

1. 序

超高層ビルに限らず、一般の中高層ビルにおいても、省力化や工期短縮の目的で鋼構化を試みる傾向が強くなってきている。各部材の接合手段に関しても、生産性向上の面から、溶接材の機械的性質の信頼性が著しく向上した裏付けのもとに、溶接の採用が増大している。反面、利用意欲の拡大は、溶接工事に対する問題意識および技術管理意識の希薄化を招いていることは否定できない。その後、溶接に関連した事故の発生や、溶接部に対する非破壊検査法の進歩によって不良溶接がクローズアップされ、現在は溶接管理の重要性が認識されている時代であるといえる。

建築関係では日本建築学会より、「鋼構造溶接部の超音波探傷検査規準」が発行されているが、この規準は検査の方法、欠陥の等級分類、合格判定を定めているもので、検査対象箇所、数の指定などの実施については、設計監理者、工場管理者が判断によっている。そのため、工事ごとにあるいは監理、管理者ごとに、同一規準によっていても溶接の品質はかなりのゆがみをもったものになっている。

ここでは、実際の工事を通じて中高層S造、SRC造における工場溶接を対象に、超音波探傷法を用いて溶接の品質確認および工場の管理レベルの調査を行なったので、その実状と若干の検討結果を示すとともに、現状に立脚したうえで、溶接部の品質管理のうちの検査について、一つの考えを示すものである。

2. 溶接部の自主検査と受入検査の現状

特殊な建物（超高層、大スパン）を除いて、一般の建物では、工場溶接部の検査は設計監理者の溶接検査に対する認識がうすく製作工場の自主管理にまかせているのが実状で、設計者は検査の程度を製作工場の製作要領書に採取率（10～30%）で示させている程度である。

筆者らが関係した実工事において、製作工場の自主検査が終了した製品について（補修後）、受取検査をランダムな採取で実施した結果を自主検査結果とともに、製作工場別に表-1に示す。検査はすべて「鋼構造溶接部の超音波探傷検査規準」によって実施された。建築における主要な溶接部は図-1に示すような柱-梁接合部の突合せ溶接部であるが、表-1の結果は1突合せ溶接線を1箇所と考えてこれらすべてを検査対象箇所としてその総数をN、その中から採取された個数の総数をn、不合格の溶接総数をdとし、検査率は $\frac{n}{N} \times 100$ 、不合格欠陥率 p は $\frac{d}{n} \times 100$ で示してある。修正不合格欠陥率 p' は自主検査において採取検査後、 p がロットと仮定した溶接線の集合（ロットは1節または2節分の鉄骨にある溶接線総数）の不合格欠陥率を代表すると仮定して、不合格溶接線を補修した後の推定される不合格欠陥率で $p' = \frac{d(N-n)}{Nn} \times 100$ によって求めている。

受入検査結果も同様に表現しているが、 P は単純に修正不合格欠陥率がロットの不合格欠陥率を代表するとして、受入検査時に少数の採取検査数に対して発見された不合格数が生じるような確率でポアソン分布(1)式により求めた値である。

$$P = \binom{n}{c} p^c (1-p)^{n-c} \quad (1)$$

受取検査において不合格となって確認された欠陥の種類は、小さなものではブローホールの密集、スラグの巻込みが主で、大きなものはルート部の溶込み不足、裏はつりの不足による全線にわたるものが主であった。少数ではあるが、大きな欠陥の中には半自動溶接工の技量未熟による全断面不着着溶接線や、板付時に生じたわれ欠陥、寒冷時における補修溶接での割れを含む溶接線が1部に検出されている。ガウジングによって確認した欠陥の代表例を写真-1, 2, 3に示す。

