

高層ビル鉄骨の溶接設計と施工

株式会社 大林組設計部 ○木田幸夫 高木正敏 黒木照夫

1. 序章

最近の構造設計は計算手法が精緻となるに伴ない、やゝもすると数学計算が主体であるかのような錯覚に、設計者自身がとらわれることがある。構造計算は構造物を数式モデルに置換することから始められる。設計者は構造物（実体）と数式モデル（写像）とのずれについて認識をもった上で計算結果を評価しなければならない。別の角度から見直すことも場合によれば必要とされるであろう。設計しようとする構造をイメージとして抱いたときから現場で施工が完了するまで、統一した意志の中で育み創りあげることが設計であり、それは構造物を生でみつめることによってなされねばならない。

施工は設計の意志にできるだけ忠実にそって行なわれるべきであるが、同時に設計は施工の実態を十分にふまえることが必要である。ここに高層ビル鉄骨の溶接について、設計者の立場から二三の問題をのべてみたい。具体例としては、先年当社で設計施工を行なった「大阪大林ビル」の場合をあげることにする。

我々が扱う素材としての鋼は、ロール方向とそれに直角な方向で異方性をもっているし、化学成分もある巾の中にばらついているので均質であると考えすることはできない。溶接方法も種々あるが、いづれにしても手作業によらねばならぬ部分が残されているので、作業員個々のモラルと技術に期待する所が大きい。当然のこととして製品の品質にばらつきができる。溶接部の力学的性能の巾が設計者の期待するものと重なりうるかどうかが問題である。もう少し詳しく分析すれば、次のようなことになるであろう。

1) 設計者として要求する力学的性能は何であるか、それは必然性があるのかをできるだけ煮つめてみる。

2) 通常程度の溶接作業を行なったとして、溶接部の力学的性能が設計者の要求に合致できる確度を高めるために必要な溶接設計上の要素は何か、それぞれについて必要限度を定量的にとらえる。

3) 製品の安全性を確認するため、非破壊試験の結果と要求される力学的性能との関係を結びつける必要がある。

上にあげた各項目はそれぞれ関連しあっている。設計者は技術的見地と経済的見地をあわせて妥当と思われる判断をしなければならない。妥当な判断とは設計者に課せられた古くてまた新しい課題である。

2. 溶接部の性能評価

高層鉄骨架構の弾塑性応答解析に於いて、塑性率に基づいた設計評価がなされているが、架構の変形性能と柱―梁の溶接接合部分の変形を直接関連づけて論じているものは見当たらないようである。

このような観点から、本章では梁端部に生じた塑性関節が要求される回転性能を発揮した時、梁端部の溶接接合部分は何の程度の歪レベルを経験するか、設計者として要求する力学的性能を「伸び」の点から評価しようとするものである。

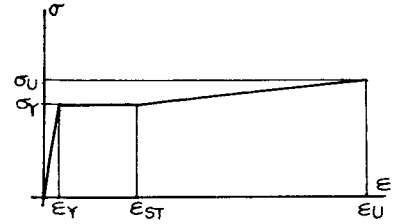
溶接部分の最大歪の概算

柱・梁共に SM50A 材とし、各材料定数は下記の通り。

$$E = 2100 \text{ t/cm}^2, \quad F = 33.3 \text{ t/cm}^2, \quad \sigma_Y = 3.5 \text{ t/cm}^2$$

