

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

藤 盛 紀 明

§ 1. 序

建築産業においては建物の超高層化が始まり、鋼材はいよいよ高張力、厚肉、大断面化しつつある。そのためその接合方法は、従来のリベット、ボルトから溶接に移行するすう勢にある。しかしながら現在わが国の建築界においては現場溶接に対する信頼性が薄く、われわれ施工関係者は早晩この問題を解決しなければならないものと思われる。

現在鉄筋の接合のほとんどはガス圧接によって行なわれているが、ガス圧接においても接合部の安全性について、いささかの不安とトラブルがつきまとっている。

この研究はガス圧接の欠陥を非破壊的に検査し、これらの不安とトラブルを排除しようとするものである。しかしながら、いたずらに接合部の完全性を要求することは経済的ではない。接合部は想定される外力に対して安全であれば充分である。もちろん欠陥の発生を予防できればこれにこしたことはない。したがって、この研究は次のことがらが達成されたときに完成するものと思っている。

- a. 欠陥生成の原因と対策
- b. 欠陥の非破壊検査
- c. 欠陥と強度の関係
- d. 欠陥とその対策
- e. 検査基準の作成

ガス圧接の欠陥の中で最も重要であり、かつ発生頻度の高いものはフラットと呼ばれるものである。今回はこのフラットの非破壊検査による検出の可能性と問題点について報告する。

使用した非破壊検査方法は次の2方法である。

- f. 超音波探傷法
- g. 棒の振動減衰による方法

§ 2. フラットについて

フラットというのは圧接面の鉄がなんらかの理由によって酸化膜を形成したものである。フラットは鈍いねずみ色を呈し、その部分にはほとんど接合強度を期待できないと考えられている。

- フラット生成の原因は次のようにいわれている。¹⁾
- a. 錆、塗料、セメントペースト、土などの付着物
 - b. 圧接面の過大な凹凸
 - c. 圧接面間の過大な隙間
 - d. 酸化炭の使用
 - e. パイプなどの材料欠陥中の酸素

フラットの位置と大きさは多種多様であるが、その多くは内部的なものであり、表面に開口していない。したがってフラットの検出には、表面に開口している欠陥を探る検査方法、は使用することができない。

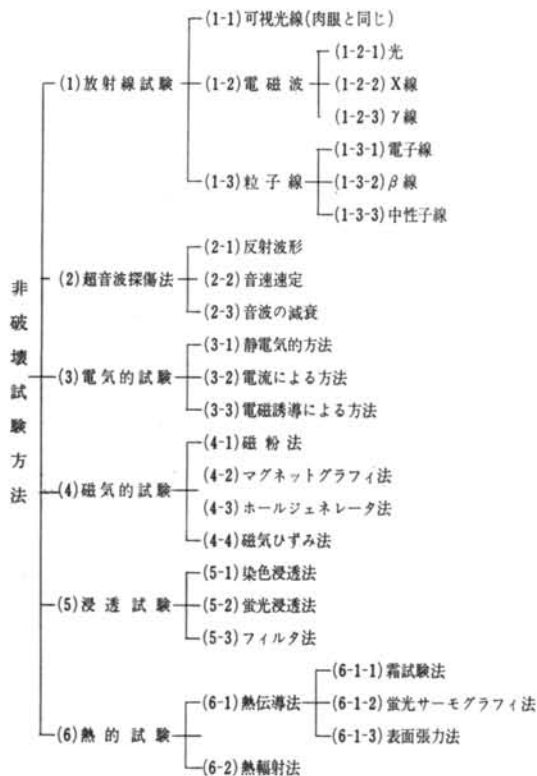
酸化膜の厚さおよびフラット間の隙間も多種多様と予想され、非破壊検査を行なう上で重要な問題である。

§ 3. 非破壊検査方法

現在実用化されている非破壊検査方法を表-1表に示す。表中(3)電気的試験、(4)磁氣的試験、(5)浸透試験は、表面に開口している欠陥を探る検査方法、であるため、フラットの検査には使用できない。(6)熱的試験は高価な装置を必要とし、測定方法が煩雑でかつ圧接部分の表面が粗いために、その影響が結果に現われ、やはりフラットの検査には不適當と思われる。

したがってフラットの非破壊検査に利用し得ると思われるものは(1)放射線試験(2)超音波探傷法の2つである。放射線による溶接の検査はすでに一般化され、現在最も信頼のおける非破壊検査方法である。しかしながら放射線による非破壊検査は次のような欠点をもっている。

- a. フィルム等の高価な消耗品を必要とする。



表—1 非破壊試験方法の分類

b. 段取りに時間を要する上、現像、焼付けの必要があるので、検査速度が遅い。

c. 一定方向の欠陥しか検出できない。

d. 裏にフィルムをあてることのできる所しか検査できないので、鉄骨の形状による制限がある。

したがって建築現場における検査方法としては余り適当な方法とは思われない。超音波探傷法には上記のような欠点がなく、建築現場における検査方法としては最適な方法と思われる。なお、超音波探傷法の欠点は次のようなものである。

