

II-6 クレーンガーダーの疲労損傷

東京電機大学 建築学科 ○海野三蔵
同上 見村博明

1. 結 言

工場建築におけるクレーンガーダーやこれ等を支持する部材は、クレーンの走行によって種々の繰り返し荷重を受け、いわゆる疲労現象を生じ達には破壊する恐れがある。従来はクレーンの稼働率も低く、またクレーンの速度も遅くその工場の耐用年限内では繰り返し応力によって疲労が生じても破壊までには到らないと考えられていた。しかし最近の製鉄所の様な重工場においてはクレーンの大型化や高速化に伴ない稼働率も高くなり、かなり早期に疲労破壊が起きている。これ等の問題に対しては従来、組織的な研究があまりなされていなかったが、疲労破壊による事故防止や保守管理の合理化に対しては、まず第一にクレーン支持機構の安全性を確保する事が必要である。

筆者等はクレーンガーダーやその支持部材の疲労損傷に対していかに対処すべきかについて、主として設計、施工、保守の問題を検討しその指針を得ようとするものである。

本報告はその第1段階として、特に苛酷な使用条件下にある製鉄所のクレーンガーダー及びその支持部材について損傷の実態を調査し、疲労損傷に影響を及ぼす各種要因を把握する事を目的とし、ここではその調査結果についてのまとめとある程度の考察を行なうものである。

2. 調 査 方 法

クレーンガーダーやその支持部材の損傷については、従来その傾向的な事は知られているがこれ等を裏付ける資料が不足していたため本調査においては既に採え換えられたガーダーを含め得るだけ多数の損傷事故例についてアンケート方式による調査を行なった。アンケートによる調査事項は、各種の損傷要因を調べる事が主目的であるためその目的を達成するのに適切な調査項目を設定する必要があるので、ここでは主として次の5項目に大別し損傷した部材について調査を行なった。即ち、

- 工場履歴：工場名、作業種別、建設年次、創業時期、休止時期、終了時、
- クレーン：種類、容量、台数、最大車輪距、サドル型式、速度、台数及び容量の変更、
- ガーダーの損傷：損傷の場所及び種類（例、ガセットプレート、亀裂、等）、損傷時までのクレーンの延運行回数、
- その他の部材の損傷：柱、間柱、ブレース、等、
- その他：基礎の不同沈下、等、

また、アンケート調査と同時に対象部材の図面、写真を提出してもらい検討を加えた。

3. 調 査 結 果 と 考 察

調査結果の一覧表をTable 1-1~2 に示す。今回の調査では19製鉄所、38工場についてクレーンランウエーガーダー55例、柱6例、不同沈下1例である。尚、Table 1 に40例について示す。同表の記号で、a: 工場名、b: クレーン容量、c: クレーン種別、d: 創業時、e: 損傷発見時、f: 延運行回数、g: 応力率を示す。

