

保全データによるガントリー・クレーンの信頼性・ 保全性分析とその改善について

金子 仁*¹

Study of Improving Reliability and Maintainability on Gantry Crane by Analysis of Maintenance Records

Hitoshi KANEKO

Abstract

Recently container ships have been upsized and even a 11,000TEU containership entered into service in 2006. With the above background, a gantry crane (crane, hereafter) at a container terminal has been upsized as well and its handling rate of container has become larger by using state-of-the-art techniques. To speed up the handling rate, the double-hoist and traverse system are employed which are more sophisticated in mechanism. This would more likely cause malfunction, which, in turn, results in tremendous delay in cargo-handling time and consequently ship departure. Both-shipside-cargo-handling has been introduced these days at Ceres Paragon Terminal, Amsterdam. When it causes malfunction, a ship is blocked in the dock and delayed.

While a crane affects berth utilization, cargo handling time and ships operation, no intensive study has been conducted about its reliability and maintainability from the practical and statistical viewpoint. This study is to evaluate the crane reliability and maintainability by analyzing the maintenance records which were collected over 2.5 years and discuss the method of improving the reliability and maintainability of the crane.

Keywords: Gantry Crane, Reliability, Maintainability, Container Terminal, Cargo Handling Gear

1. はじめに

1966年、米国のシーランド社が海上コンテナ輸送を開始し、日本は2年後の1968年にコンテナサービスを開始した。それ以降、輸送量は順調に伸びてきている。近年、コンテナ船の大型化が急ピッチであり、2006年8月にはデンマーク船社のマースクラインが11,000TEU積載船(全長397m, 全幅56m)を就航させている。これは、海上コンテナ輸送が開始されてから約40年間で約13倍の大型コンテナ船となる。コンテナ船の大型化につれ世界の港湾では、超大型コンテナ船用に水深15mのバースを整備し、また、コンテナターミナル(以後、CTと称す)には船上の24列設置に荷役対応できる超大型船用のガントリー・クレーン(以後、GCと称す)の設置が出現してきている。

このようにCTは大型船に合わせるために荷役システムの大規模化、高速化を進めているが結果的にシステムが複雑化となっており、故障発生の可能性が増大しCTの信頼性が懸念されている。CTの信頼性が悪いと、大型船の荷役遅延、CTの効率低下となり船社およびCT会社に経済的な損失を与えることは勿論であるが、物流システムは世界的なサプライチェーンを形成していることから社会にも影響を与えることになる。

2006年に懸念されていたことが現実となった。オランダのロッテルダム港のEuro Container Terminalにおいてコンテナの無人搬送システムが故障しその修復に長期間かかり、社会に影響を与えたことは耳目に新しい。

ターミナルに設置されたGCは船舶と陸上との間で荷役に不可欠なシステムであり、その役目はきわめて大きい。最近では、大型船の荷役を高速に行うためダブルホイスト

2007年9月21日受理

*1 東海大学海洋学部航海学科航海専攻 (Course of Navigation, Department of Navigation, Marine Science and Technology, Tokai University)

方式、トラバース方式等の複雑な GC が開発されてきている (Fig.1), (運輸省港湾局技術課, 1998). また, ヨーロッパではドック方式のバースで GC が船を挟んだ両舷荷役方式の採用もあり, GC の故障で本船をブロックする可能性がある (Fig.2) (金子 仁, 2006).

このように GC の故障による関係者へ損害を与える可能性が大きくなっているにもかかわらず, GC の保全データによる信頼性の解析が皆無に等しい状況である. その理由は, 保全現場で信頼性を分析する目的をもってデータを収集するのに労力がかかることだからと考えられる.

本研究の目的は, 現場から GC の保全データを収集し, データを蓄積すること, また GC の信頼性および安全性を

分析し明らかにすることである. 本データは次の研究である CT の最適化設計のためのモデル開発に使用する予定である (西村ほか, 2004; 橋本ほか, 1980). 本研究結果は GC メーカーの信頼性・安全性の向上のためのデータとなるばかりでなく, CT 全体の設計に役立つものと考えている.

2. 研究の概要

2.1 対象コンテナターミナルの概要

今回の対象ターミナルは, 東京湾に立地する船社系のターミナル運営会社で (以下, A社という) であり, 水深が 15m の 2 バースに 6 基のクレーンを設置している. 現在

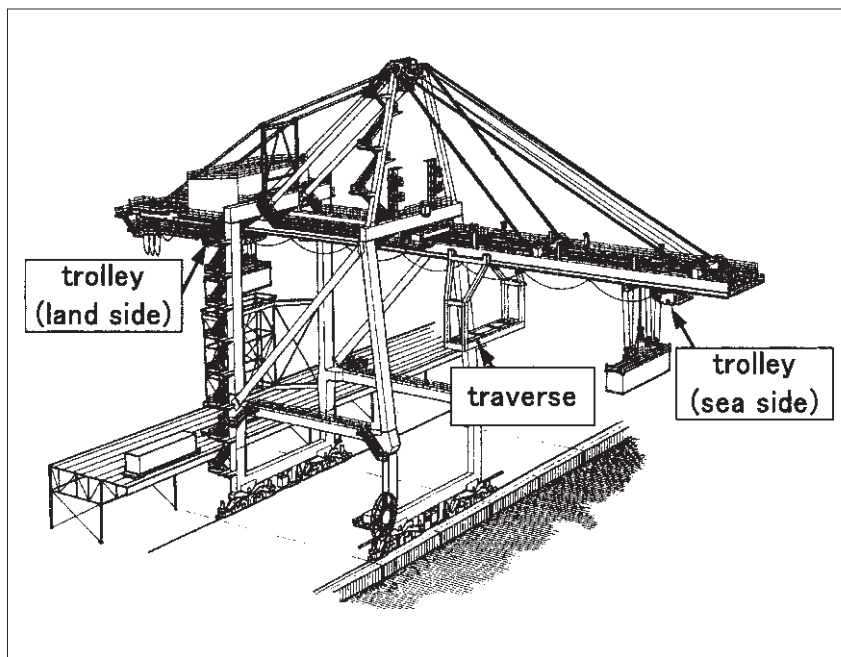


Fig.1 Complicated GC system which has 2 trolleys and a traverse



Fig.2 Container terminal which has possibility to block ship by gantry cranes

は、最大約6,500個積載のコンテナ船がサービスを受けている。一般にポストパナマックスコンテナ船の荷役では1隻に4基のGCが割り当てられる。

分析対象のGCの種類はロープトロリー式橋型クレーンであり、Fig. 3に対象GCの構造図、Fig. 4に写真、Table 1に要目を示す。

2.2 保全体制と保全方法

ここで、CTの保全体制を概観してみる。A社では、定期的な整備においては、自社の保全員で実施されている。夜間にも一部保全が実施されるが、基本的には、定期的な

Table 1 Particular of gantry crane

ITEM	Content
Type	Rope trolley crane
Rating load	Container 40tons, Heavy: 50tons
Rating speed	Hoist 70/150m/min
Rating lift	51m
Wire rope	Hoisting: IWC6×FI(29) 15mm
Span	30m
Power	3Φ, 6600V