e. 熟練を要する。

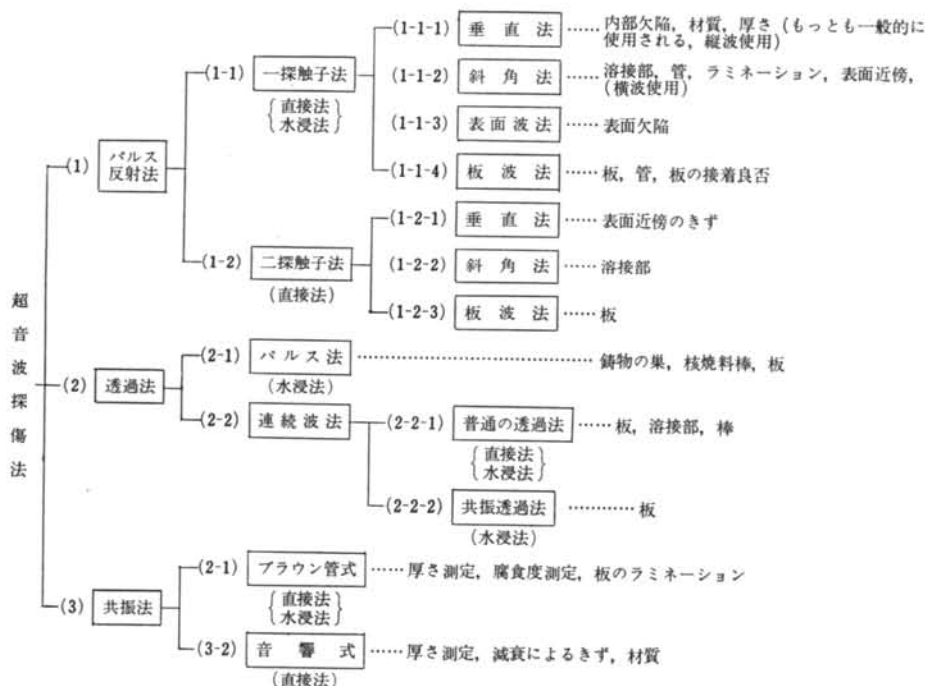
f. 記録が困難である。

棒がその内部に欠陥を持てば、その曲げ振動および縦振動の減衰性状に変化があるのではないだろうか。この点に着目した実験をもあわせて行なった。

§ 4. 超音波探傷法による非破壊検査

4.1 超音波探傷法について

超音波探傷法の種類とおもな用途を表—2に示す。今回使用したのは表—2中の(1.1.1)垂直法、(1.1.2)斜角法である。



表—2 超音波探傷法の種類とおもな用途

4.2 試験体

試験体はフラットを得るために圧接面を加工したものの、正常な圧接面をもつもの、1本ものを熱して圧縮してふくらませただけのもの3種類を作製した。すなわち図-1に示すAとEを組み合わせたもの（符号をAとする）、Eを組み合わせたもの（符号をEとする）、および1本ものをふくらませたもの（符号をFとする）である。（以下試験体は符号A、E、Fをで呼ぶ）

試験体本数はAが6本、Eが3本、Fが4本で、個々の試験体は符号の後に番号を付して呼ぶ。（たとえばA-1）使用した圧接器は日本ガス圧接株式会社のもので、パーナは4つ口である。圧接方法は圧接工（経験8

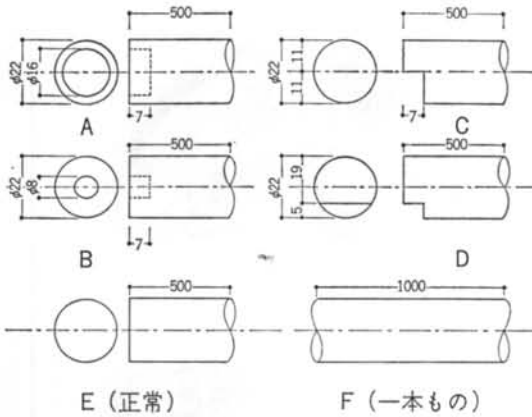


図-1 試験体圧接前形状

年、日本圧接協会NAK3種有資格者）に一任した。

各試験体の圧接面の状態を調べるために、圧接部に約15mm程度のノッチを入れ、曲げ試験を行なった。その結果を表-3に示す。

4.3 探傷器および試作標準試験片

使用した超音波探傷器は日本無線株式会社製のUSF

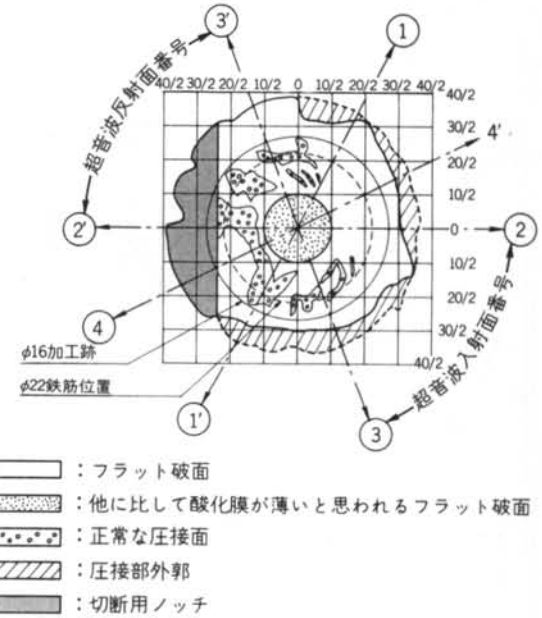


図-2 圧接部破面

試験体種別	符号	曲げ試験結果	破面性状	参照図
フラット破面作製用試験体	A-1	(破断せず)		
	A-2	破断	中央部分約10φに渡って、酸化膜が他に比して薄いと思われるフラットがあり、その周囲片側に結合破面が散在し、他はフラットである	図-2
	A-3	破断	中央部分は正常な結合破面で、周囲（この部分）に少しフラットがある。	図-3
	A-4	破断	中央部分はほぼ鉄筋径程度に渡って酸化膜が他に比して薄いと思われるフラットで、その周囲にごくわずかに結合破面があり、その外側はフラットである。	図-4
	A-5	(破断せず)		
	A-6	破断	A-3に同じ	
正常圧接試験体	E-1	(破断せず)		
	E-2	(破断せず)		
	E-3	(破断せず)		
一本ものの圧接試験体	F-1	破断		
	F-2	破断		
	F-3	破断		
	F-4	破断		

表-3 試験体一覧

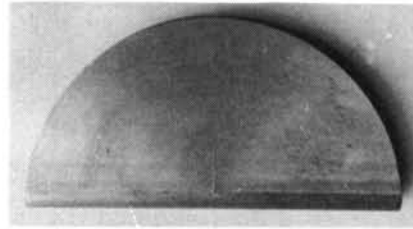
—5 A型で写真—1に示すものである。

斜角探傷用探触子のビーム中心および屈折角を測定するための標準試験片を作製しに、写真—2は11R面用斜角探触子（半径11mmの円形断面用の探触子）のビーム中心を決定するための標準試験片である。写真—3は11R面用斜角探触子の屈折角測定用の標準試験片でIIW（International Institute of Welding）の斜角探傷標準

