

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol.20 (1988) No.4

超高層ビル「深せん発展中心大厦」における極厚鉄骨の工場製作と現場施工技術

Fabrication and Erection Technique of Extremely Heavy Steel Structure for Highrise Building, Shenzhen Development Center, China

永易 正光(Masamitsu Nagayasu) 太田 克也(Katsuya Ohta) 赤秀 公造(Kohzo Akahide) 日根野 孝之(Takayuki Hineno) 上月 孝之(Takayuki Kohzuki) 高井 正行(Masayuki Takai)

要旨：

中国に建設した超高層鉄骨ビル「深せん発展中心大厦」では、最大板厚 130mm の極厚部材が用いられた。高度な溶接技術が求められる当該工事について溶接実験を行い、実工事に適用した。得られた結果は以下のとおりである。(1)工場製作するボックス断面柱の梁貫通型仕口部に、高能率化を図った 2 電極消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接工法を開発適用し、大幅な短工期化を図った。(2)現場施工においては、あらかじめ実大モデルによる溶接施工実験を行い、鉄骨建方精度を確保し、かつ、健全な現場接合部をうる溶接施工方法を確立、適用した。(3)この結果、鉄骨工事は順調に進められ、1987 年 5 月、無事完了した。

Synopsis：

Heavy steel members up to 130-mm thick were used for a highrise building called "Shenzhen Development Center" constructed in China. As it was made necessary to apply high welding techniques to the fabrication and field welding of such heavy steels, weld experiments were performed and the results were applied to the construction of this project. The results obtained are as follows: (1) Newly developed one-pass method of two-electrode, consumable-nozzle electro-slag(CES) welding was adopted to the fabrication of girder-to-column connection of the box-section columns, so as to shorten the fabrication period. (2) Before starting the erection work, welding procedure tests using real-size models of field connections were performed in order to secure the erection accuracy and to establish such welding procedure specifications for obtaining sound site welding. (3) Thus, without any trouble, all steel works were smoothly completed in May 1987.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

超高層ビル「深圳中心発展大厦」における 極厚鉄骨の工場製作と現場施工技術*

川崎製鉄技報
20 (1988) 4, 330-336

Fabrication and Erection Technique of Extremely Heavy Steel Structure for Highrise Building, Shenzhen Development Center, China



永易 正光
Masamitsu Nagayasu
エンジニアリング事業
部 研究開発センター
施工研究室 主任研究
員(課長)



太田 克也
Katsuya Ohta
エンジニアリング事業
部 研究開発センター
施工研究室



赤秀 公造
Kohzo Akahide
エンジニアリング事業
部 研究開発センター
施工研究室 室長(部
長)・工博



日根野 孝之
Takayuki Hineno
エンジニアリング事業
部 建築技術室 主査
(課長)



上月 孝之
Takayuki Kohzaki
エンジニアリング事業
部 建築技術部 建築技
術室 主査(課長)



高井 正行
Masayuki Takai
エンジニアリング事業
部 建築技術部 建築技
術室 主査(掛長)

1 はじめに

建築物の高層化に伴い、鉄骨主部材の高張力化、極厚化が進んでいる。とくに後者については、国内では板厚 100 mm 程度まで使用され始めているが、海外とりわけ東南アジアでは、すでにそれを超える鉄骨ビルが建設されている。このような鉄骨の極厚化は溶接性に優れた鋼材の適用はもちろんのこと、溶接施工技術やその管理技術の高度化が相まって可能となる。

当社エンジニアリング事業部が中華人民共和国で建設に参画した超高層ビル「深圳発展中心大厦(大厦:ビル)」の場合では、柱材にボックス断面の板厚 64~130 mm、また梁材に同断面 75~127 mm の極厚材が用いられた。また、これら主部材の現場接合は、高力ボ

要旨

中国に建設した超高層鉄骨ビル「深圳発展中心大厦」では、最大板厚 130 mm の極厚部材が用いられた。高度な溶接技術が求められる当該工事について溶接実験を行い、実工事に適用した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 工場製作するボックス断面柱の梁貫通型仕口部に、高能率化を図った 2 電極消耗ノズル式エレクトロスラグ溶接工法を開発適用し、大幅な短工期化を図った。
- (2) 現場施工においては、あらかじめ実大モデルによる溶接施工実験を行い、鉄骨建方精度を確保し、かつ、健全な現場接合部をうる溶接施工方法を確立、適用した。
- (3) この結果、鉄骨工事は順調に進められ、1987 年 5 月、無事完了した。

Synopsis:

Heavy steel members up to 130-mm thick were used for a highrise building called "Shenzhen Development Center" constructed in China. As it was made necessary to apply high welding techniques to the fabrication and field welding of such heavy steels, weld experiments were performed and the results were applied to the construction of this project. The results obtained are as follows:

- (1) Newly developed one-pass method of two-electrode, consumable-nozzle electro-slag (CES) welding was adopted to the fabrication of girder-to-column connection of the box-section columns, so as to shorten the fabrication period.
- (2) Before starting the erection work, welding procedure tests using real-size models of field connections were performed in order to secure the erection accuracy and to establish such welding procedure specifications for obtaining sound site welding.
- (3) Thus, without any trouble, all steel works were smoothly completed in May 1987.

