

(7) クレーン走行桁支承部の疲労損傷

* * *
西山 領 武元弘之
* * * * *
○本江克二 川井 豊

1. 序

この数年の間に、鉄鋼各社の製鉄所建家における天井クレーン支持構造部に種々の損傷が発生している¹⁾。その原因は、クレーンの大型化・高速化により増大した荷重であり、一方溶接構造の普及に伴って発生頻度の増した溶接部への応力集中、及び溶接欠陥による疲労強度の低下などである。さらにそれらに対する設計・施工・検査上の配慮がたならなかったためでもある。

1974年 JSSCより「疲労設計指針(案)」²⁾が発表され、さらに1981年「クレーンガーダー及び支持架構の設計規準の動向」³⁾の発表があり、ようやく、クレーン走行桁の疲労設計に対する基礎が示されたのが実情である。最近の設計には、それらの規準やこれまでの経験がとりいれられ設計・施工に工夫がされているものの、不規則な走行頻度とクレーン容量が大きく、吊上荷重率が高く、クラブの剛性率が高い製鉄所のクレーンにおいては、クレーン衝撃力と長期許容応力・疲労許容応力の関連性を現段階で確たる指針を示すことは困難であろう。また、バックガーダーに発生する主桁との共働作用による二次応力・レール偏芯^{4,5)}による付加応力等クレーン走行桁の疲労損傷を誘発するさまざまな要因が潜在している^{6,7)}。

しかし、主桁の溶接部や取り合いのカセットプレートの溶接部のディティールには疲労耐力の優劣が明らかなものもあり、橋梁には以前からとりいれられクレーン走行桁にも除々にとりいれられてきている。だが、クレーン走行桁の支承部には、Fig-1 に示す橋梁で用いられる力学的に明解で繰り返し応力や変形に追従性のあるディティール 踏を通常採用していることはなく、Fig-2 に示す移動止めの通しボルトが日本特有の標準的なディティールとして用いられることが多い。主として主桁の移動止めを目的とした通しボルトではあるものの主桁の跳ね上がり変形・連続梁作用・レール偏芯による付加応力等予測しにくい複雑な応力が生じていることが想像される。

本報告は、当社、千葉製鉄所内工場建家で建設後約3年で全数の約1.5%の支承部ボルトの破断損傷が発生し、その破断機構の解明と維持管理と今後の設計の問題点を知るため、クレーン走行時のボルトの応力実測を行い、ボルトに生じる疲労破断の確率を求め、ボルトの締め付け程度によっては早い時期に疲労破断を起こす可能性が高いことを明らかにすると共に今後の設計においてディティールを再考する方がよいことを示唆したものである。

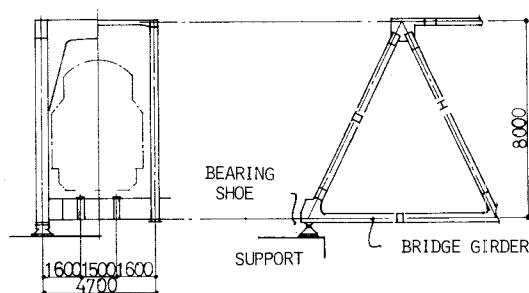


Fig. 1 Example of shoe for steel Bridges

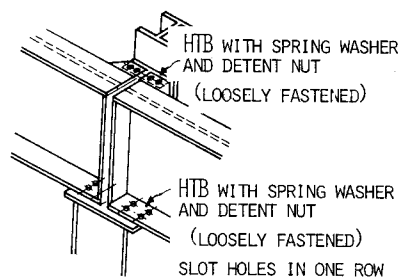


Fig. 2 Typical structural details of support for crane runway girders

2. 支承部ボルトの損傷例

当社、千葉製鉄所におけるボルト破断調査結果を Table-1,2に示す。

Table-1 建設後3年で発生したボルト破断調査結果
(Inspection results of bolts in mills constructed 3 years ago)