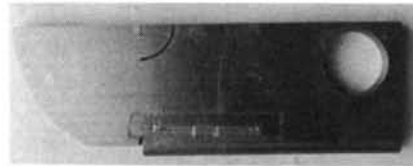
試験片を11R面用に改良したものである。



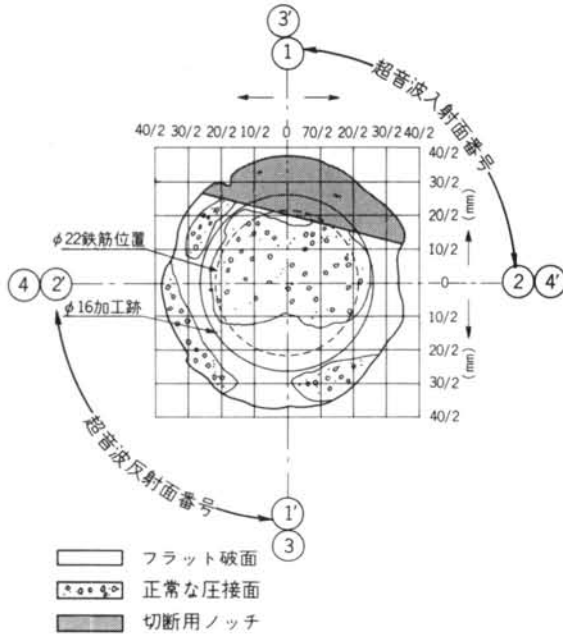
写真—1 USF—5 A型超音波探傷器



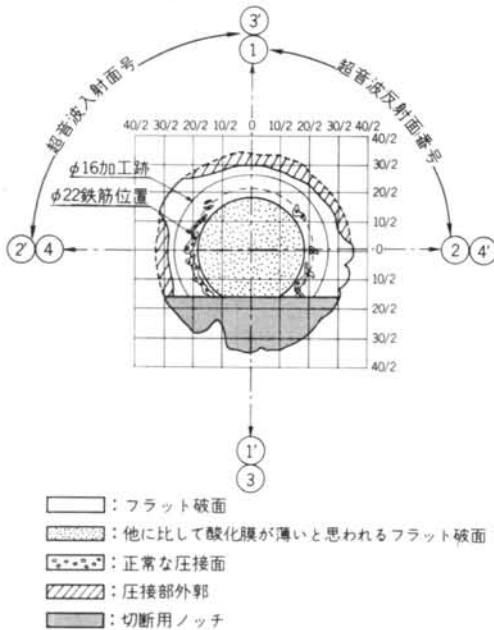
写真—2 11R面斜角探触子のビーム中心を決定するために試作した標準試験片



写真—3 11R面斜角探触子の屈折角測定用に試作した標準試験片



図—3 A—3 圧接部破面



図—4 A—4 圧接部破面

4.4 直接—探触子垂直法

4.4.1 探触子

使用した探触子は写真—4、写真—5、図—5に示すようなものである。写真—4に示すものは狭い探傷面より探傷するための日本無線株式会社製の特殊探触子で、10φの水晶振動子を使用した周波数5MC用のものである。写真—5、図—5に示すものは、周波数2.25MC用に試作したもので振動子には10φの水晶を用いている。

振動子から放射される音波は振動子の近傍では縞状の複雑な音場となる。振動子の中心軸上の音圧は(1)式で表示され $x \leq \frac{a^2}{\lambda}$ の範囲では探傷が困難である。²⁾

$$P = 2\rho c U_0 \sin \left[\frac{ka}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{x}{a}\right)^2} - \frac{x}{a} \right) \right] \sin(\omega t - kx) \dots (1)$$

λ : 波長

- ρ : 密度
- C : 音の速度
- U_0 : 振動子の運動速度
- k : 位相定数
- a : 振動子の半径
- ω : 角周波数

$x_0 = \frac{a^2}{\lambda}$ を近距離音場限界距離といい、今回使用した探触子では、5MC用で $x_0^{5MC} = 21\text{mm}$ 、2.25MC用で $x_0^{2.25MC} = 10\text{mm}$ である。

図-6 に示す充分遠方の任意の1点 (R, θ) の音圧は(2)式で表示される。

$$P(R, \theta) = \frac{U_0 \rho f S}{R} \times \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \times \sin(\omega t - kR) \dots (2)$$

- S : 振動子の面積
- f : 周波数

$$J_1(x) : \sum_{\gamma=0}^{\infty} \frac{(-1)^\gamma}{\gamma! \Gamma(\gamma+2)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2\gamma+1} \text{ Bessel 関数}$$

$P(R, \theta)$ は $ka \sin \theta = 3.83$ で 0 となる。すなわち $ka \sin \theta = 3.83$ 以内の角度に超音波があると考えられる。

$$\theta_0 = \sin^{-1} \frac{3.83}{ka} = 68 \frac{\lambda}{2a} \text{ (度)} \text{ を第1零ふく射角あるいは}$$

指向角という。今回使用した探触子では5MC用で $\theta_0^5 = 8^\circ 12'$ 、2.25MC用で $\theta_0^{2.25} = 17^\circ 42'$ である。したがって5MC水晶振動子10φ、2.25MC水晶振動子10φの22φ鉄筋中における音波の進み方は図-7に示すようである。今実験の場合、被検圧接部は超音波の入射端より50⁰mmの位置にある。したがってその位置では音波は鉄筋断面全面にわたって音圧がほぼ等しく、平面波になっていると考えられる。(垂直法の場合、使用する波は縦波で表面波および横波は無視し得るものとする)