ルトを用いることができないため、すべて溶接で接合された。このような例の少ない極厚材の鉄骨工事を進めるには、鉄骨部材の製作において膨大な溶接量となる工場溶接の工期短縮を図ること、一方、現場施工においては建方精度を確保しつつ、健全な現場接合部を確実にうる溶接施工方法を確立することが大きな技術課題であった。

当プロジェクトではこれらの課題に対して、鉄骨の工場製作で溶接量が集中している柱材の梁仕口接合部に、著しく高能率化を図っ

* 昭和63年7月28日原稿受付

た消耗ノズル式エレクトロスラグ (Two consumable nozzles electroslag—CES) 溶接工法を開発、適用した。また、現場施工については、柱と柱、梁と梁、柱と梁の接合の実大モデルによる溶接施工実験をつうじて、溶接変形の挙動や溶接内部欠陥の発生傾向を明らかにし、それに基づき適切な現場溶接施工方法と欠陥が生じた場合の補修方法を確立した。なお、これらの施工要領に従い実施した現場鉄骨工事は、超高层極厚鉄骨が初めての中国において、トラブルもなく1987年5月無事完了した。

本論文は超高层ビル「深圳発展中心大厦」で実施した極厚鉄骨の製作および現場施工について述べるものである。

2 工事概要

深圳発展中心大厦は香港に隣接する中華人民共和国広東省深圳市の深圳経済特別区に建設された。当該ビルは概要を Table 1 に示すように、地上高さ約160mで、鉄骨造としては現在中国一の高さを誇る円筒形の本格的超高层ビルである。Fig. 1 に基準階の平面を示すが、構造体は鉄筋コンクリート造の耐力壁部と鉄骨部で構成され、それらの剛性のバランスをとるため、耐力壁に対抗するようメインの鉄骨5本柱が扇状に配列されているのが当該ビルの構造的特

Table 1 Outline of Shenzhen Development Center Building

Client	Shen Han Enterprise LTD.
Basic design	CRS Corporation (U.S.A.)
Structural design	Watson Architectual & Engineering Designing Consultants
Constructor	China Construction 3rd Division 1st Company
Use	Hotel, office, exhibition hall, etc.
Floors	1B+41F, heliport (roof top)
Height	≒160 m
Structure	Steel frame+reinforced concrete load bearing wall
Steel frame weight	≒10 500 t
Structural steel specification	ASTM A572 Gr. 42, 50
Maximum plate thickness	Column 130 mm, girder 127 mm
Steel fabrication	Kawasaki Steel Corp. (Yokogawa Bridge Works LTD., Komai Bridge & Steel Engineering Inc., and Shikoku Iron Works Co., LTD.)

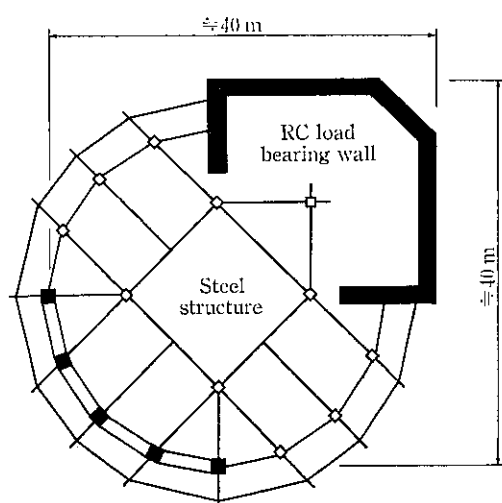


Fig. 1 Typical floor plan

徴である。このためメイン5本柱の柱材はボックス断面の最大板厚130mm、また、ラーメンを構成する梁材は同断面の最大板厚127mm (フランジ材) と、超極厚鋼が用いられている。これらの鋼種はASTM A572 Gr. 42およびGr. 50であり、設計規準としてAISC規格 (Specification for the Design, Fabrication and Erection of Structural Steel for Buildings) が、溶接にはAWS D1.1が適用されている。

3 極厚鉄骨の工場加工

鉄骨部材の工場製作はすべて日本国内で行った。工場加工で最も加工度が高く、技術を要する部材はボックス断面の柱製作であるが、この製作能率を上げるため、コーナーシームに深溶込みサブマージーク溶接 (KX法)、また、梁貫通型仕口部の接合にCES溶接の大入熱溶接法を適用した。なお、これらの溶接法の適用に際しては継手性能など各種技術データに基づき、これら継手の安全性を立証した。ここではCES溶接について述べる。

Fig. 2はCES溶接の適用箇所を示したもので、梁貫通型仕口部のためT継手となり、溶接の「のど厚」、すなわち、柱のスキンプレート厚は最大130mmとなる。CES溶接は2電極1パス法を採用することとし、その適正溶接条件を確立するため、開先形状や溶接条件をパラメータとする溶接実験を行った。その結果、得られた2電極CES法の溶接諸条件をTable 2に示すが、裏側には鋼製の当て金を、表面側には水冷式の銅当て金を使用した。また、開先内にはインサート材を取り付け、溶着させる溶接材料の節減、溶接速度の向上および溶接変形の防止を図っている。Table 3は当CES溶接継手部の機械的性能を示したものである。

