

阪神・淡路大震災による生田架道橋の災害報告

庄 俊明*1 中村 清孝*2
日野 春樹*3 川村 紘一*4
脇田 孝彦*5 寺岡 雅之*5

阪神・淡路大地震による生田架道橋の破壊は、既に土木学会等で災害調査され、従来経験した地震では想定されていなかった外力が作用し、鋼製橋脚が破断した例として示されている。1967年に架設された生田架道橋は、全長50mの3径間連続鋼桁を両端RC橋脚で、中央は遠心力鋼管柱を用いた門型ラーメン橋脚で支持する鉄道用架道橋である。大きな地震力を受け、鋼桁が西方端で1m北に移動、西方のラーメン橋脚が破断、東方は無事であった。

架道橋の破壊に至る詳しい解析や、実大実験による検討は困難であり、破断した鋼管の機械的性質の調査結果と、震災後の損傷状況から破壊概要を単純塑性理論によって耐力と変形の間係を推定、さらに、遠心力鋼管の材料特性について報告する。

1 緒言

土木学会等で既に報告されている、1995年1月17日の阪神・淡路大地震による建造物の被害調査報告では、橋脚の被害、特に鋼製橋脚に発生した災害例を座屈破壊や脆性破壊等に分類し、生田架道橋の損傷は従来の地震災害で経験しなかった、衝撃的な力が作用した脆性破壊例として示されている。本報告では、橋脚の構造概要、破断の状況、破断した鋼管の材料特性等の調査結果とそれらから推定される損傷過程について報告する。

2 遠心力鋼管を用いた建造物の被害状況

今回多大な被害を受けた兵庫県南部における遠心力鋼管の実績は多く、建造物の件数は267件、約46000ピース(铸造素管数)にのぼる。参考に激震地区であった三宮周辺での採用物件を図-1に示す。外壁等の非構造材に損傷をうけたものもあるが、生田架道橋を除けば柱本体に損傷を受けた報告はない。

3 架道橋の構造

生田架道橋は図-2に示すような全長50m、中央径間30mの3径間連続鋼桁を、両端はRC橋脚、中央は鋼管柱を用いた門型ラーメン橋脚で支持する鉄道用架道橋であり、1967年に架設された。側径間に比べ中央径間が長いいため両端支点上に上揚力が生じ、それを防止する目的でカウンターウェイトとしてコンクリートが鋼桁両端に充填されている。支承の種類は、固定、可動及びヒンジ支承であり、それぞれ4組で鋼桁を支えている。

4 損傷状況

(1) 部材の損傷

(a) 鋼管柱

三宮側と元町側の鋼管ラーメン橋脚の状況を写真-1に示す。三宮側(以下東方と言う)には損傷がないが、元町側(以下西方と言う)は梁との接合部近傍で両方の鋼管が破断している。遠心力鋼管柱(以下鋼管と略称する)は、製法の特徴から外径はモールドの形状どりに製造できるため、付録図-aに示すようにある程度モーメント勾配に応じた断面を形成し、応力集中を緩和するアール部を持った変断面柱であるので、破断は最も応力の集中する梁フランジ面から外径の約1/2離れた位置で生じている。

キーワード

橋脚破壊、遠心力鋼管

- *1 神戸高速鉄道(株)技術部
- *2 川崎重工業(株)橋梁技術部
- *3 川崎重工業(株)材料研究部
- *4 (株)クボタ鋼建材営業部
- *5 (株)クボタ鋼製造部

(b) 支承

支承の状況を写真-2に示す。西方可動支承は橋脚軸直角方向のずれ止め又はサイドブロック固定ボルトが山側(北側)に折損しているのに対し、東方固定支承はボルトの伸びやナットの緩みとRC橋脚の破壊が認められるが、支承自体の損傷は少ない。また、梁との固定ボルトが折損し浮き上がりが見られたものもあるが、ヒンジ支承の損傷も少ない。一方東方、西方いずれの橋脚支承(球支承)も仕上げ(化粧)コンクリートが破損しているが、橋脚支承及びアンカーボルトには損傷は認められない。(写真-3)

(2) 架道橋の変位

震災後の鋼桁の変位の実測値を図-3に示す。鋼桁は東方を中心にして西方が回転し、その回転は西方コンクリート橋脚との接触によって停止したと考えられる。鋼桁の変位から、破断しなかった東方橋脚の柱・梁接合部について層間部材角を計算すると約1/30となる。

5 鋼管柱の材料調査

材料調査は比較的早期に撤去された西方の南側(海側)鋼管柱の下部について行った。

(1) 破断状況

破断は鋼管柱の上端(梁との接合部)から約300~500mmの位置で生じている。破断面の北側と南側(南北方向は架道橋の南北に対応)がほぼ水平で、両破断面には約110~170mmの段差があり、南側の方が鋼管柱上部に近い位置で破断している。この段付き部での亀裂進展はその伝播状況から判断して、南北の破面が進展した後と考えられる。

破断面(写真-4)を見ると、平坦な破面と条痕を伴った粗い破面とに大別され、平坦な破面は主に鋼管柱内面に存在している。破壊形態としては脆性破壊の様相を呈しており、全体にわたって塑性変形の跡がほとんど認められない。僅かに外周部のごく一部にシャーリップが認められるのみである。

(2) 破面状況

破壊形態を確認するために、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて破面の観察を行った。その代表的なものを写真-5及び写真-6に示す。これらの結果によると、北側及び南側破面とも殆どの領域が擬劈開破面の様相を呈しており、脆性破壊であることを示している。これらの破面に認められるリバーパターンから破壊の進展方向を推測すると、平坦な破面は内面側もしくは円周方向から進展、条痕を伴った粗い破面は外面側もしくは円周方向から進展したものと考えられる。これら二種類の破面はそれぞれの破壊進展速度と方向が異なるために形成されたものであり、形態的に平坦な破面が先に形成されたと考えられる。これらの状況は地震による衝撃的な応力が、鋼管柱に何回か、かつ異なる方向から作用したことを推定させるものである。