$$\sigma_u = 5.0 \text{ t/cm}^2, \quad \epsilon_Y = 1.67 \times 10^{-3}$$

$$\epsilon_{ST} = 1.5 \times 10^{-2}, \quad \epsilon_u = 6.0 \times 10^{-2}$$



a) 解析モデル

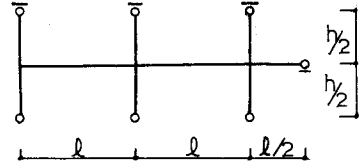
無限均等ラーメンの一般階モデルとして右記のモデルを用いた。部材は下記の通り。

柱 H-428×407×20×35

梁 BH-700×200×12×22

$$\ell = 9.0 \text{ M}$$

$$h = 3.8 \text{ M}$$



b) 解析

上記モデルについて水平力-変位関係を単純塑性理論に基づいて計算した。このモデルは梁降伏先行型で最初の塑性ヒンジが形成された時の水平変位を δ_0 とし、塑性率 μ は次式で定義されるものとする。

$$\mu = \delta / \delta_0 \quad (1)$$

ここで、 $\mu = 3$ と $\mu = 5$ の場合について最大塑性ヒンジ回転量を求めると下式を得る。

$$\theta / \mu = 3 = 4.28 \times 10^{-2} \text{ rad} \quad \theta / \mu = 5 = 6.17 \times 10^{-2} \text{ rad} \quad (2)$$

c) 片持梁の塑性曲げ

塑性ヒンジ位置に於る歪と回転角の関係を求めるために解析モデルに用いた断面形を有する材長 4.5M の片持梁を考えモーメント・曲率関係を求めた。

$$M = f\left(\frac{1}{\eta}, \eta^2\right) = M_E \left(1 - \frac{x}{\ell}\right) \quad M_E; \text{端部モーメント} \quad (3)$$

$$\phi = \epsilon_Y / \eta \quad (4)$$

(2), (3) 式から

$$x = g(\phi) \quad \phi = g^{-1}(x) \quad (5)$$

$$\theta = \int_0^s \phi dx = \int_0^s g^{-1}(x) dx \quad (6)$$

ここに η ; 断面の降伏領域を示すパラメータ ϕ ; 曲率 S ; 材長方向の塑性化した長さ。

b) で求めた θ を (6) 式と等置し (7) 式を用いて梁端部最外縁繊維の最大歪を計算した。なお計算は関数 $g^{-1}(x)$ が解析的に求まらないため図上近似計算法を用いた。

$$\epsilon_{\text{MAX}} = (H/\eta) \cdot \epsilon_Y \quad (7)$$

$$\epsilon_{\text{MAX}} / \mu = 3 = 22.0 \epsilon_Y \quad \epsilon_{\text{MAX}} / \mu = 5 = 26.0 \epsilon_Y \quad (8)$$

d) 考察

上記の算定は非常に簡略化された概算で柱軸力の存在による柱全塑性モーメントの低下、P-△効果の影響、パネルゾーンの変形、及び剪断降伏などは考慮されていない。また(c)の解析は準静的比例载荷であるが繰返し载荷による材料特性の変化及び疲労なども考慮されねばならない。これ等を考慮した有限要素法による材料及び幾何学的非線型問題として詳細な解析を行うことも可能であるが溶接部の変形性能の検討には弾性限変形の30倍程度を想定して大過ないと思われる。

3. 鋼材の選定と溶接方法の決定

50キロ鋼としてはSM50A材が最も一般的であり、通常問題ないとされている。しかし溶接部の性能とくに伸び率という点に注目し、またもっとも有害な欠陥として「割れ」を考えると炭素当量を規定した方がよい。鉄鋼メーカーから比較的容易に供給されうる炭素当量の限界は0.43%程度であることを確かめ、この値によった。

溶接方法は溶接部の良否をきめる重要なポイントとなる。各種の溶接性試験と継手性能試験を行い、その結果から実施要項をきめることとした。行なった試験は次のとおりである。

a) 溶接性試験

- 1. テーパー硬度試験
- 2. 斜めY型溶接割れ試験
- 3. 縦ビード曲げ試験

b) 溶接継手性能試験

- 1. 継手引張試験 JIS Z3121(1号)
- 2. 継手側曲げ試験 JIS Z3122
- 3. 衝撃試験 JIS Z3112(4号)
- 4. 断面硬さ試験 JIS Z3101
- 5. 断面マクロ試験 JIS G0553