また、実際の溶接施工では仕口部の継手拘束が極めて大きくなるため、当初、はさみ板となる梁フランジ材の板厚方向の開裂が危惧された。このため、仕口部をモデル化したFig. 3に示す供試体を用いて、CES溶接耐割れ性試験を行い、超音波探傷試験および断面マクロ試験で溶接部の健全性を詳細に調べたが、異常は認められなかった。Photo 1にこの断面マクロ例を示す。

Photo 2は、梁貫通型仕口部を当CES法で溶接接合している状

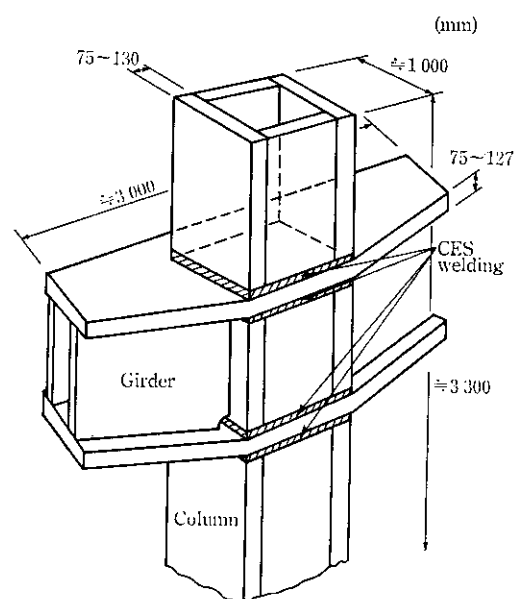
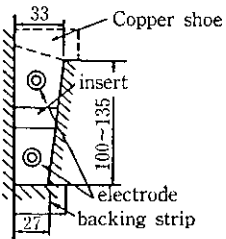


Fig. 2 Joints applied two consumable nozzles electro-slag (CES) welding

Table 2 Standard procedure specification of CES welding for column-girder connection

Joint detail (mm)	
Welding condition of both electrodes	
Welding current	430A~550A
Welding voltage	37V~40V
Wire	KW-50C, 3.2 mm ϕ
Consumable nozzle	KU-1 000, 12 mm ϕ
Flux	KF-100

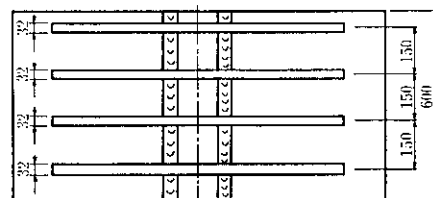
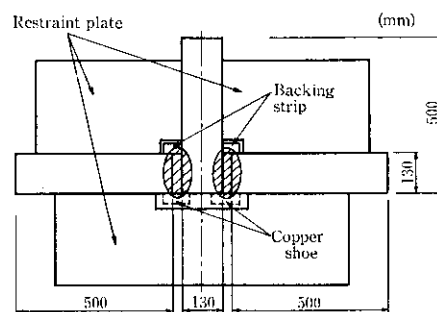


Fig. 3 Crack test specimen of CES welding

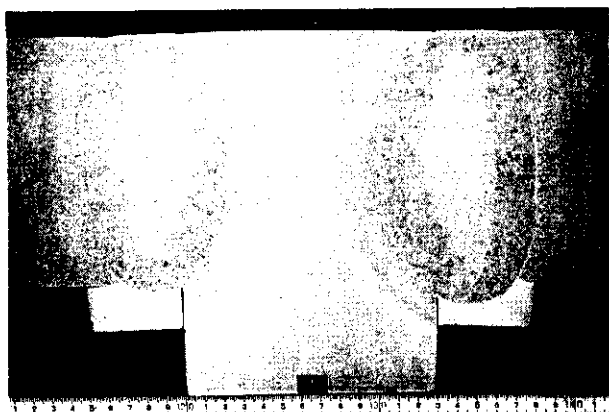


Photo 1 An example of macro-etch specimen of CES welding crack test

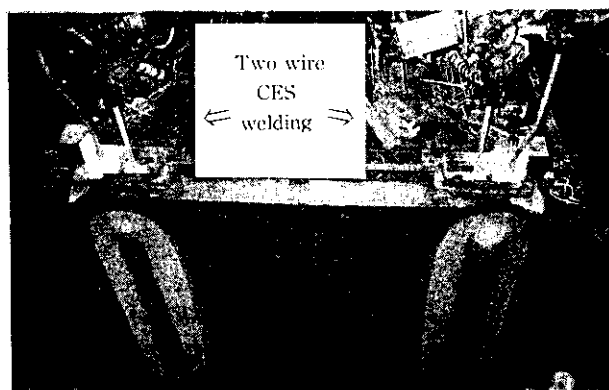


Photo 2 Two wire CES welding for column-to-girder connection

Table 3 Mechanical property of CES welded joint

Tension test for deposit metal*1			Tension test for welded butt joint*2		V-notch charpy impact test*3, $\sqrt{E_0}$ (J)			
YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	TS (MPa)	Location of fracture	Weld metal	Fusion line	HAZ	Base metal
451	590	26	495	base metal	79	45	56	115