工場	ROW-A		ROW-B		ROW-C		ROW-D		TOTAL		平均	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
製鋼工場 K	1		0		5		0		6			
90T クレーン	224	0.45	224	0.00	224	2.23	112	0.00	784	0.77	21	
製鋼工場 D	2		1		12		—		15		1348	1.56
40T クレーン	184	1.09	184	0.54	184	6.52	—		564	2.66		

N ; 破断数 NT ; ボルト全数 r ; 発生率

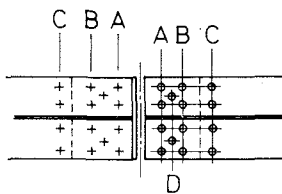


Fig. 3 Arrangement of bolts

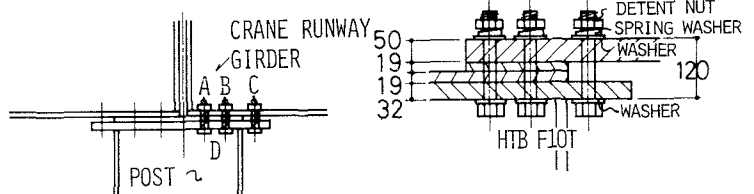


Fig. 4 Detail of support

Table-2 建設後10年以上経過した工場の破断調査例
(Inspection results of bolts in mills constructed more than 10 years ago)

工場	ヤード名	破損数 / 調査本数	発生率 %	経過年数
圧延工場 (A)	精整, モーター, 加熱, ミル	10 / 1024	0.98	16 ~ 29年
圧延工場 (B)	ミル他	1 / 456	0.22	15 ~ 21年
分塊工場	均熱	9 / 312	2.88	29年
厚板工場	ミル他	7 / 400	1.75	10 ~ 22年
冷圧工場	焼鈍, ミル, ロールショップ	5 / 608	0.82	15 ~ 26年
合 計		32 / 2800	1.14	

本調査には、支承部ボルトの仕様がそれぞれ磨きボルト～HTBまで違う種類のものであり、稼働日数も違うため比較は難しいがおおむね、1～3%程度の損傷発生率であることが判る。

3. 支承部の設計思想

当社でよく用いるディティールはFig-2のタイプであり、HTBは手締めとし、スプリングワッシャーの変形を阻害しないようにしてある。設計思想は、おおむね下記の通りである。

- 桁の移動止め
- 鉛直力 P_v はベッドプレートの支圧で負担する。
- 桁の変形はC列は隙間で、A・B列はスプリングワッシャーによって吸収する。
- 制動力・地震時等の水平力 P_h はバックトラスが負担する。
- 締め付け力を緩くするため、繰り返し応力によるナットの緩みは戻り止めナットで防ぐ。

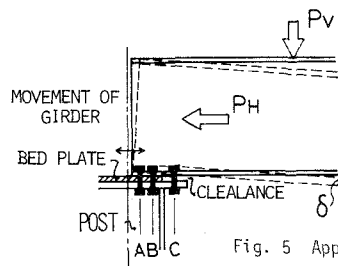


Fig. 5 Applied load and deformation of support

4. 実験概要と考察

Fig. 6に示すボルトを既設ボルトと差換え、クレーンを移動させ応力実測をコイル置き場（25Tクレーン、クレーン走行桁スパン15m、Fig. 7のディティール）と製鋼工場（40Tモールドクレーン、スパン16m、Fig. 8）の2工場で行い、ボルトの締め付け力による影響を知るため、手締、トルク1500kg・cm、トルク2600kg・cmの3種について吊荷を吊ったままクレーン位置を変え実測を行う。

Table-3には、締め付け条件、ボルトに発生した初期応力、クレーンを最も、着目走行桁に接近させ走行した場合の変動幅（測定されたボルト応力の初期応力との差）を示した。

