

超音波探傷試験による建築現場溶接の品質管理に関する調査研究

—25階建建物の検査結果を例として—

藤 盛 紀 明
倉 持 貢
近 藤 照 夫
原 田 勇
(建築部)

§ 1. まえがき

NDI S2404-70「鋼構造物溶接部の超音波斜角探傷試験方法および等級分類」が制定されて以来、建築の現場溶接の検査には超音波探傷法が急速に普及し始めた。1973年には、日本建築学会が「鋼構造物建築溶接部の超音波探傷検査規準」を制定し、鉄骨工事の仕様書には、必ず本方法が指定されるようになりつつある。

超音波探傷試験は放射線透過試験に比して安価であるといわれているが、高層建築では溶接量が多く、全数検査はなかなか行なわれ難い。

しかしながら、現場溶接を超音波探傷試験を用いて抜取検査する場合には、どのような抜取検査が適当か、抜取検査を具体的にどのように適用すべきかについてはまだ定説はない。

現場溶接は工場溶接と異なり、その検査にもいろいろな制約がある。

鉄骨造あるいは鉄骨鉄筋コンクリート造の躯体工事においては、溶接工程が全工程を決定する。溶接工事のすぐ後からは次工程が追いかけており、この次工程の後では補修溶接や検査は不可能となる場合が多い。

建築の現場溶接の品質管理は、まず溶接工自身が行ない、次いで溶接工の長、鉄骨・橋梁業者、総合請負業者が行ない、設計・監理者が受入れ管理を行なう。生産者側の最終責任者は総合請負業者である。

総合請負業者は全工程を支障なく進めるために、受入れ検査と、品質管理を平行して実施していかねばならない。

筆者は昭和45年以来、総合請負業者の一員として、数多くの現場溶接の超音波探傷試験に携わり、その受入れ検査と品質管理の方法を模索してきた。

今回、25階建の現場溶接の超音波探傷試験結果を整理し、前述の事柄に関して、従来経験的に感じとっていたことが具体的に確認されたので報告する。

§ 2. 工事および検査概要

本報告に主として引用した25階建の建物の概要を表-1に示す。本報告に引用する検査箇所は、柱-梁接合部で、その開先形状を図-1に示す。

表-2に検査の概要を示す。

規 模	地下2階、地上25階、塔屋2階 建築面積 1,590㎡ 延床面積 39,292㎡ 基準階床面積 1,481㎡									
構 造	地下2階：RC造 地上1階～3階 SRC造 4階～25階 S造									
鉄骨工事	総重量 3,400 t 柱・梁SM50A、小梁S S41 溶接量 (6 m/m すみ内換算) 工場 350,000 m 現場 49,500 m									
溶接工人 数 (人)	節	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	人 数	12	14	18	17	16	16	16	13	13

表-1 工事概要

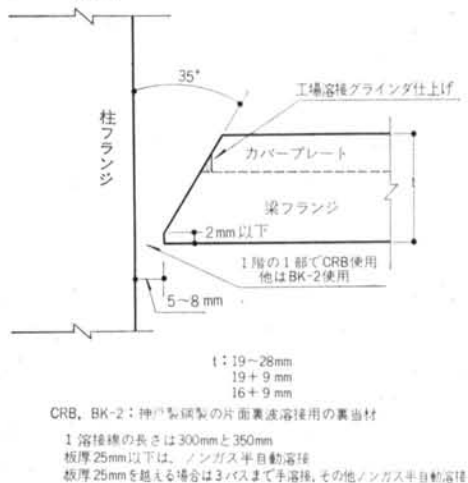


図-1 25階建建物の柱-梁接合部の開先形状

使用規格	建築学会「鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規 準案」									
検査技術者	ND I 超音波 2 級, 経験 5 年									
探傷器	三菱電機製 FD210									
探触子	検査技術研究所製 5 Z10×10A70									
接触媒質	グリセリン									
探傷方法	表裏面を直射法および 1 回反射法で探傷, カバ ープレートのある場合は, カバープレート側は直射 法のみで探傷									
抜取率 (%)	節	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	抜取率	80.0	71.3	83.5	48.9	37.6	31.9	39.4	14.7	20.1