破断面には内面側に局部的な錆が発生している。この錆はある種の材料試験で経験するものと同じく、初期亀裂を示していると考えられる。亀裂を生じさせたエネルギーによって金属原子が活性化したために、優先的に錆が生じたものと思われる。局部的な錆が南側に多く見られることから、時間的なずれはあまりないものの、南側破面が先に形成されたのではないかと推定される。

(3) ミクロ組織観察

破断面近傍から試験片を採取して、ミクロ組織を観察した。結果を写真-7に示すが調査品のミクロ組織は、フェライトとパーライトの炭素鋼鋼品にみられる標準的な組織である。

(4) 化学成分分析

表-1に化学成分分析結果を示す。本鋼管柱が製作された1966年には、この鋼管柱に対応するJIS規格(1969年制定のJIS G5201「溶接構造用選心力鋼管」)は制定されておらず、溶接構造用圧延鋼材JIS G 3106 SM41B(現在はSM400B)相当として製作されたものである。結果を現在のJIS規格にてらせばSCW410-CF相当材であり、SM400Bにもほぼ適合するものである。

(5) 引張試験

破断面近傍の北側及び南側から JIS 14A号試験片を採取して引張試験を行った。その結果を表-2に示す。北側と南側の試験結果を比較すると、両者にはほとんど差がない。

(6) シャルピー衝撃試験

引張試験と同様に、破断面近傍から JIS 4A号試験片を採取してシャルピー衝撃試験を行った結果を表-3に示す。試験結果をみると、現在の JIS SCW410-CFの規定と SM400Bの規定を満足している。

(7) 硬さ試験

ミクロ組織を観察した断面でブリネル硬度の測定を行った結果を表-4に示す。母材硬度は HB124~149(平均136)であり、溶接構造用鋼材として問題のないものである。

(8) CTOD試験

破断した鋼管より試験片を採取して、BS 5762に従ったCTOD試験を行った。試験温度は 20°C、0°C及び -20°Cである。結果を図-4に示す。問題のないレベルと考えられる。

6 架道橋の損傷について

図-3に示す地震後の鋼桁移動量計測結果と損傷状況から推定できる、破壊に至る過程はつぎのようである。

(1) 図-2のようにラーメン橋脚と比較して両端の RC 橋脚の剛性が高く、鋼桁と直角方向の水平変位に対して、両端の支承部がより大きな地震力を負担する構造であると思われる。

(2) 地震力が架道橋に作用した時、橋軸方向(東西方向)は同一の水平変位で応答するが、橋軸と直角方向(南北方向)では鋼桁を支える支承の種類によって抵抗する力が異なると推定する。

(3) 西方可動支承の破壊が大きく、橋脚の梁(RC)部材も北側(山側)のコンクリートが割落している。支承を固定するアンカーボルトが露出

するほど橋脚の梁(RC)が割れている東方固定支承の損傷は少なく、アンカーボルトの破断も見られなかった。またラーメン橋脚と鋼桁とのヒンジ支承の損傷も少ない。橋脚支承(球支承)の損傷も僅かである。

以上のことから推定すると、地震力が西方可動支承の耐力を超えたため可動支承の北側(山側)ずれ止め又はサイドブロック固定ボルトが破断、両端及び中央の支承が負担すべき水平力のバランスが崩れ、かつ東方(東側)の固定支承の破壊が少なかったため、東方 RC 橋脚上を中心として鋼桁が図-3に示すように北側(山側)に回転移動したものと思われる。この回転で、西方(西側)の門型ラーメンにより大きな水平力と急激な衝撃力が作用した。

(4) 従って西方の門型ラーメンはその保有耐力を超える鋼桁の回転エネルギーを吸収できずに破断した。

(5) 一方、東方門型ラーメンは鋼桁の回転量も回転速度も小さいため、鋼桁の回転エネルギーを吸収して破断しなかったものとする。

7 橋脚破壊過程の推定

震災後約1/30の層間変位角に耐えて損傷のなかった東方ラーメン橋脚に注目して、架道橋破壊の概要を推定する。

(1) 仮定

(a) 鋼桁横断面の水平方向の剛性は、水平力に抵抗するラーメン橋脚の剛性と比較して相当大きいので、鋼桁を剛体と考える。

(b) 鋼桁の地震途中の挙動を無視して、鋼桁が震災後の位置まで移動したものとする。

(2) 鋼桁の移動プロセス

鋼桁の移動プロセスを単純化して図-5に概要を示す。記号は以下を表す。

W: 鋼桁の質量

α : 水平震度

R: 反力 CW; コンクリート西方

CE; 同東

W; ラーメン西方

E; 同東を示す。

L: 径間長さ
 H: ラーメン橋脚高さ(梁下)
 δ : 鋼桁の移動量

(a) 初期状態 (図-5, a)

設計上考慮されている地震力 F_1 に対してすべての支承で抵抗している状態を示す。今 $\alpha_1 = 0.2$ とすると、橋脚の反力は次のように考えられる。

$$W = 1000 \text{ ton}$$

$$F = 0.2W = 200 \text{ ton}$$

$$R_{cw} = R_w = R_E = R_{cE} = 50 \text{ ton}$$

またはRC橋脚の剛性が大きいので $R_{cw} = R_{cE} = 100 \text{ ton}$ と考えることもできる。図面や破壊写真より可動支承の許容耐力を求めると約30ton/組であり、

$$4 \times 30 = 120 \text{ ton} > R_{cw}$$

である。

(b) 西方ラーメン橋脚の降伏 (図-5, b)