Fig. 9には、クレーン位置を変えて測定した着目ボルトの軸応力度の影響線の一例を示した。

以下に実験から得られた考察を述べる。

- 初期応力（トルク導入時）は軸力 N と軸モーメント M が導入され、 M のばらつきが多く、初期応力の62～72%を占める。
- 初期導入応力が大きい方がクレーンの走行によって生じる応力の変動幅も大きい。これは締め付け力を増すに従い、当該部に固定モーメントが生じるためと考えられる。
- ボルトの応力は隣接桁にクレーンがある場合に既に影響が現れ、走行桁・バックトラス・柱が一体構造として挙動している。
- ボルト変動応力は、トルク1500kg・cmでは平均値で $\sigma_M / \sigma_N = 1.9$ 、2600kg・cmでは $\sigma_M / \sigma_N = 1.1$ といずれも不確実性の大きい曲げ応力成分が卓越している。

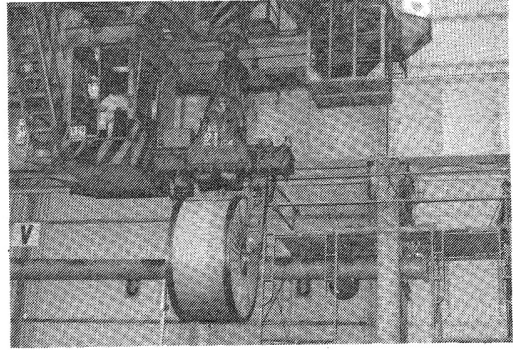


Photo. 1 Field measurement test

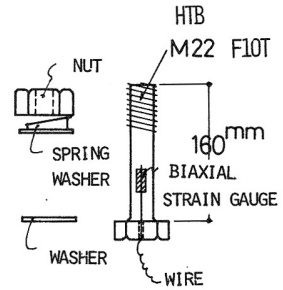


Fig. 6 Details of bolt for field measurement test

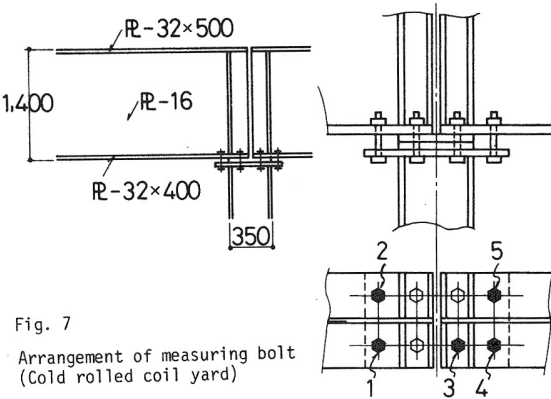


Fig. 7 Arrangement of measuring bolt (Cold rolled coil yard)

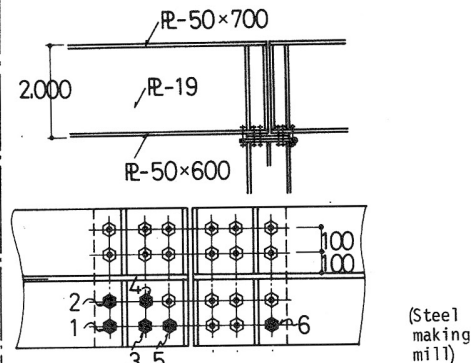
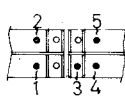
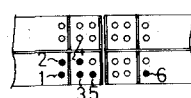


Fig. 8 Arrangement of measuring bolt

従って、このような複雑な挙動がボルト応力変動に大きな影響を及ぼしていることから、初期導入応力との明解な関係を得ることは困難であることが判る。又、ボルト軸応力は比較的ばらつきが小さく管理可能であるが、軸曲げ応力に関してはばらつきが大きすぎて管理不可能である。しかし、疲労強度を支配する最大ボルト変動応力 $\Delta \sigma_{max}$ の頻度分布については、ばらつきが大きいものの正規分布あるいは対数正規分布として取り扱えることから、 $\Delta \sigma_{max}$ を正規分布すると仮定した場合のボルトの破断確率をいくつかの仮定に基づき推定する。

