを基準とする方法の2つが考えられる。端面のエコー高さを基準とする場合、現場において被検体の鉄筋のメーカー・径ごとに直角で平滑な端面を製作しなければならない。透過パルスを基準とするのであれば、現場における鉄筋加工は不要である。したがって、感度設定法として縦リブ間の透過パルスを用いる方法が適当である。

3.3.3 探触子・接触媒質

縦リブからの2探触子K走査法に用いる探触子の周波数は5 MHz、屈折角は70°が最適であることが、これ

までの考察で明らかになった。振動子寸法が決まれば探触子を決定できる。

探触子の振動子寸法を決める要件として、

- i) 表—4に示す縦リブの幅と同程度の大きさが適当である、
- ii) 指向性の制約はない、
- iii) 圧接面のできるだけ広い領域を探傷するために接近限界長さは短かいほどよい、
- iv) 走査性をよくするために手でつかみやすい大きさである、
- v) 容易に加工でき経済的である、

等がある。以上を総合的に勘案し、以後の室内実験・現場実験では振動子寸法を5mm×5mmとした。

縦リブ上は平滑でなく、表面粗さ、凸凹、うねりなどが存在する。このような表面状態における音圧往復通過率およびその接触媒質との関連は非常に大きな問題である。筆者らは、この問題について理論的および実験的検討を行ない、文献14)で報告した。この検討で得た知見によれば、表面あらさや凸凹が存在する場合は接触媒質としてグリセリンが最適であり、グリセリンを用いれば往復通過の際の音圧損失は最大でも4 dBに過ぎない。

縦リブからの2探触子K走査法に用いる接触媒質として、グリセリンが最適である。

§ 4. 結論

鉄筋コンクリート構造物の鉄筋接合法のほとんどを占める、ガス圧接工法における非破壊検査法開発の意義を述べた。そして、ガス圧接の破断面にみられる欠陥のうち、フラット破面と呼ばれるものについてのみ既往の研究が報告されているので、それを概観した。

次に鉄筋ガス圧接に生ずる欠陥の性状を光学顕微鏡、X線マイクロアナライザ等を用いて調査し、以下の知見を得た。

(1) 現場圧接体の引張試験における破断面には、既往の文献に報告のあるフラット破面の他に黒灰色の欠陥がみられる。

(2) フラット部の引張強度は金属結晶部と同程度であり黒灰色部の強度は0に近い。したがって、圧接部の引張強度は圧接面中の黒灰色部の面積率によって定まる。

(3) 黒灰色部欠陥は厚さ約10 μ mのフェライトバンド層にはさまれた薄層状で、2~100 μ mの厚さを有している。そして、黒灰色層の厚さの増加とともに引張強度は減少し、10 μ m₂以上でほとんど0となる。

このような性状をもつ欠陥の検出には超音波探傷にその可能性があると考えられるので、その可能性を実験的に検証した。そして、第1に平面状に広がるフラット部からの超音波の反射は存在しないか、もしくは非常に小さいこと、第2に黒灰色部の薄層内の多重反射効果による反射波が存在し反射エコーを検出できることが分かった。周波数5 MHzで屈折角 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ の横波を用いたとき検出能が高くなる。

現場での探傷法として縦リブからの2探触子K走査法が、その基準感度として縦リブ間の透過パルスが最適で

あると考えられる。また、探触子として周波数5 MHz、振動子寸法 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 、屈折角 70° を提案した。

本報では、欠陥の性状を把握しその検出に有効な方法を検討した。鉄筋ガス圧接部の超音波探傷法の確立のためには、導いた探傷法・探傷条件で実際に現場圧接体を探傷したときに得られる種々の情報をどう加工し、圧接部の何を評価するのかを明確にしなければならない。

また、探傷法を現場圧接体に適用し、その信頼性を定量的に評価しなければならない。これらの問題に関しては続報に述べることとする。

<参考文献>

- 1) 藤盛紀明：“ガス圧接におけるフラットの非破壊検査に関する基礎的研究” 清水建設研究所報 Vol.11 (1968年) pp.97~108
- 2) 矢部喜堂，倉持貢，藤盛紀明，篠田雅夫：“太径異形鉄筋(D38)ガス圧接部の超音波探傷試験に関する研究” 清水建設研究所報 Vol.22 (1974年) pp.131~140
- 3) 藤盛紀明，矢部喜堂，倉持貢，斉藤鉄夫：“鉄筋ガス圧接部の超音波探傷試験の実用化” 清水建設研究所報 Vol.30(1979年) pp.75~84
- 4) T. Fujimori, T. Saito & H. Matsuyama: “Special Purpose Flaw Detector and the Ultrasonic Examination of Gas-Pressure Welds of Reinforcing Bars” 9th World Conference on NDT, 3B-10 (1979)
- 5) 大井一郎，滝本正，袴田定雄：“高張力異形鉄筋のガス圧接性” 鉄道技術研究報告 No.640 (施設編第276号) (1968年)
- 6) 小平一丸，松坂勲一郎：“鋼材のガス圧接部の破面に関する一考察” 昭和42年度溶接学会全国大会講演概要集 No. 1 (1967年)
- 7) 白岩俊男，伊藤慶典，石井謙一：“ガス圧接材のフラット破面について” 鉄鋼協会第72回講演大会講演論文集 (1966) pp.60~63
- 8) 舟橋功男：“ガス圧接に及ぼす鉄筋端の隙間の影響” 圧接 Vol.3, No.1 (1968年)
- 9) 大井一郎，袴田定雄：“鉄筋のガス圧接における風の影響” 鉄道技術研究所速報 No.68 (1968年) p.188
- 10) 岡本剛，木村敬三，舟橋功男：“異形鉄筋のガス圧接に関する実験研究” 日本建築学会論文報告集号外 (昭和42年10月) p.70
- 11) 岡本剛，舟橋功男，北後寿：“異形鉄筋のガス圧接に関する実験研究 (その2，曲げ試験および破面試験について)” 日本建築学会論文報告集号外 (昭和42年10月) p.71
- 12) 岡本剛，大井一郎，前川修二：“異形鉄筋のガス圧接に関する実験研究 (その3，鋼材成分による圧接性)” 日本建築学会論文報告集号外 (昭和47年10月) p.72
- 13) J. クラウトクレマー，H. クラウトクレマー：“超音波試験技術 (理論と実際)” 日本能率協会 (1980年) p.96
- 14) 斉藤鉄夫，藤盛紀明：“超音波斜角探傷の伝達損失に与える表面粗さの影響” 非破壊検査 Vol.28 (1979年) pp.418~424