可動支承は衝撃力によって1組ずつ別々に破壊したものと考えられる。可動支承が破壊すると鋼桁は西方が自由端となり、反力がアンバランスとなって鋼桁が回転する。

鋼桁の回転開始から西方ラーメン橋脚が降伏(柱頭部にヒンジ発生)までを検討する。外力 $F_2 = W\alpha_2$ 、ラーメン橋脚の位置での鋼桁の移動量 δ_w 、 δ_E 、 $2.5F_2 = 4.0 \times {}_2R_w + 2.0 \times {}_2R_E$ 、 $\delta_w = 4\delta_E$ より

$${}_2R_w = 10F_2 / 17, \quad {}_2R_E = 5F_2 / 34$$

鋼管の外径をD応力度を σ として、曲げ変形 δ は

$$\delta = PH^3 / 3EI = 2\sigma H^2 / 3ED$$

鋼管断面を $\phi 800 \times 40t$ ($I = 691000 \text{ cm}^4$ 、 $H = 600 \text{ cm}$ 、 $Z = 17300 \text{ cm}^3$)とし、鋼管の材料試験結果より降伏点 $\sigma_y = 2.6t/\text{cm}^2$ を用いて西方ラーメンの降伏時の撓み δ_y 、その時の δ_c 、 δ_E を求めると、

$$\delta_y = 2 \times 2.6 \times 600^2 / 3 \times 80 \times E$$

$$= 3.72 \text{ cm}$$

$$\delta_c = 2.325 \text{ cm}$$

$$\delta_E = 0.93 \text{ cm}$$

$${}_2R_w = (2.6 \times 17300 / 600) \times 2 = 149.9 \text{ ton}$$

$$F_2 = {}_2R_w \times 17 / 10 = 254.9 \text{ ton}$$

$$\alpha_2 = 0.255$$

(c) 東方ラーメン橋脚の降伏 (図-5, c)

西方ラーメン柱頭がヒンジ、東方ラーメンの柱頭が降伏するまでを検討する。外力 $F_3 = W\alpha_3$ とすると、

$${}_3R_E = 2.5F_3$$

$$\delta_y - \delta_c = 2.79 = 0.5 \times {}_3R_E \times H^3 / 3EI$$

$${}_3R_E = 112.5 \text{ ton}$$

$$F_3 = 45 \text{ ton}$$

$$\alpha_3 = 0.045$$

(d) 西方ラーメン破断後

東方ラーメン柱頭部降伏以降、東西共に柱頭にヒンジが形成され、鋼桁の移動エネルギーを吸収して桁が回転、西方ラーメンが層間変位角 $\delta/H = 1/30$ で破断したと考えると、鋼桁の西端がRC橋脚に接触し、摩擦抵抗等によって鋼桁の回転が停止、幸いにも落橋を免れたと推定される。

(e) 鋼桁に作用した水平力と変位

上記計算結果より、鋼桁に作用した水平力と変位を図-6に示す。図中▽印は西方ラーメン橋脚の破断時点を想定したものであり、斜線部は門型ラーメンの吸収エネルギーを示す。

①は計算値を示し、点線は橋脚破断後の回転力制御勾配を示す。②は従来の実体実験で得られた平均的接合部の部材角 $\gamma^{(1/2)3}$ ($> 1/20$) を想定したものである。回転力制御の勾配が急になるが、秒速20cm程度のゆるやかなものである。

(f) 門型ラーメンの変形能力

以上は静荷重での検討であり、初期の水平力 F_1 について数値的な特定は出来ないが、鋼桁が回転しはじめ停止する間に門型ラーメンの推定変形量と吸収エネルギーは図-6に示すとうりであり、水平震度として $\alpha = 0.3$ 程度の地震力に耐えた。

鋼管を使用した西方門型ラーメン橋脚は破壊はしたけれど、充分変形能力を発揮したものと考えている。

8 まとめ

(1) 材料調査の結果、破断した遠心力鋳鋼管は現在のJIS規格SCW410-CF相当材であり、SM400Bの規格にもほぼ適合するものであった。

(2) 西方鋼管柱は、非常に大きな変位が急速に加わったため脆性破壊に至ったものと考えられる。

- 可動支承の破壊によって西方鋼管柱は、鋼桁の重量の50%以上の荷重を支持すると同時に、桁の回転と推定される強制変形を受けた。
- 鋼桁の剛性が大きく、柱脚が堅固であった鋼管ラーメンは上下を拘束され、特に東方の4倍の強制変形を受けた西方は破断した。

(3) 西方に比べ変位及び回転速度が小さかった東方鋼管ラーメン橋脚は、層間変位角約1/30の変形によって鋼桁の回転エネルギーを吸収した。

参考に、生田架道橋鋼管柱と同サイズで幅約4.5m、高さ6.9m、スパン80mの連続桁中央を1本柱で支える、国道2号線を跨ぐ第2阪神架道橋(春日野、柱頭剛接合、柱脚ピン)は無事であったことを付記しておく。

(参考文献)

- 1) 東京大学伸研究室 : 仕口部実験報告書、昭和42年10月
- 2) 金谷他 : 高張力遠心鋳鋼管の接合部に関する研究、日本建築学会大会概要集、昭和44年8月
- 3) 金谷他 : 高強度円形鋼管の曲げ圧縮実験 その1、その2、日本建築学会大会概要集、平成4年8月
- 4) 久保田鉄工(株) : 厚肉Gコラム確性試験、昭和47年4月
- 5) 久保田鉄工(株) : 53キロクラス厚肉Gコラム確性試験、昭和54年11月

Survey Report on the Mechanical Tests of Cast Steel Columns of Ikuta Railway Bridge Broken by Seismic Load