Table-3 ボルト応力の測定結果 (Field measuring test results of bolt stress)

	ボルトNo	初 期 応 力					変 動 応 力					ボルト位置
		N	M	ボルト応力度 tonf/cm ²			N	M	ボルト応力度 tonf/cm ²			
		tonf	tonfcm	σ Max	σ N	σ M	tonf	tonfcm	σ Max	σ N	σ M	
手締め	1	2.412	1.061	1.888	0.704	1.184	0.382	0.164	0.700	0.112	0.588	
	2	2.573	2.572	2.379	0.750	1.629	1.934	2.399	1.936	0.492	1.436	
	3	2.760	3.320	4.513	0.804	3.709	1.092	1.662	2.174	0.317	1.857	
	4	4.008	0.461	1.684	1.170	0.514	2.638	0.109	0.893	0.771	0.122	
	5	2.107	1.074	4.425	0.615	3.810	0.929	0.620	0.964	0.271	0.693	
トルク kgcm 1,500	1	2.890	1.171	2.150	0.842	1.308	2.400	0.801	1.592	0.699	0.893	
	2	2.066	2.572	3.476	0.603	2.873	1.697	1.092	1.720	0.500	1.220	
	3	2.093	0.980	1.705	0.611	1.094	0.833	0.334	0.618	0.244	0.374	
	4	2.537	2.623	3.669	0.739	2.930	0.293	0.097	0.195	0.086	0.109	
	5	3.554	2.400	3.717	1.037	2.680	0.958	0.437	0.766	0.279	0.487	
6	2.426	0.559	1.331	0.708	0.623	2.383	0.712	1.491	0.695	0.796		
平均	2.675	1.708	2.812	0.780	2.032	1.413	0.766	1.186	0.406	0.780		
標準偏差	0.587	0.950	1.114	0.171	1.147	0.796	0.683	0.598	0.229	0.520		
トルク kgcm 2,600	1	5.302	1.065	2.736	1.546	1.190	2.359	0.764	1.260	0.695	0.565	
	2	6.410	3.997	6.334	1.869	4.465	2.835	0.988	2.033	0.827	1.206	
	3	5.426	1.779	3.570	1.583	1.987	2.443	0.752	1.552	0.712	0.840	
	4	5.369	2.700	4.582	1.567	3.015	2.609	0.090	0.861	0.760	0.101	
	5	6.442	4.529	6.936	1.880	5.056	2.815	2.076	3.140	0.821	2.319	
6	4.865	1.273	2.841	1.840	1.001	4.123	0.729	1.508	1.203	0.305		
平均	5.636	2.557	4.500	1.714	2.786	2.864	0.900	1.726	0.836	0.889		
標準偏差	0.587	1.321	1.635	0.150	1.549	0.590	0.594	0.723	0.171	0.732		

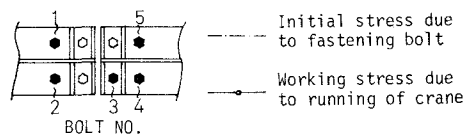
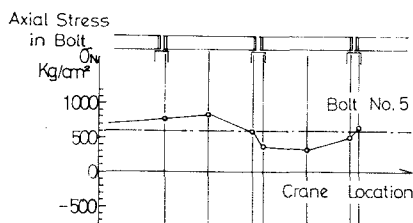
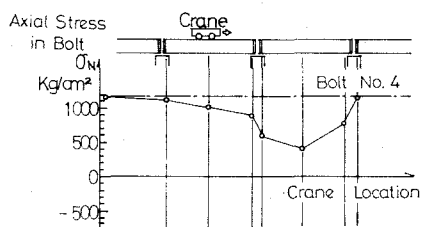
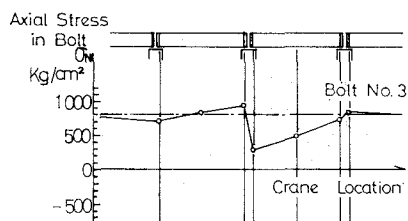
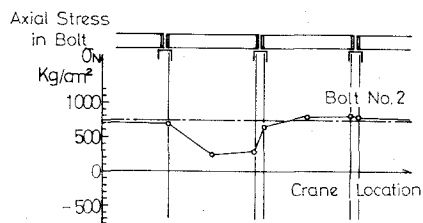
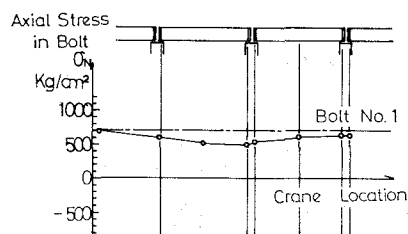


