

特別講演

UDC 693.97

建築における鉄骨構造*

仲 威 雄**

Steel Construction of Buildings

Takeo NAKA

1. は し が き

昭和 47 年度のわが国の普通鋼材の内需は鋼材クラブの調査によれば 5656 万トンで建設用鋼材はその52.4%になっている。すなわち用途別に記すと

建 築	34.1%
土 木	18.3%
自 動 車	10.0%
船 舶	9.7%
2 次 製 品	8.8%
産 業 機 械	7.5%

となっており、建築と土木の使用量の和が過半数を示している。このようにわが国の建築は鉄鋼材料に負うところが非常に大きく、鉄鋼生産工業の発展とともに成長していることは明らかである。

建築における鉄鋼使用は釘、ボルト、屋根板など多方面のものを含んでいるが、重要なものは構造材料としてである。そして、構造形式として分類すれば次の三形式になる。すなわち、

鉄筋コンクリート構造

Reinforced Concrete Construction 略称 RC

鉄骨鉄筋コンクリート構造

Steel-Reinforced Concrete Construction 略称 SRC

鉄骨構造 Steel Structure 略称 S

建築における鉄骨構造とはこの中の SRC と S における鉄骨部分をいつている。比較的最近までの建築の主要構造はこれらの三種の中では鉄筋コンクリート構造、すなわち RC であつて建築構造設計家のおもな業務はこの RC の経済的デザインをすることでありまた建築施工業者はこれを手際よく完成することに努力が払われている。鉄筋材料は引張強さも大で、付着力のよい異形棒鋼 (Deformed Bar) が、コンクリートは Ready-Mixed Concrete が多用されている。異形棒鋼の継手にはガス圧接法が利用されている。RC は大地震の発生するごとに、予想外の被害を見ることがあり、それを調査研究して設計規準の改訂が重ねられている。Fig. 1 は RC の柱を示

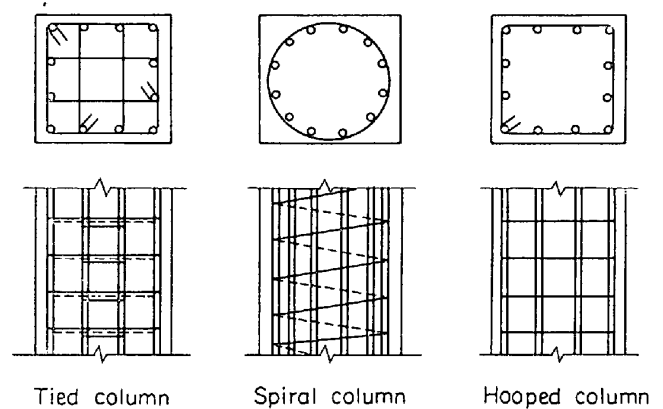


Fig. 1. Types of hoop for reinforced concrete columns.

すが主筋のフープの形式の差を知ることができよう。右のものが従来からのものである。この形式は地震により大きなせん断力が加わったとき、フープがはずれやすく、コンクリートが破壊されて構造全体に著しい損傷を起こすことがある。図の左または中央のものはフープがはずれにくいため損傷を防ぐのに役立つことが明らかにされている。SRC と S は経験上耐震性が大であつて、構造として大変形を生ずるような極限の状況でも人命に損傷を与えることが少ない。理論的にまた実験的にはなお説明を要する部分がかかり残されているが、ある程度高い建物または層数の多いものは SRC か S 構造となつており、とくに超高層建築はもつぱら S になつている。SRC と S との採用は層数で 15 階位のところにあつてこれより下では SRC、これ以上では S である。しかし RC 構造で 20 階建のアパートが現在建築中である。(Fig. 2)。これは RC 構造の従来の経験を耐震的にさらに確かめて設計施工されているものである。たとえば鉄

