

建設機械・クレーン「設計編」*

山本 光**, 下平 貴之**, 高橋 毅***



山本 光

下平 貴之

高橋 毅

Construction Equipment, Crane (Design)*

by YAMAMOTO Hikaru**, SHIMODAIRA Takayuki** and TAKAHASHI Takeshi***

キーワード 油圧ショベル, 建設用クレーン, 構造規格, 荷重, 応力頻度, 疲労設計, 溶接継手, 応力集中

1. はじめに

建設機械産業は国内の建設投資に相関した需要構造を持ち、1990年代前半に崩壊したバブル景気以降は、大幅な需要増の見込めない成熟産業とされてきた。ところが近年、新興国をはじめとする海外市場で急速な規模の拡大が進んでいる。かつては日米欧などの先進国が主な市場であったが、2003年度に輸出が国内需要を初めて上回って以来、中国、インド、ロシア、中東、南米、アフリカなどにも市場が広がり多極化している。これらの国々には数十年単位でのインフラ整備が必要とされ、建設機械は世界規模では成長産業と言える。

これに伴い、国内の建設機械メーカーでは海外工場を含めたグローバルな視点での開発・調達・生産・販売の最適化が行われている。本稿では、世界各地で使用されている建設機械およびクレーンの設計について基本的な考え方を紹介する。

2. 製品概要

建設機械とは一般に土木・建築作業（工事）などに使われる機械の総称である。平成22年度の建設機械生産高構成比を図1に示す。機種別では油圧ショベルとミニショベルを合わせて全体の3分の2を占めている。油圧ショベルは

フランスのシカム社からの技術導入により1961年に国内で初めて発売された。続いて1965年に純国産技術による国内第1号機が完成して以来、比較的歴史の浅い機械である。しかしながら、その汎用性・経済性に加えて各社の高い技術レベルが製品に活かされ、現在では日本の油圧ショベルが世界で最も活躍している建設機械となっている。

油圧ショベルの中で最も生産量の多い機械質量20tクラスの外観を図2に示す。機械質量が1t未満のミニタイプから100tをはるかに上回る超大型まで製品展開されている。主な作業としては整地、運搬、積込み、掘削であるが、長い腕の部分とその先端部は通常のバケットタイプに

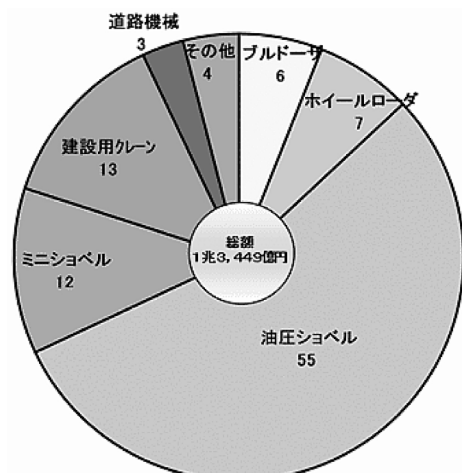


図1 平成22年度 建設機械生産高構成比 (単位%)
(出典：(社)日本建設機械工業会)

*原稿受付 平成23年12月5日

**正 員 日立建機 Member, Hitachi Construction Machinery Co., Ltd.

*** 日立建機 Hitachi Construction Machinery Co., Ltd.

替えて各種アタッチメントを装着でき、様々な用途への対応が可能である。具体的にはスクラップ処理、林業、道路整備・管理、ブロック運搬、草刈など多岐にわたる。

油圧ショベル・ミニショベルに次いで生産量が多いのは建設用クレーンである。図3に、最大つり上げ荷重 500tクラスのクローラクレーンを示す。クローラクレーンを含む移動式クレーンは19世紀末に米国で生まれたパワーショベルのアタッチメントとして発展し、1950年以降は専用機としてクローラクレーン、トラッククレーンに分かれて進化してきた³⁾。