Fig. 9

Variation of axial stress in bolt due to running of crane (Manual fastening with ratchet wrench, Coil yard)

5. 疲労強度と破断確率

今回の実測によって得られた支承ボルトの変動応力に関する統計量と、ボルトの疲労強度に関する資料を用いることによって、破断確率を推定した1計算例を示す。まず、ボルトの疲労強度 R 変動応力 S がいずれも簡単のため正規分布に従うものとする R, S の生起確率は、

$$f(R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_R} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{R - \bar{R}}{\sigma_R} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$f(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_S} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{S - \bar{S}}{\sigma_S} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$\bar{R}, \bar{S}$; 平均値 σ_R, σ_S ; 標準偏差

にて表される。ボルトの破断確率 P_f は

$$P_f = \text{Prob} \left((R - S) \leq 0 \right) \quad (3)$$

$$\text{即ち, } P_f = \Phi(-\beta_1) \quad (4)$$

$$\text{ここに, } \beta_1 = (\bar{R} - \bar{S}) / \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (5)$$

で計算される。

一方、ボルトの疲労強度の平均値 R と荷重繰返し数 N の関係は、ボルトの軸方向の引張疲労試験結果を参考に次式で表されるものとする。

$$R = \frac{10}{3 \sqrt{N}} \quad (\text{tonf/cm}^2) \quad (6)$$

ボルトの疲労強度の標準偏差も N の関数となるが簡単のため次式で表す。

$$\sigma_R = \eta \log(10 \times \bar{R}) \quad \eta = 0.4 \text{ とする。} \quad (7)$$

ボルトの変動応力 S の分布は、実測最大変動応力

$\Delta \sigma_{\max}$ 分布を用いて求める。

等価な荷重繰返し数 N_{eq} は下式によって求められる。

$$N_{eq} = N_t \cdot F_i(m, q, r) \quad \begin{matrix} N_t; \text{ 走行回数} \\ m=3 \\ q, r; \text{ 分布形状のパラメータ} \end{matrix} \quad (8)$$

Fig - 11には、計算手順を示す。

次に、 $m=3, q=7, r=4$ と仮定した（当社他工場でのシュミレーション結果から推定）場合のボルト破断確率の計算例を示す。

$$F_i = 0.294, \quad N_t = 50 \times 365 \times 0.7 \times Y \\ (50 \text{ 回/day, 年稼働率 } 0.7, \text{ 経過年数 } Y \text{ とした})$$

を用いて経過年数 Y をパラメータにし、 $N_t \rightarrow N_{eq} \rightarrow R \rightarrow \sigma_R$ を求め、次にトルク $1,500 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 及び $2,600 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 導入時のボルト変動応力 $\Delta \sigma_{\max}$ の分布（Table - 3参照）から

$$T = 1,500 \text{ kg} \cdot \text{cm} \rightarrow S = 1.186 \text{ tonf/cm}^2, \quad \sigma_S = 0.598 \text{ tonf/cm}^2$$

$$T = 2,600 \text{ kg} \cdot \text{cm} \rightarrow S = 1.726 \text{ tonf/cm}^2, \quad \sigma_S = 0.723 \text{ tonf/cm}^2$$