* 昭和48年4月本会講演大会における特別講演
昭和48年4月23日受付

** 東京電機大学教授 東京大学名誉教授 工博

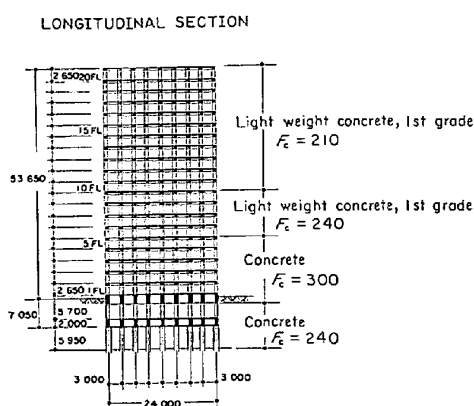


Fig. 2. Reinforced concrete building of 20 storeyed height under construction at Shiinamachi, Tokyo.

筋の組立をできるだけ工場で行ないまた特殊の溶接法を使用している。経済的な点から、3者の構造のどれが有利かということは一概に言えない。現行のように6階位までがRCでそれ以上に他の構造が用いられているのもわが国における経済性の考慮からの自然に出た解答のようにも考えられるのである。しかし経済性は社会のすべての条件から定まるので、きわめて徐々に、もしくは突如として、従来の観念で律しられないようなことも生じることが確かである。すう勢としては鉄骨構造がその範囲と量を増大するものと筆者は予測している。

2. 従来の鉄骨構造と最近の鉄骨構造

現在建築中の鉄骨構造には形式的にもかなり違ったものがある。外見上容易に見分けられる差は柱および梁のウェブがオープンになっているかフルになっているかである。オープンウェブのものはラチス材によつてフランジ部分とを連絡しており、ラチスの隙間から天空が見透かされるものである。これに対しフルウェブのものは文字通りで、見透かされるところがないから天空に対して画然とした趣きを呈している。いささか威圧的といった景観を呈することもある。この2つの形式は鉄骨構造の歴史的発展に深い関連をもっている。すなわちオープン・ウェブ式のものにはフランジを山形鋼でつくりそれにラチス材をリベット接合するものである。戦後T形鋼が生産されてからこれをフランジとし、ウェブ・ラチスと溶接したものも用いられている。フル・ウェブ式のものには鋼板だけを用い、溶接で集成した部材が最初である。現在はH形鋼をできるだけ加工せず直接に柱および梁として用いている。梁としてHoneycomb ウェブとするものもあるがこれはH形鋼を自動切断と自動溶接とにより集成したものである。最も新しいタイプであり省力化がとくに重要となつた現在ではこの傾向はますます強められている。しかし工数が増加する点で問題を残している。

鉄骨の組立作業でもリベット工法によるか溶接による

かによつて大きな差が外見上からも分かれている。リベット工法による場合は下層から上層に鉄骨を組立てる場合、柱、梁が工場から現場に運ばれるとそれにしたがつて組上げていく。したがつて鉄骨の工事の途中での高さは凹凸があり、もし一つの建築の鉄骨工事を2社以上の鉄骨製作所が分担して作業する場合には、1社は下から上まですでに組立完了しているのに、他社はなお下層で作業をするということもしばしば生じている。しかし溶接が鉄骨の組立に多用されるようになってからこの形式は用いられなくなつていく。すなわち、組立中の鉄骨のスカイラインはほとんど常に水平に架設されている。したがつて組立を2社以上で行なう場合には作業の進行に特別の注意が要求される。この2つの大きな組立上の差の生ずる原因は主として次の理由に基づくものである。

リベット工法による場合は水平、垂直の方向における鉄骨の組立中の寸法誤差はリベットの穴の大きさの手直して補正されるものであり、また誤差はおおむね下層より上層に至るほど柱間隔が広がる傾向にあつて、その程度の修正は工作上可能である。これに対して溶接による場合は常に収縮誤差が生じ、ある一部だけが早くかつ設計通りに組上つてしまつたときは、他の遅れて組立てられる部分は若干倒れた形になり補正ができないようになる。したがつてこのような組立中の歪みを注意深く調整するために、柱の一節ごとに頭をそろえて組上げ、次の一節の建方を定める必要が生じる。