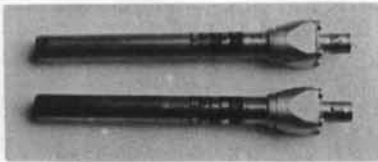


写真-4 10φ水晶探触子 5MCおよび10MC

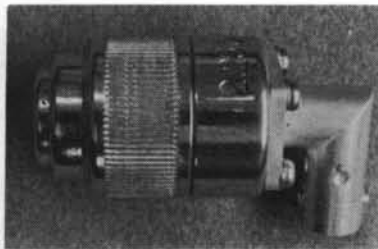


写真-5 試作した水晶2.25MC垂直探直子

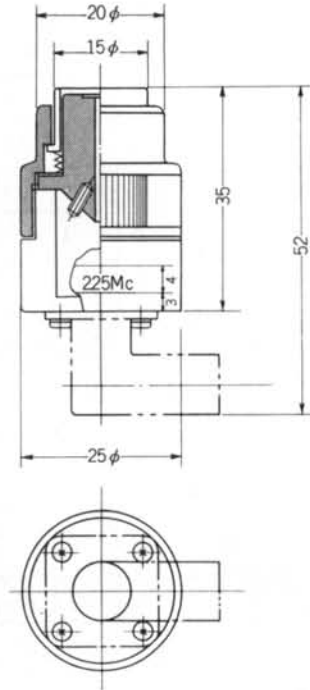


図-5 10φ, 2.25MC 水晶探触子

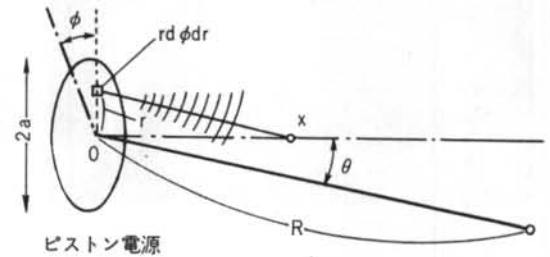


図-6 音場の計算座標

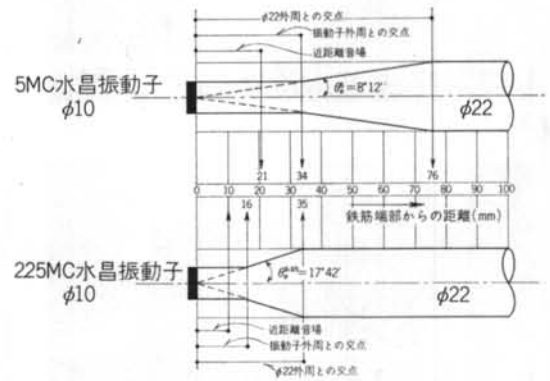


図-7 22φ鉄筋中の音波の進み方 (太線)

試験符号	周波数 増幅度		2.25 MC		5 MC		曲げ試験結果		参照 写真
	55db	73db	55db	73db	フラットの 有無	参照図			
A-1	×	圧接こぶ部分の反射波のため被検不可能	×	×	無			写真-6	
A-2	○		○	○	有	図-2		写真-7	
A-3	×		×	×	有	図-3		写真-8	
A-4	×		×	○	有	図-4		写真-9	
A-5	×		×	×	無				
A-6	×		×	×	無				
E-1	×		×	×	無			写真-10	
E-2	×		×	×	無				
E-3	×		×	×	無				
F-1	×		×	×	無			写真-11	
F-2	×		×	×	無				
F-3	×		×	×	無				
F-4	×	×	×	無					

○—傷ありと判定されるもの
×—傷なしと判定されるもの

表-4 垂直探傷結果

4.4.2 実験結果

探傷面は J I S B 4703 に規定される中目の鉄工やすりで仕上げた。探触用媒質としてはマシン油を使用した。実験結果を表-4 に示す。

実験の結果を要約すれば次のようである。

- A-2 のフラットは完全に検出可能である。
- A-3 のフラットは検出不可能である。
- A-4 のフラットは周波数 5 MC, 増幅度 73 db でのみ検出可能である。
- 周波数 2.25 MC, 増幅度 73 db では圧接こぶ部分からの反射があり検出不可能である。

結果の b および d は次のように説明される。幾何光学では遮蔽物の影は後方のどこまで離れても明らかな影を生ずるが、波動論では波動は影の部分に回り込んで進む。すなわち回折現象が起こる。前述のように今回の実験の場合、圧接こぶの近辺（入射端より約 500mm）では 22ϕ の断面一杯に拡がった平面波があるが、こぶ部分では回折現象が生じ、音波は 22ϕ よりも拡がる。その拡がり方は前述の(2)式と同様である。図-8 に示すように周波数 5 MC の場合指向角 θ_0 が $8^\circ 12'$ と鋭いため、鉄筋の母材径の外側にあるフラットでの反射も少なく、こぶ部