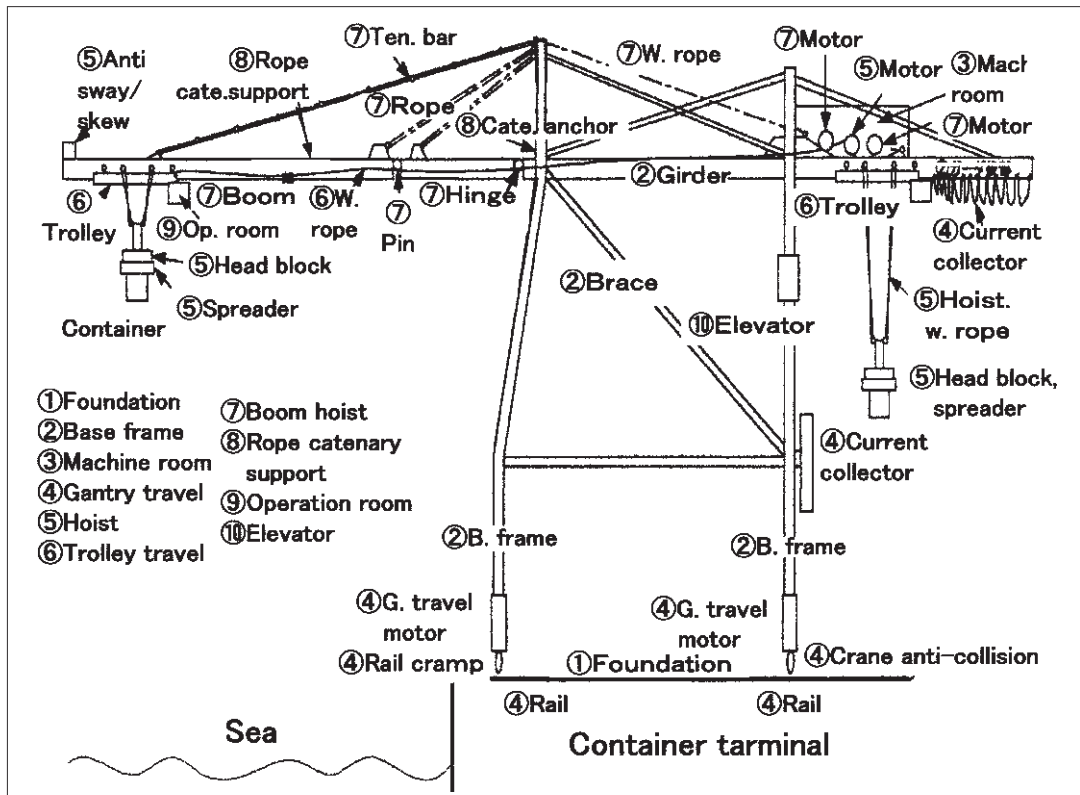


Fig. 3 Structure of gantry crane

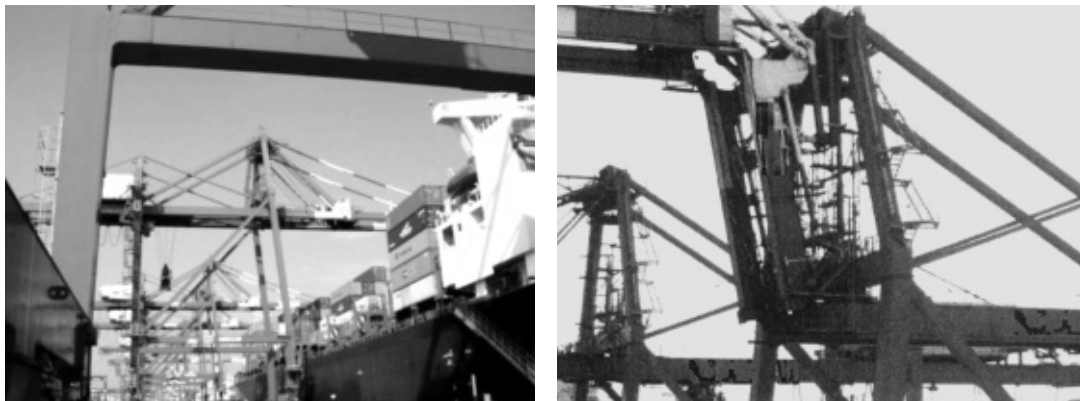


Fig. 4 Picture of gantry crane

保全が実施されるのは、日中の時間帯である。荷役が行われる昼間にトラブルがあれば、機器担当者または全員で修理にあたる。夜間は2名の荷役アテンド要員が当直を行い、機器の異常に対応することができる。しかし、対応範囲は限られ、GCの振替、スプレッドの取替等で対処している。一般に毎月発生する「月例点検整備」は、A社の保全員で実施されるが、それ以外の「年次点検整備検査」や「ワイヤロープの交換」は多くの要員を必要とし、一部または全部を外注する傾向にある（金子・堀籠，2006）。

2.3 保全データ

(1) 保全データの原票

保全データ作成のために利用できる原票には、毎日の作

業が記録されている「作業記録簿」、年次点検作業が記録されている「年次点検整備検査報告書」、および外注作業の内容が記録されている「請求書」がある。これらの原票をターミナル会社から入手し分析用の保全データを作成した。これらのデータ収集整理に2.5年を要した。

(2) 保全作業データ

調査対象のターミナルにはGCが6基設置されている。これらの設置後の年月は3年5ヶ月～6年7ヶ月である。本研究ではそのうちの3基を対象としているが、それらの分析対象GCを1号機（設置後3年5ヶ月）、2号機（設置後6年）、3号機（設置後5年11ヶ月）と称す。

Table 2 System category on gantry crane

ITEM I	ITEM II		ITEM III	
1. Foundation	(1) Rail (foundation)		(a) Mechanical	
2. Base frame	(2) Main structure (foot, brace)	(4) Piller upper/aft		
	(3) Girder	(5) Tension bar		
3. Machine room	(1) Frame/floor	(2) Floor		
4. Gantry travel	(1) Gantry travel driveline	(5) Crane tie down		
	(2) Rail clamp (gantry travel)	(6) Seismic Isolation		
	(3) Crane anchor	(7) Current collector (gantry travel)		
	(4) Crane anti-collision			
5. Hoist	(1) Hoist driving	(5) Spreader trim and list adjusting		
	(2) Hoist driveline	(6) Head block		
	(3) Sheave shuttle	(7) Spreader		
	(4) Anti sway/skew			
6. Trolley travel	(1) Trolley travel driving	(4) Rail trolley travel		
	(2) Trolley driveline	(5) Rope tension adjusting (trolley travel rope)		
	(3) Trolley	(6) Current collector (trolley travel)		
7. Rope catenary support	(1) Rope catenary truck driveline	(3) Rope catenary anchor		
	(2) Rope catenary truck	(4) Rope tension adjusting (catenary)		
8. Boom hoist	(1) Boom hoist driving	(3) Boom hook		
	(2) Boom hoist driveline	(4) Ship anti-collision		
9. Operation room	(1) Operation console	(4) Alarm indication board		
	(2) Remote I/O board			
	(3) Tel. & communication			
10. Power high voltage supply	(1) 1st power high supply box	(2) Transformer (high voltage)	(b) Hydraulic/lubricant	
11. Power low voltage supply	(1) Transformer (low voltage)	(3) Power feeder (local)		
	(2) Power supply board (low voltage)			
12. Lighting	(1) Lighting (passage)	(3) Lighting (room/power distributing board)		
	(2) Obstacle light			
13. Elevator	(1) Frame /cage guide	(2) Hoist driving /cage		
14. Winch	(1) Winch			
15. Others	(1) Air conditioning	(2) CRT monitoring		
				(c) Electric/control
				(d) Base frame