3-1. 調査対象工場の建設年次別分類、

Table 1-

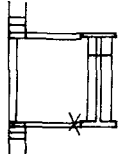
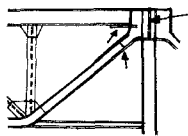
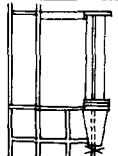
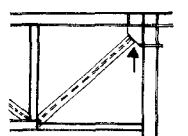
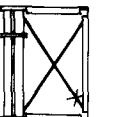
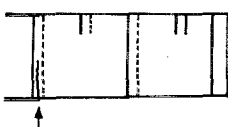
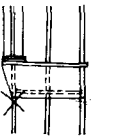
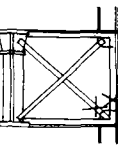
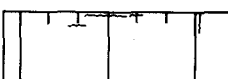
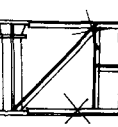
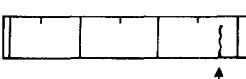
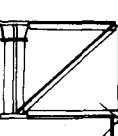
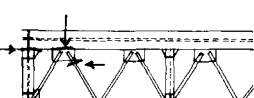
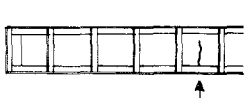
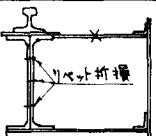
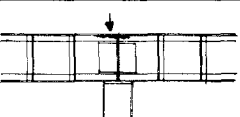
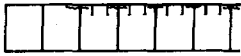
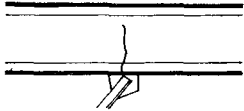
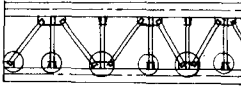
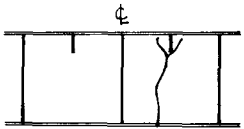
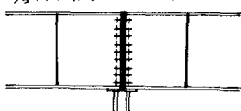
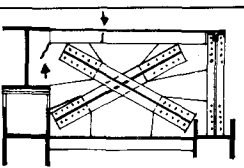
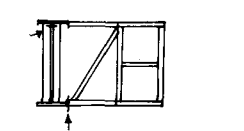
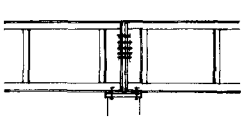
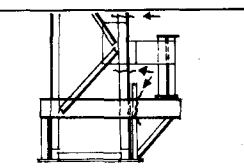
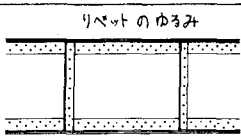
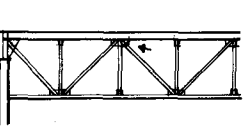
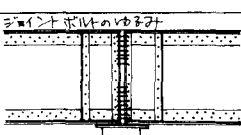
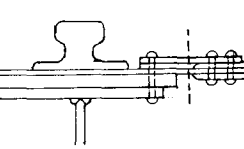
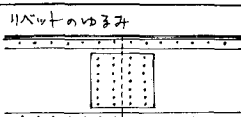
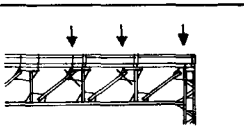
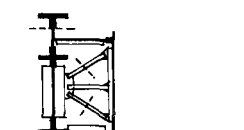
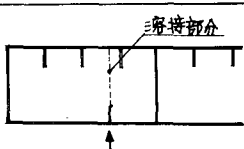
1 a. A 製鋼工場 b. 60 ^m × 2 ^台 60 ^m × 2 ^台 c. ストリップ・クレーン 兼用 "	d. S41.10 e. S46 f. 2.6 × 10 ⁶ g. "		11 a. B 転炉工場 b. 20 ^m × 3 ^台 45 ^m × 1 ^台 c. ストリップ・クレーン	d. S36 e. S49.12 f. 1.4 × 10 ⁶ 4.7 × 10 ⁶ g. 1.25	
2 a. 同上 b. " c. "	d. " e. S49.8 f. 4.1 × 10 ⁶		12 a. B 製鋼工場 b. 20 ^m × 1 ^台 120 ^m × 1 ^台 c. ストリップ・クレーン レドイル "	d. S44.6 e. S47.10 f. 1.44 × 10 ⁶ 1.68 × 10 ⁶ g. 1.12	
3 a. 同上 b. 270/30 ^m × 1 ^台 70/70 ^m × 1 ^台 c. レドイル クレーン 兼用 "	d. S42.4 e. S49 f. "		13 a. C 厚板工場 b. 15 ^m × 1 ^台 c. マグネット クレーン	d. S32 e. S47 f. 2.5 × 10 ⁶ g. 1.4	
4 a. 同上 b. " c. "	d. " e. S50 f. "		14 a. C 1分塊工場 b. 40 ^m × 2 ^台 c. ストリップ・クレーン	d. S31 e. S45 f. 1.0 × 10 ⁶ g. "	
5 a. 同上 b. 90 ^m × 1 ^台 45 ^m × 2 ^台 c. ストリップ・クレーン モールド "	d. S44.夏 e. S50.2 f. 3.16 × 10 ⁵ g. 1.8		15 a. C 2分塊工場 b. 同上 c. "	d. " e. " f. "	
6 a. 同上 b. 90 ^m × 1 ^台 45 ^m × 1 ^台 c. ストリップ・クレーン モールド "	d. S45.8 e. S49.10 f. 2.1 × 10 ⁵ g. 1.6		16 a. C3 ストリップ工場 b. 30 ^m × 1 ^台 c. 天井走行クレーン	d. S40 e. S47 f. 2.1 × 10 ⁶ g. 1.3	
7 a. 同上 b. " c. "	d. " e. " f. "		17 a. C1 製鋼工場 b. 100 ^m × 1 ^台 c. レドイル クレーン	d. S34 e. S47 f. 1.2 × 10 ⁶	
8 a. 同上 b. 25 ^m × 2 c. C フック・クレーン	d. S43.6 e. S50.4 f. 2.3 × 10 ⁵ g. 1.1 (2.5)		18 a. D 分塊工場 b. 10/25 ^m × 3 ^台 c. ソーキングピット クレーン	d. S37.2 e. S48.12 f. 1.1 × 10 ⁶ g. 1.34	
9 a. 同上 b. " c. "	d. " e. S50.4 f. "		19 a. 同上 b. " c. "	d. " e. " f. " g. 1.34	
10 a. B 鉄材工場 b. 3 ^m × 2 ^台 10 ^m × 1 ^台 , 3 ^m × 1 ^台 c. クロー・クレーン 天井走行クレーン	d. S35 e. S40 f. 3.6 × 10 ⁶ 2.0 × 10 ⁶ 3.6 × 10 ⁵		20 a. 同上 b. " c. "	d. " e. " f. "	