一方超高層ビルにおける現場溶接については、施工精度の保持、気象条件、足場などの溶接条件が不利であるという認識のもとに、溶接施工側と監理側

表-1

番号	対象箇所数	自主検査						受入検査						P
		検査数	検査率	不合格欠陥数	不合格欠陥率	修正欠陥率	検査数	検査率	不合格欠陥数	不合格欠陥率	修正欠陥率	検査数	検査率	
1	186	79	42.4	4	5.1	3.6	24	12.9	0	0.0	0.42			
2	466	242	51.9	5	2.1	1.0	107	8.7	7	6.5	0.1			
3	260	24	9.2	0	0.0	0.0	28	10.8	3	10.7	0.1			
4	768	39	5.1	4	10.2	9.7	11	14.3	3	27.9	0.07			
5	4212	72	1.7	6	8.3	8.2	54	1.2	3	5.6	0.17			
6	853	262	30.7	18	6.9	4.76	48	56.2	0	0.0	0.1			
7	1208	188	15.7	7	3.7	3.14	16	1.3	2	12.5	0.08			
8	1174	256	21.8	0	0.0	0.0	45	15.3	16	35.6	0.1			
	1066	38	3.6	0	0.0	0.0								
9	1932	570	29.5	12	2.1	1.48	15	0.8	2	13.3	0.02			
10	784	251	32.1	15	6.0	4.08	56	7.1	7	12.5	0.1			
11	880	319	36.1	13	4.0	2.6	529	60.1	85	14.07	0.1			
12	128	62	49.1	5	8.1	4.16	27	21.1	2	7.1	0.21			
13	988	116	11.7	18	15.5	13.7	56	5.6	21	37.5	0.1			
14	432	267	61.8	9	2.76	0.7	247	50.1	68	27.1	0.1			
15	1176	136	11.5	2	1.5	1.3	86	7.3	1	1.2	0.37			
16	1876	121	6.9	4	3.3	3.09	32	1.7	3	9.4	0.06			
17	588	317	53.9	3	1.0	0.44	33	5.6	0	0.0	0.88			
18	948	650	68.5	2	0.3	0.09	26	2.7	0	0.0	0.8			
19	319	305	95.6	20	6.55	0.29	23	7.21	1	4.34	0.61			
20	1454	435	30.1	135	31.1	2.1	138	9.5	37	27.5	0.1			
21	1148	288	25.1	11	4.0	2.9	17	1.5	0	0.0	0.1			
22	1364	425	31.1	109	25.7	17.8	30	2.2	17	57.1	0.1			
23	312	190	62.1	13	6.9	2.7	57	18.1	15	26.4	0.1			
24	1440	203	14.1	7	3.5	3.0	135	9.4	4	3.0	0.99			
25	1874	562	30.1	13	2.3	0.01	109	5.8	8	7.3	0.1			
26	1874	298	16.1	55	18.5	15.1	47	3.1	2	4.3	0.1			
27	1829	1829	100.0	0	0.0	0.0	54	3.1	1	1.9	0.1			