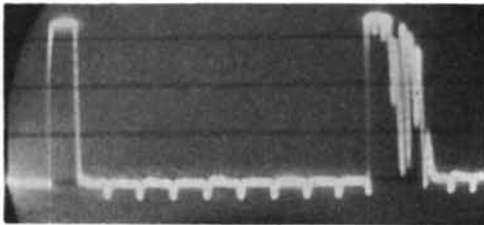


写真-6 A-1 増幅度73db 5MC

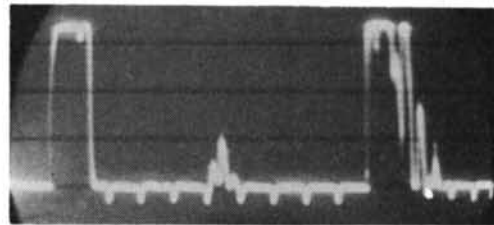


写真-9 A-4 増幅度73db 5MC

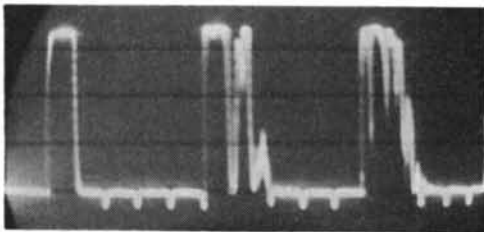


写真-7 A-2 増幅度73db 5MC

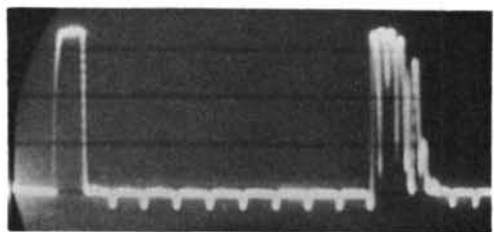


写真-10 B-1 増幅度73db 5MC

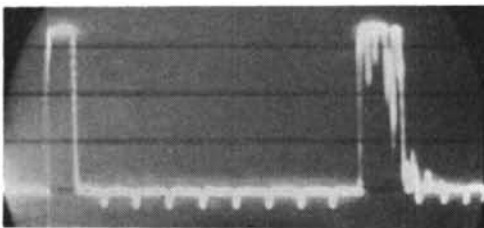


写真-8 A-3 増幅度73db 5MC

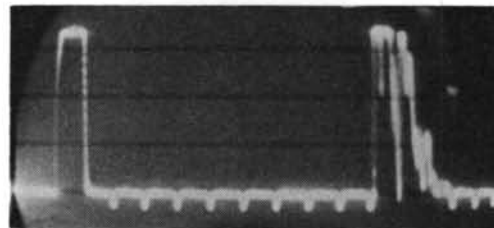


写真-11 F-1 増幅度73db 5MC

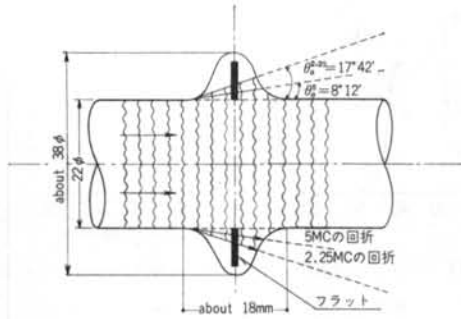


図-8 母材径の外側にあるフラットと音波の回折

分での反射も少ない。したがってA-3のようなフラットの検出も不可能であり、増幅度を増してもこぶ部分からの反射は検出できない。周波数2.25MCの場合、指向角 $\theta_0^{2.25}$ が $17^\circ 42'$ と比較的鈍いため、鉄筋母材径の多側にあるフラットからの反射も比較的多いが、圧接こぶ部分からの反射も多くなる。そのためA-3のようなフラットの検出は不可能である。

結果のaおよびcは重要な問題を提起している。

フラット率 f を次のように定義する。

$$f = \frac{\text{フラット面積}}{\text{圧接部分の全断面積}} \times 100 \dots (3)$$

傷の反射率 γ を次のように定義する

$$\gamma = \frac{\text{傷からの反射波の音圧}}{\text{傷部分に無限に大きい垂直な完全反射面を置いた場合の反射波の音圧}} \dots (4)$$

実験結果によれば次のようである。

$$f_{A-2} < f_{A-4} \dots (5)$$

$$\gamma_{A-2} > \gamma_{A-4} \dots (6)$$

ここで f_{A-2} : A-2のフラット率 $\approx 88\%$

$$f_{A-4} : A-4のフラット率 $\approx 98\%$$$

$$\frac{\gamma_{A-2}}{\gamma_{A-4}} = \frac{A-2の傷の反射率}{A-4の傷の反射率} > 3$$

したがって傷の反射率 γ は少なくともフラット率 f のみの関数ではない。すなわち傷よりのエコー高さから一義的にフラット率 f を判別することはできない。

反射率 γ は酸化膜の厚さとその音響インピーダンスおよび酸化膜間にある空気層の幅とその音響インピーダンスの関数でもある^{4), 5)}。これらは今後の研究課題である。また回折現象は異形鉄筋の垂直探傷の場合問題となると思われる。

4.5 直接一探触子斜角法

4.2.1 探触子

使用した探触子は写真-12、図-9に示すようなもの

である。これは11R面用に試作したもので振動子は10mm角の硫酸リチウム、周波数は2.25MC、屈折角は 60° である。この他に水晶振動子を使用したものも試作したので写真-13に示す。探触子の試料との接触部分の半径は試料の半径より0.5~1mm程度大きくする必要があり、その深さも探触子が鉄筋の軸方向からずれない程度にする必要がある。

一般に板材に入射された横波(斜角探傷法では適当な材質のくさびを介して縦波を横波に変換して使用する)は試料の端面で反射して探触子にもどる。もどってくるエコーの高さは探触子が次の位置の時に大きくなる。

$$x = (2n - 1)t \cdot \tan\theta \dots (7)$$

ここで x : 試料の端面から探触子までの距離

t : 板厚

θ : 超音波の屈折角

$$n = 1.2, 3, \dots$$

板厚22mmの場合、屈折角 60° の超音波を入射させると図-10のbに示すような位置に高いエコーが出る。図-10のaは22φの丸棒の場合のエコー高さで探触子の位置

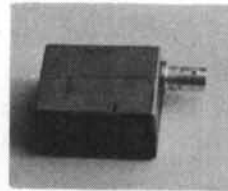


写真-12 試作した硫酸リチウム斜角探触子2.25MC 60°



写真-13 試作した水晶斜角探触子2.25MC 57°

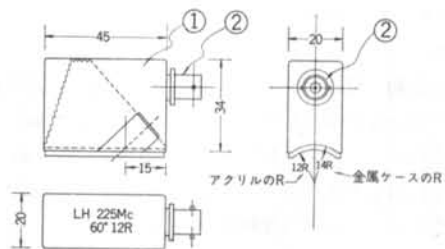
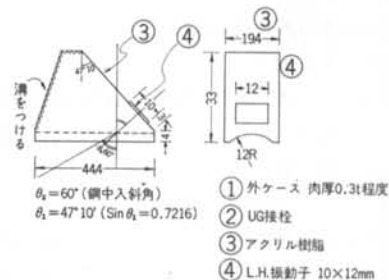