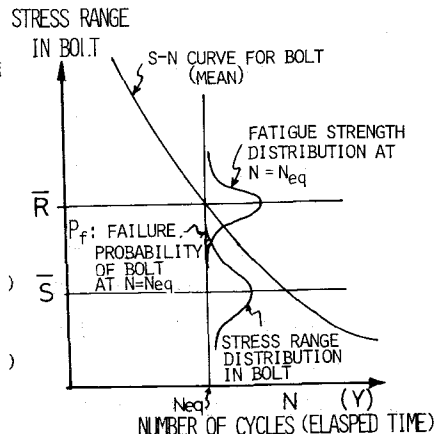


Fig. 10 Schematic illustration of failure probability of bolt

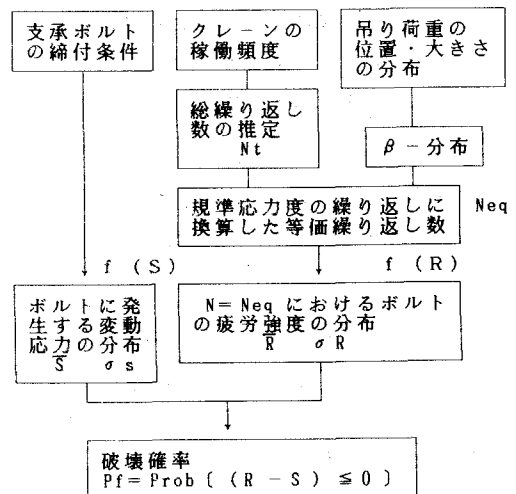


Fig. 11 Estimation procedure of failure probability of bolts in support

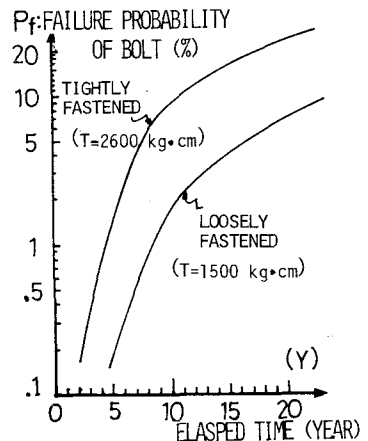


Fig. 12 Estimated failure probability of bolt in relation to fastening condition

を式(4)、(5)を用いて、各々のボルト破断確率を求めるとFig-12のごとくなり、Table-1(Y=3年)の結果と比較すると、締め付け力や走行回数の仮定に問題はあるものの損傷率はオーダー的にあっていいといえる。

6. 今後の支承部に関する一考察

今回の実測、及び検討において以下の結論を得た。

- a) 支承部ボルトには、計算にのらない複雑な応力が生じており、クレーン走行による変動応力を受ける。この変動応力は初期締め付け条件に大きく依存し、締め付け力が増すと共に増大する。
- b) 変動応力は、軸応力と軸曲げ応力からなり、軸曲げ応力は、ばらつきが大きく比例関係も明瞭でない。
- c) 定性的には、疲労強度を支配する変動応力幅を小さくすることが良策であり、ボルト締め付け力は、戻り止めに必要な最小限が良い。
- d) 施工後早い時期に破断したものは、初期締め付け力が高すぎた結果の疲労破断と考えられる。
- e) ボルト締め付け力が小さい場合(トルク1,500 kg・cm以下)では、その破断確率は低く10年程度で約1%と推定される。
- f) ボルト座面の不整を極力小さくして、軸曲げ応力を防止する方が良い。

最後に、Fig-13に支承部のディティールの参考例を示す。詳細な設計仕様は不明だが、日本の設計によるディティールに比べ、桁の変形量を十分に考慮したディティールが見受けられる。