Table 1-2

21 a D 分塊工場 b 12 ^m × 1(台), 8 ^m × 1(台) 75 ^m × 1(台), 18 ^m × 2(台) c 天井走行, スタッフ クロー, ダブルワーク	d 539.5 e 544.5 f 5.9 × 10 ⁶ g 0.95		31 a G 製管工場 b 5 ^m × 3(台) c クロー-クレーン	d 512 e 546.6 f 15.4 × 10 ⁶	
22 a 同上 b " c "	d " e " f "		32 a H 分塊工場 b 30 ^m × 2(台) c 天井走行クレーン	d 538 e 550.5 f 2.0 × 10 ⁶	
23 a 同上 b " c "	d " e " f "	ジョイントボルトのゆるみ 	33 a I 分塊工場 b 40 ^m × 5(台) c ストリッパークレーン	d 543.12 e 544.5 f	
24 a E 系鋼工場 b 5 ^m × 2(台) 6 ^m × 2(台) c 天井走行クレーン	d 543 e 548 f 4.31 × 10 ⁵	アンカー・ジョイントボルトのゆるみ 	34 a J 製鋼工場 b 220 ^m × 1(台) 110/25 ^m × 1(台) c レードルクレーン	d 537 e 549.5 f 7.0 × 10 ⁵ 1.76 × 10 ⁶ g 1.35	
25 a E 製鋼工場 b 42 ^m × 1(台) 50 ^m × 2(台) c ストリッパークレーン	d 536 e 543.5 f 5.67 × 10 ⁵	アンカー・ジョイントボルトのゆるみ 	35 a J 圧延工場 b 25 ^m × 2(台) 22 ^m × 2(台) c 天井走行クレーン	d 528 e 548 f 2.0 × 10 ⁶ g 2.27	
26 a F 製鋼工場 b 21 ^m × 2(台) c クロー-クレーン	d 517 e 550.2 f 63 × 10 ⁶	リベットのゆるみ 	36 a J 厚板工場 b	d 535 e 549.9 f 1.0 × 10 ⁶ g 1.02	
27 a 同上 b " c "	d " e " f "	ジョイントボルトのゆるみ 	37 a J 圧延工場 b 55 ^m × 3(台) c 半門型クレーン	d 540 e 545 f 9.0 × 10 ⁶	
28 a F 製管工場 b 5 ^m × 3(台) c クロー-クレーン	d 518 e 545 f 208 × 10 ⁶	リベットのゆるみ 	38 a K 分塊工場 b 14 ^m × 2(台) c ストリッパークレーン	d 515.3 e 549 f 21, 22.23 休止 f 4.24 × 10 ⁶	
29 a 同上 b " c "	d " e " f "		39 a K 分塊工場 b 12 ^m × 2(台) c ストリッパークレーン	d 515.3 e 546.1 f 4.3 × 10 ⁶	
30 a G 製管工場 b 5 ^m × 4(台) c クロー-クレーン	d 527 e 548.4 f 3.19 × 10 ⁶		40 a L 高炉 b 50 ^m × 1(台) c 円型クレーン	d 542 e 549.6 f 5.3 × 10 ⁷ g 1.26	

