UDC 621.873.3-758.37: 538.85: 621.396.673
614.825

論文

57-B15

ラジオ放送アンテナ近傍の大形クレーンにおける感電防止

正員 笠島 善 憲 (鹿島建設)

正員 高坂 修 一 (鹿島建設)

1. ま え が き

近年、建造物が高層化、規模の大きいものが建設されるようになり、工事に使用されるクレーンも高さの高い大形のものが多くなってきている。特に超高層ビル建設に使用されるタワークレーンは、工事の進行に伴って建物と一緒にクライミングするため高さも非常に高くなり、200mを越す場合も少なくない。

また、これら大形クレーンの使用場所も中波ラジオ電波の強い都市部、あるいは、都市開発の郊外への進出により、電波の強い送信アンテナに隣接した地域の場合が増えてきている。

最近、このような建設現場からクレーン作業時、作業者がフック部に触れると電撃を受けるという報告がたびたび寄せられるようになってきた。調査の結果、建設工事中の大形クレーンが中波ラジオ電波に対して効率のよい巨大な受信アンテナとして動作し、建設途中のある高さで、共振状態になってかなり高い電圧を発生していることが分った。また、発生電圧は、1,000

V_{p-p}前後であることも分った。表1は過去に観測された異常電圧の記録の一部である。このような周波数の高い電流は、表皮効果により人体の表面を流れやすいのでクレーンのフック部に触れても直接生命への危険はないが、熱作用により皮膚の表面に軽い火傷を負い、強い電撃を受けるため作業進行の障害になるばかりでなく高所作業には、この電撃による墜落事故発生の心配がある。そこで、早急にこの種の現象を解析し対策装置を開発することが望まれている。

このような現象は既に外国でも発生例があり、調査研究の報告がなされている⁽¹⁾⁽²⁾。これらの報告によるとクレーンは、マスト、ブーム、つりワイヤーで一つのループを形成し、ループアンテナとしての特性を示すという説⁽¹⁾と、電圧はクレーンの先端から地上までのワイヤーの長さだけに関係し、この長さが1/4波長のときに共振し高い電圧を発生するという説がある。また、この対策としてはループアンテナの共振をクレーンブーム先端部からの導線で別ループ回路を設け共振をはずす方法、並びにクレーンの一部に絶縁物を挿

表 1 大形クレーンの異常電圧の測定記録

Table 1. Records of measurement high-voltage in large the cranes.

異常電圧の発生した作業所				高島平	戸田橋	豊島	千住元町	新後友ビル	宿 国際通信センタービル	新 三井ビル	宿 三井物産	川 河原町	崎 平
使用クレーンの型式名				住友HC -108BS	日立KH -150	タワークレーン	東都TC -200	石川島K -200H	石川島K -350H	石川島KT K-200W	石川島KT K-200W	水 原	平
クレーンの全長(マスト+ブーム+ワイヤー)				93.0m	89.5	120.0	101.0	91.5	232.1	88.0	88.0	123.0	
測定時のビルの高さ				27.6m				22.0	165.3	44.5	42.6		
フック先端の誘起電圧				800 V _{p-p}	850	600	110	800	120	1300	500	300	
フック先端の接地電流				200 mA	150	122		120	52	145		163	
電 界 強 度	放送局名		周波数	波長	出力								
			MHz	m	W	V/m							
	F E N		810	370	50	0.16	0.10	0.09	0.56	0.10		0.40	0.27
	T B S		950	316	100	1.59	0.37	0.71	0.71	0.18	2.11	0.40	0.03
	NHK第一		590	508	100	0.28	1.59	0.71	0.63	0.42	1.00	1.26	1.17
	NHK第二		690	435	300	0.45	0.45	0.45	0.63	0.01	0.84	1.26	0.34
	文化放送		1130	265	100	0.25	0.63	0.47	0.28	0.11	0.84	0.32	0.07
	ニッポン ラジオ関東		1240 1420	242 213	50 30	0.01 0.03	0.03 0.54	0.01 0.01	0.01 0.01	0.06 0.01	0.14 0.08	0.02 0.07	0.07 1.56
測 定 年 月				47.8	47.5	46.9	45.8	47.8	48.8	48.1	47.12	45.10	