3. 純粹の鉄骨構造

この建築は鉄骨に耐火被覆のようなものがほとんど施されないものである。工場建築、発電所建屋、飛行機のハンガー、東京タワー、神戸ポートタワーのようなものが入る。建築の鉄骨構造とは本来この種類のものがおもであつた。人間が直接居住し生活するということには比較的縁が遠く、建築の中ではむしろ工作物に近い範囲に属している。なお建築以外の鉄骨構造には送電鉄塔、マイクロウェブの塔、吊橋の塔など多数のものが含まれている。鉄橋なども明らかに鉄骨構造に属している。

4. 低層建築の鉄骨構造

第2次大戦後、国産の軽量形鋼が市販されるようになって、軽量鉄骨構造の名称の中で発達した鉄骨構造である。現在では軽量形鋼のような冷間成型材のほかに熱間圧延でもまたサーマツール (Thermatool) 自動溶接法などによる溶接形鋼や鋼管が供給されているから、軽量鉄骨構造の使用範囲も広がっている。当初はおもに倉庫とか住宅向きであつた。それが低層の病院、工場、事務所、学校などにも使われるようになり、木構造建築の範囲に相当置き代わつて用いられている。

5. 中層建築の鉄骨構造

中層建築という定義は確定していないのでここではお

もに8階位までの建築をいうことにする。特別の場合は15階くらいのもの中に入る。関東大地震がちょうど満50年前の1923年9月1日に発生した。そのときの経験では鉄筋コンクリート構造だけのものより鉄骨を加味した構造が際立つて良好な耐震性を示した。この事実はわが国の建築界に直接的な影響を与えおよそ6階より高い建築はSRCにするのがよいという習慣を植えつけた。しかし旧来の建築構造的解釈からは理論上、SRCがRCより耐震性がすぐれているという証明がなされなかつた。したがって理論的、実験的研究成果とは別に総合的、経験的判断からSRCが高く評価され実用されていたのである。したがって長い間、SRCに対する構造計算規準というものは発表されておらず、設計者は各自思い思いにその構造に取り組んでいた。その鉄骨はリベット接合を主要接合法とした旧式のもので、前述のオープン・ウェブ型の柱、梁が用いられた。また鉄骨の使用量もきわめて少ないものから、純鉄骨構造に近いものまで各種各様であつた。しかし曲げ応力とせん断力とのいずれもが大きくなる梁の端部では通常のラチスでそれを受けもつことができないうことは、実大実験ができるようになって確かめられた。そして、種々の大小とりまぜた実験を参考にして1958年に鉄骨鉄筋コンクリート構造の計算規準を日本建築学会よりはじめて発刊した。その基本的思想は従来の慣用手法にあまり急激な変革を与えずに新規規準が流布使用されることにあつた。そして実験的にまた若干の極限設計理論で説明のつく範囲でいわゆる累加強さ方式をとつた。これは簡単にいうと鉄骨鉄筋コンクリート構造の総体的強さは鉄骨部分の強さと鉄筋コンクリート部分の強さととの和で定まるという考えである。これによつて、鉄骨部分の強さの算定は鉄骨構造に対する規準を使用することができ、また鉄筋コンクリート部分に対しても同様の処置をすることができる。1963年に若干の改訂を行なっているがその基本理論は変わっていない。しかし、この考えの中で現在まで多数の重要な建築がつくられておりその中には相当大きな地震力を受けたものもある。予期していたように耐震的にはほとんど被害がなく信頼性のあることは明らかである。ただ、累加強さ式の基本的構想が最近になつて種々の矛盾を呈するようになった。すでに述べたように鉄筋コンクリート構造は年々その研究が進み、それにつれて規準の重要部分が改訂されている。したがって、累加式ではその要求を常に満足させることがむしろ困難となつてきている。

SRCの従来型のもは、柱の鉄骨は水平ラチス、はりには斜めラチス材でできている。現在筆者らが関係して日本建築学会は鉄骨鉄筋コンクリート構造の改訂を進めており、そのために各所で巨額の費用を伴う実験を遂行しているところである。とくに従前は地震時において応力の局限状況での繰返し変形に対するこの構造の実験的



Fig. 3. Beam-to-column connection of steel skeleton for steel-reinforced concrete construction of Highrise Apartment House.