*1 Test piece: JIS Z3111-A2

*2 Test piece: JIS Z3121-1

*3 Location: $t/4$ (Test piece: JIS Z2202-4)

況を示したもので、この適用により極厚鉄骨の工場加工能率を大幅に上げることができた。

4 極厚鉄骨の現場溶接施工

4.1 現場溶接施工実験

鉄骨部材の現場溶接接合は Fig. 4 に示す柱と柱、梁と梁、柱と梁の3種類の接合に大別される。それぞれの接合数を Table 4 に示すが、総数は1700箇所にもおよび、消費する溶接材料は約40tに達する。このため、ビル鉄骨の現場溶接において、中国では経験がほとんどないGMAW (シールドガス: CO_2) を全面的に採用し、効率化を図ることとした。

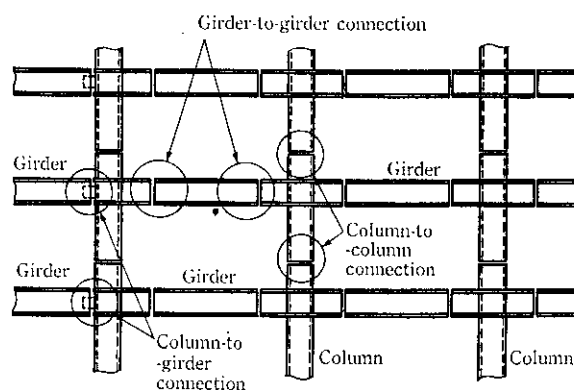


Fig. 4 Types of field connection

Table 4 Type and number of field connection

Connection	Shape of member	Steel grade	Plate thickness (mm)	Penetration*1	No. of field connection
Column to column	□, H H	A572 Gr. 42	64-130	FP or PP	268
		A572 Gr. 50	18.1-124.7	PP	111
Girder to girder	II, □ H	A572 Gr. 42	75, 127 (F)-75, 64 (W)	FP	128
		A572 Gr. 50	40-75	FP	32
Column to girder	H	A572 Gr. 50	13-43	FP	≒ 1 200

*1 FP: Full penetration

PP: Partial penetration

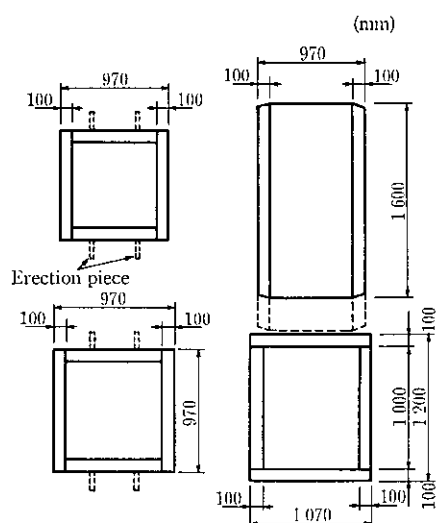


Fig. 5 Test specimen of column-to-column connection

しかし、対象板厚が130 mmにもおよぶ極厚材の鉄骨現場溶接工事の施工例はみられず、健全な接合部はもちろんのこと、高い建方精度を確保するためには、現場溶接施工方法を多面的に検討する必要がある。このため実施工に先立ち、ボックス断面の柱と柱、同断面の梁と梁の接合部を対象に、実大モデルによる現場溶接施工実験を行った。その内容は、(1) 施工方法の妥当性、健全性の総合的検証、(2) 極厚鉄骨の現場溶接で発生しやすい溶接欠陥の種類と位置の確認およびその防止策の確立、(3) 欠陥が発生した場合の補修溶接方法の確立、(4) 各接合部の溶接による変形量の把握と建方精度確保対策などである。各接合部の供試体を Fig. 5 と 6 に示すが、供試極厚鋼は実工事と同一規格の Table 5 に示すものである。なお、柱と梁の接合部についても実大溶接施工実験を行っているが、ここでは省略する。

設定した当現場溶接施工方法の要点を以下に示す。すなわち、柱と柱の接合では、

(1) 溶接作業は Fig. 7 に示す手順で行う。

(2) 溶接欠陥が発生しやすいルート部は、GMAW の溶接トーチ

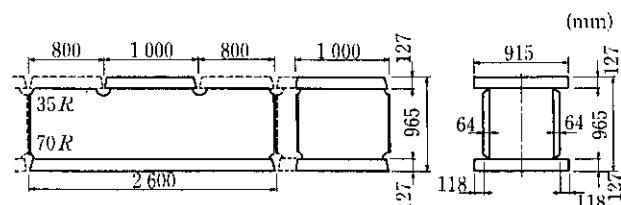


Fig. 6 Test specimen of girder-to-girder connection

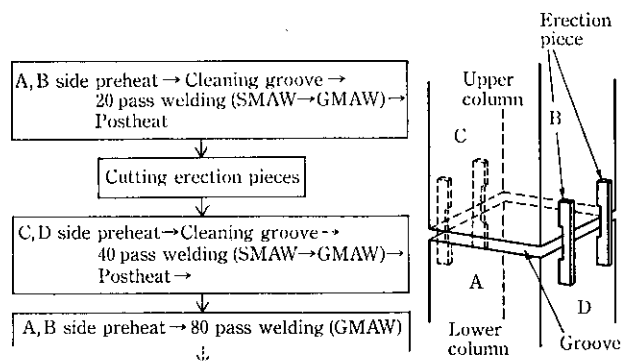


Fig. 7 Welding process of column-to-column connection

が開先内で自由にねらえるまで、SMAW で溶接 (3 層まで) する。

(3) 横向き姿勢で行う当接合部では、Photo 3 のごとく開先の上壁に沿って融合不良が生じやすい。これを防ぐため、各層の最終パス溶接では事前にスパッタやスラグなどを確実に除去する。