クローラクレーンは建設工事の一般荷受作業に使われる機械で、油圧ショベルと同様に作業腕部分を取り替えることで、現場の状況に応じた様々な作業を行える。近年は港湾作業や基礎工事の掘削作業など用途の範囲が拡大し



図2 油圧ショベル（機械質量 20 t）



図3 クローラクレーン（最大つり上げ荷重 500 t）
（写真提供：日立住友重機械建機クレーン(株)）

ている。さらには世界的な規模で進むインフラ整備やエネルギー産業の発展に伴い海外需要も増大しており、海外メーカーへの OEM 供給と輸出の両面から世界市場におけるシェアを伸ばしつつある。

3. 溶接構造物としての設計思想

本章では建設機械における代表例として油圧ショベルの設計手法について述べる。設計に際し用いられる規格としては「車両系建設機械構造規格」等があるが、強度に関しての定量的な規定は無い。このため各社ごとに設計基準が設けられている。一方、クレーンについては「移動式クレーン構造規格」、JIS B8821「クレーン鋼構造部分の計算基準およびクレーン構造規格」が定められており、これらをもとにした各社の設計基準がある。

3.1 油圧ショベル構造物に加わる荷重と応力

油圧ショベルでは自身の動力と作業対象物との相互作用により機体の各部に荷重が加わる。掘削・積み込み作業であれば、掘削動作のたびに最大負荷が訪れ負荷変動が激しい。作用点であるバケットつめ先には、自身の掘削力や旋回力による反力、作業対象物からの外力などさまざまな方向に力が加わる。また近年では掘削以外の用途比率が高まっており、さらに新興国をはじめ世界中の様々な現場での稼働を想定した汎用性の高い製品設計が重要となってきている。

掘削作業時などに発生する応力は、作業腕の姿勢および油圧シリンダの推力により計算することができる。従来は梁の力学モデルを作り、静的負荷時のピン結合部の荷重を求め、これを境界条件として FEM 解析し構造物各部の応力を求めていた。近年、計算機の性能向上により、シミュレーション上で機体全体の油圧・機構モデルを再現し、動的負荷を含めた応力を把握することが可能となってきた（図4）。

3.2 実働測定による負荷頻度の把握と寿命推定

前述のように、構造物に発生する応力はシミュレーションである程度推定できるが、負荷の発生頻度については使用現場・作業ごとに異なる実働荷重を把握する必要がある。一般的には、荷重計や加速度計を取り付けるか、代表的部位にひずみゲージを貼付し実働応力（ひずみ）を測定

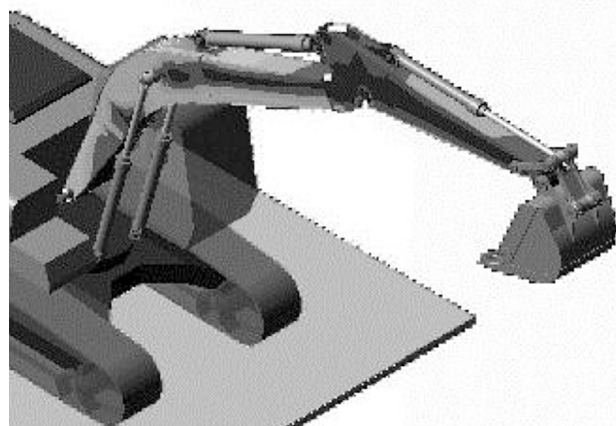


図4 機構解析による応力の把握

する。図5に、油圧ショベルの実働応力測定により得られた作業腕における応力波形例を示す。

さまざまな部位で測定した応力波形を応力レベルごとにカウントし、図6のような応力頻度分布を求める。部位ごとに応力レベルは異なるが、実働作業中に発生する最大応力と累積頻度で正規化することにより応力頻度分布を共通化できる。シミュレーションから求めた応力とこの頻度分布により、疲労寿命の推定が可能となる。