いずれにしても、今後の設計においては、ディティールの改善が必要であるといえる。

参考文献

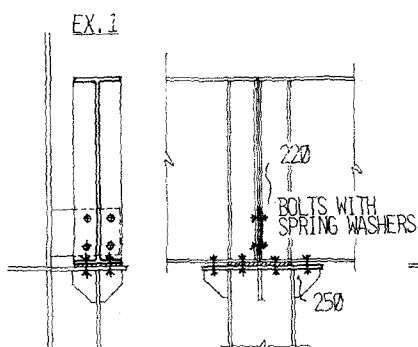
- 1) JSSC; クレーンガーダーの疲労損傷に関する調査報告、'76.8, Vol12, No.128
- 2) JSSC; 疲労設計指針・同解説(案) '74.5, Vol10, No.101
- 3) JSSC; クレーンガーダー及び支持架構の設計規準の動向、'81.4, Vol17, No.180
- 4) 西山, 武元他; クレーン走行桁の静的載荷試験(その1), S 53建築学会梗概集, 2413
- 5) 西山, 武元他; クレーン走行桁の静的載荷試験(その2), S 53建築学会梗概集, 2414
- 6) 西山, 武元他; レール偏芯によるクレーン走行桁の局部応力の実験的研究(その1)
- 7) 西山, 武元他; レール偏芯によるクレーン走行桁の局部応力の実験的研究(その2)
S 55建築学会梗概集, 2378
2379
- 8) by Karl H. Frank; Proc. of ASCE Vol106 No. ST6, June, 1980 P1279~1293

RELATED DESIGN SPECIFICATIONS

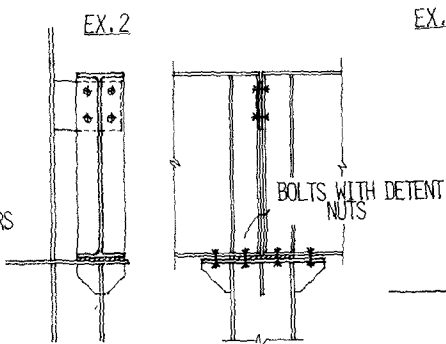
- 1) RECOMMENDATIONS FOR THE DESIGN AND EXECUTION OF THE TRACKS FOR TRAVELING CRANES : C.T.I.C. M. RECOMMENDATION PROJECT, CONSTRUCTION METALLIQUE, NO.3-SEPT, 1976
- 2) DIN 4132 KRANBAHNEN, STAHLTRAGWERKE. GRUNDSATZE FUR BERCHNUNG, BAULICHE DURCHBILDUNG UND AUSFUHRUNG : FEBRUAR 1981

FOR REFERENCES

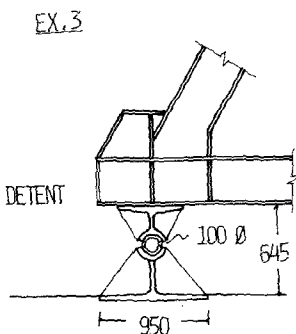
- 1) RULES FOR THE DESIGN OF HOISTING APPLIANCES : FEDERATION EUROPEENNE DE LA MANUTENTION SECTION 1, 1970
- 2) JIS B8821 SPECIFICATION FOR THE DESIGN OF CRANE STRUCTURES : JIS 1976
- 3) BS 2573 SPECIFICATION FOR PERMISSIBLE STRESSES IN CRANES AND DESIGN RULES : BSI 1977
- 4) KONSTRUKTION UND BERECHNUNG VON KRANBAHNEN NACH DIN 4132 : J. OXFORD, H.A. BITZER, VDI - INFORMATIONSTAGUNG, 1982