表-2 超音波探傷試験概要

節	1	2	3	4	5	6	7	8	9
階数	1~2	3~4	5~7	8~10	11~13	14~16	17~19	20~21	23~25

表-3 節と階数の関係

柱は一般に 2~3 階分の長さを単位として製作され, 現場工事も, 柱の単位 (節と呼ばれている) ごとに行なわれる. 本工事の節と階数の関係を表-3 に示す.

事務所ビルの現場溶接は, 建物平面の中心 (コアと呼ばれ, 一般に耐震壁が設けられ, エレベーターホールがある) から外側に放射状に進められる. 溶接工事は各節単位で進められるが, 節の下階から上階へと進む場合, 節の上階から下階へと進む場合, 節の各階で同時に進む場合の 3 方法がある. 本工事ではコア部のタワークレーン廻りを最初に溶接し, 次いで各階同時に中心から外側へ放射状に作業が進められた.

欠陥は初期には裏当材近傍のルート部の溶込み不足やスラグ巻き込みであったが, 品質が安定してきてからは, 内部のスラグ巻き込みがほとんどであった.

§ 3. 溶接欠陥発生の時間依存性

節ごとにデータを集計し, 横軸に節 (溶接時期), 縦軸に欠陥発生の割合をとったものを図-2, 図-3, 図-4 に示す.

図-5 は 9 階建ビルの現場溶接の検査結果である.

図-2~図-5 に示すように, 一般に現場溶接では, 溶接開始当初には比較的多く欠陥が発生し, 次第に減少して一定値に落ちつく. 欠陥の発生を零にすることは, 全数検査をして補修する以外には不可能である. また欠陥の発生率が一定値に落ちつき, 溶接の品質が安定した状態になった後にも, 一時欠陥の発生が増加する時期が

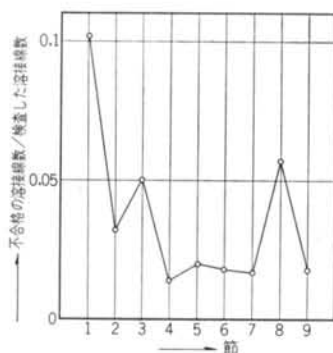


図-2 不合格溶接線の発生率

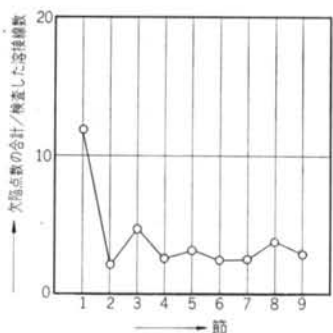


図-3 1 溶接線の平均欠陥点数

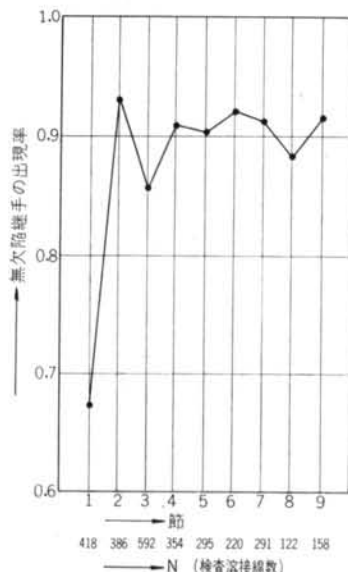


図-4 無欠陥継手の出現率

ある.

図-6 は保険数理や最近の信頼性工学で良く引用される Bath-tub Curve である. Bath-tub Curve は人間の死亡率や, 装置やシステムの故障率にみられる.