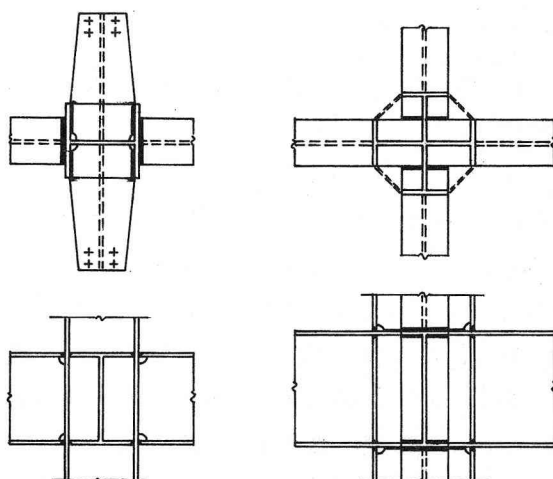


図-1

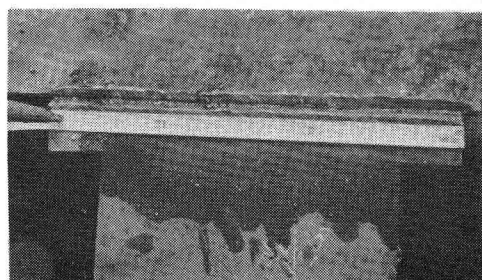


写真-1

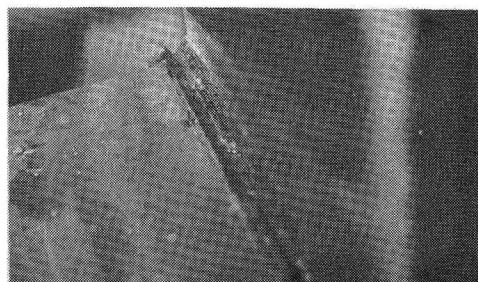


写真-2

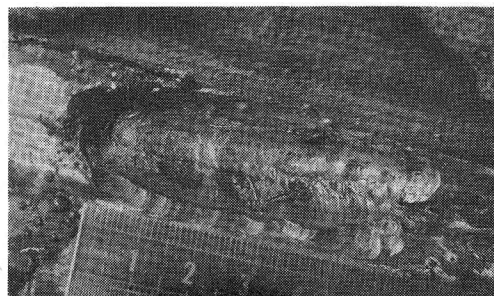


写真-3

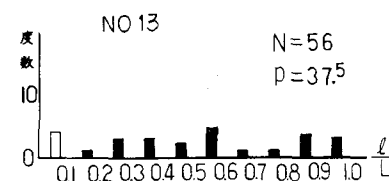
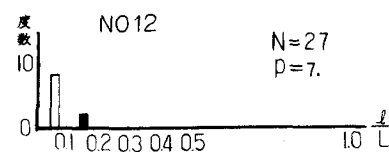
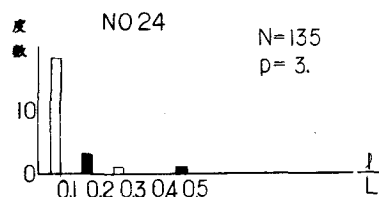
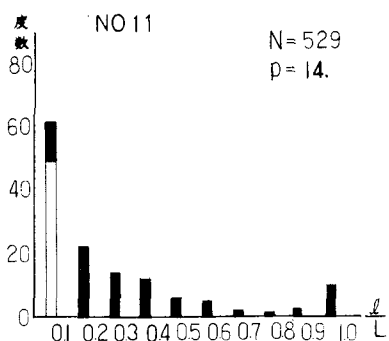
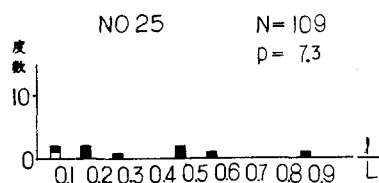
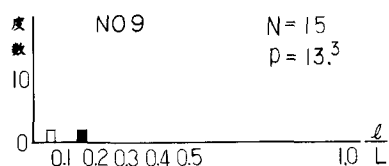
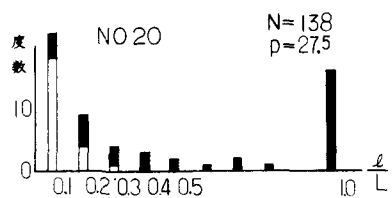
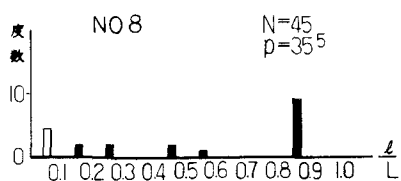
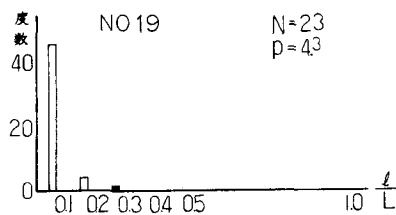
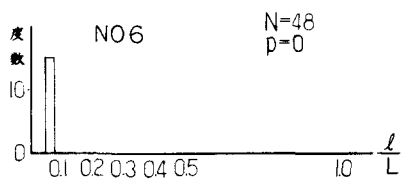
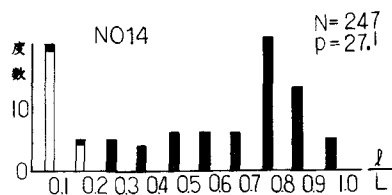
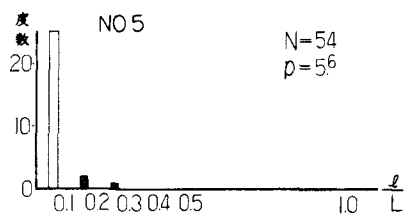


図-2 (a)