図-9 L.H斜角探触子(12R 60° , 2.25MC)



- ① 外ケース 肉厚0.3t程度
- ② UG接栓
- ③ アクリル樹脂
- ④ L.H.振動子 10×12mm

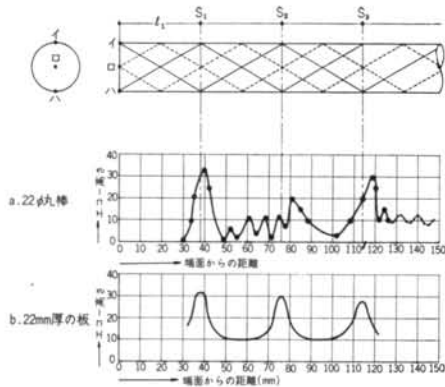


図-10 試料端面からの探触子の位置とエコー高さ（屈折角60°の場合）

の関係である。この場合 $n=1$ および 3 で高いエコーが得られるが $n=2$ では明確な高いエコーは得られない。また $n=4$ 以降にも明確な高いエコーはない。これは音波が鉄筋の外周でレンズあるいは鏡の効果によって収束と発散を繰り返すためと思われる。

4.5.2 実験結果

探傷面は黒皮のまま、接触媒質としてはマシン油を使用した。

A-1, A-5, A-6, E および F (フラットの無いもの) の圧接中心部からの探触子の距離 x とエコー高さの関係は総て図-11の範ちゅうにある。すなわち次のように分類される。

- 40mm $\angle x \angle$ 50mm および 70mm $\angle x \angle$ 80mm の 2 ヲ所にエコーの山がある
- 40mm $\angle x \angle$ 50mm に 1 ヲ所エコーの山がある
- 70mm $\angle x \angle$ 80mm に 1 ヲ所エコーの山がある
- エコーの山がない

これは図-12に示すように圧接こぶ部分の音波に直角な所で強い反射があるためと思われる。いま 40mm $\angle x \angle$ 50mm でのエコーの山を第 1 エコー、70mm $\angle x \angle$ 80mm でのエコーの山を第 2 エコーと呼ぶことにする。(7)式で x を圧接こぶの中心からの探触子とすれば、第 1 エコーは $n=1$ の場合、第 2 エコーは $n=2$ の場合である。ただし圧接こぶ部分の音波に直角な箇所は一定でないで、それによって x も変動する。

A-2, A-3, A-4 の増幅度 43 dB の場合の圧接中心部からの探触子の距離 x とエコー高さ h の関係を図-13, 図-14, 図-15に示す。

A-3 および A-4 は図-11のフラットの無いものの範ちゅうに入る。一般に材に垂直な平面状欠陥は図-10からも分るようにエコーが探触子にもどらないことがある。したがって A-3, A-4 のように鉄筋径全面にわ

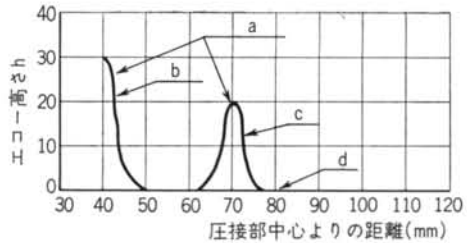


図-11 フラット破面のない試験体の探触子の圧接部中心よりの距離とエコー高さの関係

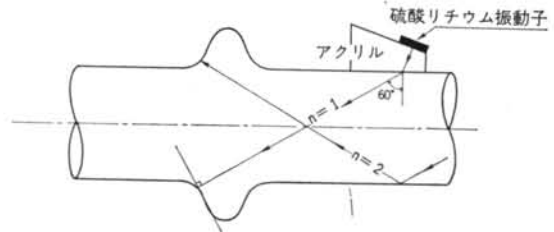


図-12 圧接こぶでの反射

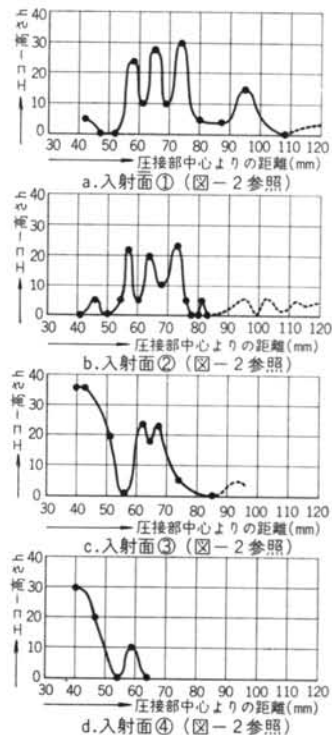


図-13 A-2 圧接部中心よりの距離とエコー高さ

たって、ほぼ一様な状態にあるものは、この直接探触子斜角法では検査が困難なものと思われる。さらにフラットの端部で音波がどのような状態になるかは今後の研究課題である。

A-2は第1エコーと第2エコーの間にいくつかのエコーの山があり、傷のあることが判別される。

圧接中心部からの探触子の距離 x と音波(中心軸)の圧接中心部における位置 y は次のような関係にある。

(図-16参照)

$$y = 11 - \frac{x}{\sqrt{3}} \quad x_1 + 22\sqrt{3} \leq x \leq 0 \dots (8)$$

$$y = \frac{x}{\sqrt{3}} - 33 \quad x_2 + 44\sqrt{3} \leq x \leq x_1 + 22\sqrt{3} \dots (9)$$

A-2の各エコーの山(図-13参照)と音波の圧接中心部における位置を図-16に示す。

エコー α はほぼ鉄筋の中心に、 β は酸化膜が他に比して薄いと思われるフラットの境界に、 γ は鉄筋外周位置に音波のある時である。

e. エコー α, β, γ の存在する理由

f. エコー $\beta_1, \gamma_1, \gamma_2$ の欠除している理由

これらは今後の研究課題である。

A-2, A-4, E-1, F-1の探傷図形の一部を写真-14から写真-25(表-5)に示す。写真から判るように、フラットのない場合第1エコーと第2エコー(ない場合もあるが)の間では音波は他端に逃げて反射エコーはほとんど得られない。それに比してフラットのあるものは第1エコーと第2エコーの間でも弱いながら