(3) システム分類

GC をシステム毎に分析するため ITEM I, ITEM II, ITEM III の内容で分類した。ITEM I では「Hoist」, 「Gantry travel」, 「Trolley travel」, 「Boom hoist」等の15システムに、ITEM II ではITEM I をさらに53のシステムに分類した。ITEM III では「Mechanical」, 「Electric/control」, 「Hydraulic/lubrication」, 「Base frame」の4システムに分類した。分類の詳細を Table 2 に示す。

2.4 各種定義

本研究における定義を以下のようにする。

(1) 故障

故障とは、GC の各種のシステム、搭載品あるいはその部品がある規定の条件の下で規定の機能を果たせない状態をいう（金子ほか，2004）。故障はGC を止めるもの、止めなくても修理できるものがあるが、運転中に発見した全ての故障を対象とする。

(2) 信頼性・保全性の評価指標

GC の信頼性および保全性の評価指標を以下のように定める。これらの指標は筆者のグループが舶用機関の信頼性・保全性の分析に使用しているものである（橋本ほか，1980; Hashimoto *et al.*, 1981）。

- 故障率 λ [件/1000hr] (Failure rate of each maintenance)

$$\lambda = \frac{\text{故障件数}}{\text{運転時間}} \times 1000 \quad (1)$$

- 平均保全時間 $MTTR$ [hr/件] (Mean time to repair)

$$MTTR = \frac{\text{保全時間}}{\text{故障件数}} \quad (2)$$

- 保全時間率 mt [hr/1000hr] (Mean maintenance time rate of each maintenance)

$$mt = \frac{\text{保全時間}}{\text{運転時間}} \times 1000 \quad (3)$$

- 平均保全工数 mh [MH/件] (Mean man-hour per a occurrence of each maintenance)

$$mh = \frac{\text{保全作業工数}}{\text{故障件数}} \quad (4)$$

- 配員指数 MI [MH/1000hr] (Manning index of each maintenance)

$$MI = \frac{\text{保全作業工数}}{\text{運転時間}} \times 1000 \quad (5)$$

- 平均故障間隔 $MTBF$ (Mean time between failures) [hr]

$$MTBF = \frac{\text{運転時間}}{\text{故障件数}} \quad (6)$$

3. 保全データの分析結果

3.1 全体の分析

Table 3 に GC3 基の指標値を示す。GC3 基の平均としては、故障率15.24 [件/1000hr]、平均保全時間2.24 [hr/件]、保全時間率34.20 [hr/1000hr]、平均保全工数7.59 [MH/件]、配員指数115.64 [MH/1000hr]、平均故障間隔65.62 [hr] および稼働率20.49 [%] の信頼性・保全性の評価指標値を得た。各基の数値を比較すると同じような値であり、信頼性および保全性が同じ程度といえる。

既存の研究データとして唯一1998年に（社）港湾荷役機械システム協会が全国36ヶ所のCT についてアンケート方式で調査し協会誌「港湾荷役」に発表したものがある（港湾荷役機械システム協会，1998）。しかしながら、主に整備状況に関する調査であり故障に関するものは少ない。当協会のデータを利用して本研究と関係する保全時間率のみが計算できた。その値は平均24.9 [hr/1000hr] であった。本研究より9.3 [hr/1000hr] 小さい値である。本研究では詳細に殆どの故障を対象としているが、当協会の調査はアンケート式であり概略をつかむことが目的であること、GC を止めて修理する大型の故障が対象と思われることから差が出ているものと推定できる。

3.2 システム別の分析

各システムの評価方法について説明する。「故障率」, 「保全時間率」および「配員指数」においては累積計算が可能であり全体に占める割合を知ることができるのでパレ

Table 3 Evaluation indices of reliability and maintainability for 3 gantry cranes

Crane No.	Failure rate	Mean time to repair	Mean maintenance time rate	Mean man-hour per a occ.	Manning index	Mean time between failures	Operation rate
	occ./1000hr	hr/occ.	hr/1000hr	MH/occ.	MH/1000hr	hr	%
No. 1	16.07	2.06	33.15	6.36	102.21	62.23	20.03
No. 2	15.15	2.37	35.92	7.81	118.35	66.01	21.12
No. 3	14.85	2.24	33.30	8.14	120.94	67.34	20.32
Average	15.24	2.24	34.20	7.59	115.65	65.62	20.49

ート分析を行い評価する。「平均保全時間」および「平均保全工数」については1件当たりの値であり、累積計算ができないので平均値と比較して評価する。

本文中の説明において「故障率」, 「保全時間率」および「配員指数」では評価指標値と全体に占める割合とした。すなわち「各システム名」評価指標値(%割合)の順に表している。一方, 「平均保全時間」および「平均保全工数」では評価指標値と全体平均との比較(倍率)とした。すなわち「各システム名」評価指標値(倍率)の順に表している。また, 評価指標値の単位は省略している。

3.2.1 ITEM I の分析

Table 4 に分類 ITEM I の信頼性・保全性評価指標値を示す。この表から以下のように説明する。

(1) 故障率 λ [occ./1000hr]

故障率の大きい順に「Hoist」7.46 (49.0), 「Operation room」2.19 (14.4), 「Lighting」1.33 (8.7) であり, 上位3システムで約75%となる。信頼性向上には, 先ずこれらのシステムの改善が必要である。例えば上位3システムの信頼性を30%向上させると全体の21%の向上となる。

(2) 平均保全時間 $MTTR$ [hr/occ.]

平均保全時間が平均より大きいシステムは「Rope catenary support」4.53 (2.0), 「Power low voltage supply」3.41 (1.5), 「Hoist」2.66 (1.2), 「Gantry travel」2.55 (1.1) の4システムである。「Rope catenary support」および「Power low voltage supply」は故障の発生は少ないが, 発生した場合に多くの修理時間を要する

システムであるといえる。

(3) 保全時間率 mt [hr/1000hr]

保全時間率の大きい順は「Hoist」19.83 (58.0), 「Operation room」3.42 (10.0), 「Gantry travel」2.79 (8.2) であり, この上位3システムで全体の75%を越える。

(4) 平均保全工数 mh [MH/occ.]