今回調査した工場のうち、昭和40年代に建設されたものは全体の40%と最も多く、次いで昭和30年代の30%、昭和10年代の20%の順である。従って建設後10年未満に約半数(損傷部材)を占め予想以上に早期に損傷を起している。

3-2. 損傷が多い工場及び使用クレーンの種別

fig.1は損傷のあった工場別に分類したものである。図に示す様に、製鋼工場が全体の約40%、分塊工場が30%と大部分の2工場に集中している。また、fig.2は損傷があった工場に使用されているクレーンを分類したものであるが、その割合はストリップパー及びモールドクレーンが約30%、一般の天井走行クレーンが20%、レドリッククレーンが14%である。特に最近のクレーンは大型化し、高速度化してその使用頻度も極めて高く、4~5年で 2×10^6 回を超えるものも多く、いかなる疲労破壊を起す可能性は十分あるが、同時にストリップパークレーンやクロクレーンの様にクレーン自体の剛性が高いものが全体の約40%を占めている事は使用頻度のみならずクレーンの衝撃による影響もかなり小さいと考えられる。

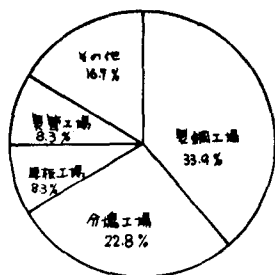


fig.1

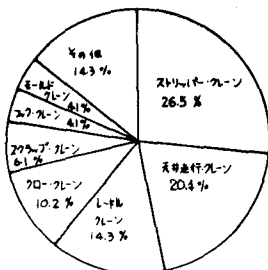


fig.2

3-3. 損傷時までの使用期間及びクレーン延運行回数

fig.3は損傷部材について創業時から損傷発見時までの使用年数と示したものである。5年以下で損傷が起った部材は全体の8%であるが、その中で40ヶ月で主要部材(Table 1. (1))に重大な亀裂が生じた例もある。また10年以下では全体の40%、さらに15年以内では全体の70%と大部分が何らかの損傷を起している事が判る。fig.4は、損傷発見時までのクレーンの延運行回数を示す。ここに示す運行回数は損傷部材をクレーンが1回通過した場合を1回と数えている。図中、 0.5×10^6 回以下で損傷が生じている部材が全体の約15%を占めているが、多くはリベット、ボルトの破断や主桁の破断である。また、 2×10^6 回以上のものが全体の約50%を占めているが、上述した損傷時までの使用年数を考え合えるとクレーンの使用頻度が極めて高い事が判る。

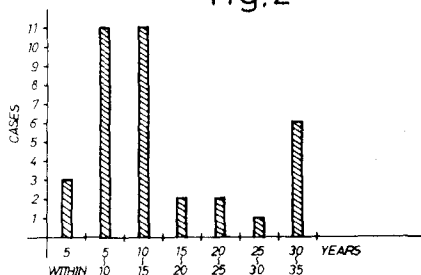


fig.3

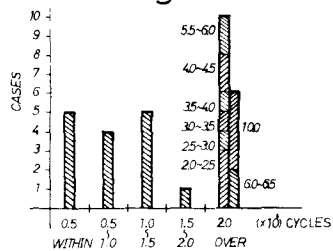


fig.4

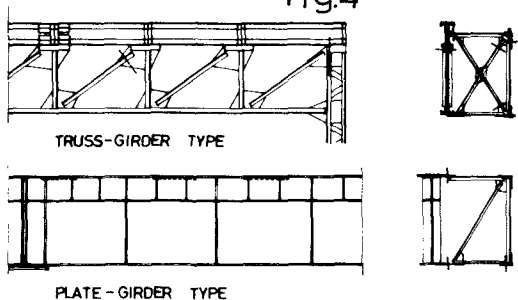


fig.5

3-4. 損傷の種類

fig.5はクレーンランウェーガーダーの主な損傷箇所を破線で示したものである。また、fig.6は今回調査した損傷部材についてその種類を分類したものである。尚、fig.6に示す割合は、1つのガーダーにおいて同様な損傷箇所が多数ある場合、その数量にかか