Fig. 4. Details of connection of beam, column and floor of steel-reinforced concrete construction.

証明はしていなかつたのを今回はそれを試みている。すなわちきわめて回数少ない low-cycle fatigue の実験である。その結果、柱の水平ラチス型のは案外に弱く、これに反してフル・ウェブ型のは理論上予想できる程度に強いことが明らかとなつた。Fig. 3はSRCの柱・はり接合部を示すが、ここでは柱はフル・ウェブ、梁は中央部がラチスになつている。Fig. 4は柱・梁および床スラブの接合する部分の鉄骨と鉄筋の交錯している状態を示している。都営西台アパート、14階建のものもSRC構造である(Fig. 5)。このようにSRCの新しいすう勢はH形鋼を用いた鉄骨と鉄筋コンクリートとの協力による構造として、従来の累加式の概念を離れ、独立した実験と理論に基づいた規準の作成が必要となつてきている。とくに指摘しておきたいことは、鉄骨鉄筋コンク

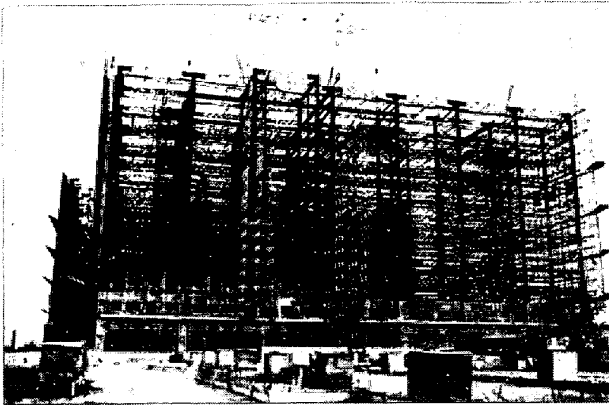


Fig. 5. Steel-reinforced concrete construction for Nishi-Dai Highrise Apartments, Tokyo.

リート構造というわが国だけで発達したこの構造法が現在世界的にも注目されていることである。これは耐震耐火構造として、地震を意識する国々もしくはそのような地域での建築を設計する人々に絶大な拠りどころとなっていることを示している。

6. 高層建築の鉄骨構造

20階以上の建築を高層建築と呼ぶことにし 30 階以上を超高層というようなばく然とした定義が慣用されている。実際には Tall Buildings という言葉の中に数層程度のものから 110 階のニューヨークの世界貿易センタービルまでも包含され、明確な区別を下げない。さて、高層建築について耐震性を十分に考慮した構造を選択すると純鉄骨構造となる。事務所建築が最も多いが火災時における耐火性を与えることが不可欠の要素である。鉄骨の表面への耐火被覆、または鉄骨と火焰とが直接触れないようにするための耐火性の遮断材などの使用が必然的に付随している。これらの耐火材料の研究開発は高層建築の発展には絶対必要なものと考えられている。

高層建築の鉄骨構造は柱はH形鋼、十字形断面、箱形断面または円形断面が用いられ、梁はHビーム材が使われている。JIS G3192-1966 のH形鋼の寸法許容差を定めるとき、圧延者、鉄骨製作者、建方関係者との間で種々の検討があつた。幸いわが国のH形鋼の寸法誤差はJIS規格表示のものより少ない場合が多く、建設工期の短縮にも大いに役立つ。製作工数をできるだけ少なくしかつ精度を保持することが必要であるから種々の工作機が鉄骨製作に導入されている。たとえば鋼材表面に設計寸法をえがくのに Electric Printing Machine が用いられる。また多軸ボール盤でハイテン・ボルト接合部の穴あけを迅速かつ精確に行なつている (Fig. 6)。溶接部分のスカラップは従来ガス切断をしていたが、最近ではスカラップ加工機によつている。このような速度と精度を高め、省力化を行なう機械化は鉄骨加工の面でますますさかんに行なわれるであろう。現在、鉄骨加工作業の工数を低減するため建築現場で柱と梁とを直接溶接す



Fig. 6. Multiple boring machine for steel skeleton of tall buildings.