平均保全工数が平均値より大きいサブシステムは「Rope catenary support」12.75 (1.7), 「Hoist」10.82 (1.4) の2システムである。これらは, 一度故障が発生すると大きな修理工数となる。

(5) 配員指数 MI [MH/1000hr]

配員指数が大きい順は「Hoist」80.77 (69.8), 「Gantry travel」10.08 (8.7) となり, 2サブシステムで78%を占める。「Hoist」だけで約70%を占めることから, このシステムの信頼性と保全性の向上が優先される。

3.2.2 ITEM II の分析

Table 5 に分類 ITEM I のサブシステムである ITEM II の信頼性・保全性評価指標値を示す。Table 5 から以下のこと言える。

(1) 故障率 λ [件/1000hr]

故障率が大きい順に「Headblock」4.22 (27.7), 「Spreader」1.60 (10.5), 「Operation console」1.29 (8.5), 「Lighting (passage)」0.70 (4.6), 「Current collector (trolley travel)」0.63 (4.1), 「Anti sway/skew」0.59 (3.9), 「Hoist driving」0.55 (3.6), 「Obstacle light」0.55 (3.6), 「Rope tension adjusting (trolley travel rope)」0.47 (3.1),

Table 4 Reliability and maintainability evaluation indices on ITEM I

System name	Failure rate		Mean time to repair		Mean maintenance time rate		Mean man-hour per a occ.		Manning index	
	occ./1000 hr	percent-age %	hr/occ.	magnification	hr/1000 hr	percent-age %	MH/occ.	magnification	MH/1000 hr	percent-age %
Hoist	7.46	48.98	2.66	1.19	19.83	57.99	10.82	1.43	80.77	69.84
Trolley travel	1.29	8.46	2.06	0.92	2.66	7.77	5.41	0.71	6.98	6.03
Gantry travel	1.09	7.18	2.55	1.14	2.79	8.17	3.61	0.48	10.08	8.72
Boom hoist	0.27	1.80	1.64	0.73	0.45	1.31	2.30	0.30	1.04	0.90
Rope catenary support	0.31	2.05	4.53	2.02	1.42	4.14	12.75	1.68	3.99	3.45
Operation room	2.19	14.36	1.56	0.70	3.42	10.00	2.73	0.36	5.97	5.16
Elevator	0.43	2.82	1.86	0.83	0.80	2.34	4.68	0.62	2.01	1.74
Machine room	0.12	0.79	1.00	0.45	0.12	0.35	1.33	0.18	0.16	0.14
Power high voltage supply	0.04	0.26	1.00	0.45	0.04	0.11	1.00	0.13	0.04	0.03
Power low voltage supply	0.20	1.28	3.41	1.52	0.67	1.95	6.77	0.89	1.32	1.14
Lighting	1.33	8.72	0.85	0.38	1.13	3.29	1.39	0.18	1.84	1.59
Others	0.51	3.35	1.73	0.77	0.88	2.57	2.86	0.38	1.46	1.26
Total/average	15.24	100.00	2.24	1.00	34.20	100.00	7.59	1.00	115.65	100.00

Table 5 Reliability and maintainability evaluation indices on ITEM II

System name	Failure rate		Mean time to repair		Mean maintenance time rate		Mean man-hour per a occ.		Manning index		ITEM I	Remarks
	occ./1000 hr	percentage %	hr/occ.	magnification	hr/1000 hr	percentage %	MH/occ.	magnification	MH/1000 hr	percentage %		
Head block	4.22	27.70	2.81	1.25	11.85	34.65	12.79	1.69	53.99	46.68		Hoist.
Spreader	1.60	10.51	2.12	0.94	3.39	9.91	6.38	0.84	10.23	8.84		Hoist.
Anti sway/skew	0.59	3.85	2.57	1.15	1.50	4.40	6.57	0.87	3.85	3.33		Hoist.
Hoist driving	0.55	3.59	2.46	1.10	1.35	3.94	7.00	0.92	3.83	3.31		Hoist.
Sheave shuttle	0.27	1.80	2.68	1.20	0.73	2.14	7.46	0.98	2.04	1.77		Hoist.
Hoist driveline	0.16	1.03	5.00	2.23	0.78	2.29	38.75	5.11	6.06	5.24		Hoist.
Spreader trim and list adjusting	0.08	0.51	2.88	1.28	0.22	0.66	9.75	1.28	0.76	0.66		Hoist.
Current collector (trolley travel)	0.63	4.10	1.64	0.73	1.03	3.00	4.02	0.53	2.51	2.17		Trolley t'vel
Trolley travel driving	0.20	1.28	3.20	1.43	0.63	1.83	8.40	1.11	1.64	1.42		Trolley t'vel
Rope tension adjusting (trolley travel rope)	0.47	3.08	2.15	0.96	1.01	2.94	6.02	0.79	2.82	2.44		Trolley t'vel
Rail cramp (gantry travel)	0.27	1.80	2.43	1.08	0.66	1.94	7.29	0.96	1.99	1.72		Gantry t'vel
Current collector (gantry travel)	0.27	1.80	5.68	2.54	1.55	4.54	24.75	3.26	6.77	5.85		Gantry t'vel
Gantry travel driving	0.12	0.77	0.50	0.22	0.06	0.17	0.67	0.09	0.08	0.07		Gantry t'vel
Seismic Isolation	0.08	0.51	1.25	0.56	0.10	0.29	5.50	0.72	0.43	0.37		Gantry t'vel
Crane tie Down	0.08	0.51	0.38	0.17	0.03	0.09	0.75	0.10	0.06	0.05		Gantry t'vel
Crane Anchor	0.04	0.26	0.50	0.22	0.02	0.06	1.00	0.13	0.04	0.03		Gantry t'vel
Crane Anti-Collision	0.04	0.26	0.75	0.33	0.03	0.09	1.50	0.20	0.06	0.05		Gantry t'vel
Others	0.20	1.28	1.75	0.78	0.34	1.00	3.35	0.44	0.65	0.57		Gantry t'vel
Boom hoist driving	0.12	0.77	2.33	1.04	0.27	0.80	6.00	0.79	0.70	0.61		Boom hoist
Boom hook	0.08	0.51	1.25	0.56	0.10	0.29	2.50	0.33	0.20	0.17		Boom hoist
Boom hoist driveline	0.04	0.26	0.50	0.22	0.02	0.06	0.50	0.07	0.02	0.02		Boom hoist
Ship anti-collision	0.04	0.26	1.50	0.67	0.06	0.17	3.00	0.40	0.12	0.10		Boom hoist
Rope catenary anchor	0.16	1.03	4.13	1.84	0.64	1.89	14.63	1.93	2.29	1.98		Rope cate.
Rope catenary truck	0.04	0.26	5.00	2.23	0.20	0.57	10.00	1.32	0.39	0.34		Rope cate.
Rope catenary truck driveline	0.12	0.77	4.92	2.19	0.58	1.69	11.17	1.47	1.31	1.13		Rope cate.
Operation console	1.29	8.46	0.87	0.39	1.12	3.29	1.25	0.16	1.61	1.39		Ope. room
Remote I/O board	0.47	3.08	2.27	1.01	1.07	3.11	5.00	0.66	2.34	2.03		Ope. room
Tel. & communication	0.20	1.28	1.40	0.63	0.27	0.80	3.20	0.42	0.63	0.54		Ope. room
Alarm indication board	0.08	0.51	6.00	2.68	0.47	1.37	11.50	1.52	0.90	0.78		Ope. room
Others	0.16	1.03	3.13	1.40	0.49	1.43	3.13	0.41	0.49	0.42		Ope. room
Frame /cage guide	0.27	1.80	1.00	0.45	0.27	0.80	2.07	0.27	0.57	0.49		Elevator
Hoist driving/cage	0.16	1.03	3.38	1.51	0.53	1.54	9.25	1.22	1.45	1.25		Elevator
Frame/floor	0.04	0.26	2.00	0.89	0.08	0.23	2.00	0.26	0.08	0.07		Mach. room
Others	0.08	0.52	0.50	0.22	0.04	0.12	1.00	0.13	0.08	0.07		Mach. room
Transformer (high voltage)	0.04	0.26	1.00	0.45	0.04	0.11	1.00	0.13	0.04	0.03		Power high.
Power supply board (low voltage)	0.20	1.28	3.41	1.52	0.67	1.95	6.77	0.89	1.32	1.14		Power low.
Obstacle light	0.55	3.59	0.95	0.42	0.52	1.52	1.61	0.21	0.88	0.76		Lighting
Lighting (room/power distributing board)	0.08	0.51	0.50	0.22	0.04	0.11	0.50	0.07	0.04	0.03		Lighting
Lighting (passage)	0.70	4.62	0.81	0.36	0.57	1.66	1.31	0.17	0.92	0.79		Lighting
CRT monitoring	0.23	1.54	1.79	0.80	0.42	1.23	2.71	0.36	0.64	0.55		Others
Air conditioning	0.23	1.54	1.71	0.76	0.40	1.17	3.00	0.40	0.70	0.61		Others
Others	0.04	0.26	1.50	0.67	0.06	0.17	3.00	0.40	0.12	0.10		Others
Total/average	15.24	100.03	2.24	1.00	34.20	100.00	7.59	1.00	115.65	100.00		—