試験の結果の詳細は省略するが、概括的に次のことがいえる。

- 1) 手溶接は安定した性状を示している。
- 2) CO₂溶接は衝撃値でやや劣るが割れに対して優れている。
- 3) ノーガス溶接はOW-56Aによると衝撃値、伸び率で劣るがOW-56は良好である。

特に伸びの性能に関するデータを表-1に抄録する。これによれば前節で考察した局部塑性変形率に十分対応できる。

表-1

溶接方法種別		手溶接	CO ₂	ノーガス	ノーガス	ノーガス	母材
試験の種別		LB-52	MG-50	OW-56A	OW-56 3.2φ	OW-56 2.4φ	
ビード曲げ 曲げ角度から表面伸び 率に換算した値(%)	JIS t=22	23%	23	10.8	—	—	
	JIS t=40	21.4	23	10.2	23	23	
	JIS t=70	20.9	23	14.1	—	—	
	多層 たて裏曲げ	23	—	23	23	—	
全溶着金属	降伏点 kg/m ²	49	—	45	46	41	42
	引張強さ kg/m ²	57	—	61	55	54	54
	伸び %	31	—	25	29	30	28
	絞り %	75	—	51	61	57	64

4. 溶接部の欠陥と性能および検査

従来、溶接部の非破壊検査は主に放射線透過試験によって行なわれていたが、最近、日本非破壊検査協会および日本建築学会から超音波探傷検査規準が制定されたことにより、この試験方法による検査が広く利用されているのが実状である。しかし、この試験方法では人工欠陥（NDI-STB-A 2の4φ×4）と自然欠陥との対応関係が必ずしも明確でなく、欠陥の種類、大きさおよび長さなどを判別することは非常に困難である。またこれらの欠陥の位置と欠陥の程度によって、継手強度がどのような影響を受けるかを明確にすることも極めて困難である。

本実験では、これらの問題をもっとも実用的な立場から、等級に分類された溶接欠陥とその強度との関係を疲労試験によって求め、一方、人工欠陥と自然欠陥との対応関係、欠陥検出レベルおよび欠陥指示長さの求め方について検討を加えたものである。

(a) 溶接欠陥と疲労試験

供試体はSM50Aの鋼材を用い図-1に示すような柱-梁仕口部に当る十字継手とした。

溶接は低水素系50kg/mm²クラスの溶接棒を用い、溶接部に欠陥が含まれるように配慮した。

供試体の溶接欠陥は、超音波探傷試験および放射線透過試験で欠陥を確認の上、それぞれの規格に

従って等級分類を行なった。疲労試験は、下限負荷応力を3.4kg/mm²とした荷重制御片振引張疲れ試験で、試験機はアムスラータイプのものを使用し、600 cycle/minの繰返し速度で行なった。図-2に実験結果（ σ -N線図）を示す。図-2は超音波探傷試験で等級分類したものを示している。各直線

は、各々の実験値から最小二乗法で求めたものであり、破線は1級クラスの95%信頼強さを示している。図-2でも明らかなように、等級が悪くなる程、強さは低くなる傾向にある。表-2には、10⁵回および10⁶回における平均強さとバラツキの程度を示している。1級に対して2級の平均強さの低下は僅かであるが、そのバラツキの程度は著しく大きい。