Fig. 7. Inspection jig attached on welded steel member.

る手法が行なわれているが、その際は溶接中の検査、監督が十分に行なわれないことが多いからとくに注意を要する。Fig. 7は検査治具を示している。これは工場溶接の完了した後で製品が工場を出るまでに寸法検査をするためのものである (Fig. 8)。現場に持ちこんでから寸法にくるいがあると工期の遅延だけでなく、建築そのものの安全にも重大な故障を生ずることになる。製品は工場で塗装されて現場にもちこまれる。最近の建設現場では高層タワー・クレーンが使われる。そのマストの自立高さは 33m で柱 1 節で 4 フロア分の組立が可能である。Fig. 9は東京海上ビルの工事でタワー・クレーンによる組立状況を示している。ここでは 1 節 3 フロアの組立工事のところを見せている。

溶接は建築では相当大胆に使われていて柱・柱継手の現場溶接を CO₂ アークまたはノーガスアーク半自動溶

接によることがしばしば行なわれている。また柱・柱継手をナロー・ギャップの自動溶接法により速度の増大と省力化とを行なうこともある。

これらの溶接部の検査としては非破壊手法が重要であ

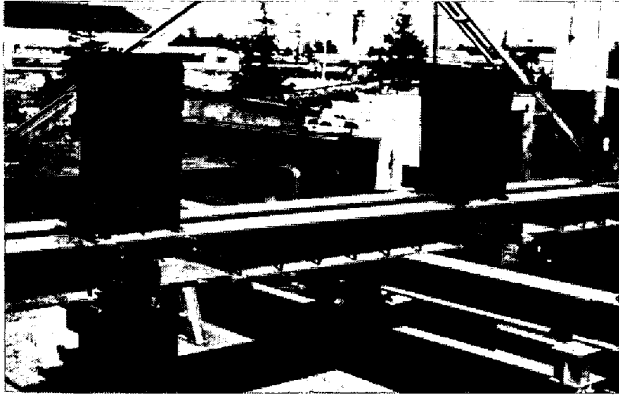


Fig. 8. Preparation for inspection of welded column at shopyard.

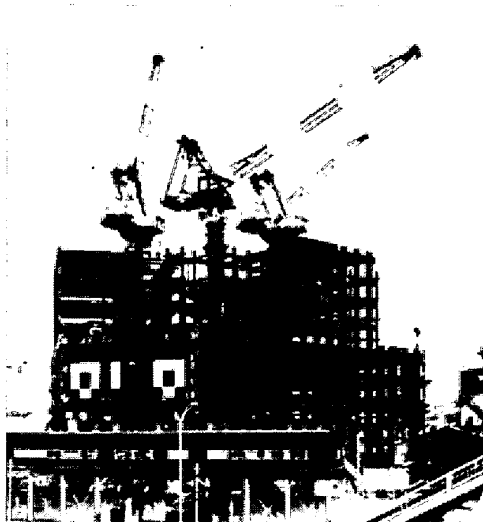


Fig. 9. Erection Tower Crane working at Tokyo Kaijo Building, Tokyo.

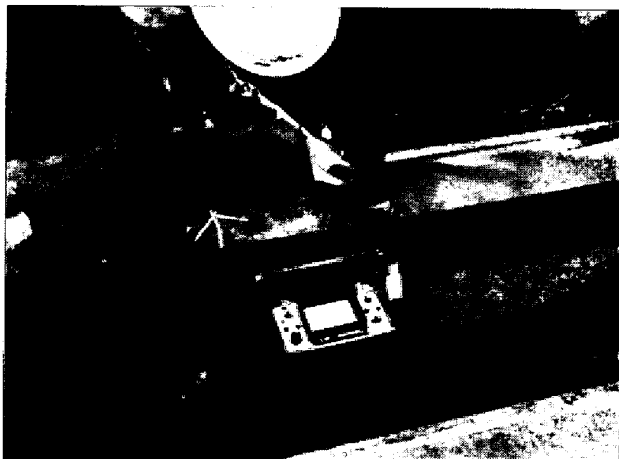


Fig. 10. Non-Destructive inspection by ultra sonic wave on welded parts.