現場溶接の欠陥発生率と施工時間との関係はこの Ba-

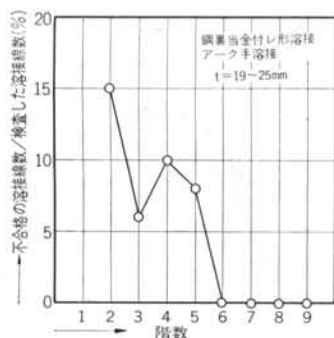


図-5 9階建ビルの不合格溶接線の発生率

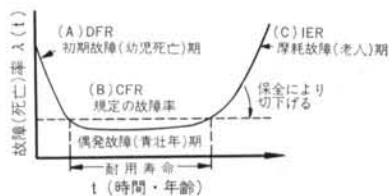


図-6 Bath-tub Curve

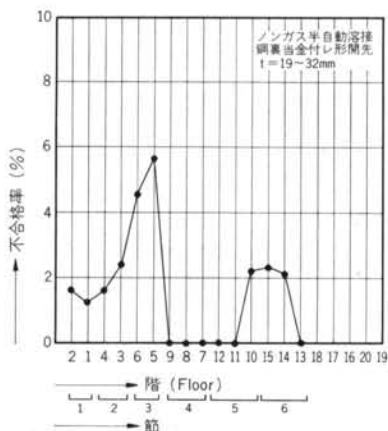


図-7 1974年3月から溶接中の高層ビル現場溶接の不合格溶接線の発生率

th-tub Curve に類似している。

図-7は、1974年3月～9月に施工する20階建建物の検査結果の1974年5月までのものである。この建物の場合、図-6の初期故障期がみられない。このような現象は1973年の後半から、幾つかの工事で見られるようになっている。このような現象は、ごく近い過去に同一開先形状と溶接方法を用いて溶接し、かつ超音波探傷で検査された経験を有する溶接工と、同様な経験を有する管理技術者が組合わされた場合に発生する。このような組合わせでは、新しい工事に入った場合にも、過去の工事の偶発故障期の延長となる。

しかしながら、偶発故障期は比較的短く、すぐ摩耗故

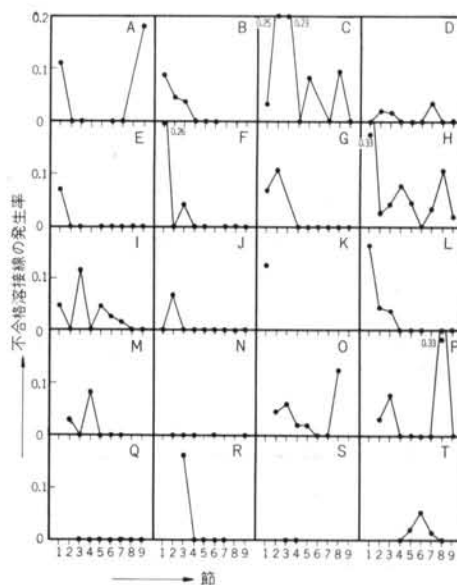


図-8 溶接工別の不合格溶接線の発生率
(図中のアルファベットは溶接工の符号)

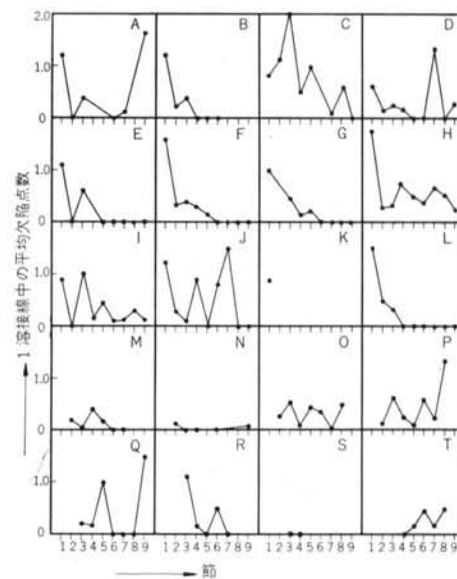


図-9 溶接工別の1溶接線の平均欠陥点数
(図中のアルファベットは溶接工の符号)