以上の実験は、非破壊試験と

疲労試験との対応についての一つのアプローチに過ぎないが、超音波探傷試験でもっともシビアに検査の対象となるルート

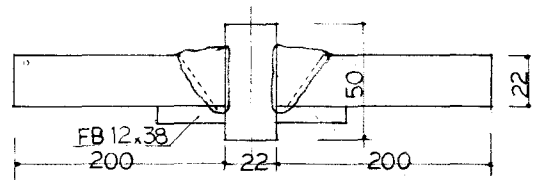


図-1 供試体

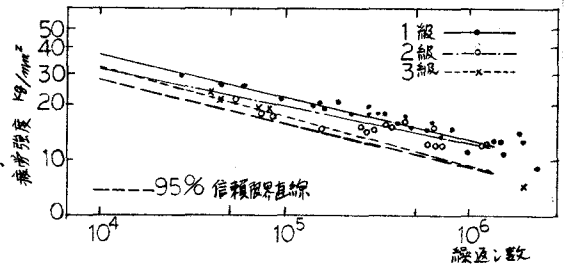


図-2 溶接欠換と疲労強度

表-2 疲労強度と信頼限界

等級	10 ⁵ サイクル			10 ⁶ サイクル		
	平均強度	標準偏差	95%信頼強度	平均強度	標準偏差	95%信頼強度
1級	21.5 kg/mm ²	0.0704	16.3 kg/mm ²	12.7 kg/mm ²	0.0766	9.4 kg/mm ²
2級	19.4	0.1378	11.1	12.1	0.1510	6.5
3級	17.4	0.1151	10.4	9.4	0.1276	5.3

部の割れや、溶込み不足などの溶接欠陥が、強度上もっとも影響を与えることは、応力集中、クラック伝播のことも考え合せると明らかであるが、検査対象として考えなければならない溶接欠陥の種類、形状および位置についても、この点を考慮すべきであろう。

(b) 人工欠陥と自然欠陥との対応関係

図-3、図-4に示す溶接線方向にのびた欠陥を有する供試体を作成し、探触子4B8×9A4.5および4B8×9A70の2種類で探傷した結果を図-5、図-6に示す。欠陥寸法は、スラグ巻込みの場合は超音波の進行方向から見た見込み巾、割れの場合は、深さで表わした。

探触子を溶接線方向に移動させると一つの連続した欠陥でも、そのエコー高さは著しく変化する。このときの最大エコーと、もっとも頻度の高いエコーについて整理したのが、図-5、図-6であり、欠陥寸法が大きくなっても必ずしもエコー高さは大きくならない。本実験では、多くのエコーがB線以下(この領域は欠陥評価の対象とされていない)で