注：TBS・文化・ニッポン・ラジオ関東は46年11月に出力増強している。放送局の出力においてニッポン放送のみ46年11月以前のものである。現在の周波数は昭和53年から全局が数Hzの幅で変更している。□はクレーンに異常電圧を誘起させた電流である。

Prevention of Electric Shock in a Large Crane Near Radio Broadcasting Antenna. By Yoshinori Kasashima, [Member & Shuichi Kohsaka, Member (Kajima Institute of Construction Technology).

笠島善憲：正員，鹿島建設(株)技術研究所 高坂修一：正員，鹿島建設(株)技術研究所

入する方法が示されている⁽²⁾。しかし筆者らの実験によると、フック部を絶縁する以外の方法では、顕著な効果を確認することができなかった。

そこで、大形クレーンが中波ラジオ電波に対し、どのようなアンテナ特性を示すのか、またどのような対策が効果的なのか解析するため、模型実験を行ない、更に、移動式のクレーンを実際の送信所近くに設置して現場実験を行なった。その結果、クレーンがループアンテナと折返しアンテナの中間の特性を示すこと、また共振回路を応用した減衰装置により、フック部に誘起する異常電圧を減衰させうることが明らかになった^{(4)~(7)}。

2. クレーンにおける異常電圧の発生

実測データや、現場での経験によると、大形クレーンのフック部に発生する高い異常電圧は、クレーンがある中波電波に共振するためと推測される。この大形クレーンの巨大なアンテナとしての特性を詳しく調べるに際して、理論計算ではクレーンの形状が非常に複雑であり、その解析が困難である。よって、実際に異常電圧が発生した大形クレーンの 1/40 模型に、これと同比率に周波数を高くした電波での模型実験により各種の測定を行なった。その模型実験概要図を図 1 に示す。

模型クレーンは主にマスト部、ブーム部、つりワイヤー部から構成されている。実験はクレーンのマスト部の近くに置いた使用電波の 1/4 波長以下の励振アンテナでクレーンを励振させ、フック部に誘起した電圧をフック部に固定した検出探針によって測定した。

図 2 はブーム俯仰角を固定し、励振周波数を変化させたときのクレーンの共振特性を示したもので、測定にあたってはブーム角が変ってもフック部の地面からの高さは 25cm 一定になるようにした。表 2 はクレーンの各状態における共振定数であり、表中の l はクレーン全長(マスト、ブームおよびワイヤー長の和)、 f_r は共振電波の周波数、 λ_r は共振電波の波長、 $2\Delta f$ は共振帯域幅を示す。また、 $l/(\lambda_r/4)$ は波長伸長率と定義する。図 2 から分かるように、共振点は 30 MHz 前後であり、この周波数を実際のクレーンの場合に換算すると、過去にこのクレーンに発生した異常電圧の周波数とよく一致している。

この共振周波数は、ブーム俯仰角にあまり関係なく、ほぼ一定になっているが、この理由は次の通りである。ブーム俯仰角が大きい場合は、クレーンの揚程は高くなるので全長も長くなり、通常のアンテナと考えれば共振周波数は下がるはずである。しかし、同時

図 1 模型実験概要図

Fig. 1. Schema of the model experiment.

図 2 模型クレーンの共振特性

Fig. 2. Resonance characteristics of the model crane.

表 2 模型クレーンの共振定数

Table 2. Resonance constant of the model crane.