り現在は超音波探傷検査が実施されている (Fig. 10). 日本建築学会からその規準が近く正式に発表される。

7. 鉄骨構造に関する最近の研究

現在、建築では高張力鋼として SM 58 まで使うことが行なわれている。これよりさらに高張力のものを使用するかどうかはなお施工上の問題の解決をまつ必要がある。ただし、超高層建築では柱・梁に 70 mm を超すような極厚鋼部材を使用する場合がしばしば生じている。極厚鋼部材の脆性的破壊に関する実験は新しい課題として現在行なわれている。溶接された柱・はり接合部は三次元的に連続されているので、荷重がかかった場合多軸応力状態になり、脆性的な破壊を起こす危険性を持っている。

Fig. 11 は柱・梁接合部を示し、これを X 型試験体として地震時におけると同等の水平荷重時における耐力を測つているところである。

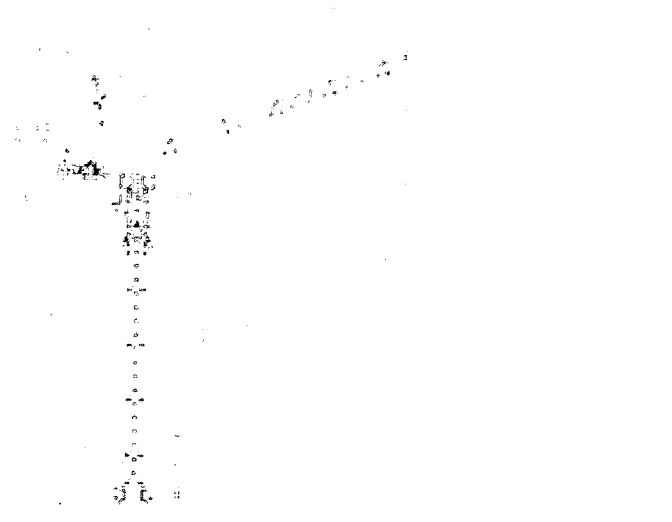


Fig. 12 は接合部に発生した亀裂で柱フランジ部分のマクロ写真のように脆性亀裂が柱フランジを貫通していることを示している。このような事実に基づいて適切な柱・はり接合部を設計することが肝要である。また、柱・梁接合部の形式を決定することは筆者の経験によるとおおむね鉄骨構造設計の全部を決定したことに相当する。

8. 超音波探傷法について

種々の fastener すなわち鉄骨の接合形式について、たとえば高張力ボルト (High Tensile Strength Steel Bolt) などが併用されているが主体は溶接になつている。この部分を非破壊的に検査する方法として、X線のほかに、超音波探傷が重要視されている。建築の鉄骨構造の実際



Fig. 11. Test of X type full-size beam-to-column connection. Top right to bottom left is column and top left to bottom right is beam. Loading girder is shown in upper part.

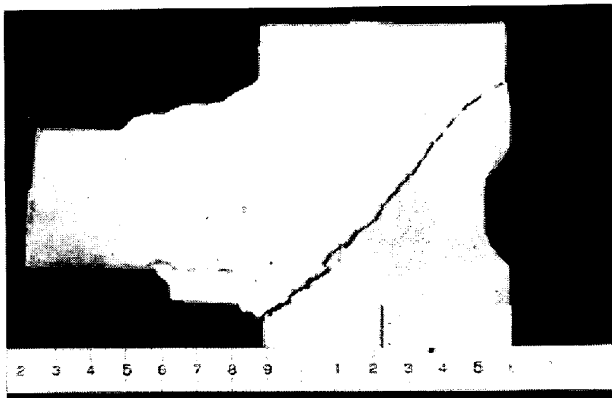


Fig. 12. Brittle fracture occurred by the test of beam-to-column connection. Fracture run through the whole depth of flange of the column.