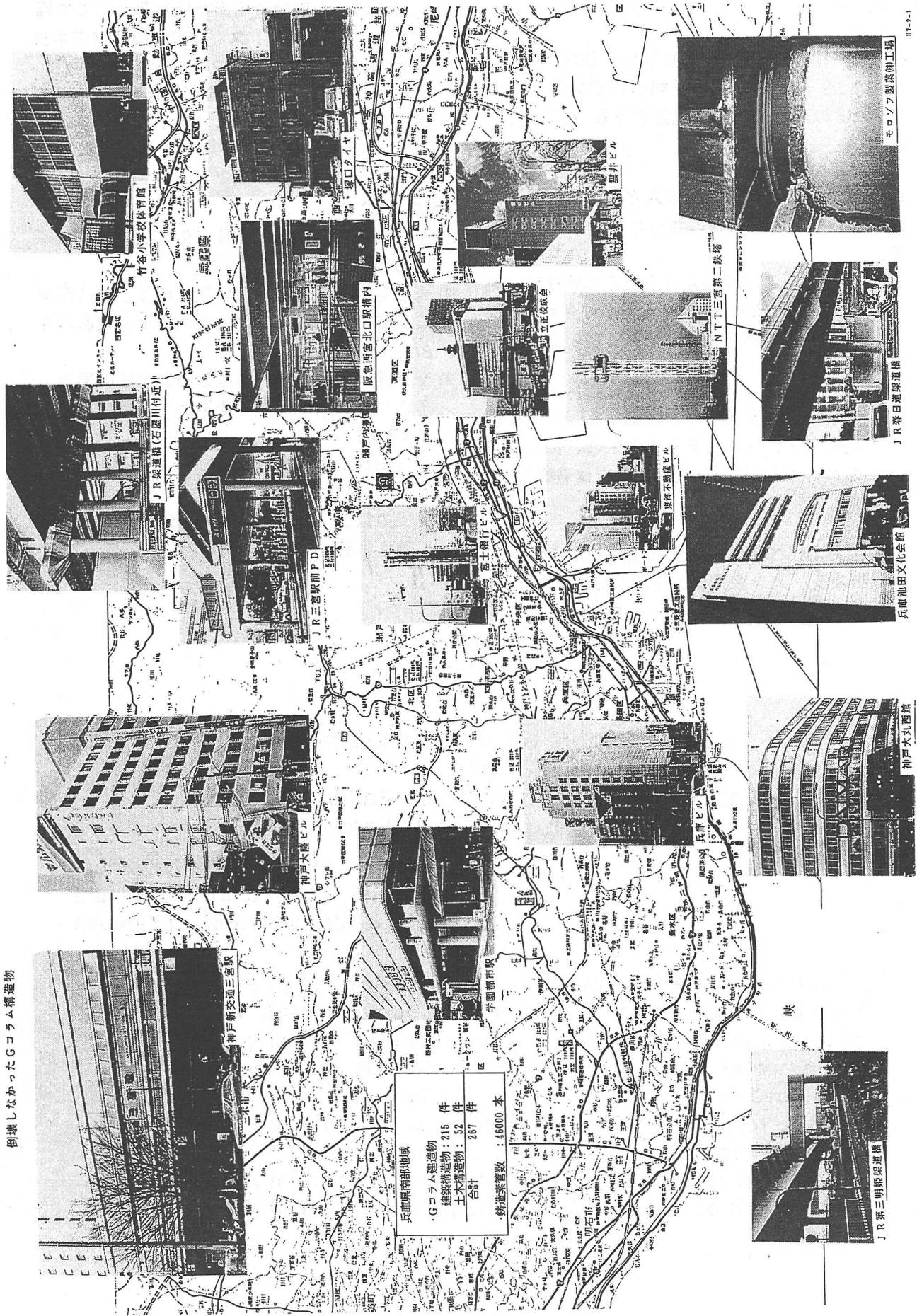
Toshiaki Sho, Kiyotaka Nakamura
Haruki Hino, Kohichi Kawamura
Takahiko Wakita, Masayuki Teraoka

The seismic damage of continuous girder bridge of Ikuta Railway have been reported in A.I.J and J.S.C.E Journals. This brittle fracture of steel pier were caused by a combination of following adverse circumstances : ① local stress concentrations ② notch sensitive steel ③ shock loading ④ low temperature ⑤ triaxial tensile stress condition.

Since research data on the problem of the fracture is insufficient, no single easy rule is available to designer.

In this report, we explain the results of mechanical properties, SEM analysis of broken column, and plastic analysis of the structure.

倒壊しなかったGコラム構造物



兵庫県南部地域
Gコラム構造物 215 件
建築構造物 52 件
土木構造物 163 件
合計 215 件
製造業者数 : 4600 本

図-1 三宮周辺の鉄鋼管柱採用物件

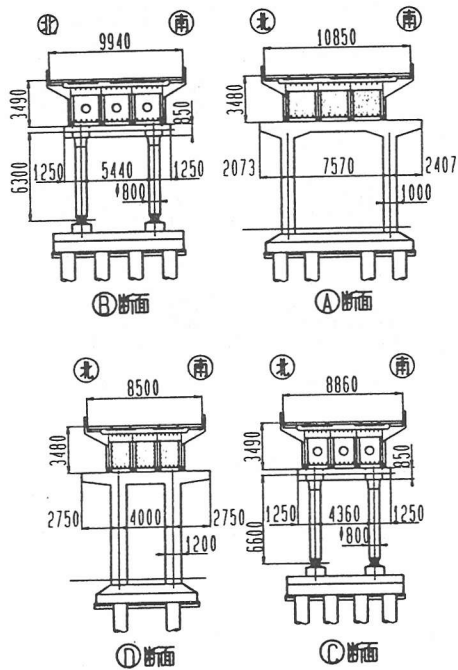
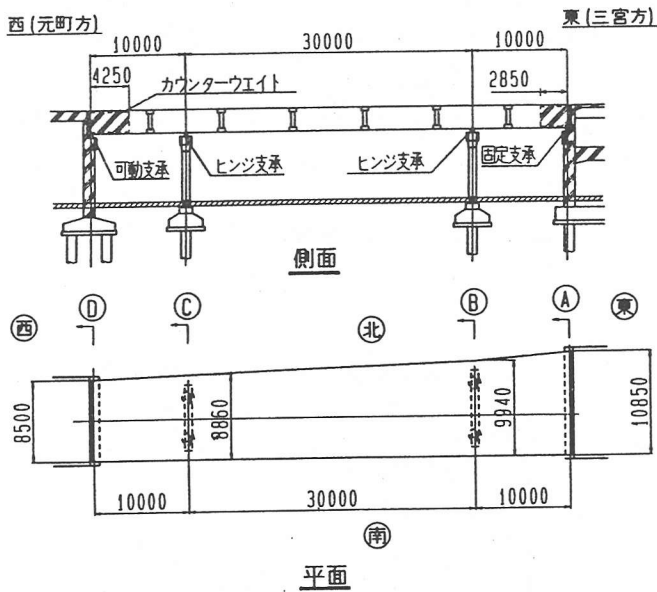
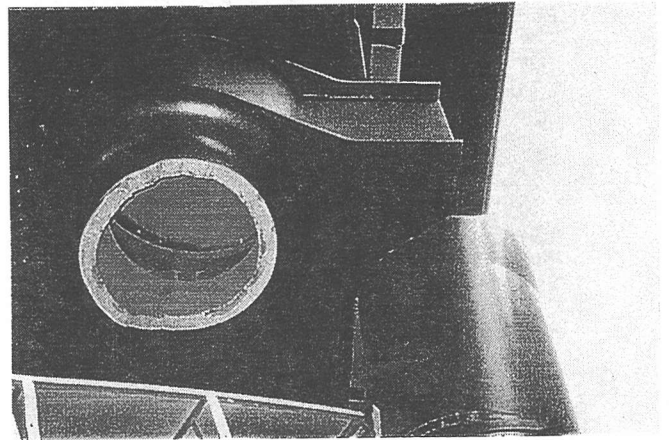
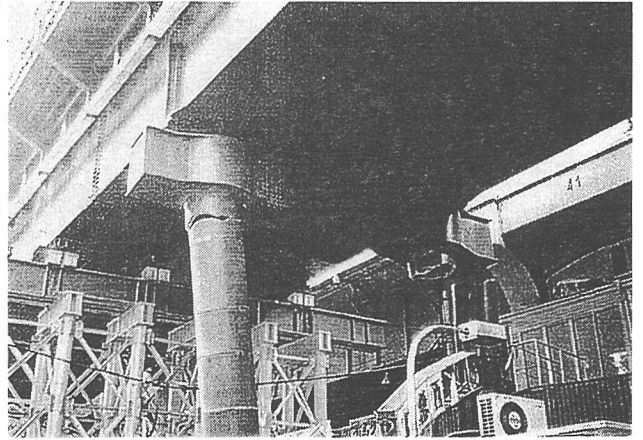