俯仰角	約 6°	14	27	41	50	60	76
l	260cm	280	300	320	330	340	350
f_r	30.5MHz	29.7	29.0	29.0	28.3	28.4	29.0
$\lambda_r/4$	246cm	253	259	259	265	264	259
$l/(\lambda_r/4)$	1.06	1.11	1.16	1.24	1.25	1.29	1.35
$2\Delta f$	2.5MHz	2.25	3.85	4.6	4.8	4.35	3.0
$f_r/2\Delta f$	12.2	13.2	7.5	6.3	5.9	6.5	9.7

ただし、 $l = 92 + 97 +$ (ワイヤー長) …クレーンの全長 (cm)
 $l/(\lambda_r/4)$ …波長伸長率
 $Q = f_r/2\Delta f$ …尖鋭度

にマスト、ブームとワイヤーの間隔が狭くなるために波長伸長率が大きくなり、結果的に共振周波数はあまり変化しない。逆に、ブーム俯仰角が小さい場合もクレーン全長は短くなるが、波長伸長率も小さくなるので共振周波数はあまり変化しない。また、波長伸長率は 1.1~1.4 である。この事実、クレーン形状のアンテナがループアンテナ (伸長率 ≈ 1.0) と折返しアンテナ (伸長率 ≈ 2.0) の中間的性質を有することを示している。

なお、クレーンに誘起される電圧の分布は、開放端であるフック部で最大電圧となり、マスト基部で最小電圧 (零) となる正弦波状であることが確かめられてい

る。

3. 異常電圧の減衰装置

大形クレーンの模型実験から、このようなクレーンのフック部に高い異常電圧が発生するのは、共振現象が起きるためであることが明らかになった。図1の模型実験装置を用いて、このクレーンの一部に図3に示すような共振回路を応用した減衰装置を取り付けることによりフック部の異常電圧を減衰させる方法を開発した。減衰装置は外部アンテナと同調コイルと可変コンデンサで、直列共振回路を構成している。ブームの先端の外部アンテナはアンテナとしてのクレーンとの高周波結合させるためのものであり、同調コイルは大きな尖鋭度をもって共振させるものである。また、ブームの根本に挿入されている可変コンデンサは減衰装置の同調をとるためのものである。

クレーンがある周波数に共振し、そのフック部に大きな誘起電圧が発生したとき、同じ周波数にこの減衰装置を同調させることによって、フック部の電圧を減衰させることができる。なお、模型実験においては、

図3 模型減衰装置の概要図

Fig. 3. Schema of the model attenuator.

図4 模型減衰装置の減衰特性

Fig. 4. Attenuation characteristic of the model attenuator.

実際の大形クレーンに取り付ける寸法、形状、位置、並びに作業性を考慮しながら改良し、最終的に図3に示すような減衰装置が得られた。

図4はこの模型減衰装置を用いた場合の実験結果を示したものである。図4(a)において模型クレーン単独での共振曲線を実線で示しており、この共振回路の Q は約10程度である。また、クレーンの共振周波数に減衰装置を同調させて、フック部の電圧を減衰させるときの減衰曲線を破線で示してあるが、この減衰装置はフック部の電圧を共振時の電圧の1/20程度に減衰させている。図4(b)はこの減衰装置単独での共振特性を示しているが、共振回路の Q は20程度である。

以下にこの減衰装置の理論検討を行なう。図5はクレーンに減衰装置を取り付けた場合の等価回路を示したものである。クレーン単独の等価回路は C_1 と L_1 、 R_1 の並列共振回路として表わすことができ、減衰装置はその回路の一部に1:nの理想変圧器を介して第2共振回路として挿入された形になる。外来電波の角周波数を ω とし、この挿入された変圧器一次端子のインピーダンスを $Z(\omega)$ とすれば $Z(\omega)$ は(1)式で示される。

$$Z(\omega) \simeq \frac{n^2 R_2 Q_2^2}{1 + (2 \Delta Q_2)^2} (1 - j 2 \Delta Q_2) \quad \dots\dots (1)$$

但し、

$$Q_2 = \omega_0 L_2 / R_2, \quad \omega_0^2 L_2 C_2 = 1, \quad \Delta = (\omega - \omega_0) / \omega_0$$

ω_0 : 減衰装置の共振角周波数

n : クレーンと減衰装置の高周波結合度から

決まる定数, $n \ll 1$

減衰装置が共振せず、 ω が ω_0 から離れている場合、(1)の式は(2)の式のように近似される。

$$Z(\omega) \simeq -j \frac{n^2 R_2 Q_2}{2 \Delta} \quad \dots\dots (2)$$

図5 減衰装置付きクレーンの等価回路

Fig. 5. Equivalent circuit of crane fitted with the attenuator.