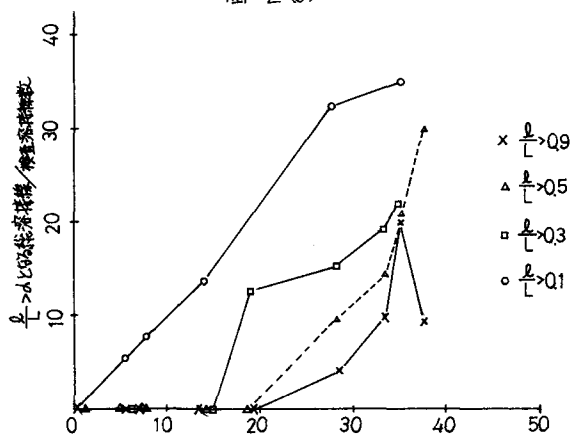


図-3 工事別の不合格率

図-2 (a)

一体となって現場において管理し

ており、ほとんど良い結果を出している。筆者らの関連した工事の一部

の検査結果を表-2に示す。しかしこの結果から単純に管理意識の低い中小の工事に現場溶接を採用しても良い結果が得られるかは疑問である。

3. 検査結果の考察

表-1より、自主検査より少ない抜取り数の受取検査の不合格率及び自主検査の ρ を上まわっている工事は約半数近くあり、かつ修正した自主検査の ρ が正しいと仮定して2項分布で求めた受入検査時の不合格溶接線の発生確率が零(10^{-2} 以下)のものも半数近く存在している。自主検査自体の方法、さらには製作工場の管理体制が疑問視される結果となっている。

これらの原因は受取側の指示の有無でしか非破壊検査を実施しない製作工場が存在したり、また受取側の不明確な要求品質と生産者側の要求品質の独断的解釈、さらに設計変更、工期短縮によって検査工程を省略して出荷することが大きな原因と考えられる。個々には溶接工の技量、モラル、管理者の管理意識の低下等が考えられる。

工事毎に受入検査で抽出された溶接線について、欠陥指示長さ(l)を溶接線長(L)で除した値(l/L)を0.1づつに区切ってその度数分布図を作成した。これらの1部を図-2に示す。ここで黒く塗りつぶした部分が規程で不合格となる溶接線の度数である。各工事において(l/L)の度数分布は異なるが、全体の不合格欠陥率の低い工事は(l/L)の増大につれて、各々の度数が低下する傾向にあり、不合格欠陥率の高い工事は、(l/L)の増加と共に度数は低下するが、(l/L) = 0.8~1.0の付近でまた度数が増大している。このことは受取検査の工事毎の不合格欠陥率を横軸とし、各工事の(l/L) $\geq \alpha$ ($\alpha = 0.9, 0.5, 0.3$)となる溶接線の総数と全検査溶接線数の割合 R_α (2式)を縦軸とした図-3からも明らかで、不合格欠陥率が20%をこえると(l/L) ≥ 0.5 となる欠陥が生じ、30%位をこえると(l/L) = 1.0となる欠陥が増大する傾向がある。(l/L) ≥ 0.5 となる欠陥の中には接合部の性能に重大な影響を与えるものも少なくない。

$$R_\alpha = \frac{\sum_{i=\alpha}^{1.0} m_i}{n} \quad (n_i: i=l/L \text{ における度数}, i=1.0, 0.9, \dots, 0.1) \quad (2)$$

4. 全数検査と抜取検査

溶接部の品質保証として超音波探傷検査を実施した場合に、いくつかの製作工場にみられる大きな不合格欠陥率および工場自主検査結果と受取検査結果の不一致は大きな問題である。図-1のような

表-2

製作工場	接合形式	純溶接線数	検査された溶接線数	不合格溶接線数
I	Beam-Column	812	286	10
	Column-Column	304	120	5
II	Beam-Column	1024	696	8
	Column-Column	464	270	1
III	Beam-Column	1040	720	10
	Column-Column	24	24	0
	Total	3668	2116	34