図-2 生田架道橋の構造



南側Gコラム (破断)

↑ 破断した下部を今回調査

写真-1 生田架道橋ラーメン橋脚の状況

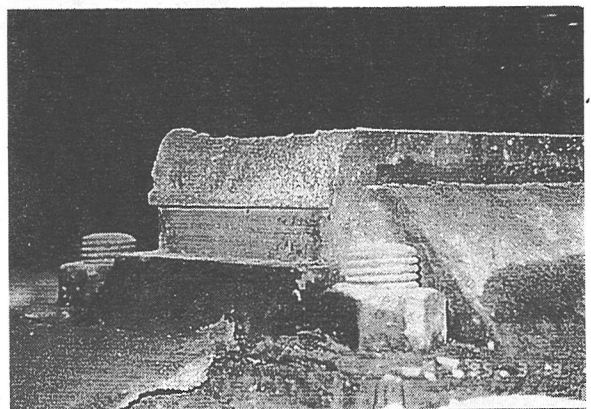
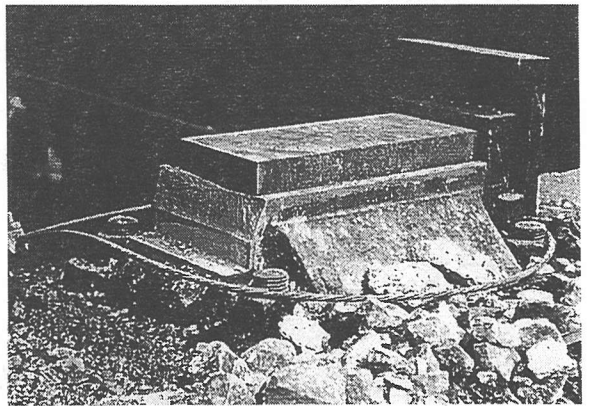
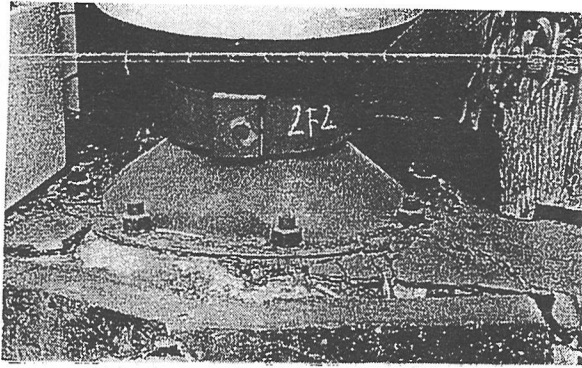
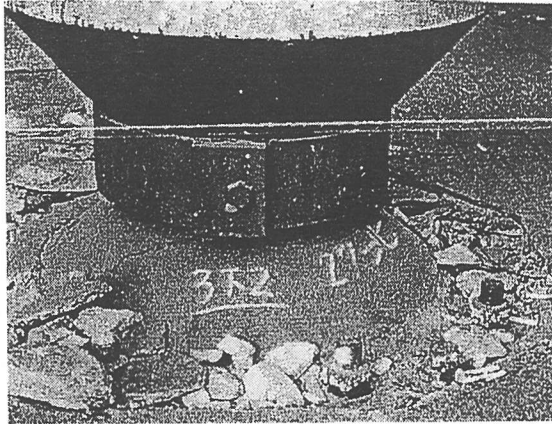