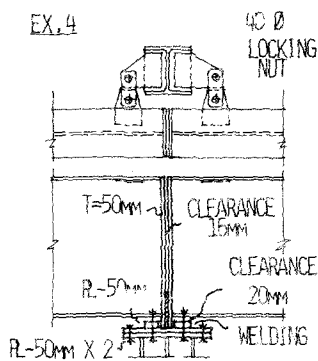
N-STEEL MILL/JAPAN
DESIGN IN 1970



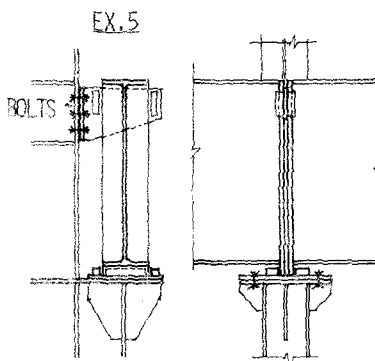
STRUCTURAL DETAILS
OF LIGHT C.R.G.
(BEFORE 1972)
CHIBA WORKS/JAPAN



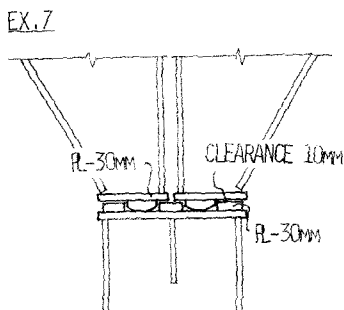
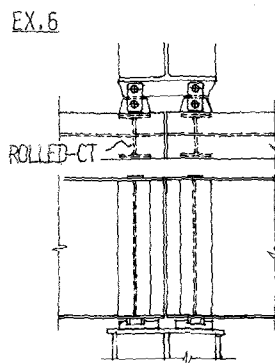
RAILWAY STEEL BRIDGE
JAPAN



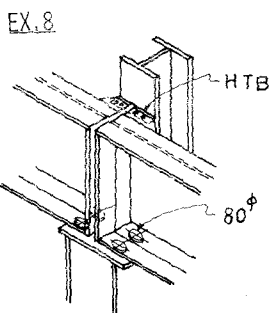
DESIGNED IN FRANCE AND U.K.



C.T.I.C.M. (FLANCE)



DESIGNED IN F.R.GERMANY



IMPROVED DETAIL (SHEAR KEY TYPE)
DESIGNED BY K.S.C.

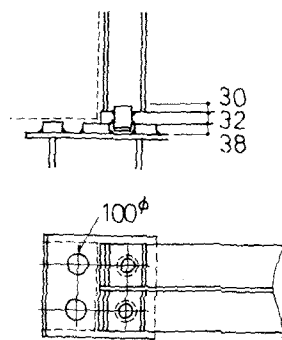


Fig. 13 Examples of improved structural details of support

Fatigue Damage in Supports Of Crane Runway Girders

R. Nishiyama*, H. Takemoto*, K. Hongou*, Y. Kawai**

In this decade, crane runway girders in steel mills have been suffering from fatigue damages. Several investigations on this problem have been conducted to prevent the fatigue cracking and failures in Japan, U.S.A and Europe. And, some recent design specifications in Europe were revised taking these research results into account.

Fatigue damage have been often experienced in supporting parts of crane runway girders in Japan, partly because of the peculiar structural details to Japanese design. In general Japanese design, runway girders are connected to posts with some bolts, which are designed intending to prevent large movement and/or falling down of runway girders, without settling special bearing shoes. Failure of these bolts is one of typical fatigue damages in supporting parts of crane runway girders.

The present study was conducted to investigate the state of fatigue damage in supporting parts of crane runway girders, and to estimate the probability of failure of existing structures for the future maintenance and repair.

A series of inspection into existing bolts and field measurements on stress histories of bolts was carried out in Chiba Works. The inspections into bolts revealed that 1.5% of the total bolts examined were damaged by about 3 years after construction. And, the field measurement of the stress histories of the bolts showed that the connecting bolts did not behave as intended in design mainly attributed to over-fastening. As a further information, connecting bolts were subjected to severe repeated bending stress in addition to repeated axial stress due to the deformation of runway girders and the bad conditions of contact surface between the bolt head and the flange of girder.

For future maintenance, an example of estimation method of the failure probability of bolts was illustrated and compared with the present inspection results.

As a conclusion, more attention should be paid to the structural details of supporting parts of crane runway girders taking account of the function of the support and movement of runway girders in design procedures.

* Civil Engineering and Construction Dept., Chiba Works,
Kawasaki Steel Corporation, Chiba

** Structure Research Laboratories, Engineering Division,
Kawasaki Steel Corporation, Chiba