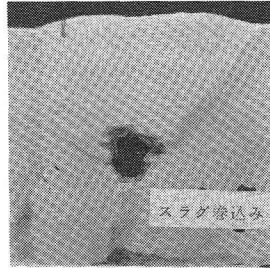


図-3 スラグ巻込み

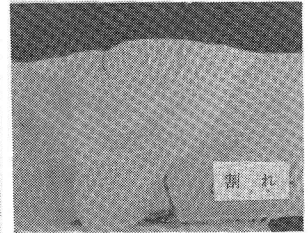


図-4 割れ

検出されていることから、欠陥検出レベルとして、NDI-STB-A2の4φ×4のエコー高さの1/4(-12dB)の高さに選ぶと欠陥の見落としが少ないといえる。

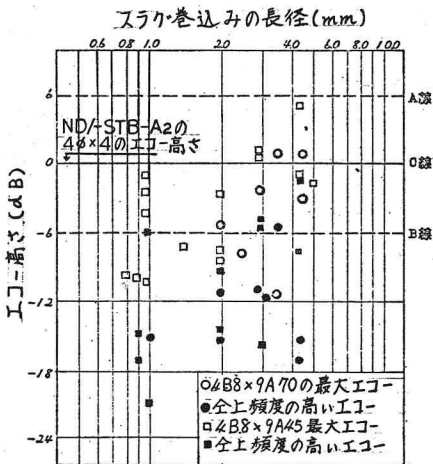


図-5 スラグ巻込みとエコー高さの関係

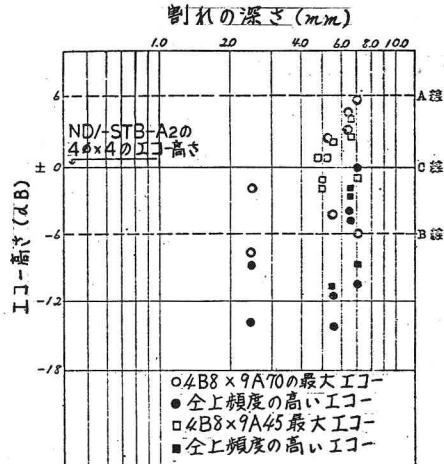


図-6 割れの深さとエコー高さの関係

(c) 欠陥指示長さの求め方

NDIS-2404で規定された欠陥指示長さの求め方では、図-7に示すように一般に過小評価する傾向がある。欠陥指示長さを求めるには、図-8に示すようにエコー高さがその最大値の1/4(-12dB)をこえる範囲の探触子の移動距離を測定する方法で求めたものが図-9で、欠陥の実長にもっとも近い値が得られた。

実際の検査に於いては、図-10に示すC線より12dB低い $B/2$ 線を設け、この $B/2$ 線をこえる範囲の探触子の移動距離を測定すれば、図-11に示すように結果的には-12dB法と大差なく、検査能率もよく、欠陥の見落としも少ない。現在行なわれている精密探傷の殆んどは、手動探傷であり、寸法測定はスケールによって簡単に行なわれているのが現状で、検査技術者の個人差が生じ、欠陥エコーの記録の仕方によっては、検査結果が大きく異なることがある。そこで個人差が少なく、しかも記録が