(4) 溶接ビードのつなぎ部はスラグの巻込みや融合不良を起こしやすいため、各層、各パスとも Fig. 8 のごとく、1 箇所集中させない。

(5) 欠陥が生じやすいボックス柱のコーナー部はアークを切ることなく回し溶接を行う。

(6) 柱の対称 2 面を溶接工 2 人で同時溶接し、柱の倒れ変形を防

Table 5 Test results of chemical composition and mechanical property of base metal

Specification	Plate thickness (mm)	Chemical composition (%)						Tension test			Notes
		C	Si	Mn	P	S	Nb	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	
ASTM A572 Gr. 42	100	0.13	0.34	1.26	0.017	0.005	0.012	333	493	36	□-column skin plate
	127	0.13	0.31	1.29	0.020	0.005	0.011	292	485	33	II-girder flange
	64	0.13	0.34	1.27	0.018	0.014	0.015	310	499	36	II-girder web
Requirement	>38.1	<0.21	0.15~0.40	<1.35	<0.04	<0.05	0.005~0.05	>289	>414	>20	Type-1

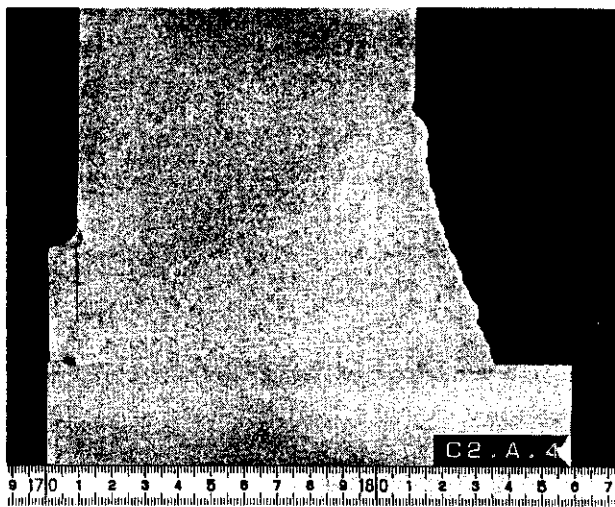


Photo 3 An example of lack of fusion at groove face of upper column

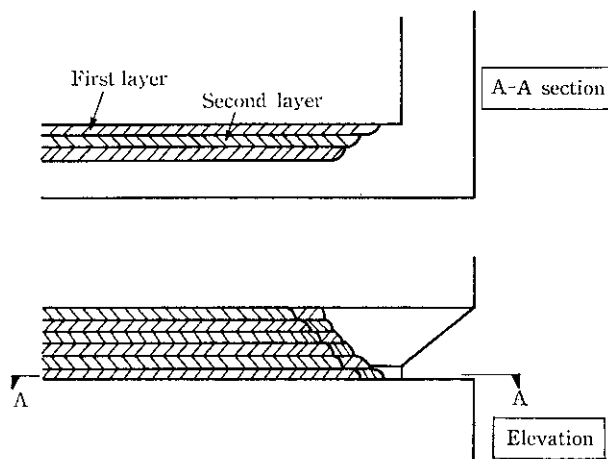


Fig. 8 Laying process of weld beads for column-to-column connection

止する。

- (7) 柱材軸方向の溶接縮み変形量として 2.5 mm を見込み (Fig. 9), 柱の工場製作時に余長をつける。

などである。

また、ボックス断面の梁と梁の接合では、

- (1) 接合は Fig. 10 に示す溶接順序で行う。
- (2) 下フランジの突合わせ継手に対しては、狭隘作業となるが、梁内から信頼性、効率とも優れた下向き溶接とする。
- (3) 溶接量の比較的小さいウェブの立向き突合わせおよびフィレットの上向き突合わせは確実性のある SMAW とする。
- (4) 一方、溶接量の多いフランジの下向き突合わせは能率のよい GMAW とするが、欠陥が生じやすいルート部では 3 層まで SMAW で溶接する。
- (5) 下フランジの溶接はボックス梁の内部と外部を別に行うとビードのつなぎ部に欠陥が集中するため、積層に段差を起こさないよう内外部で 2 人が同時溶接する (Photo 4)。
- (6) 主に上下フランジの溶接量の差によって生じる梁上下方向の大曲がり変形は 0.5 mm 程度である。一方水平方向の大曲がり変形に対しては、左右のウェブの突合わせ溶接を 2 人で同時に