障期のような現象を呈していることは、人間性が現われて、興味深いことである。

建築の現場溶接では、最近一部自動溶接が試みられているが、そのほとんどが手溶接または半自動溶接で、その品質には人間性が大きく関与しており、品質管理をする上で最も重要視する必要があることである。

図-8、図-9は溶接工ごとにデータを整理したもの

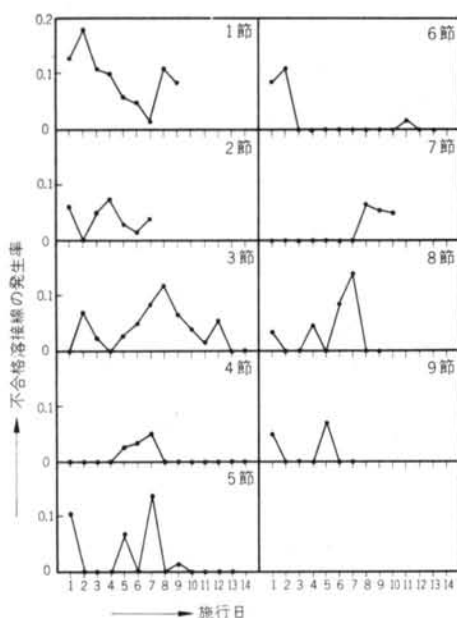


図-10 節中の施工日ごとの不合格溶接線の発生率
(全溶接工のデータの平均値)

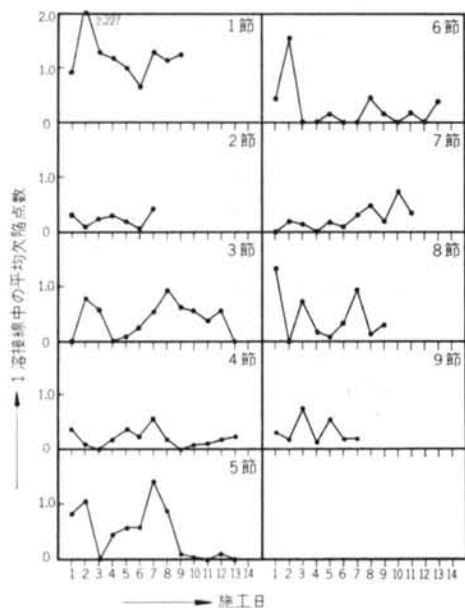


図-11 節中の施工日ごとの1溶接線の平均欠陥点数
(全溶接工のデータの平均値)

である。大半の溶接工は図-2や図-3と同じく、図-6のBath-tub Curveやその摩耗故障期のない減少型であるが、初期故障期の長さやその間の欠陥発生率はいろいろである。品質の変動の激しい溶接工もかなり存在している。注目すべきことは、工事の途中から参加した

溶接工の場合、初期故障期のない場合の多いことである。このことは初期故障期における欠陥発生の主原因は、溶接工の技量以外のものであることを示している。溶接工の技量以外の要因とは、開先の管理、足場の整備等といったことと同時に、現場全体の溶接の品質管理に対する雰囲気といったことまで含まれている。

連続して2節、不合格溶接線の発生率が零の溶接工は摩耗故障期までは、不合格溶接線の発生が零に近い。

図-10、図-11は節の中での施工日ごとの欠陥発生率を示したものである。節内では図-6のようなBath-tub Curveはあまりみられず、欠陥の発生はランダムのようなものである。現場溶接では1節の溶接は短期間(たとえば1週間)に終了しなければならない。図-10、図-11は、1節中では超音波探傷試験結果をフィードバックして、溶接の品質を改良すべき時間的余裕の少ないことを示している。

§ 4. 欠陥発生率の表示方法

§3. では欠陥発生率を(1)不合格溶接線の発生率、(2)無欠陥溶接線の出現率、(3)1溶接線の平均欠陥点数、の3方法で表示した。これらの3つのパラメータ間の関係を図-12、図-13、図-14に示す。