わらずイテ折と数えて求められているため、同図から損傷個所の総体数は判断できない。

主ガーダーの損傷の主なものは、プレートガーダー型式で(写
 は、(a). 圧縮側フランジとウェブの接合部の亀裂(写真1参照)奥
 (b). ウェブのサブステナ端部の亀裂、(c). 引張り側フラン
 ジからウェブにかけての亀裂(写真2参照)、トラスガー
 ー型式においては、(d). 節点ガセットプレートの亀裂及び、
 リベットの破断、(写真3,4参照)、(e). 斜材の破断、(写
 写真5参照)、主ガーダー以外の損傷では、(f). 上下面水平
 ブレース部材の破断及び節点ガセットプレート、リベットの
 亀裂及び破断、(g). 鉛直ブレースの破断、(h). 間柱の破断、
 (i). 補助ガーダー部材の破断、等である。以上の様にクレ
 ンランウェーガーダー及びその支持部の殆どの部材にわた
 して損傷を起しているが、その絶対数から見の場合には、(a)の圧
 縮側フランジとウェブの溶接接合部の亀裂損傷が最も多く、
 例えばTable 7, (a) (14), (15) (17)に示す如く1スパンのガー
 ーに10ヶ所以上あり且つ数スパンに及ぶものもある。次いで
 多いものは、(b)ウェブのサブステナ端部の亀裂、(f)水平ブ
 レース部材の破断例で、これ等の損傷も(2)同様に数スパンに及
 ぶものが数例見られた。また、トラスガーダーでは、ガセッ
 トプレートの亀裂、及びリベット、ボルトの緩み及び破断例
 が多く、特にリベット、ボルトの緩みはかなり早期に起、て
 いる。

(写
 1)

(写
 2)

(写
 3)

(写
 4)

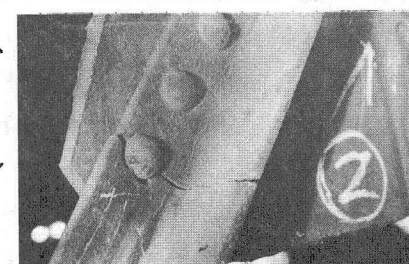
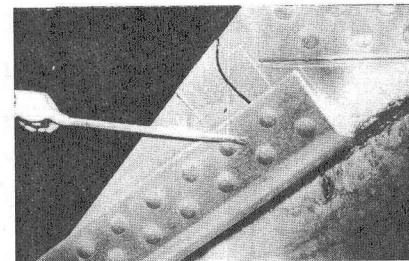
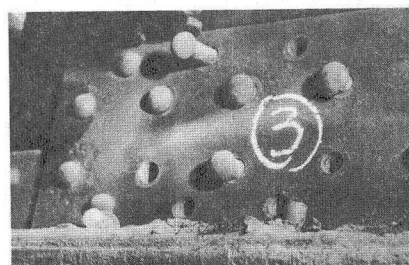
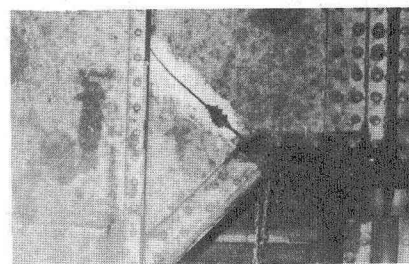
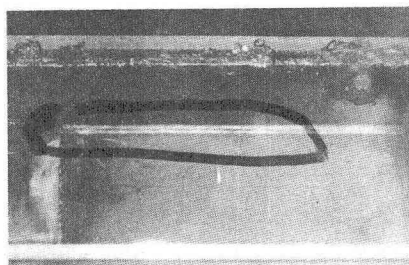
(写
 5)

(写
 6)

3-5. 損傷部分の応力度の検討.