「Remote I/O board」 0.47 (3.1), 「Sheave shuttle」 0.27 (1.8) であり, 全41システムの中, これら11システムで全体の75%を占める. 特に「Head block」, 「Spreader」, 「Operation console」の故障が多く信頼性が悪いことが分かる.

(2) 平均保全時間 *MTTR* [hr/件]

平均保全時間が平均より大きいのは, 「Alarm indication board」 6.00 (2.7), 「Current collector (gantry travel)」 5.68 (2.5), 「Hoist driveline」 5.00 (2.2), 「Rope catenary truck」 5.00 (2.2), 「Rope catenary truck driveline」 4.92 (2.2), 「Rope catenary anchor」 4.13 (1.8), 「Power supply board (low voltage)」 3.41 (1.5) 「Hoist driving/cage」 3.38 (1.5), 「Trolley travel driving」 3.20 (1.4), 「Others」 3.13 (1.4), 「Spreader trim and list adjusting」 2.88 (1.3), 「Head block」 2.81 (1.3), 「Sheave shuttle」 2.68 (1.2), 「Anti sway/skew」 2.57 (1.2), 「Hoist driving」 2.46 (1.1), 「Rail cramp (gantry travel)」 2.43 (1.1), 「Boom hoist driving」 2.33 (1.0), 「Remote I/O board」 2.27 (1.0) である. 特に, 上位の5システムは修理に平均より2倍以上の時間を要していることが分かる. また, ITEM I における「Rope catenary support」のサブシステムである「Rope catenary truck」, 「Rope catenary truck driveline」, 「Rope catenary anchor」も修理に長時間を必要としていることが分かる. これらは発生率の低いものが多く, 発生頻度が少ないが故障を起こすと修理に長時間を要するものである.

(3) 保全時間率 *mt* [hr/1000hr]

平均保全時間率の大きい順位は, 「Head block」 11.85 (34.7), 「Spreader」 3.39 (9.9), 「Current collector (gantry travel)」 1.55 (4.5), 「Anti sway/skew」 1.50 (4.4), 「Hoist driving」 1.35 (3.9), 「Operation console」 1.12 (3.3), 「Remote I/O board」 1.07 (3.1), 「Current collector (trolley travel)」 1.03 (3.0), 「Rope tension

adjusting (trolley travel rope)」 1.01 (2.9), 「Hoist driveline」 0.78 (2.3), 「Sheave shuttle」 0.73 (2.1) であり上位11システムにて全体の75%を占める. 特に, 最上位の「Head block」は単体で約35%を占め, また上位にはITEM I の「Hoist」のサブシステムが多く占めるのが特徴的である.

(4) 平均保全工数 *mh* [MH/件]

平均保全工数が平均値より大きいのは「Hoist driveline」 38.75 (5.1), 「Current collector (gantry travel)」 24.75 (3.3), 「Rope catenary anchor」 14.63 (1.9), 「Head block」 12.79 (1.7), 「Alarm indication board」 11.50 (1.5), 「Rope catenary truck driveline」 11.17 (1.5), 「Rope catenary truck」 10.00 (1.3), 「Spreader trim and list adjusting」 9.75 (1.3), 「Hoist driving/cage」 9.25 (1.2), 「Trolley travel driving」 8.40 (1.1) の10システムである. 特に, 上位の2システムはそれぞれ5倍, 3倍の修理工数を必要とすることが分かる. また, 平均保全時間と同様に, ITEM I における「Rope catenary support」のサブシステムが上位に位置している.

(5) 配員指数 *MI* [MH/1000hr]

配員指数の上位は「Head block」 53.99 (46.7), 「Spreader」 10.23 (8.8), 「Current collector (gantry travel)」 6.77 (5.9), 「Hoist driveline」 6.06 (5.2), 「Anti sway/skew」 3.85 (3.3), 「Hoist driving」 3.83 (3.3), Rope tension adjusting (trolley travel rope) 2.82 (2.4) であるが, この7システムで全体の75%を占める. 特に, 最大は「Head block」であり, 1000時間の期間での修理工数は抜きん出ている.

3.2.3 ITEM III の分析

Table 6 に分類 ITEM III の信頼性・保全性評価指標値を示す. Table 6 から以下のことが言える.