疲労寿命評価では、直線累積被害則の1つである修正マイナー則を使用する人が多い。応力頻度分布より、ある応力レベル σ_i のときの頻度が n_i であるとする、後述のS-N線図より応力レベル σ_i で破断に至る回数 N_{fi} のうちの n_i/N_{fi} の疲労被害を構造物が受けたと考える。各応力レベルで受けた疲労被害をそれぞれ累積し、累積疲労被害 D は

$$D = \sum \frac{n_i}{N_{fi}}$$

と表される。直線累積被害則では累積疲労被害 $D=1$ となったとき疲労破壊すると考える。頻度 n_i がたとえば1時間あたりのカウントであるとする、 $D=1$ すなわち n_i の総

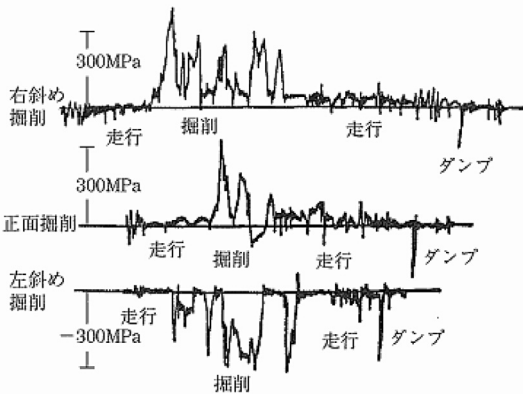


図5 油圧ショベル掘削時の実働応力波形の例²⁾

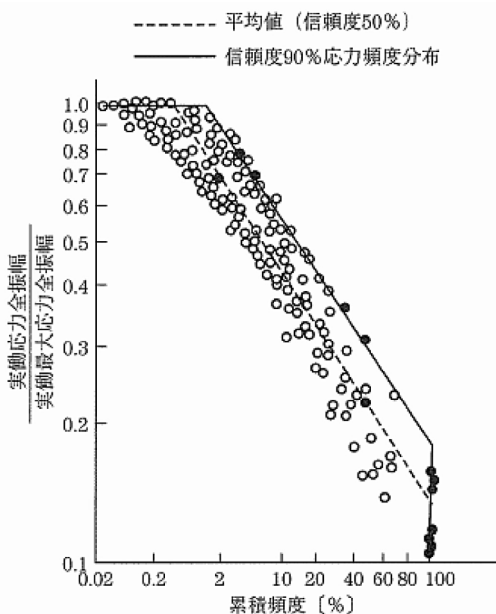


図6 油圧ショベル実働応力頻度分布例²⁾

和 $= N_{fi}$ の総和となる時間(下記の推定寿命)が算出できる。

$$\text{推定寿命 (hr)} = \frac{1}{\sum \frac{n_i}{N_{fi}}}$$

3.3 寿命推定のための各種応力基準

前述のとおり構造物の寿命推定には応力基準 (S-N線図) が必要であるが、溶接構造物では溶接部からの破壊が大半であるため、溶接部のS-N線図が不可欠である。溶接部は溶接継手の種類や溶接ビードの形状により応力集中部が存在する。疲労強度評価としては溶接継手から離れた部位の応力(公称応力)による方法と、応力集中部の応力(局部応力)による方法がある。

図7に日本鋼構造協会の疲労設計曲線を示す³⁾。このS-N線図の縦軸は公称応力であり、応力変動幅によって整理している。公称応力による評価では、溶接継手をその形状や仕上げ程度によって等級分類し、各等級毎に必要な寿命に対する設計疲労曲線を定める。表1に等級毎の溶接継手形式の例を示す。

製品設計時はFEM応力解析により公称応力を求め、この評価曲線で評価できる。しかし、実際の構造物では公称応力としてどの部位の応力を抽出するか戸惑うことが多い。また継手形式も複雑な構造になると、どれに該当するのか迷うことも多い。