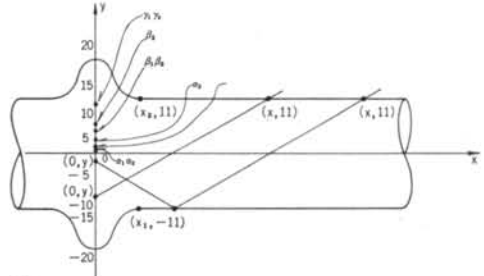
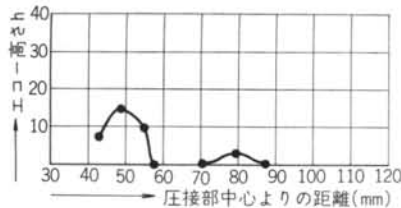
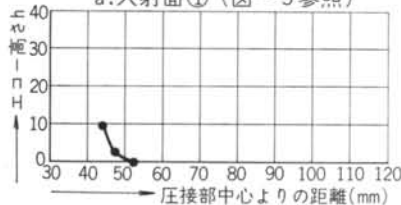


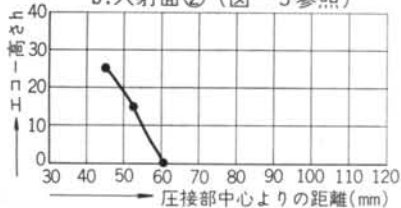
図-16 A-2の断面と音波の中心軸の進路



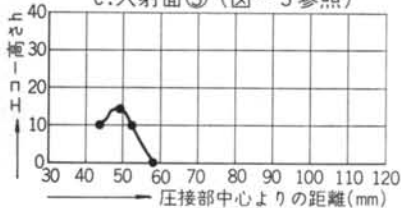
a. 入射面①(図-3参照)



b. 入射面②(図-3参照)

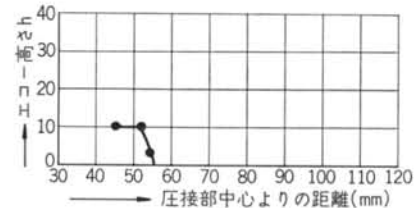


c. 入射面③(図-3参照)

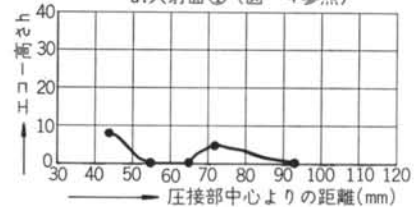


d. 入射面④(図-3参照)

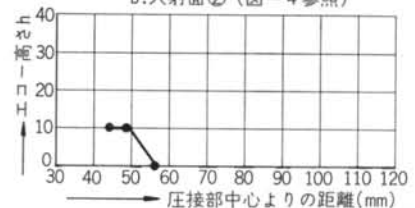
図-14 A-3 圧接部中心よりの距離とエコー高さ



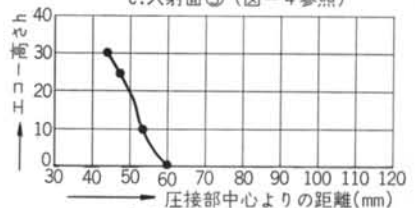
a. 入射面①(図-4参照)



b. 入射面②(図-4参照)

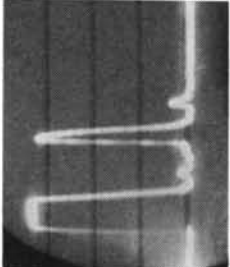
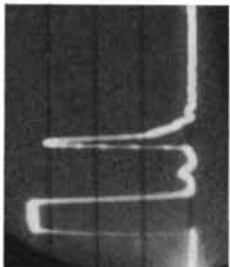
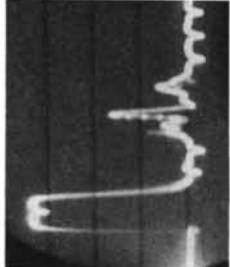
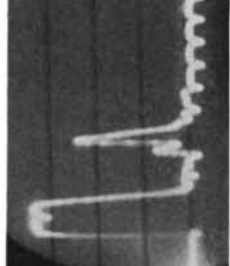

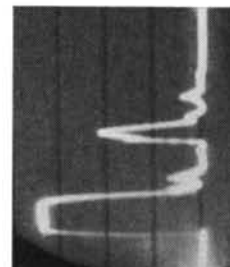
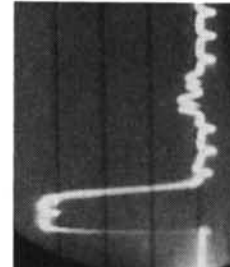
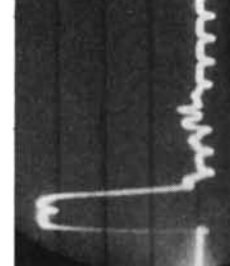

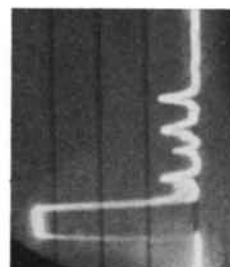
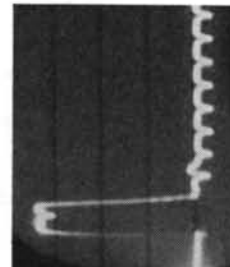
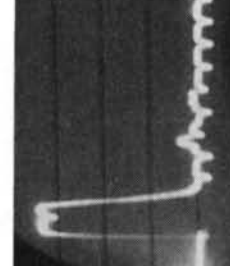