容易で再現性のある精密探傷を行なうには、図-12に示すような探傷用治具を使用すると便利である。

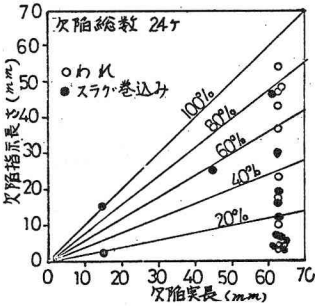


図-7 NDISによる方法

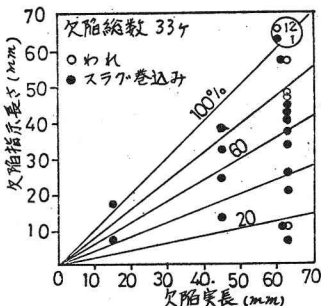


図-9 -12dB法

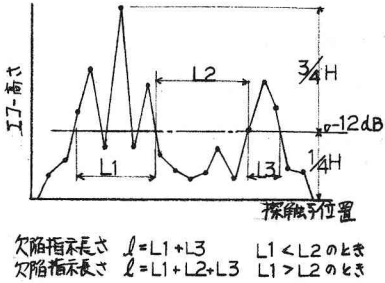


図-8 欠陥指示長さの求め方

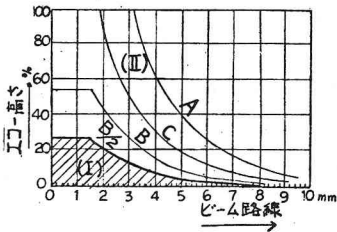


図-10 欠陥検出レベル

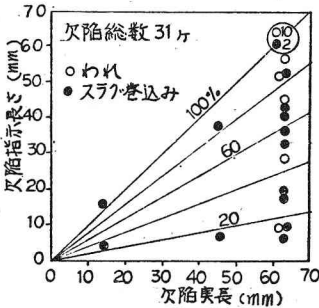


図-11 B/2線による方法

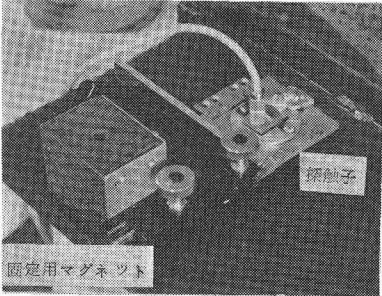


図-12 探傷用治具

5. 大阪大林ビルの溶接設計

BOX柱は図-13に示すように工作上の検討の結果、柱貫通タイプとした。BOX柱のダイヤフラムの溶接は、詳細③および④に示す方法によった。

梁仕口となる柱材のコーナー部分は、詳細⑤に示すように材厚に応じて溶接量を少なくすること、熱による歪、変形を少なくするための開先形状とした。

梁仕口は、直接柱に現場溶接とし、現場溶接における開先形状および溶接条件は表-3に示す。

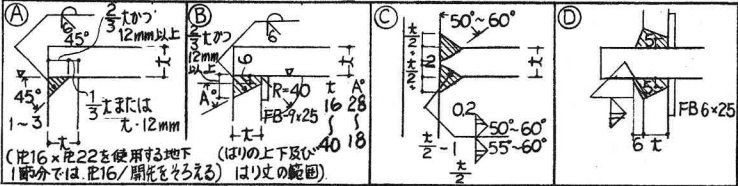
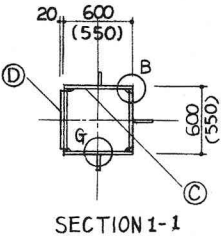
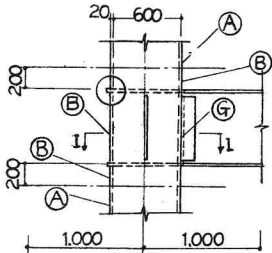


図-13 BOX柱の詳細

表一 3 現場溶接仕様

当ビルは鉄骨総重量4600屯、部材数約4500ピース、現場溶接長約4700m(6%換算)である。鉄骨製作についての検査は、品質検査と製品検査に分け、前者は製作者の責任において検査を実施し、後者は、受入側が独自に実施した。

溶接部検査は、工場溶接と現場溶接について、その検査作業を非破壊検査㈱に委託し、検査個所の決定、結果の判定は工事管理担当者が協議の上行なった。

検査方法としては、超音波探傷試験を中心に、放射線透過試験 (Ir192)

染色浸透探傷および磁粉探傷試験など適宜併用した。溶接検査箇所は表-4の如く、一応の抜取基準として実施し、検査結果および工事の進捗に応じて適宜増減した。

実際には検査結果によるフィードバックや、鉄骨業者間取合部の抜取率の引上げ、また、当ビルの構造計画上のキーポイントであるクロスストラックチェアーを形成する、16階の大形ばりの全数検査を行なった。従って抜

表-4 工場、現場溶接部の抜取率

表-4 工場、現場溶接部の抜取率

	検査方法	検査部位	採取率	備考	
工場溶接部	放射線透過検査	BOX柱板突合せ	25%	鉄骨業者の責任において検査	
		H型鋼柱突合せ	25%		
		大梁フランジ突合せ	10%		
		16階大型はり突合せ	25%		
		耐震壁および16階大型はり板突合せ	10%		
	超音波斜角探傷検査	BOX柱仕口部	全て	5%	放射線透過検査阿蘇外の丁型突合せおよび隅肉溶接部
		柱はり仕口部			
		16階大型はり隅肉			
		地下トラス仕口部			
		耐震壁開口補強部			
現場溶接部	放射線透過検査	耐震壁接合部	0.25%	溶接長さ30cm以下箇所として各階4ヶ所	
	超音波斜角探傷検査	柱-柱接合部	 各階ごとに上記のサイクルで増減	10%で各階10ヶ所	
		柱-はり接合部	 各階ごとに上記のサイクルで増減	10%で各階15ヶ所	

検査規準はNDIS-2404を参考に前節の実験結果をもとに、当ビルの検査規準を作成し、それに基づいて検査を行ない合否判定規準はNDIS-2404に準じ、欠陥指示長さと溶接部におけ