即ち $Z(\omega)$ は、ほぼ純リアクタンスの小さな値であり、図5の等価回路はクレーン単独の場合の等価回路と大きな変化がないため、クレーンの誘起電圧は変化を受けない。

減衰装置が共振した場合は $\omega = \omega_0$ であり、(1)式は(3)式となる。

$$Z(\omega) \approx n^2 R_2 Q_2^2 \dots\dots\dots (3)$$

即ち、 $Z(\omega)$ は純抵抗であって、これが図5の等価回路の L_1 に直列に挿入させることになるため、クレーン共振回路の Q が低下し、従ってクレーンの誘起電圧は減衰する。当然、(3)式の値が大きいくほど減衰効果は大きくなる。

Q_2 は減衰装置の尖鋭度であり、同調コイルの形状、大きさ、材質などで決めることができるが、実際の減衰装置としてはある程度の減衰帯域幅をもたせる必要があるため、適度の尖鋭度をもつコイルが望ましい。しかし、装置を実際の大形クレーンに取り付けることを考えれば、その形状、大きさ、材質などに制限を受ける。 n はアンテナとしてのクレーンと減衰装置との高周波結合度から決まる定数であり、外部アンテナのクレーンへの取り付け位置は電圧の高いフック部に近いほど効果的であるが実際の大形クレーンへの取り付けを考慮した結果、ブームの先端となった。外部アンテナの長さは長いほどよいが作業性を考慮すると、その長さはある制限内のものになる。以上のような検討結果から最終的に図3に示す形状、取り付け状態の減衰装置が得られた。

4. 実物大形クレーンにおける感電防止実験

図3に示す模型減衰装置を実物大にスケールアップして、図6に示すクローラークレーンに設置し、現場実験を行なった。実験場所は、中波ラジオ送信所(TBS, 950kHz)から約2km離れており、この送信アンテナを直接見通せる周囲に障害物の少ない平地を選んだ。なお、本機は実験場所の近くで使用した際、同放送電波に対して共振現象を示し、高い異常電圧を発生した機種のもので、マスト・ブームの長さも同寸法にして行なった。

減衰装置のクレーンへの取り付けは実験の都合上、外部アンテナはブームの先端からつり下げ、同調コイルはブームの横に平行に取り付け、同調は同調コイルの巻数で行なった。この減衰装置は図3のものとは異なっているが、この形についても模型実験を行ない、図3のものと差のないことを確かめてある。クレーンの基部は、完全に接地した。また、フック部の地面からの高さは常に一定に保ち、フック部の電圧を測定し

図6 試作減衰装置の実験概要図

Fig. 6. Experimental schema of the trial attenuator.

図7 試作減衰装置の減衰特性

Fig. 7. Attenuation characteristic of the trial attenuator.

た。

図7は、クレーンのブームの長さを一定とし、ブームの俯仰角を40°, 50°, 60°, 70°と変化した場合のクレーン単独でのフック部の誘起電圧と、各状態で減衰装置が動作したときのフック部の電圧、およびその減衰比率を示したものである。図7に示すようにこのクレーン単独の場合は、ブームの俯仰角が50°程度でほぼ共振しており、俯仰角を変化させても大きく共振ははずれていない。減衰装置が動作したときの減衰電圧を950kHzの成分だけと考えた場合の減衰比率を図7に二点破線で示してあるが、最大1/7程度の減衰効果があった。大形クレーンに発生する異常電圧は、1,000V_{rms}前後の場合が多いので、この電圧を1/7に減衰できれば、人体が感じない程度の電圧になり、実用上問題はない。

図6の実験でのコイルの巻数と減衰電圧の関係を図

図 8 試作減衰装置の同調コイル巻数特性

Fig. 8. Relationship between attenuation voltage and number of coil turns of the trial attenuator.