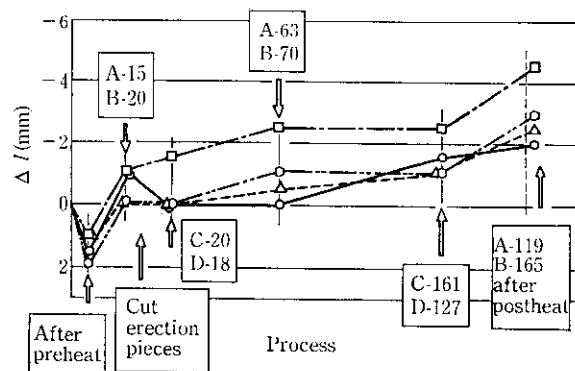
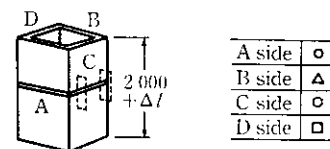


Fig. 9 Shrinkage Δl due to welding of column-to-column connection

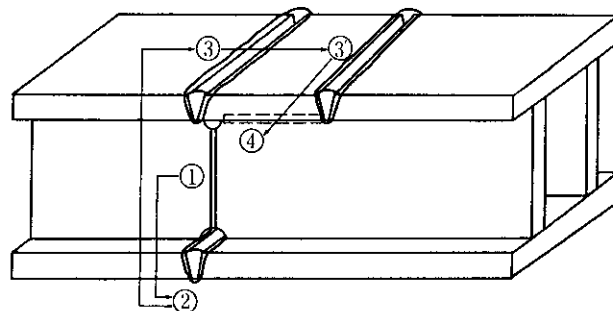


Fig. 10 Weld sequence of girder-to-girder connection

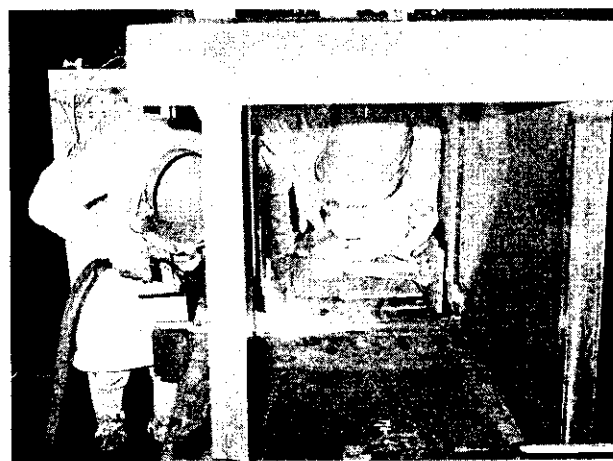


Photo 4 Girder lower flange welding

行うことによりほぼ防止できる。

- (7) 梁軸方向の溶接縮み変形量は約 3.5 mm であり、その半分は最初に行うウェブの突合わせ溶接で発生する (Fig. 11)。したがって、その量をあらかじめ見込み施工する。などである。

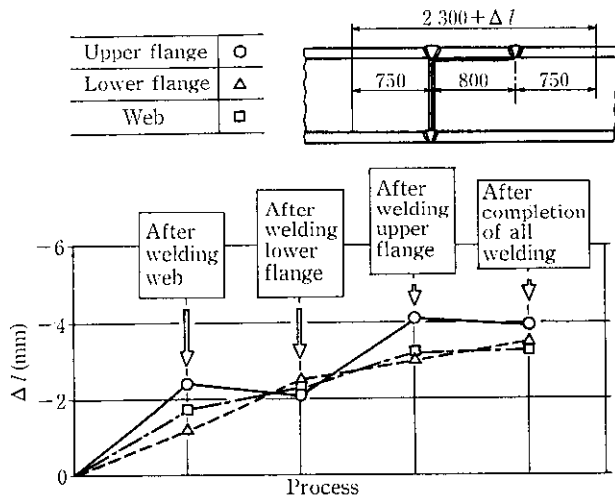


Fig. 11 Shrinkage due to welding of girder-to-girder connection

4.2 現場溶接の施工体制

今回の現場溶接では工程上、約 100 名の溶接工を必要とするが、中国ではビル鉄骨の現場溶接、しかも GMAW についてはその経験者がほとんどいない。このため、溶接技術者と選ばれた 10 名の溶接工を日本において教育、訓練した。さらに、その 10 名が指導者となり、中国において残りの溶接工の教育を実施し、GMAW 溶接技能者の確保を図った。

現場接合部の溶接作業は、溶接工 2 人による柱と柱の接合で約 55 h (板厚 130 mm, 溶接材料使用量約 250 kg/接合)、また溶接工 2 人によるボックス断面の梁と梁の接合が約 35 h (フランジ板厚 127 mm, 溶接材料使用量約 150 kg/接合) と、きわめて長時間となる。極厚鉄骨の現場溶接では、継手部の温度管理などの問題も含め、作業の中断は極力避ける必要があり、ここでは接合部が完全に溶接されるまで、昼夜の連続作業を行うこととした。このため、1 日 3 交替の施工体制をとり、各班を溶接管理者と溶接工 2 名、補助作業員 2 名、予熱工 4 名 (バス間温度の保持や雨などによる溶接中断時の保護) の計 9 名で構成した。