(1)と(2)の関係と(1)と(3)の関係では類似の傾向を示している。すなわち無欠陥溶接線の出現率が高い場合および1溶接線中の平均欠陥点数が小さい場合には、不合格溶接線の発生率は低くなる。しかしこの逆は必ずしも成立しない。すなわち、無欠陥溶接線の出現率が低くとも、また1溶接線中の平均欠陥点数が大きくとも、不合格溶接線の発生率が低い場合がある。

図-15は、不合格溶接線の発生率と3点の欠陥を含む溶接線の発生率の関係を示したものである。

一般に不合格直前の欠陥を良く出す溶接工は、不合格の欠陥をも出し勝ちと考えられるが、必ずしもそうではない。不合格直前の欠陥は良く出すが、不合格の欠陥は絶対に出さない溶接工もいる。超音波探傷ではエコー高さが領域Ⅰの場合は欠陥とみなされないが、溶接工の中には領域Ⅰの不連続部は良く出すが、領域Ⅱ以上のエコー高さを与える欠陥は出さない者もいる。

品質管理や目標管理の本質は、定められた目標値を最低の費用で達成することにあるから、これらの溶接工は超音波探傷を良く知って、最適の溶接をしているともいえる。

この意味では、欠陥発生率を表示するパラメータとし

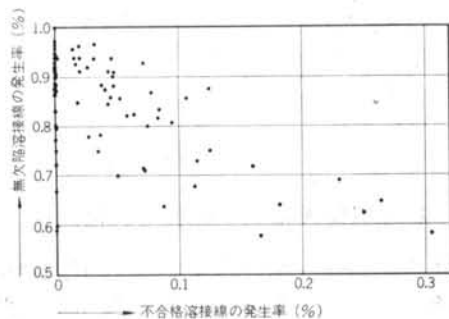


図-12 不合格溶接線の発生率と無欠陥溶接線の発生率の関係 (1人の溶接工が1節中に溶接した溶接線の平均値を1データとした)

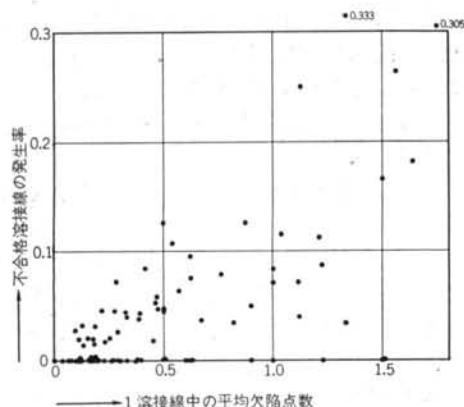


図-13 不合格溶接線の発生率と1溶接中の平均欠陥点数の関係 (1人の溶接工が1節中に溶接した溶接線の平均値を1データとした)

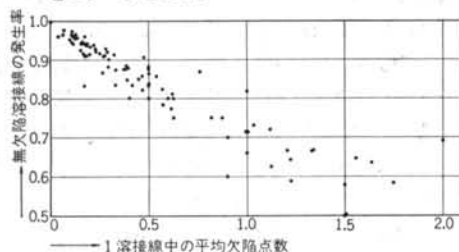


図-14 無欠陥溶接線の発生率と1溶接中の平均欠陥点数の関係 (1人の溶接工が1節中に溶接した溶接線の平均値を1データとした)

ては、無欠陥溶接線の出現率や1溶接線中の平均欠陥点数よりも、定められた品質限界を用いた不合格溶接線の発生率を使用するのが良いと思われる。

管理者の立場として、溶接の施工の状況を全体的にとらえるためには、前2者のパラメータも有効である。

図-14に示すように無欠陥溶接線の出現率と1溶接線の平均欠陥点数の間には、比較的良好な直線関係があり、いずれか一方のパラメータのみを採用すれば良い。

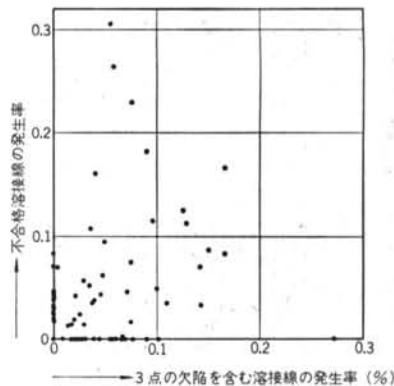


図-15 3点の欠陥を含む溶接線の発生率と不合格溶接線の発生率の関係 (1人の溶接工が1節中に溶接した溶接線の平均値を1データとした)