図8は建設機械の一部分を模した構造物で疲労試験を実施した結果である。縦軸の応力は溶接ビード止端部をグラインダーで部分的に削り、そこにひずみゲージを貼って計測した局部応力である。この局部応力でまとめたS-N線図は、継手の種類にかかわらず一定の範囲内に収まる。要求寿命に対し各部位で共通の許容応力を設定でき、試作時に応力を計測して寿命を評価するには使い勝手の良い方法である。しかし設計段階では、局部応力を求めるために詳細なFEMモデルを作成して計算を行う必要があり、限られた開発期間の中では負担が大きくなる。

以上のように、評価方法によって長所と短所があり、設計時は公称応力による評価、試作時には局部応力による評価がなされることが多いが、近年の計算速度の向上もあり設計段階でも局部応力での評価を試みるようになってきている。公称応力と応力集中係数により局部応力を推定する手法や、溶接ビード近傍の応力分布から局部応力を推定するホットスポット評価法⁴⁾などが提案されている。

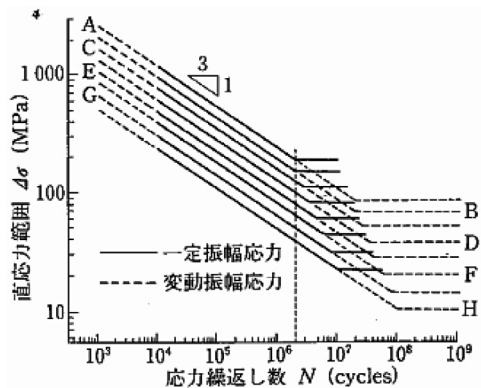
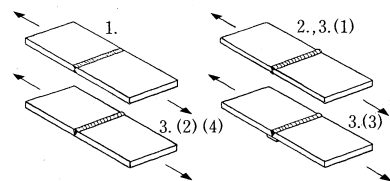
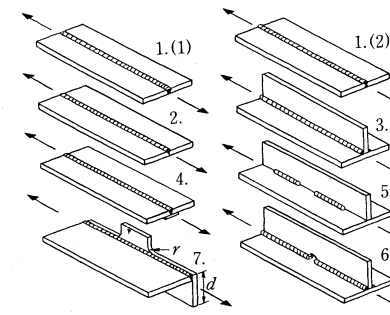


図7 日本鋼構造協会の疲労設計曲線例³⁾
(直応力を受ける継手)

表1 等級毎の溶接継手形式例³⁾

継手の種類		強度等級 ($\Delta\sigma_f$)	備考
1. 余盛削除した継手		B (155)	 <p>※ 完全溶込み溶接で、溶接部が健全であることを前提とする。 ※ 継手にアーバが付く場合には、その勾配を1/5以下とする。 ※ 深さ0.5 mm以上のアンダーカットは除去する。 ※ (1., 2.)仕上げはアンダーカットが残らないように行う。仕上げの方向は応力の方向と平行とする。</p>
2. 止端仕上げした継手		C (125)	
3. 非仕上げ継手	(1) 両面溶接	D (100)	
	(2) 良好な形状の裏波を有する片面溶接	D (100)	
	(3) 裏当て金付き片面溶接	F (65)	
	(4) 裏面の形状を確かめることのできない片面溶接	F (65)	

継手の種類		強度等級 ($\Delta\sigma_f$)	備考
1. 完全溶込み溶接継手 (溶接部が健全であることを前提とする)	(1) 余盛削除	B (155)	 <p>※ (1.(2), 2., 3.) 棒継ぎにより生じたビード表面の著しい凸凹は除去する。 ※ (2., 3.)内蔵する欠陥(ブローホールなどの丸味を帯びたもの)の幅が1.5 mm, 高さが4 mmを超えないことが確かめられた場合には、強度等級をCとすることができる。</p>
	(2) 非仕上げ	C (125)	
2. 部分溶込み溶接継手		D (100)	
3. すみ肉溶接継手		D (100)	
4. 裏当て金付き溶接継手		E (80)	
5. 断続する溶接継手		E (80)	
6. スクラップを含む溶接継手		G (50)	
7. 切抜きガセットのフィレット部に接する溶接	(1) $1/5 \leq r/d$	D (100)	
	(2) $1/10 \leq r/d < 1/5$	E (80)	