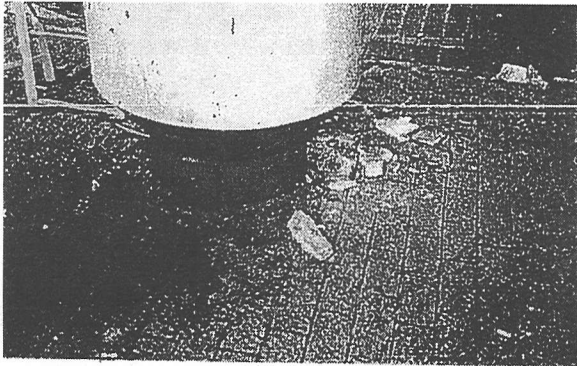
写真-2 生田架道橋西方可動支承の状況



西方/北側の状況



東方/北側の状況



東方/南側の状況

写真-3 生田架道橋橋脚支承の状況

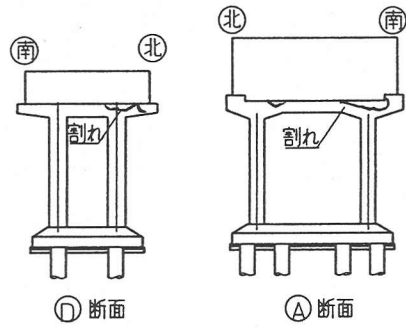
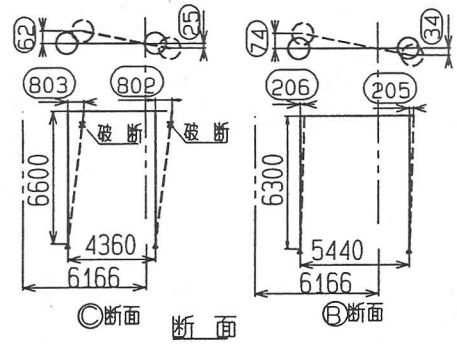
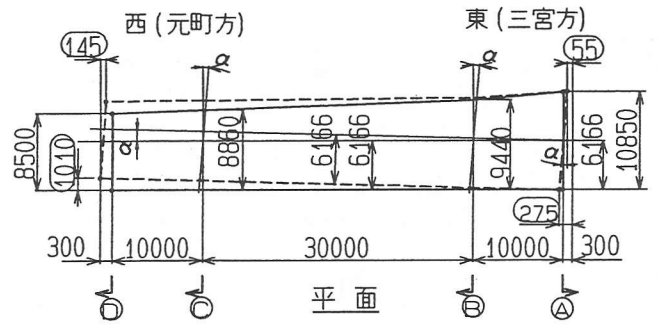


図-3 生田架道橋の変位



写真-4 破面状況(北側破面)

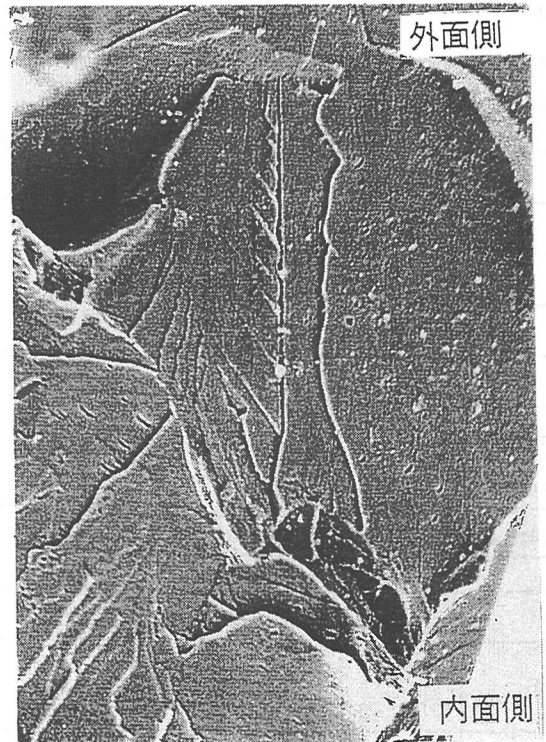
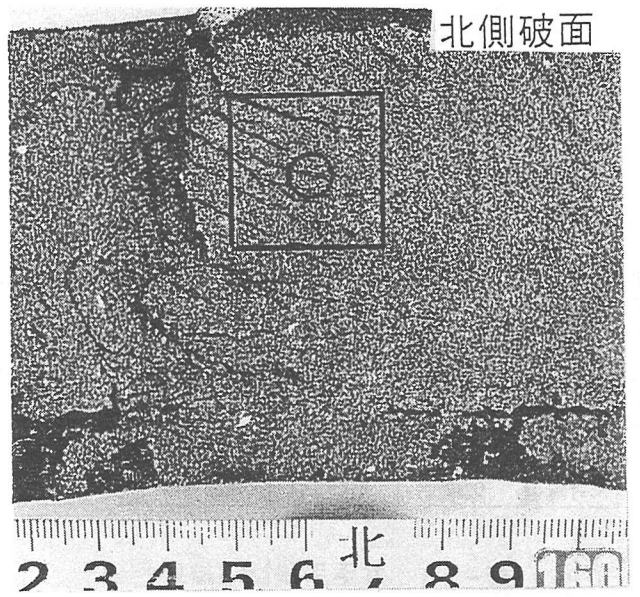
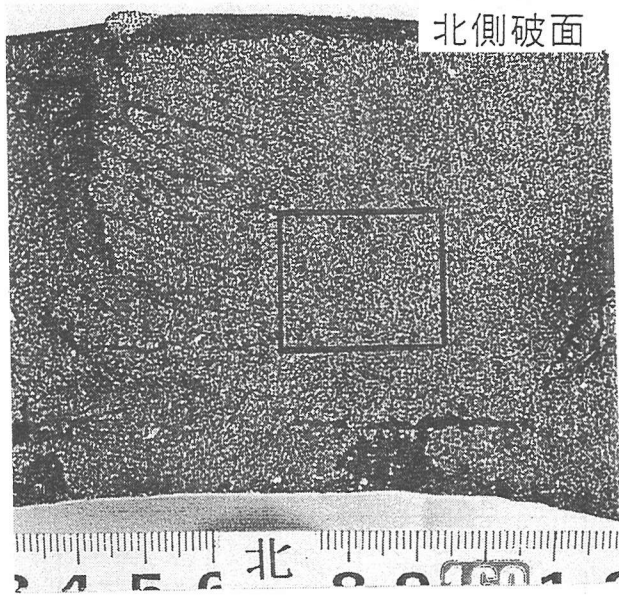


写真-5 破面状況-(1) (SEM観察)

写真-6 破面状況-(2) (SEM観察)