1) フランジの巾を1溶接線と仮定している。

2) 製作工場の自主検査後、筆者らによって150の溶接線について受入検査を実施したが、不合格となる溶接線は見出されなかった。

力学的に最もきびしい個所に溶接が用いられることから、非破壊検査を実施し何らかの保証をしなければならぬ。

溶接はすべて同一条件で施工されてはいないので、検査の原則からは全数について行うのが望ましい。しかし現状では非破壊検査法そのものも絶対的なものでなく、さらに全数検査に耐えては検査費用、検査工期、検査技術(検査員を含む)の面で問題になっている。検査法については、溶接部の幾何学的な欠陥は検出できても、冶金学的な欠陥は検出できないことを含めて全数について行なっても、溶接部の一部には欠陥が含有されていることになる。また工場溶接部に対して受取側からの自主検査実施要求を行うと、製作側からは検査費用の面で難色を示す場合が多い。概略検討してみると、全数検査を実施するとして鉄骨工事のコストに対する検査コストの割合は表-3にみられるように3~4%位で不可能な値ではない。製作工場における検査実行能力として検査員、検査工期を考察すると、推定ではあるが、表-4にみられるように各製作工場の検査員1人に対する溶接工は約10~20名であり、小規模な工場では検査員が存在しない。溶接工が1日に50~150m(6mm換算)の溶接作業をするのに対して、検査員は1日に40~70個所の受合せ個所(ここでは1個所の平均溶接長を4m, 6mm換算)しか検査できない。これらの事を考えると、工程に影響を与えないで全数検査を実施するとした場合、検査員1人で監視しえる溶接工はほぼ3~4名位となる。

表-3

工事	鉄骨総重量 (ton)	溶接個所数	* 鉄骨コストに占める 検査コストの割合(%)	構造種別
U	94	1062	4	SRC
V	253	2407	3.8	SRC
W	654	5162	3.1	SRC
X	800	7618	3.8	S
Y	372	3232	3.4	S

* 鉄骨単価 25万円/ton
検査単価 5万円/日(検査員1, 補助員1)
検査能力 50個所/日
として割合を算出した。

表-4

ファブリケーター	資本金 (億円)	溶接工人数 (人)	超音波検査員数	
			1級	2級
A	10	120	1	7
B	6	143	0	3
C	0.5	73	0	4
D	1.2	24	0	1
E	0.45	31	0	0
F	0.7	37	0	2
G	0.75	19	0	0
H	0.5	21	0	0

以上から現状を認識すれば、特別な場合を除いてほぼ同一条件のものをまとめてロットと考えこれに抜取検査を適用する方向で検討せざるを得ないことになる。抜取検査によって品質を保証することは、検査法が絶対的でないことに加えて、前記のように溶接部の一部に欠陥が含有されたままとなる確率は高くなる。従って溶接部は若干の欠陥が存在しても設計荷重に対して溶接部としての機能を失わないような材料の選択、ディテール等の決定が前提になくはならないと考える。

ある確率分布を有する荷重に対してある確率で欠陥を含む溶接部が存在する構造物の信頼性について今後検討されねばならぬ。

5. 抜取検査

工場溶接部の欠陥検査としては、①責任施工による自主検査、②採取または全数自主検査後に採取による受取検査、③全面的に受取検査(全数又は預取り)という分

類が考えられるが、我国のような諸君形態から、また検査結果から判断して②の方法が適切と考えられる。前記のことと考えるあわせて筆者らは大胆ではあるが最低限必要な抜取検査について検討し、この検査を現業において工場密着された製品について実施している。

抜取検査を行う場合の条件は、製品がロットとして処理できることと、ロットがほぼ同じ材料を用い同じ製造条件で生産された品物であるという条件が必要である。受取側としては製作工場各々が1の製造ラインと考えることによって、各工場毎一定期間(例えば工事毎)に出荷される密着を管理単位とすることができ、製作工場は各密着工個人を1つの製造条件とみなすことによって管理単位を設定することができる(現状では密着工別に管理している工場はごく少数である)。