§ 5. 欠陥指示長さの分布

欠陥指示長さの分布を図-16に示す。10~19mmのものが最も多い。ただし先に報告したように現行の超音波探傷の規格では小さい欠陥を長めに測定するので、欠陥指示長さ10~19mmのものの中には、実際の欠陥長さが9mm以下のものも含まれていると考えられる。

図-17は各欠陥指示長さを有する欠陥の節ごとの出現率である。長い欠陥の出現率の傾向は図-2の不合格溶接線の出現率と類似している。図-18は各節ごとの1溶接線に含まれる平均欠陥指示長さである。上階に行くと一定値に収める傾向がある。

欠陥指示長さの最大のものは、7節までは溶接線全線(300mmまたは350mm)で、8節は165mm、9節は63mmである。不合格溶接線は時間とともに減少してある一定値となり、長い欠陥の出現率や欠陥長さの平均値も同様な

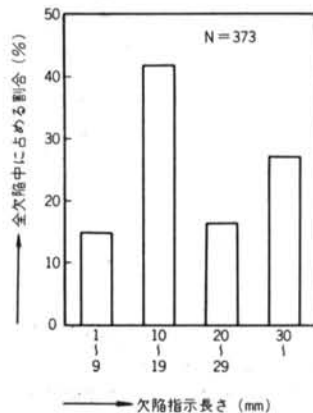
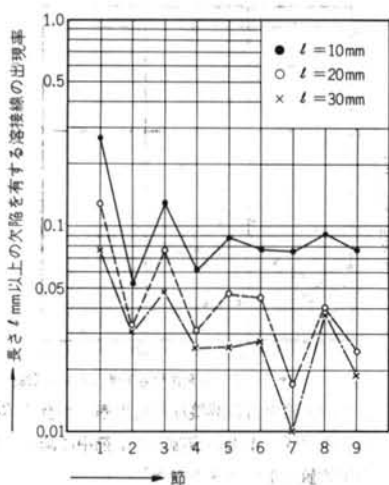
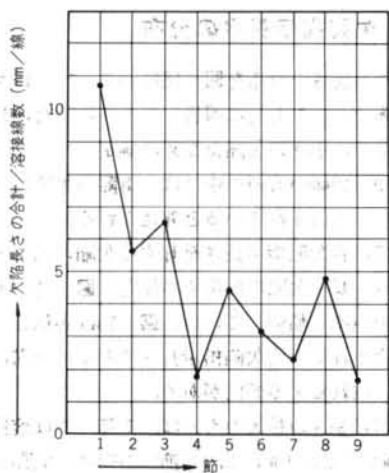


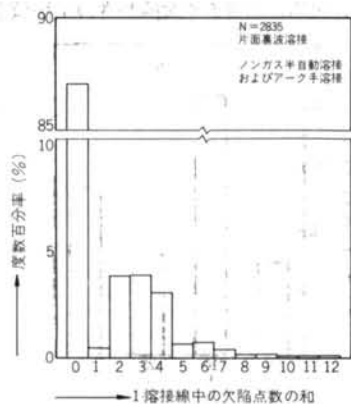
図-16 欠陥指示長さの分布



図一七 長さ l mm 以上の欠陥を有する溶接線の出現率の節による変化



図一八 1 溶接線中の平均欠陥指示長さの節による変化



図一九 1 溶接線に含まれる欠陥点数の度数百分率

傾向を示すが、欠陥指示長さの最大値はそうでもない。

参考のために図一9に1溶接線中に含まれる欠陥点数の分布を示す。

§ 6. 建築現場溶接の取扱検査方法

抜取検査は、ある程度不合格品の混入を許容することが前提であるから、構造上不合格品の混入が一切許されない箇所は全数検査を実施しなければならない。

先に述べたように現場溶接とその検査の場合、溶接の次工程が接近して追いかけているため、1節の溶接終了後に、その節全体の溶接の合格判定が判明するような抜取検査法の採用は一般に困難である。