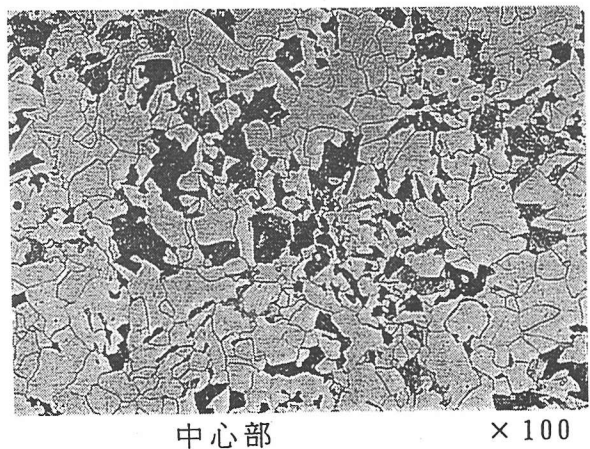
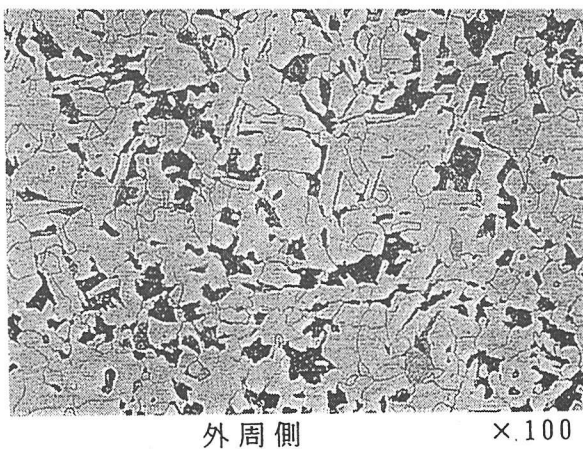


写真-7 ミクロ組織

表-1 化学成分分析結果

(単位 wt%)

	外面 (外面下 10mm)	中央 (外面下 35mm)	参考SM 400B (50t以下)	参考 SCW410- CF
C	0.14	0.16	≦0.20	≦0.22
Si	0.36	0.37	≦0.35	≦0.80
Mn	1.00	1.03	0.60~1.40	≦1.50
P	0.013	0.015	≦0.035	≦0.040
S	0.013	0.016	≦0.035	≦0.040
C当量	0.32	0.35	≦0.44	≦0.40

表-2 常温引張試験結果

鋼管柱北側				
No.	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
1	257	459	30.7	58.4
2	258	456	33.4	58.8
3	256	457	24.9	38.4
4	264	461	27.4	37.3
5	264	461	31.6	55.0
平均	260	459	29.6	49.6
SM 400 B	≧235	400~510	≧22	-
SCW410-CF	≧235	≧410	≧21	-

鋼管柱南側				
No.	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
1	257	448	31.9	60.9
2	254	448	30.0	64.2
3	261	450	30.3	52.5
4	256	450	30.0	58.5
5	263	454	28.6	61.4
平均	258	450	30.2	59.5
SM 400 B	≧235	400~510	≧22	-
SCW410-CF	≧235	≧410	≧21	-

試験片形状 : JIS 14A号、試験温度 23°C

表-3 シャルピー衝撃試験結果

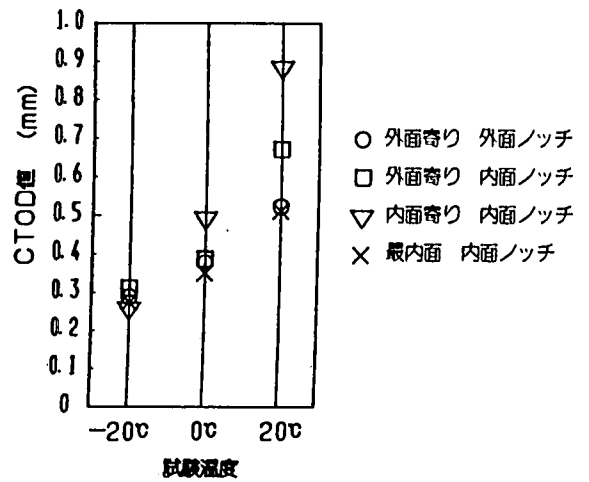
(試験温度 0°C、2mm-Vノッチ)

	吸収 エネルギー (J)	参考 SM 400 B (J)	参考 SCW410-CF (J)
1	52.0	-	-
2	40.6	-	-
3	50.0	-	-
平均	47.5	27 以上	27 以上

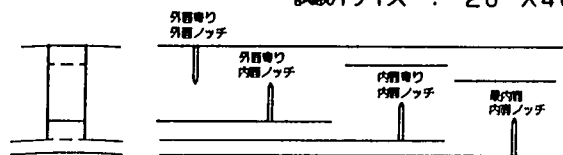
表-4 硬さ試験結果

(HB3000)

	軸方向断面	周方向断面
1 (外面下10mm)	126	130
2 (外面下10mm)	124	128
3 (外面下25mm)	131	131
4 (外面下40mm)	144	146
5 (外面下40mm)	149	147
平均	135	136