抜取検査方法としては、JIS Z 9001 ~ 9015 にその方式が各種定められており、各々の目的に使いわけることが可能である。ここでは単純に JIS Z 9002 によるとする。 α (生産者危険率)、 β (消費者危険率)を 0.05, 0.10 として、受取側の立場において1密着線の品質水準を不合格欠陥(検査率による)が存在しないことにおくと、不合格欠陥率がロットにおいて 20% をこえると (ρ_L) ≥ 0.5 となる大きな欠陥がロットに含まれる可能性が大きいのでこれを拒否(なるべく不合格とさせたロットの不良率の下限)とし、生産者側としては密着工の技量の限界、非破壊検査の見おれ等を考えると、 ρ_0 (なるべく合格させたロットの不良率の上限)として、良く管理された工場、超層層どりの不合格欠陥率より 5% の値が適切と考えられる。これから試料数 $m=35$, 合格判定個数 $C=3$ の抜取検査が得られる。当然これをこえた場合はそのロットについては全数検査をすることが必要である。

合格となったロットについても、検査中に見出される不合格欠陥は補償されるし、また不合格となったロットは、全数検査によって不合格欠陥は補償される。したがって補償後の出荷される段階での AOQL (平均出検品質限界) は (3) 式となる。

$$AOQL = y \cdot \frac{N-m}{Nm} \quad (3)$$

上記の検査に対して $N=350$ とすれば、 $m=35$, $C=3$ に対して G.C. Campbell の計算結果より、 $y=1.946^*$ となり、 $AOQL=0.05$ となる。

自主検査が上の要領で実施されたロットの不合格欠陥率は AOQL をこえないから受取検査としては逆に $AOQL=0.05$ となるように実施すれば、自主検査で保証された品質の確認ができることになる。このとき抜取検査は (3) 式より以下のようになる。

$$C=1 \text{ の場合, } m=17,$$

$$C=2 \text{ の場合, } m=25$$

$$* \quad y = x \sum_{r=0}^C \frac{e^{-x} x^r}{r!}$$

$$x = p_L \cdot n$$

$$p_L = p_A \text{ の最大値}$$

$$p_A = \frac{p \cdot L(p) \cdot (N-m)}{N} = AOQ; \text{ 平均出検品質}$$

$$L(p); \text{ 不合格率 } p \text{ のロットが合格する確率}$$

N ; ロットの大きさ

m ; 試料数

C ; 合格判定個数

p ; ロットの不合格(欠陥)率

一方、建築における他の採取検査の利用は鉄筋のガス圧接部の破壊検査に利用されている。これは圧接部のロットの大きさ200に対して $n=5$ 、 $C=0$ で実施している。またサンフランシスコ市のビルディングコードでは剛接合の鋼溶接部には全数検査を原則として要求しているが、設計者の同意によって採取検査を認められている。この場合、溶接工別に $n=40$ として不合格率が5%以下($C=2$)ならば全体の検査率を25%にして良いとしている。

以上で採取検査に対する場合の筆者らの考えを示したが、自主検査においては製作工程のなかで適切な採取方法も他に考えられるだろうし、またここで想定した数値自体は議論の余地が十分ある。現状では管理が十分でない製作工場の自主検査は不合格になる確率がたかく全数検査になるケースが多い。

6. まとめ

一般の建築鉄骨の工場溶接部を対象に、欠陥(幾何学的なもの)検査を超音波探傷法によって実施し、管理状態を調査した。その結果、製作工場により溶接部の不合格欠陥率に大きな相異があり、また製作工場の自主検査結果と受取検査結果が著しく異なる結果が得られた。このことは溶接検査、いかなると品質保証ということに対して、設計監理者、製作工場が容易に考えているためと考えられる。構造物の安全確保という立場にたてば、検査規程が定められたのを機会に、建築構造物の溶接検査をいかに生産ラインに導入しその管理を行うかという問題、すなわち広く生産者、消費者を通じて規程の運用が真剣に検討されねばならない。溶接検査による管理を強化することは見掛け上の生産性を低下させるかも知れないが、あるレベルの検査体制を早急に確立する必要がある。一方、調査結果によれば欠陥溶接は初歩的なものが多く、検査以前に注意すれば解決するものが少くなく、関係者の溶接欠陥に対する再認識が要求される。

現状を考慮して、必要と思われる自主検査、受取検査の品質レベルを著者らの立場にたって考察し採取検査についてのべたが、ここで論じていない現生産体制下での検査費用の問題をはじめ、構造物全体としての信頼性の観点から要求される品質レベルなど多くの問題が残されている。