したがって現場溶接の抜取検査法としては、JIS Z 9008「計数連続生産型抜取検査」、あるいはこれに類似した方法が良い。

この検査の場合、検査の手順は、(1)品質基準を決める、(2)AOQLを指定する、(3)ロットを形成する、(4)途中で見出した不良品を、良品と取り換えるか取り除くかを定める、(5)工程平均不良率を推定する、(6)区切りの大きさを決める、(7)連続良品数を決める、(8)実施に移る、である。

品質規準は使用する規格によって定まり、先に述べた日本建築学会の規準では、とくに疲労を考慮して設計された溶接部とそれ以外に分けられている。

不合格となった溶接部は補修するのが一般的であるから、不良品は良品と取り換えることになる。

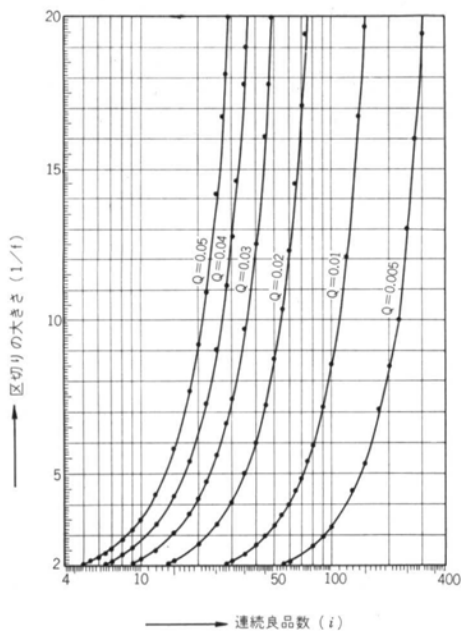
§ 3. で報告したように、溶接工によって欠陥発生状況が異なり、また1区切りの溶接(たとえば節)では、その品質は、施工日による一定傾向が認められないので、ロットは原則として、1つの節の同一溶接工の溶接箇所形成するのが良い。品質が安定してきた溶接工の場合は、以後の節は全節を1ロットと考えることもできる。品質が安定したか否かの判定は連続して2節不合格溶接線の発生率が零に近い場合を安定したとするのも一方法である。

溶接開始後のある期間の工程平均不良率(不合格溶接線の発生率)は現場によって千差万別で、予測不可能である。1節中の不良率は、施工日による傾向がそれ程ないことを根拠として、各節の始めの溶接を調べて推定する以外にない。品質が安定してくれば、前節の結果を利用することも可能である。

平均出検品質限界AOQLは注文者と生産者の合議で決められるが、建築構造物の安全からみたAOQLは、

工程平均不良率 (%) AOQL (%)	15	10	5	3	2	1	微小
0.5	2/69	2/69	2/69	2/69	2/69	8/245	50/540
0.7	2/44	2/44	2/44	2/44	4/95	30/285	50/340
1	2/28	2/28	2/28	3/46	8/97	50/215	50/215
2	2/17	2/17	5/44	50/135	50/135	50/135	50/135
3	2/11	3/18	20/60	50/84	50/84	50/84	50/84
5	3/11	8/24	50/52	50/52	50/52	50/52	50/52

表一 4 JIS Z 9008 による区切りの大きさ 1/f (左側) と連続良品数 i (右側)



図一 20 区切りの大きさ (1/f) と連続良品数 (i) を定めるためのグラフ (Q: AOQL)