(a). 圧縮側フランジとウェブ接合部の亀裂

前述の如く圧縮フランジとウェブの接合部の亀裂損傷は極
 めて多い。その原因として 6.3.7に示す様にレール芯とウェブ
 芯の偏心による局部的な撓れによる疲労と考えられる。この
 偏心は施工上避け難いもので、実際には各工場において、例
 えば、 $e < tw/4$ or, $e < 10\text{mm}$ (e : 偏心量, tw : ウェブ
 厚)の様に社内的に規定しているところもある。しかしなが
 ら今回の調査においても $e \approx 40\text{mm}$ のものもあり、2-3の実
 測によれば最低 $0.8 \times tw$ 程度の偏心を有している。ガーダー
 に作用する撓れモーメントは、クレーンの走行やクランプの移
 動によって生じる水平力 (H , 通常は車輪圧の10%) によって
 $H \times l$ (l : レールのせい)のモーメントと、偏心によつて、



生じるモーメント Pe (P :車輪圧) の和である。衝撃係数と仮定すれば局部的な振りモーメントは、 $M_e = P(1.2e + 0.1l)$ となる。この2次のモーメントに対しては上式に見る如く、偏心によるモーメントが支配的であり、偏心の大きいものでは局部的には降伏点を超える応力產生しているものと思われる。この場合は1個の車輪圧で計算したものであるが、クレーンが1回通過する度に上記応力でクレーンの車輪数にける繰り返し荷重を受ける事になる。従って高応力で多数回の繰り返しに負荷を受けるために早期に疲労破壊するものと思われる。

fig.6

fig.7

4. Bierell は、この様な実状を考えたゲージにおいては、特に抵抗を大きくするよう、また上端フラジ近傍のウェブ板厚を極端に厚くする（従、ウェブ断面は変断面になる）様なゲージを提案している。

fig. 8

(b). 上、下面水平ブレースの破断

その応力度は殆ど 1.0 t/cm^2 以下のものが多く比較的低い値である。しかし、その節点は殆ど剛接合に近く、Fig. 8 に示す様に主ガーダーと補助ガーダーのためみの差によって、二次的な曲げモーメントが生じる。今回の調査例のうち、いくつかの損傷例についてこの曲げ応力度を求めた結果、その値は $2.0 \sim 3.0 \text{ t/cm}^2$ とかなり高い応力度を示している。一方、同様な方法で損傷のなか、た水平ブレースについてこの応力度を算定すると $0.8 \sim 1.5 \text{ t/cm}^2$ 程度であり、損傷ブレースのものに比較してかなり低い結果であったが、これ等の数例の検討からは断言できないが、この二次的な曲げの影響が上、下両水平ブレースの破断に対して、かなり大きいと考えられる。

通常の構造物では溶接部分や有孔部分等、構造的な不連続部分が存在し、いわゆる応力集中も起る部分が含まれており、疲労破壊もその応力集中部分から発生するものと考えられる。

写真5はトラスガーダーの第1斜材(H-350×300×16×22)であるが、写真に示す様に片側フラ
ンジとウェブの全面面にわたって亀裂が進行している例である。損傷部合の平均応力度は、衝撃係数
1.2を考慮した場合で、 1.12 t/cm^2 であるが F.E.M (Finite Element Method) で解析した結果で
は、fig. 9に示す様に端部で 1.31 t/cm^2 と平均応力の約1.2倍の応力集中が存在する。また、亀裂部分
はウェブの溶接台合部分で厳密には溶接部の切欠きの影響が大きいと予想され、計算値以上の応力集

中があったものと思われる。

また、写真2はプレートガーダーの変断面部分の引張側フランジからウェブにかけて亀裂が進行している例である。損傷部分の設計応力度は、 1.34 t/cm^2 (最外縁の曲げ応力度) であるが、F.E.M. によって解析した結果、fig.10 に示す様に亀裂と直角方向に 1.89 t/cm^2 と設計応力の約1.4倍の応力が作用している。