Photo 5 に柱と柱の接合部の現場溶接状況を示す。

4.3 現場接合部の施工順序と溶接変形対策

現場溶接では柱と柱の接合、梁と梁の接合の施工順序により、溶接変形を受ける鉄骨に発生する応力状態は変化する。通常、現場接合部の施工順序は、下階から上階へと、単調に進められていくが、この場合、梁と梁の接合の溶接による梁軸方向の縮み変形によって、すでに柱と柱の接合部が溶接されている下階の柱部材は、Fig. 12 (a) に示すように脚部に設計外の大きな応力が生じることになる。これに対し、柱と柱の溶接の前に上階の梁と梁の溶接接合を行うとすれば、Fig. 12 (b) のように柱の接合部は少なくともピン接合の状態であり、そのような応力はほとんど生じないことになる。このことから、ここでの現場溶接では極厚部材の構造物に溶接による附加応力を極力残留させないよう、各接合部の施工順序は後者の方法、すなわち、Fig. 13 に示すものを採用した。

現場溶接による鉄骨の変形は、柱と柱の接合による階高の縮みと、梁と梁の接合による梁間の縮みおよびこれに伴う柱の倒れが主なものである。前述の実大溶接実験結果に基づき、前者についてはあらかじめ 2 mm の余長をつけ柱を工場製作すること、現場での

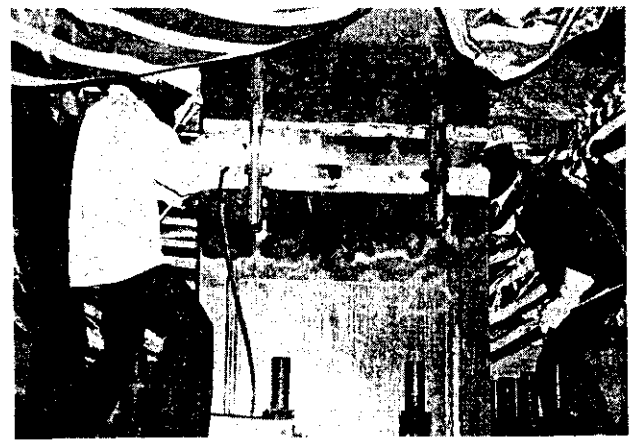


Photo 5 Field welding of column-to-column connection

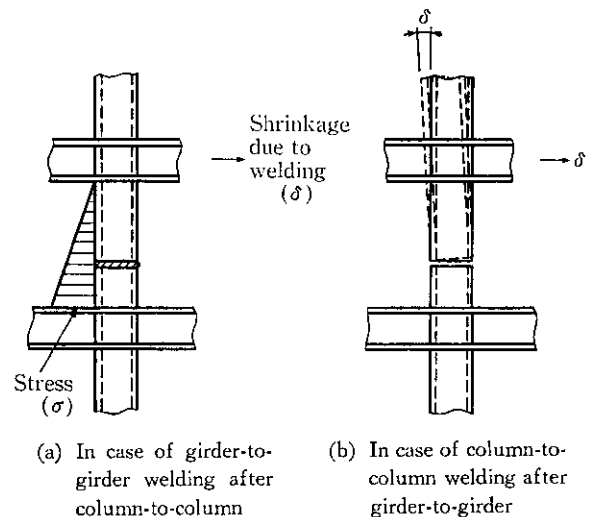


Fig. 12 Influence of difference in welding sequence on residual stress and incline of column

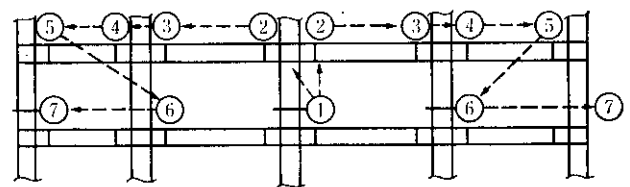


Fig. 13 Sequence of field connection

レベルの実測値をみながら必要に応じて、上柱の建方時にライナーを柱接合部にはめこみ、微調整することで対応した。後者については梁間 2 箇所の接合部のうち、最初の接合部の溶接縮みは Fig. 14 に示すごとく、片方の接合部の梁ウェブに設けた建方用のボルト穴をルーズホールにし、梁本体をすべらすことで、また後で行う接合部の溶接縮み変形は、建方時に設けた柱の逆倒れ変形で吸収させた。

Fig. 15 は現場溶接後における当該極厚鉄骨柱の倒れ変形測定結果である。鉄骨柱の倒れ変形は、梁軸方向の溶接縮みが集積する側柱 (C1A, C1B 柱) の 4 階部で大きく生じているが、それ以上の階では精度よく納まっている。これは 5 階の梁と梁の接合部から、ウェブの建方用ボルト穴のルーズホール化を採用したことにより、建方時に不十分であった柱の逆倒れが容易に確保できるようになったこと、また先行する片方の梁と梁の接合で生じる溶接縮みを、他方