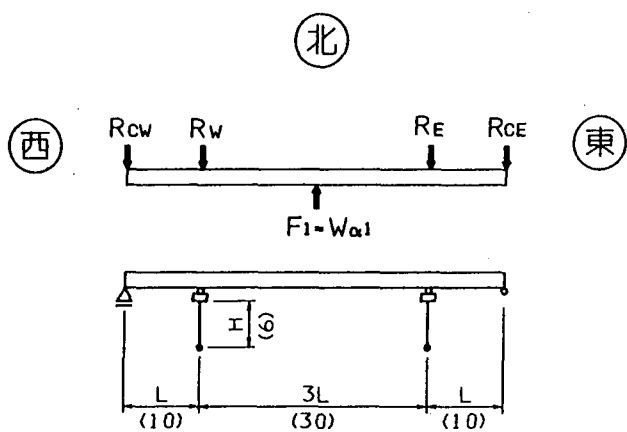


試験片サイズ : 20^wx40^hx200

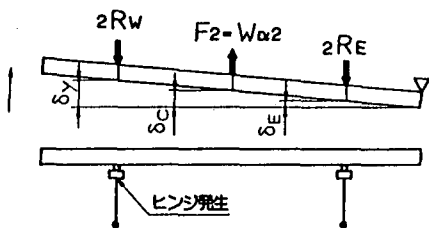


結果は3点の平均を表示

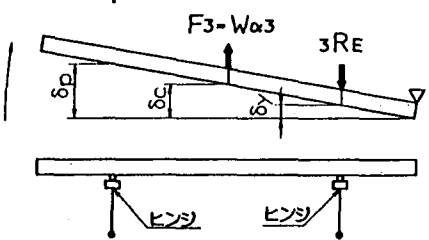
図-4 CTOD試験結果



a. 初期状態



b. 西方ラーメン降伏



c. 東方ラーメン降伏

図-5 鋼桁の移動

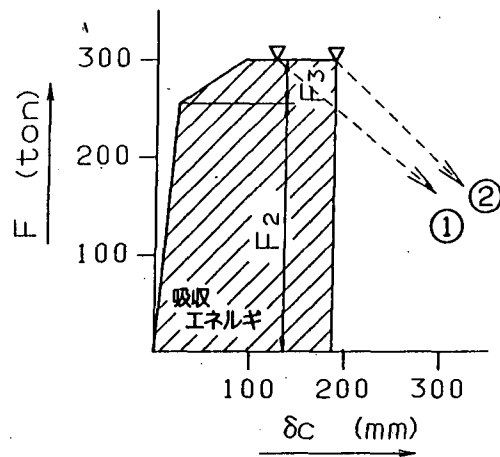


図-6 水平力と変位

(付録) 遠心力鋳鋼管の材料特性4)5)

1) 製法概要

鑄造機上で金枠を高速回転させ、金枠に溶湯を鑄込み、遠心力の作用で溶湯を金枠に伸延・圧着、外面から一方向凝固させる鋼管の製造方法である。

鋼管の外形状は金枠の型通りに造形でき、厚肉管の製造が容易である。鑄造後必ず所定の熱処理を行い鑄造歪み等はほとんどない。

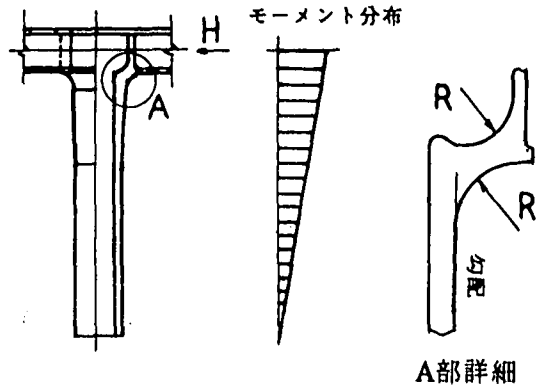


図4 遠心力鋳鋼管の概要

2) 機械的性質

遠心力鋳鋼管素管には4種類あるが、生田橋に使用された素管と同形状(φ800-φ1250×60t)のソケット管と肉厚105t直管の試験結果の一部を報告する。

図aにソケット管の概要、図bにソケット部分の偏析状態、図cにソケット部の引張試験結果を、ソケット管の直管部分と105t直管の引張試験、衝撃試験の比較を示す。図eの位置より試験片を採取した引張試験結果を表aに、試験片採取位置をノッチの方向を図dに示した衝撃試験の結果を表bに示す。以上のように管軸方向、肉厚方向の機械的性質に差がなく、方向性のない材料である。

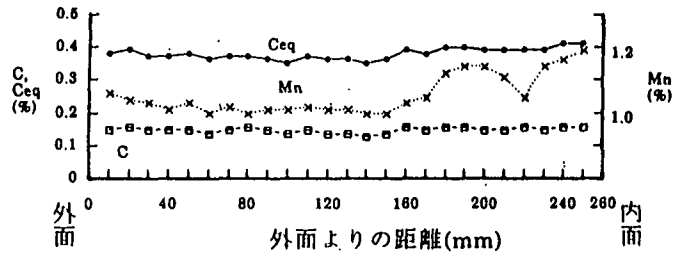


図5 ソケット部の偏析調査結果

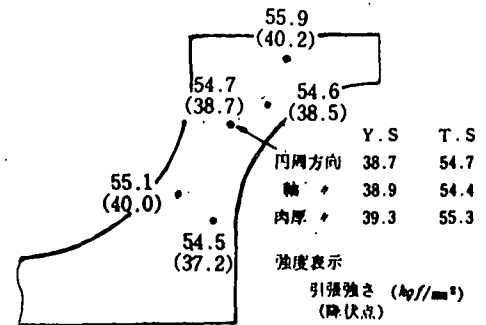
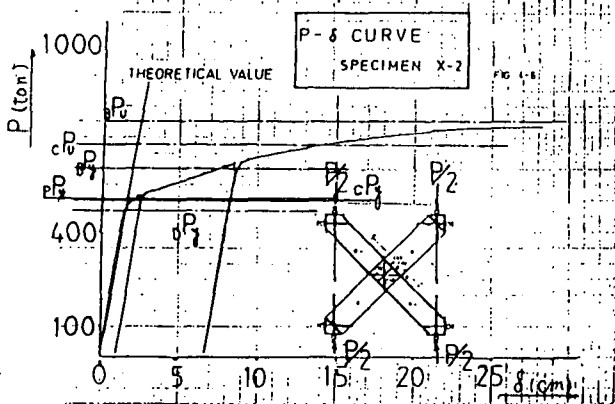


図6 ソケット部引張試験結果

3) 遠心力鋳鋼管の変形性能1)

遠心力鋳鋼管の変形性能について、ソケット管の実験データはないが、外径φ800のはりとの接合部部分架橋実験のうち、荷重と変形の間係を下図に示す。破壊は破断等によるものではなく、全塑性状態の耐力と変形能力をもっている。



表a 引張試験

肉厚 (T)	位置	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
105t	O	422	549	33
	M	422	559	32
	I	412	539	31
60t	O	402	559	32
	M	392	539	33
	I	402	559	30
SCW520 -CF	規格	≥ 355	≥ 520	≥ 18

表b シャルピー衝撃試験

肉厚 (T)	位置	吸収エネルギー vE _g (J)			
		1	2	3	平均
105t	OLT	67	58	94	73
	MLT	94	126	82	101
	ILT	48	72	78	66
	SCW520 -CF	規格	≥ 27		
60t	OLT	64	84	72	77
	MLT	88	78	48	70
	ILT	74	84	58	65
	60t	MZL	80	57	75
MCL		94	64	64	74
MLC		75	64	94	78

図d シャルピー衝撃試験片採取位置 (JIS Z 2202 4号試験片)

図e 引張試験片採取位置 (JIS Z 2201 14A号試験片)