現行の設計では上述のレールの偏心、部材の2次的な応力、及び応力集中や切欠きの影響等は考慮されていない。

3-6 損傷部分の応力度とクレーンの延運行回数との関係

fig.11 に損傷部分の応力度とクレーンの延運行回数の関係を示す。応力度は現行の設計法で求めたものである。また、図中の破線、及び一点鎖線は鋼構造設計規程による許容応力度で $\sigma_2 = 0$ (応力振幅の下限值) の場合である。一点鎖線は切欠きを考慮した場合の許容値である。図に示す様に 2×10^6 回以下においては切欠きを考慮しない場合の許容値以下で損傷が起きているが、既述した2次的な応力の影響によるものと思われる。 2×10^6 回以上では設計応力度は殆ど許容値以上である。現行の設計法では疲労を考慮せずその設計応力は一般に $1.0 \sim 1.5 \text{ t/cm}^2$ (1.6 t/cm^2 に対して) であるため、疲労破壊の恐れが十分あると云える。

4. 現行の規程について

日本建築学会の鋼構造設計規程により繰返し応力を受ける部材や接合部に対しては、繰返し数に応じて応力係数 (γ) を求める。

$$\gamma \sigma_1 < f \quad (f: \text{許容応力度})$$

を満足する様に設計しなければならない。また、

γ は繰返し回数 (N) に応じて、i) $N < 10^5$ で

$$\gamma = 1 - \frac{2}{3} \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \quad \text{ii) } 10^5 < N < 2 \times 10^6 \quad \gamma = 1 - \frac{2}{3} \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \quad \text{iii) } N > 2 \times 10^6 \quad \gamma = \frac{2}{3} (1 - \frac{2}{3} \frac{\sigma_2}{\sigma_1})$$

ただし、 γ は ± 1 の様に定める。ここで、 σ_1, σ_2 : 応力振幅の上下限値で $|\sigma_1| > |\sigma_2|$ である。また、当規程には鋭い切欠きのある場所では f の75%を、特にすみ肉溶接による十字継手、断続すみ肉溶接継手等

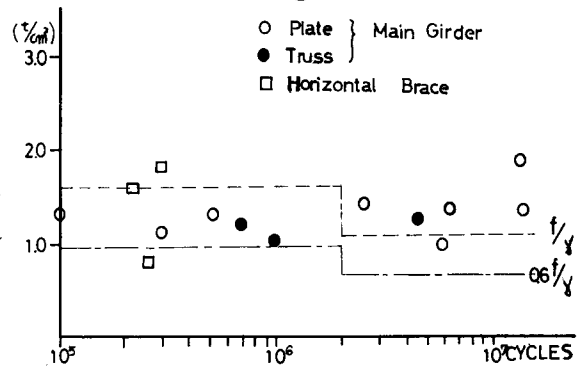
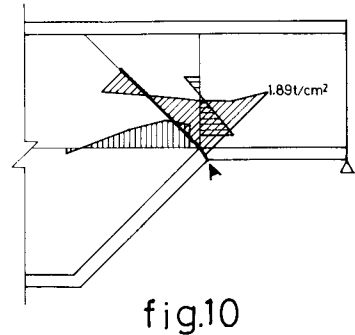
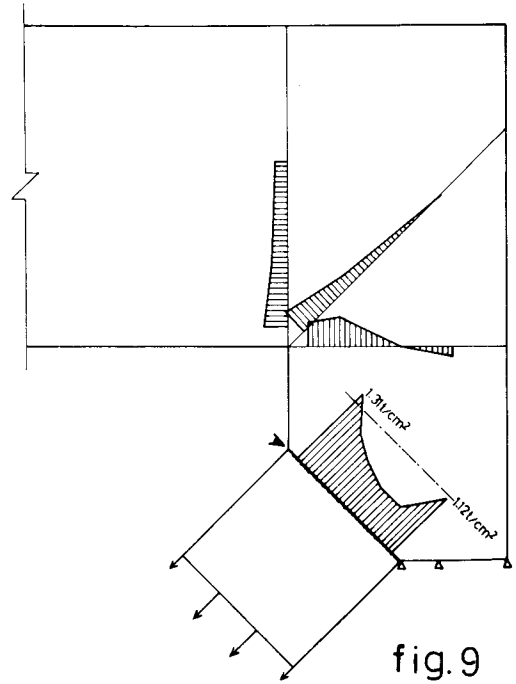