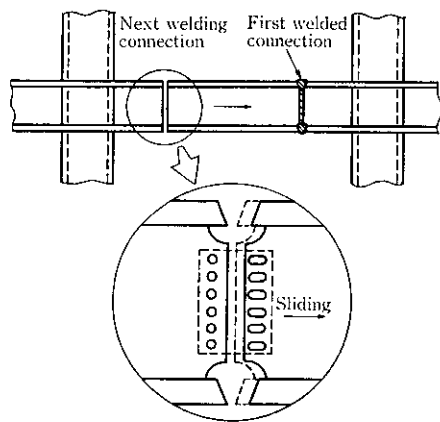


Fig. 14 Consideration to shrinkage of girder-to-girder connection due to welding

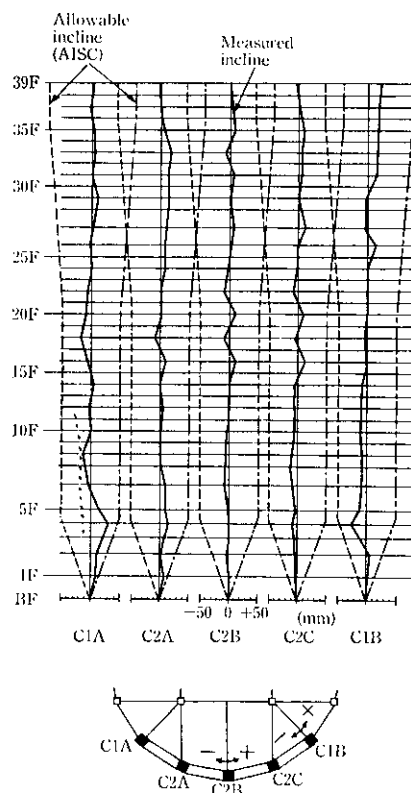


Fig. 15 Actual incline of column after welding

の接合部に設けたルーズホールのボルト穴が吸収し、柱の倒れ変形を最小限にとどめたこと、などによるものである。建方中の鉄骨外観を Photo 6 に示す。

5 おわりに

極厚部材を用いた超高層ビル「深圳発展中心大廈」の鉄骨工事について溶接実験を行い、その知見をもとに当該工事を施工した。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 工場製作では、ボックス断面柱のコーナーシームに深溶込み SAW (KX 法) を適用し、工場加工の高効率化を図った。
- (2) また、ボックス断面柱の梁貫通型仕口部に適用する 2 電極 1

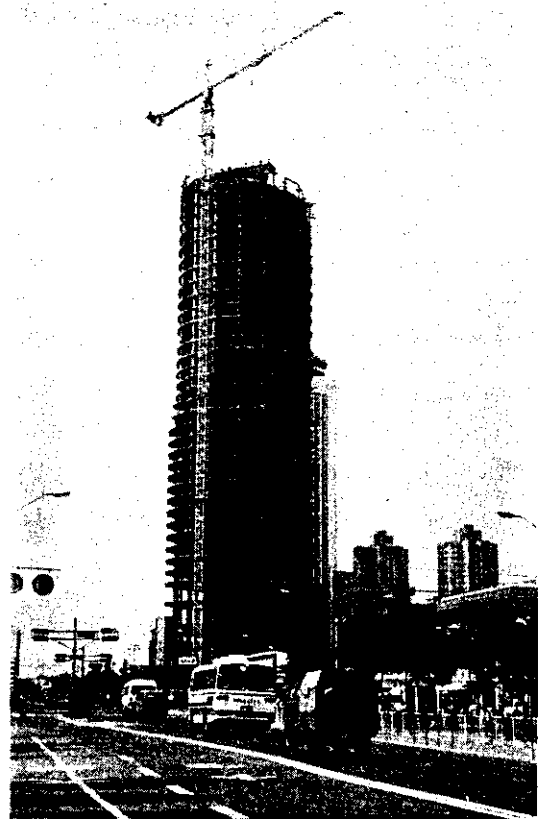


Photo 6 View of steel structure under construction

パス CES 溶接法を開発した。

- (3) 同溶接法による接合部の耐割れ性は良好であり、工場製作の大幅な工期短縮が可能となった。
- (4) 現場施工については、あらかじめ実大モデルによる柱と柱、梁と梁の接合部の溶接施工実験を行い、溶接欠陥の防止、欠陥補修方法、建方精度の確保などを目的とする施工方法を確立した。
- (5) 中国人の溶接技術者および溶接工を日本において教育・訓練し、施工方法に則した現場溶接施工体制を整えた。
- (6) 梁と梁の接合部の溶接を柱と柱の接合部に先行させることにより、部材に生じる残留応力を軽減させる施工順序を採用した。
- (7) 溶接実験結果に基づき工場製作時に部材に余長を設けること、現場測量結果に基づき柱と柱の接合部にライナーをはさみ込み調整することおよび梁と梁の接合部では建方用のウェブボルト穴をルーズホール化することなどにより、鉄骨建方精度は AISC 規格を十分に満足した。

本ビル鉄骨の現場施工においては、極厚鋼材の柱と柱および梁と梁の現場溶接、未経験の溶接工、中国と日本の合作といった多くの課題を抱えていたが、超音波探傷による溶接部検査、鉄骨の建方精度など何んら問題なく、1987 年 5 月無事鉄骨工事が完成した。これは工事関係者の溶接に対する深い理解のもとに成り得たものと確信する。

最後にあたり、実大モデルによる現場溶接施工実験の供試体製作に協力を頂いた株式会社横河橋梁製作所大阪工場、株式会社九州駒井鉄工所の関係諸氏に感謝の意を表します。