図 9 試作減衰装置でのフック部測定波形

Fig. 9. Induced voltage wave form to the crane hook.

8に示すように、今回使用した寸法の同調コイルは巻数が2～3回の増減で同調がとれ、また、多少同調がはずれても、減衰した電圧が急激に上昇することがないので、同装置は適度な尖鋭度をもったコイルであるといえる。

クレーンの単独での、フック部の誘起電圧波形を図9(a)に、減衰装置が動作したときの波形を図9(b)に示す。いずれの波形も950kHz(TBS)と1,130kHz(文化放送)が混信しているが、図9(b)は図9(a)に比べ950kHzによる電圧が減衰を受けているため、1,130kHzの混信状況が顕著に表われている。

5. む す び

大形クレーンが中波ラジオ電波に対して共振アンテナとして動作し、そのフック部に異常電圧を発生させる現象の解析と、このような異常電圧を減衰させる装置の開発について述べた。

大形クレーンはループアンテナと折返しアンテナの中間的な特性を示し中波ラジオ電波に共振したときはフック部に通常の十数倍の電圧が発生する機構を明らかにし、また、大形クレーンに共振回路を応用した減衰装置を取り付けることにより、この異常電圧を1/7程度に減衰できることを示した。

しかし、今回の対策装置は寸法面でまだ改善の余地が残されており、小形化までに時間を要する。

外国では、このような大形クレーンの電波障害も含んだ広い周波数範囲の強電磁界領域における人体の安全に対して、許容電磁界強度、電磁波による誘爆などの制限規準が明文化されつつある⁽⁸⁾。我が国でも早急にこのような制限規準の制定の必要がある。

この研究を進めるにあたり、有益なご助言とご指導を賜った東北大通信研究所 西田茂穂教授、研究に関連する貴重な資料を提供くださりご懇篤なご助言を頂いた、岡山大学 中田高義教授の両先生のご厚意に心から感謝の意を表すとともに、この研究の現場実験で、多大なご協力を頂いた、ニッポン放送並びに鹿島建設(株)内関係部所の諸兄に深く感謝いたします。

(昭和55年12月26日受付、同56年6月11日再受付)

文 献

- (1) M. Seidel: "Beseitigung von Hochfrequenzspannungen an einer Krananlage", *NEDR (Techn. Hausmitt)* 11-12, 238-240 (1955-7)
- (2) E.W. Plischke & W.F. Wolff: "Tuned in or Turned on-RF Radiation Study", *ASSE Journal* 14, 6, 12-5 (1969-6)
- (3) 笠島:「ラジオ波によりクレーンに発生する異常電圧の減衰装置について」, 昭49日本建築学会大会(北陸), 1088
- (4) 田付・高坂・笠島:「ラジオ波によってタワークレーンに発生する異常電圧とその減衰装置について(Ⅱ)」, 昭51電気学会大会 No. 490
- (5) 笠島:「ラジオ波によって大型クレーンに発生する異常電圧とその減衰装置について(Ⅱ)」, 昭51日本建築学会大会(東海), 1166
- (6) 田付・高坂・笠島・木村:「ラジオ波によってクレーンに発生する異常電圧の試作減衰装置」, 昭53信学総大会 555
- (7) 高坂・石川・笠島:「ラジオ波によりタワークレーンに発生する異常電圧減衰装置に関する模型実験」, 昭49電気学会大会 No. 713
- (8) BS 4992: "1974 Protection against Ignition and Detonation Initiated by Radio Frequency Radiation", *British Standard Institution*, BS 4992, 1974, 1-29 (1974-2-28)