fig.11

に対しては f_y の 60% を超えない様に規定している。fig.12は、許容応力度 (f_y) と応力比の関係である。実線は鋼構造設計規準値で、(a)は $N < 2 \times 10^6$, (b)は $N > 2 \times 10^6$, (c)は $f_y \times 0.6$ を示す。また同図に鋼鉄道橋規準, DIN, BS, AISC, AASHTO, の規準値を示し比較した。図中の値は殆ど $N = 2 \times 10^6$ に対して示され、A は Base Metal, B は最も切欠き効果の大きい場合について示される。実線(b)は A に属する。

5. ま と め

今回の製鉄所におけるフレンガーダー及びその支持部材の損傷調査結果のうち主なものは次の通りである。

1. 損傷は特に製鋼、分塊工場に集中している。
 2. 損傷部材に使用されているクレーンはストリッパ、ワールド、クロークレーン等剛性の高いクレーンに多い。
 3. 損傷時までの使用期間は10年以内が40%、15年以内が70%と早期に損傷を起している。
 4. 損傷時までのクレーンの総運行回数は、 2×10^6 回以上が全体の約50%を占め、(3)の結果を考えるとクレーンの使用頻度が非常に高いと云える。
 5. 損傷の種類のうち特に多いものは、(a)主ガーダーの圧縮フランジヒューブの接合部の亀裂、(b)サブストラクチャ端部の亀裂、(c)上下水平ブレース部材の破断、(d)トラスガーダーの野底がカットプレートに亀裂及びリベット破断及び緩み、等であった。
 6. レール芯の偏心は、今回は調査箇所が少なかったが、大きいもので40mm程度あり、少なくも0.8%程度の偏心量を有している。
 7. 現行の設計法ではクレーン荷重を動荷重として考えないもので、繰り返し回数が 2×10^6 以上では現行の許容値を超えるが、 2×10^6 以下において許容値以下で損傷を起している。しかし、レールの偏心、2次応力、応力集中を考慮した場合には殆ど許容値以上になる。
- 以上の損傷の原因は見方を変えれば a) 設計の良否に依るもの、b) 加工工作に起因するもの、c) 工場における運行管理に関するものと三つに大別できる。それぞれに共通した事柄として荷重源となる天井クレーンそのものの特性が十分判明していないこと、なうびに動動荷重に対する検討が十分ならなかった事があげられる。

終りに今回の調査に当り製鉄所の方々に多大のご協力をいただいたことに対し感謝を表します。

【参考文献】

1. G. Bierett, "Hinweise zur Ausführung von betriebsfesten Kran- und Kranbahn-Trägern für den Schmelzmetallbetrieb, besonders für Hüttankrananlagen," Stahl u. Eisen 1970
2. J. J. Murray "Impact Investigation Using Strain Gages on a Hot Metal Charging Crane," Iron and Steel Engineer, August, 1972
3. G. Mass, "Investigations Concerning Craneway Girders," Iron and Steel Engineer, March 1972

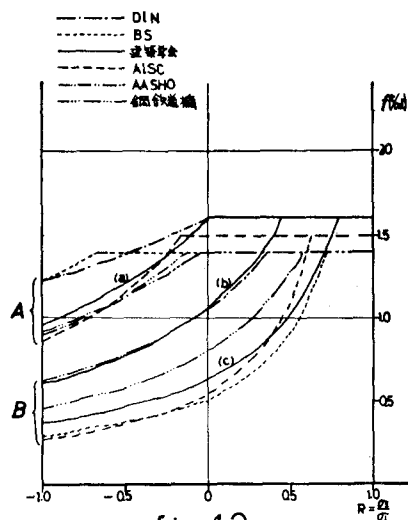


fig.12