る欠陥分布状態および使用条件等を考慮の上、表－６の規準により補正の要否を決定し、明らかに割れと判断される欠陥はすべて補修とした。

超音波探傷検査結果を工場溶接、現場溶接に区分して集計したのが表－７、表－８である。現場溶接部の品質が工場溶接部に比べて優れている。これは溶接作業前、中、後の作業検査を溶接工自身の責任で行なわせ、記録させた。さらに鉄骨業者の検査員に自主管理の立場からチェックさせた上で、受入側がチェックする管理体制をとったためであろう。

一方工場溶接部については、鉄骨業者自身が品質検査としての管理体制はとっていても、個々の溶接作業に対する指示の徹底、検査結果のフィードバックがうまくいかなかった場合があったと考えられる。

表－５ 現場溶接部検査箇所数集計

	柱－はり溶接部		柱－柱溶接部		合計
			BOX柱	H柱	
全箇所数	5260		704	216	6180
検査数	(461)970		(78)185	(27)85	(566)1240
抜取率(%)	(8.8)18.4		(11.1)26.3	(12.5)39.3	(9.2)20.0

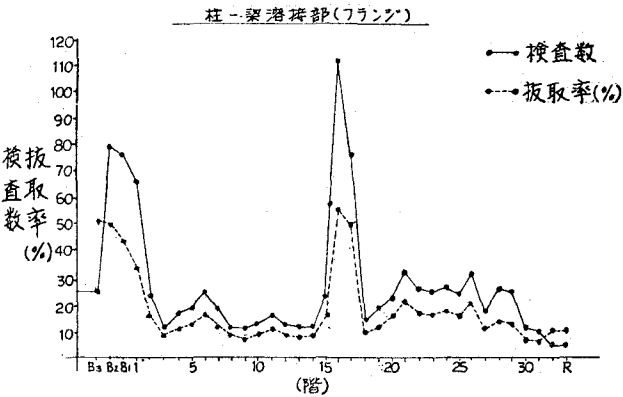
()内は当初予定

表－７ 工場溶接の欠陥率

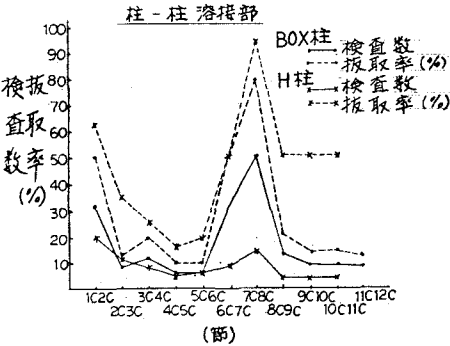
	(m)		
	フランジ	梁仕口部柱の完全溶接部	タイヤワーム
全探傷長さ(L)	60,892	126,630	60,268
検出された欠陥指示長さ(L)	4,474	12,663	1,691
欠陥率 $\frac{L}{L}$	7.3%	10%	2.8%
			7.598%

表－８ 現場溶接の欠陥率

	(m)		
	柱－梁仕口	柱－柱継手	大梁16階
全探傷長さ(L)	173,158	137,348	29,358
検出された欠陥指示長さ(L)	4,409	1,451	1,451
欠陥率 $\frac{L}{L}$	2.55%	1.06%	4.9%
			2.15%



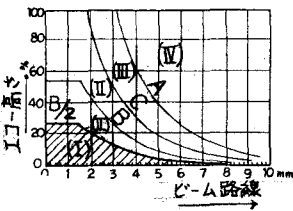
図－１４ 検査数と抜取率（柱－梁）



図－１５ 検査数と抜取率（柱－柱）

表－６ 補修要否の判定基準

最高エコー高さ	補修の要否
領域－Ⅰ	補修を要しない。
領域－Ⅱ	欠陥長さか板厚の1/3以上の場合は補修の要否を検討する。
領域－Ⅲ	
領域－Ⅳ	補修を要する。



図－１６ エコー高さの領域