今後の研究課題である。しかし常識的には0.5%~5%程度が良いと考える。

区切りの大きさ 1/f は、JIS Z 9008 では平均検査数が最小となる条件から与えている。予想される工程平均不良率と AOQL に応じた JIS の区切りの大きさ 1/f、および連続良品数 i を計算した結果を表一 4 に示す。

建築現場溶接の場合、先に述べたように、1人の溶接工が1節で行なった溶接箇所を1ロットとすれば、そのロットの大きさは、せいぜい100である。1/f が大きい場合には、全数検査になってしまう。

JIS Z 9008 は生産がランダムであることが前提である。現場溶接はほとんどが手溶接であるから、1/f が余

り大きいと、人間の心理上この前提がくずれる可能性が大である。

したがって建築現場溶接では 1/f を 2~10 程度にし、連続良品数 i を小さくするのが良い。1/f を小さくすることによって、摩耗故障期を適切につかまえることも可能となる。

建築現場溶接の技取検査に使用されると予想される AOQL に対する i、および 1/f を決める曲線を図一 20 に示す。

図一 20 は式(1)を用いて計算したものである。

$$\frac{1}{f} = 1 + iQ \left\{ \frac{i(1-Q)}{i+1} \right\}^{i+1} \dots\dots(1)$$

ここで、Q: AOQL

式(1)は H.F. Dodge の論文¹⁾の式(2)と式(2)から求めたものである。

なお、一部検査に移った後の検査箇所を 1/f 番目ごとと定めてしまうと、溶接工がそれに対処した溶接をする可能性があり、ランダムな生産という条件が失なわれるので、1/f 個中のどれを検査するかはランダムサンプリング等によるのが良い。

品質が安定した場合には、節の始めから一部検査を適用するのが良いと考える。良い品質が得られた場合には 1/f をしだいに大きくして行くが良い。

§ 7. あとがき

建築現場溶接では工程上の制約から、抜取検査を行なう場合には、連続生産型のもが良いこと、また人為的な作為を避けるために、種々の工夫の必要なことを報告した。AOQL をいくらにすべきかは今後の研究課題である。

建築の溶接は一般的な材質、一般的な工法、一般的な板厚の組合わせがほとんどである。したがってそれほど高度の溶接知識を必要としない。良い溶接を得るためには、普通の方法で普通の手順通りに丁寧に溶接しさえすれば良い。溶接工 1 人 1 人がそのような心構えを持ちさえすれば良い。欠陥がありそうな所は溶接工は皆知っており、非破壊検査で発見された欠陥はほとんどの溶接工が身に覚えのあるものである。

したがって建築現場溶接の品質管理にとっては、非破壊検査や統計的手法以上に、組織の人間関係やチームワークが重要である。すなわち建築現場溶接の品質管理は人間管理である。

本報告は、手溶接および半自動溶接で行なわれた溶接

についてのものであり、全自動溶接による溶接については別に調査が必要である。

建築溶接における超音波探傷の普及は目覚ましいものがあるが、現在はまだ過渡的であり、超音波探傷による溶接部の品質管理方法は、今後も検討を続ける必要がある。

本論文が建築現場溶接の品質管理にいささかでも役立

てば幸甚である。

謝辞

本論の論旨は、1969年以来採取した数多くの現場溶接の検査結果から得られたものである。それらのデータ採取にご協力頂いた設計部の方々、現場の方々に紙上を借りて謝意を表します。

<参考文献>

- 1) H.F. Dodge: "A Sampling Inspection Plan for Continuous Production" Annals of Mathematical Statistics, 14
- 2) 日本規格協会: "品質管理 (JIS ハンドブック)"
- 3) 101小委員会, 石井勇五郎, 中田正也: "鋼構造物の溶接部放射線透過検査の統計的研究" 非破壊検査 第10巻, 5号 昭和36年10月
- 4) 101小委員会, 石田正次: "溶接条件による溶接品質の予測に関する統計的研究" 非破壊検査 第10巻, 5号 昭和36年10月
- 5) 横尾恒雄: "JIS Z 9015 の多回抜取検査 (案)" 標準化と品質管理 1974年6月