上の条件から容易に了解されるように、X線検査の利用は特別の場合に限られる。超音波探傷法によることが有効であり 5MHz と 2MHz が標準的に使われている。現在のところ超音波パルス反射式Aスコープ法で一探触子斜角探傷によつてゐるが、この方法では欠陥の一部からの反射波の強さを指示するだけで直接に欠陥の分布状況を示すことができない。この欠点を補正するために超音波断層法一種であるBスコープを利用することを筆者らは研究中である。Fig. 13はAスコープ法により得られるブラウン管上の図形であり、Fig. 14はBスコープ

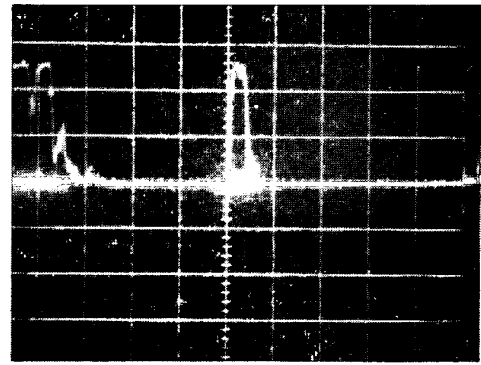


Fig. 13. A-scope screen picture on CR tube by ultra-sonic wave inspection test. Left shows input picture and right secondary reflection picture.

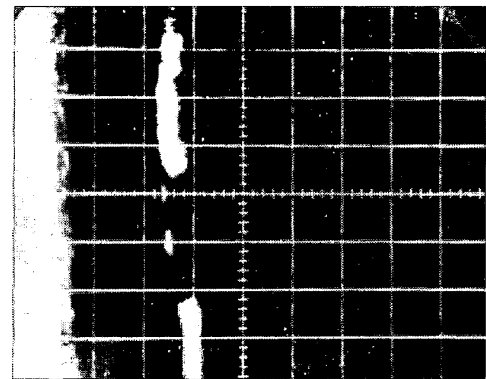


Fig. 14. B-scope screen picture by ultra-sonic wave inspection test. Left shows input picture at the contact surface and two long and short white pictures show artificial and natural defects respectively. Each cross has 10 mm and length of defects may be obtained.

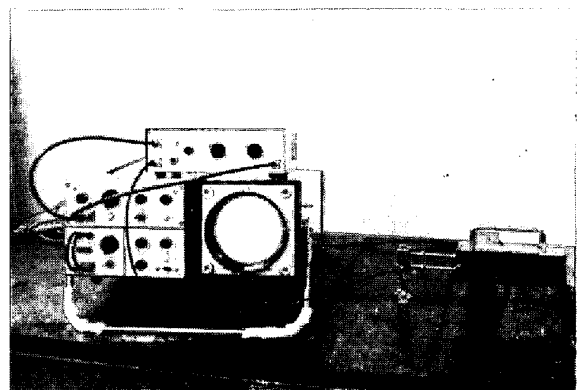


Fig. 15. Ultra soninc wave inspection apparatus with manual scanner. A and B scope are obtainable. Left upper is attenuator, down is main apparatus and right is manual scanner on a test specimen.

法により得られる図形である。ここでわかるように溶接欠陥長さ位置がブラウン管上に示される利点がある。ブラウン管上の座標は 10 mm 間隔であつて、欠陥の長さは補正值 5 mm を差し引いたもので直接測定される。

この研究はしかしまだはじめばかりで、なお研究を進めるにしたい一般的などの程度使用できるか、また

周波数の適正值をどのように定めるかなどが明らかにされると考えている。Fig. 15 はこの研究に用いている手動スキャナー付きの超音波探傷装置を示している。まず A スコープを求めスイッチを倒してス B コープを得るようになつている。