(1) 故障率 λ [件/1000hr]

故障率では, 「Electric/control」 11.18 (73.3) が最も

Table 6 Reliability and maintainability evaluation indices on ITEM III

System name	Failure rate		Mean time to repair		Mean maintenance time rate		Mean man-hour per a occ.		Manning index	
	occ./1000 hr	percent-age	hr/occ.	magnification	hr/1000 hr	percent-age	MH/occ.	magnification	MH/1000 hr	percent-age
		%				%				%
Mechanical	2.77	18.21	1.89	0.85	5.26	15.37	6.07	0.80	16.84	14.56
Electric/control	11.18	73.33	2.32	1.04	25.96	75.90	8.15	1.07	91.06	78.74
Hydraulic/lubrication	0.86	5.64	2.42	1.08	2.08	6.09	6.90	0.91	5.93	5.13
Base frame	0.27	1.80	2.43	1.08	0.66	1.94	4.93	0.65	1.35	1.17
Unknown	0.16	1.03	1.50	0.67	0.23	0.69	3.00	0.40	0.47	0.41
Total/average	15.24	100.00	2.24	1.00	34.20	100.00	7.59	1.00	115.65	100.01

大きく約75%を占め、信頼性の向上が最優先される。

(2) 平均保全時間 *MTTR* [hr/件]

平均保全時間が平均より大きいのは「Base frame」2.43 (1.1), 「Hydraulic/lubrication」2.42 (1.1) および「Electric/control」2.32 (1.0) である。

(3) 保全時間率 *mt* [hr/1000hr]

保全時間率が大きいのは、「Electric/control」25.96 (75.9), 「Mechanical」5.26 (15.4) である。「Electric/control」のみで約75%を占め突出しているため、本システムの改善が必要である。

(4) 平均保全工数 *mh* [MH/件]

平均保全工数において平均値を超えるのは「Electric/control」8.15 (1.1) のみである。GCでは「Electric/control」の平均保全工数削減が重要である。「Electric/control」の平均保全工数が大きいのは修理において、故障箇所診断、発見には時間を要するからであると考えられる。

(5) 配員指数 *MI* [MH/1000hr]

配員指数が最も大きいのは「Electric/control」91.06 (78.7) であり飛びぬけて大きいのが分かる。1システムで75%を超える。この結果から、「Electric/control」の信頼性および保全性の改善は重要である。最終部品レベルで見ると、センサの故障、給電ケーブル内の心線の混線、配

線断線が多い。振動および経年劣化と思われる原因が多い。

4. 信頼性および保全性の向上に関する考察

本研究では信頼性および保全性の評価指標として「故障率 λ 」, 「平均保全時間 *MTTR*」, 「保全時間率 *mt*」, 「平均保全工数 *mh*」, 「配員指数 *MI*」, 「平均故障間隔 *MTBF*」を使用している。ここでは信頼性および保全性の向上策を考察するが、評価指標「故障率 λ 」, 「平均保全工数 *mh*」, 「配員指数 *MI*」からみた考察を行う。理由は「平均保全時間 *MTTR*」, 「保全時間率 *mt*」は故障の修理時間からみた指標であるが、この修理時間の削減方法は保全員を多く投入することで可能であり、さらに「平均保全工数」および「配員指数」で得たと同様な保全性向上策が適応できること、また「平均故障間隔 *MTBF*」は信頼性の指標であるが「故障率 λ 」で説明できるからである。

(1) 信頼性の向上策に関して

GCの信頼性の向上策とは故障しないシステムの導入を意味する。対策は以下のとおりである。

Table 7にITEM Iにおいて故障率の大きい3システムを示す。ITEM Iにて故障率の大きい(信頼性が悪い)

Table 7 Systems of higher value of Failure rate on ITEM I

ITEM I		ITEM II			ITEM III		
System name	Failure rate occ./1000 hr	System name	Failure rate		System name	Failure rate	
			occ./1000 hr	percent-age %		occ./1000 hr	percent-age %
Hoist	7.46	Head block	4.22	56.58	Electric/control	5.59	74.92
		Spreader	1.60	21.48			
		Anti sway/skew	0.59	7.86	Mechanical	1.09	14.67
		Hoist driving	0.55	7.33			
		Sheave shuttle	0.27	3.67			
		Hoist driveline	0.16	2.10	Hydraulic/lubricat.	0.47	6.29
		Spreader trim and list adjusting	0.08	1.05	Base frame	0.20	2.62
Total	7.46	Total	7.46	100.00	Total	7.46	100.00
Operation room	2.19	Operation console	1.29	58.90	Electric/control	2.11	96.35
		Remote I/O board	0.47	21.46			
		Tel. & communication	0.20	9.13	Mechanical	0.08	3.65
		Others	0.16	7.31			
		Alarm indication board	0.08	3.65			
Total	2.19	Total	2.19	100.00	Total	2.19	100.00
Lighting	1.33	Lighting (passage)	0.70	52.89	Electric/control	1.33	100.00
		Obstacle light	0.55	41.14			
		Lighting (room/power distributing board)	0.08	5.88			
Total	1.33	Total	1.33	100.00	Total	1.33	100.00

順に「Hoist」, 「Operation room」, 「Lighting」であり、3システムでGC全体の約75%となる。本3システムの信頼性向上は全体の信頼性に大きく寄与するので、このシステムの信頼性向上が最優先される。以下にこれら3システムの向上策について述べる。

ITEM I の「Hoist」を構成するITEM II のシステムにおいて故障率が大きいのは「Head block」, 「Spreader」である。この2システムは全システムの中で故障率が1位、2位であり信頼性が特に悪い。ITEM III のシステムでは「Electric/control」が特に悪いことから「Hoist」において「Electric/control」の信頼性を上げることが必要である。

「Hoist」はコンテナを吊り上げ、吊り卸しを行う部分であるが稼働が激しい。特に「Head block」, 「Spreader」はコンテナが岸壁に着地するとき、また船内の貨物倉に搬入するときにガイドレールに接触・衝突する。そのときの衝撃および振動が激しい。故障部品と原因は「リミットスイッチの誤作動、損傷」, 「配線の被覆損傷によるショート」, 「給電ケーブルのキンク」等で電気・制御部品であるが、経年劣化と相俟って、やはり衝撃・振動に起因するものが多い。

対策として経年劣化と衝撃に耐える部品の使用が必要であることは勿論であるが、予防保全をとれるシステム導入も重要である。それには、「Electric/control」のモニタリングシステムの導入およびモジュール化を行い簡単にモジュールごとと取替え可能とすることである。即ち、モニタリングシステムで誤作動等の異常兆候を発見し、荷役終了時または整備時にモジュールごと取り替える方法をとることである。

ITEM I の「Operation room」を構成するITEM II のシステムにおいて故障率が大きいのは「Operation con-

sole」, 「Remote I/O board」であり、ITEM III のシステムでは「Electric/control」である。「Operation room」では「Operation console」の「Electric/control」の信頼性向上が必要である。「Operation console」はGCの運転員が操作する盤であるが、スイッチおよび表示ランプの故障が多い。スイッチの故障原因は操作が高頻度であることからの劣化、表示ランプは振動による劣化と推定される。これらの故障はGCの運転を阻害することになるので改善が必要である。

対策としてはスイッチに関しては接点の耐摩耗性、作動機構の信頼性のある部品の選択である。また、前述のように「Electric/control」のモニタリングシステムの導入も有効な手段である。表示ランプに関しては振動に強い発光ダイオードの採用が良い。

ITEM I の「Lighting」を構成するITEM II のシステムにおいて故障率が大きいのは「Lighting (passage)」であり、ITEM III では「Electric/control」である。これらの信頼性向上が必要である。「Lighting (passage)」は照明の故障であるが、やはり振動および衝撃を原因としたナトリウム灯の玉切れが多い。対策は耐振の照明装置の導入が必要である。例えば、発光ダイオードを利用した照明装置である。ちなみに、ナトリウム灯が切れると夜間荷役に影響を与えることになり重要な機器である。また、高価でもある。