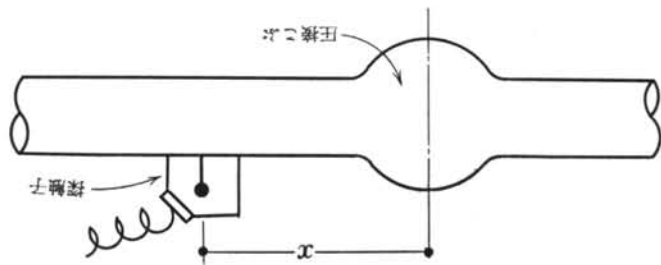
c. 入射面③(図-4参照)



d. 入射面④(図-4参照)

図-15 A-4 圧接部中心よりの距離とエコー高さ

フラットの有無 試験体番号	有		無	
	A - 2	A - 4	E - 1	F - 1
45	 写真-14	 写真-17	 写真-20	 写真-23
50	 写真-15	 写真-18	 写真-21	 写真-24
55	 写真-16	 写真-19	 写真-22	 写真-25



硫酸リチウム斜角探触子使用
屈折角60°, 周波数5 M.C., 増幅度50db

表-5 斜角探觸図形例

も複雑な反射エコーがある、しかしこれらはまだ検討の必要があり、探傷図形からのフラットの検出方法は今後の課題である。

4.6 考察

今回の実験では、鉄筋外周の内側にあるフラットは一応検出可能であった。しかしながら今後の研究課題として次のことが残されている。

- a. 酸化膜および酸化膜間の隙間の反射率
- b. 鉄筋外周における音波の収束、発散（斜角法）
- c. フラット端部における音波の反射，散乱状態（斜角法）
- d. 探傷図形とフラットの関係

斜角探傷法においては2探触子法による方が、より容易に検査できるものと思われる。

§ 5 棒の振動減衰による非破壊検査

棒の縦および曲げの自由振動の減衰性状が、フラットの存在によって変化するのではないだろうか。この点に着目して実験を行なった。試験体は材質SR24、径22φ、長さ2.5mの鉄筋を圧接したものである。その端部は図



写真-26 棒の曲げ振動実験の概要



写真-27 ピックアップ



写真-28 支持治具

—1に示すような加工を施してフラットを作製した。

振動のピックアップおよび測定装置は Bürel 社製のものを使用した。曲げ振動の実験概要、ピックアップおよび両端の支持治具を写真—26～28に示す。支持治具の鉄筋の締めつけ力は可変である。

5.1 棒の振動減衰に影響を与える要因

棒の振動減衰は物理的には次のように分類される。

- a. 粘性減衰：内部摩擦による粘性のため、振動のエネルギーの一部が熱に変化して減衰する。
- b. 欠陥減衰：内部欠陥により振動エネルギーの一部が熱に変化して減衰する。
- c. 外部減衰：空気、支持点等との摩擦損失，振動エネルギーの音のエネルギーへの変換
- d. その他：支持点外部の減衰，断面，形状の変形による減衰，

減衰の要因を、実験条件から分類すれば次のようになる。

- e. 材料的要因
 - e—1 内部欠陥（フラットを含む）
 - e—2 全体変形
 - e—3 断面変形
 - e—4 内部応力
- f. 外的要因
 - f—1 支持点の固定度（締めつけ強さ）
 - f—2 支持点外部の棒の長さ
 - f—3 支持点外部の棒の環境
 - f—4 打撃条件
 - f—5 支持点間の距離

5.2 実験結果および考察

詳細は省略するが実験結果を以下に要約する。

- 支持点の締めつけ強さは、それがあがる程度以上であれば減衰に影響を与えない。また振動数も固定条件の解と一致する。^{注)}しかし締めつけ強さがあがる程度以下になれば、支持点は鉸に近くなり固有振動数が変化するとともに、支持点の摩擦力による減衰効果が起こり、大幅に減衰する。
- 打撃力は減衰に影響を与えない。
- 支持点外部の棒の環境は、ごくわずかであるが減衰に影響を与える。
- 棒の支持箇所を少し変えても減衰は大幅に変化する。
- 一般的意味で同一条件と考えられるもの（たとえば加工を施さない、同質、同径の丸棒）でも、試験体を変えると減衰は大幅に変化する。

以上のように棒の振動減衰は、フラット以外の要因に大きな影響を受ける。したがってこのような方法によるガス圧接におけるフラットの非破壊検査に困難である。

注)

横の曲げ振動の一般式は棒の長さによって曲げ剛性 $E I$ が変らず、かつ減衰がない場合は下式で与えられる。

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + a^2 \frac{d^4 y}{dx^2} = 0$$

$$\text{ここで } a^2 = \frac{E I g}{A r}$$

g : 重力の加速度

A : 断面積

r : 単位体積重量

両端固定の場合の周期 f は下式で与えられる。

$$f = \frac{(kl)^2}{2\pi l^2} \cdot a$$

ここで kl : $\cos kl \cdot \cosh kl = 1$ の解

l : 試験体の長さ

22φ鉄筋の場合 $a = 2.824 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{sec}$ である。

§ 6. あとがき

超音波探傷法によるフラットの検出は十分な可能性を持っている。しかしながら、まだいくつかの基本的な問題が未解決である。今後はこれらの問題を研究して行きたいと思っている。

なお、当研究については計画研究部の久保田喜八郎氏の多大なご助力を得ました。紙上を借りて謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 鉄筋のガス圧接編集委員会編: “鉄筋のガス圧接” 日本圧接協会 p. 174
- 2) 日本学術振興会: “超音波探傷法” p. 22
- 3) 日本学術振興会: “超音波探傷法” p. 24
- 4) 日本学術振興会: “超音波探傷法” p. 31~p. 34
- 5) 山原浩: “地盤基礎系における波動問題” 清水建設研究所報第4号
- 6) 実吉・菊池・能本: “超音波技術便覧”
- 7) “非破壊検査便覧” 日本非破壊検査協会
- 8) J. W. S. Rayleigh: The Theory of Sound