(2) 平均保全工数よりみた保全性の向上策

保全性の向上策とは工数の削減を意味する。以下のとおりである。

ITEM I では平均保全工数、すなわち1件当たりの修理に必要な工数が平均値より大きいシステムは「Rope catenary support」, 「Hoist」の2システムであり、それ

Table 8 Systems of higher value of Mean man-hour per a occ. on ITEM I

ITEM I			ITEM II			ITEM III		
System name	Mean man-hour per a occ.		System name	Mean man-hour per a occ.		System name	Mean man-hour per a occ.	
	MH /occ.	magnification		MH /occ.	magnification		MH /occ.	magnification
Rope catenary support	12.75	1.68	Rope catenary anchor	14.63	1.93	Electric/control	19.38	2.55
			Rope catenary truck driveline	11.17	1.47	Mechanical	6.13	0.81
			Rope catenary truck	10.00	1.32			
Hoist	10.82	1.43	Hoist driveline	38.75	5.11	Electric/control	11.56	1.52
			Head block	12.79	1.69	Mechanical	10.25	1.35
			Anti sway/skew	6.57	0.87			
			Spreader trim and list adjusting	9.75	1.28	Hydraulic/lubricant	8.63	1.14
			Spreader	6.38	0.84	Base frame	3.70	0.49
			Sheave shuttle	7.46	0.98			
			Hoist driving	7.00	0.92			
Average	7.59	1.00	Average	7.59	1.00	Average	7.59	1.00

ぞれ GC 全体の平均の1.7倍, 1.4倍の工数を必要としていた。このことから, この2システムの保全性の向上, 即ち工数の削減が必要である。Table 8に ITEM I におけるこの2システムとそれぞれのサブシステムである ITEM II および ITEM III のシステムの平均保全工数を示す。

最も平均保全工数の大きいITEM I の「Rope catenary support」を構成するITEM II のシステムにおいて「Rope catenary anchor」, 「Rope catenary truck driveline」, 「Rope catenary truck」の3システムは平均より1.9~1.3倍もの工数を必要としている。また, ITEM III では「Electric/control」が平均の約3倍の工数を必要とし, 全体の工数を押し上げていることが分かり, 特に工数削減が必要である。

「Rope catenary support」は Boom 上にあり修理自体に時間がかかるが「アクセス性」, 「作業性」が悪く, これらの理由も工数を大きく押し上げている。ITEM III で示すように「Electric/control」, 即ち電気・制御系の修理作業では故障箇所の判明まで多くの時間を要するものである。前述のとおり電気・制御系のモニタリングシステムおよびモジュール化は保全性を向上する。

2 番目に平均保全工数の大きい ITEM I の「Hoist」を構成する ITEM II のシステムにおいて平均保全工数を押し上げているのは「Hoist driveline」, 「Head block」である。また, ITEM III では「Electric/control」の工数

が多いことが分かる。

「Hoist driveline」は「Rope catenary support」と同様に Boom 上にあり「アクセス性」, 「作業性」が悪くその改善が必要である。また, 「Electric/control」の工数が大きいことから, 電気・制御システムのモニタリングシステムの導入, モジュール化は保全性を向上する。また, 工数削減には保全員の技術は重要であるが, 電気・制御系の保全のスキルアップも重要である。

(3) 配員指数からみた保全性の向上策

配員指数は1000時間の長時間に必要とする工数である。即ち, 信頼性が悪く(故障率大)且つ保全性が悪い(平均保全工数が大)と大きくなる。また, 配員指数からはCTに必要な保全要員数の計画, 人件費の推定が可能であり保全システムの設計に重要な指標である。

ITEM I において配員指数が大きいのは「Hoist」, 「Gantry travel」であり, それぞれ GC 全体の70%, 10%であり, 2 サブシステムで約80%を占めていた。「Hoist」だけで約70%を占めることから, 特にこのシステムの信頼性と保全性の向上が優先される。

Table 9に ITEM I におけるこの2システムとそれぞれのサブシステムである ITEM II および ITEM III のシステムの配員指数を示す。

ITEM I の「Hoist」を構成する ITEM II のシステム

Table 9 Systems of higher value of Manning index on ITEM I

ITEM I		ITEM II			ITEM III		
System name	Manning index	System name	Manning index		System name	Manning index	
	MH /1000 hr		MH /1000 hr	percentage %		MH /1000 hr	percentage %
Hoist	80.77	Head block	53.99	66.85	Electric/control	64.62	80.01
		Spreader	10.23	12.67			
		Hoist driveline	6.06	7.50	Mechanical	11.22	13.89
		Anti sway/skew	3.85	4.77			
		Hoist driving	3.83	4.74			
		Sheave shuttle	2.04	2.53	Hydraulic/lubricant	4.05	5.01
		Spreader trim and list adjusting	0.76	0.94	Base frame	0.72	0.90
Total	—	Total	80.77	100.00	Total	80.77	100.00
Gantry travel	10.08	Current collector (gantry travel)	6.77	67.17	Electric/control	7.93	78.71
		Rail cramp (gantry travel)	1.99	19.77	Mechanical	0.74	7.37
		Others	0.65	6.49	Base frame	0.63	6.20
		Seismic Isolation	0.43	4.27			
		Gantry travel driving	0.08	0.78	Hydraulic/lubricant	0.47	4.65
		Crane tie down	0.06	0.58			
		Crane anti-collision	0.06	0.58			
		Crane anchor	0.04	0.39	Unknown	0.31	3.10
Total	—	Total	10.08	100.00	Total	10.08	100.00

において配員指数が大きいのは「Head block」, 「Spreader」である。この2システムは全システムの中で配員指数が1位, 2位である。ITEM IIIのシステムでは「Electric/control」が特に悪いことから「Hoist」において「Electric/control」の安全性の改善が必要である。

ITEM Iの「Gantry travel」を構成するITEM IIのシステムにおいて配員指数が大きいのは「Current collector」であり, ITEM IIIのシステムにおいて「Electric/control」である。

即ち, 「Hoist」, 「Gantry travel」においても「Electric/control」の工数が大きく, 前述のとおり電気・制御系のモニタリングシステムの導入, 取替え可能なようにモジュール化を行い, 予防保全による保全を導入することである。また, 工数削減には保全員の技術は重要であるが, 電気・制御系の保全のスキルアップも重要である。

5. まとめ

本研究では, ガントリー・クレーンをITEM I, ITEM II, ITEM IIIの三つの分類方法で各システムに分類し, 保全データを利用して各システムの信頼性ならびに安全性を明らかにした。ガントリー・クレーンのシステムごとの信頼性および安全性を分析した試みはわが国では皆無である。以下に本研究で明らかになった結果と信頼性および安全性の向上策をまとめる。

① ガントリー・クレーンの信頼性および安全性の評価指標値を明らかにすることができた。それぞれの値は, 故障率15.24 [件/1000hr], 平均保全時間2.24 [hr/件], 保全時間率34.20 [hr/1000hr], 平均保全工数7.59 [MH/件], 配員指数115.64 [MH/1000hr], 平均故障間隔65.62 [hr], 稼働率は20.49 [%]であった。

② ガントリー・クレーンの信頼性が悪いシステムは分類ITEM Iの「Hoist (巻上装置)」, 「Operation room (運転室)」, 「Lighting (照明装置)」であり, 3システムでガントリー・クレーン全体の約75%の故障発生となる。本3システムの信頼性向上は全体の信頼性に大きく寄与するので, このシステムの信頼性向上が最優先される。また, ITEM IIIの分類では「Electrical/control (電気・制御系)」の故障発生が全体の約73%を占めていて, 当該システムの信頼性向上が必要である。

「Electrical/control」の故障発生の原因は衝撃, 振動に起因するものが多い。対策として衝撃・振動に耐える部品の使用が必要であることは勿論であるが, 予防保全をとれるシステムにすることである。それには, 「Electric/control」のモニタリングシステムの導入および当該システムのモジュール化を行い簡単にモジュールごと取替え可能とすることである。即ち, モニタリングシステムで誤作動等の異常兆候を発見し, 整備時にモジュールごと取り替える方法をとることである。この手法で大

幅に信頼性の改善が図れると考える。

③ 安全性の向上策には平均保全工数と配員指数から分析を行った。

平均保全工数では, 分類ITEM Iにおいて保全工数が大きいシステムは「Rope catenary support」, 「Hoist」であり, このことから, この2システムの安全性の向上, 即ち工数の削減が必要である。「Rope catenary support」はガントリー・クレーンのBoom上にあり修理自体に時間がかかるが「アクセス性」, 「作業環境」も悪い。後者の理由も工数を大きく押し上げている。また, 「Rope catenary support」, 「Hoist」とも分類ITEM IIIの「Electric/control」の工数が特に大きい。即ち「Electric/control」の修理作業では故障箇所の判明まで多くの時間を要するものである。前述のとおり当該システムのモニタリングシステム導入およびモジュール化は安全性改善に大幅に寄与する。

配員指数では分類ITEM Iの「Hoist」および「Gantry travel」の工数が多く全体の約80%を占めていた。両システムとも「Electric/control」の工数が特に多い。保全工数の削減策は平均保全工数で述べたとおりである。

④ 信頼性と安全性向上に寄与する対策

保全データの分析から「Electric/control (電気・制御系)」の故障が多く修理工数が多いとの結論になった。このことから以下のような対策が信頼性と安全性の向上に寄与する。

- ・[保管理方式の変更]

現在, 保管理方式は事後保全方式であるが, それを予防保全方式に変更すること。

保管理室に「電気・制御系」のモニタリングシステムを設置しそれによる保管理を行うこと。モニタリングシステムの機能として, GCの運転状況と各電機・制御部品の劣化状況, 誤作動状況の診断, 保全員に診断情報を提供できることである。このシステムにより, 運転中の状況から傾向を捉え故障が発生する前の整備時に修理する方法に変更することである。

- ・[電気・制御系のモジュール化]

「電気・制御系」をモジュール化し, モジュールごとに短時間に取替え可能とすること。保全時間と工数の削減が可能である。

- ・[衝撃・振動に耐える電気部品の使用]

「電気・制御系」において衝撃に強い部品を採用すること。照明では振動に強い発光ダイオードの使用が良い。

- ・[保全作業環境の改善]

修理時における各システムへの「アクセス性」を良好にし, 「保全作業環境」を良くすること。

8. おわりに

参考文献

世界の物流量は増大傾向にある。その中で輸送コストの削減のためにコンテナ船は大型化し、11,000TEUの船が出現し隻数が増えつつある。このような傾向からガントリー・クレーンは大規模化、高速化となつてきていると同時にメカニズムが複雑となり、故障発生の可能性が増大しコンテナターミナルの信頼性が懸念されている。しかしながら、このように信頼性への懸念があるにもかかわらず保全データからガントリー・クレーンの信頼性および安全性の研究は皆無に等しい。本研究ではコンテナターミナルの現場の保全データからガントリー・クレーンのシステムごとの信頼性および安全性を明らかにすることができ、それらの向上策を提案することができた。今後、本研究のデータを利用し、コンテナターミナルの荷役システムの信頼性設計および電気・制御系のモニタリングシステムの研究を行う予定である。

本研究結果はガントリー・クレーンメーカ、コンテナターミナル運用会社に貴重な情報となると考える。

謝 辞

本研究にあたりお世話になったコンテナターミナル運営会社、ガントリー・クレーンメーカの関係者に感謝を申し上げます。

要 旨

1996年に米国のシーランド社が海上コンテナ輸送を開始し、日本は2年後の1968年にコンテナサービスを開始した。それ以降、輸送量は順調に伸びてきている。近年、コンテナ船の大型化が急ピッチであり、2006年8月にはデンマーク船社のマースクラインが11,000TEU積載船(全長397m,全幅56m)を就航させている。このような大型コンテナ船の荷役を行うガントリー・クレーン(以後、クレーン)は大規模化、高速化となつてきている。それと同時にクレーンは複雑となり、故障発生の可能性が増大してきている。また、高速荷役を行うドック方式のバースでは、クレーンが船を挟んだ両舷荷役方式の採用もあり、クレーンの故障が荷役の停止ばかりでなく本船をブロックし出港できない可能性もある。しかしながら、このようにクレーンの信頼性への懸念があるにもかかわらず保全データによるクレーンの信頼性および安全性の研究はみられない。

本研究は約2.5年間に収集した保全データからクレーンのシステムごとの信頼性および安全性を明らかにするとともにそれらの改善策を提案するものである。

- 橋本 武, 金子 仁, 佐田昌弘 (1980): 船用機関のサブシステムに関する故障統計と安全性評価, 日本船用機関学会誌, Vol. 15-7, 546-554.
- 橋本 武, 金子 仁, 的場佑司 (1980): デジタルシミュレーションによる船用機関保全システムに関する考察, 日本船用機関学会誌, Vol. 15-8, 19-31.
- Hashimoto, T., H. Kaneko, M. Sata (1981): Some Multivariate Evaluation of Reliability and Maintainability on the Marine Engine System and their Statistics, Bulletin of MESJ, V9-1, 56-56.
- 金子 仁, 城戸八郎, 今井昭夫, 西村悦子 (2004): 荷役機器の信頼性・安全性からみたコンテナターミナルの生産性向上に関する研究—ガントリー・クレーンの信頼性・安全性について—, 日本航海学会論文集, Vol. 112, 255-263.
- 金子 仁, 堀籠教夫 (2006): 保全データ等によるガントリー・クレーン・ワイヤロープの統計的解析, 日本マリンエンジニアリング学会誌, Vol. 41-4, 119-126.
- 金子 仁 (2006): 海上コンテナターミナルの生産性向上における機器運用および安全管理方法に関する研究, 神戸大学博士論文, 147pp.
- 港湾荷役機械システム協会 (1998): コンテナ荷役機器維持管理データ調査報告(その1), 港湾荷役, No. 43-3, 345-349.
- 西村悦子, 今井昭夫, 金子 仁 (2004): メガシップ対応港湾におけるヤードトレーラのルーチングに関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 21-3, 805-810.
- 運輸省港湾局技術課 (1997): 次世代コンテナターミナル技術開発調査報告書, 128pp.