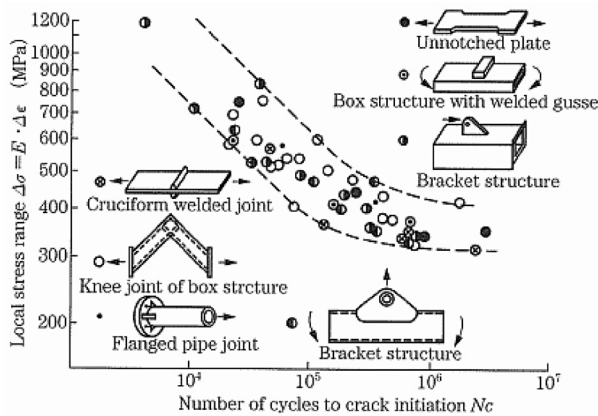


図8 局部応力でまとめたさまざまな構造体のS-N線図²⁾

これらの評価の他に、製品の事故事例や生産設備の制約などによる要素が反映され、各社独自の基準により最終的な構造が決定される。油圧ショベルは国際的な価格競争の中、原価低減のための努力が絶えず行われている。溶接自動化など製造コストの低減とともに、板厚の最適化や鋳鋼による構造一体化など、強度の維持・確保を前提とした設計努力も進められている。

4. 溶接継手の特徴と要求性能

4.1 部材の組み合わせと材料

油圧ショベルの主要構造物を図9に示す。大きく分けて

上部回転体、下部機構(走行体)、作業機(腕)がある。油圧ショベルは地球を相手にすることが多く、機械自身にある程度の自重を必要とする。ほとんどが鋼板と鋳鍛造部品の重さであり、溶接構造物の比率が高い。

構造としては、主に板材同士を溶接し箱型形状になっているのが特徴である。板厚は小型機種では4.5 mm程度、大型機種では50 mmを超えるものもある。軸受け部や大荷重を受ける部位等では、鋳鋼や鍛造で成型した部材と板材とを溶接する機会が多い。板材としては軟鋼(SS400)が大部分であり、軽量化や強度が必要な部位では500~600 MPa級の高張力鋼が用いられる。また、作業機先端のバケット等の磨耗が問題になる部位には耐磨耗材が使われる。

一方クレーンでは、下部機構は油圧ショベルと同様であるが、作業機は箱型構造で伸縮式のもの、図3に示したようなラチス構造のものに分けられる。後者においては型鋼やパイプ材の溶接が行われる。作業機の材料としては800 MPa級や1000 MPa級の高張力鋼が用いられている。また海外では1200 MPa級の高張力鋼が使用され始めている³⁾。

4.2 溶接継手の種類

建設機械に用いられる溶接継手として、油圧ショベル作業機の構成部材であるブームの例を図10に示す。突合せ溶接継手、すみ肉溶接継手、ガセット溶接継手、重ね継手等が用いられている。適材適所の板厚構成にするため、突合せ溶接継手では板厚の異なる板を溶接することが多い。板

厚差が大きい場合は、厚板側に板厚差を緩和するテーパを予め設ける。箱型の構造が主であるため、内部の溶接や仕上げ処理が困難である部位では、突合せ溶接継手にV形開先で鋼の裏当て材を用いた片側施工を採用する機会が多い。角部や内部隔壁のすみ肉溶接では、最後に箱を成す（閉じる）部分の内部溶接が困難な部位は片面からだけの施工となり、内部に未溶着が残る部分もある。

4.3 求められる強度

4.3.1 静的強度

静的強度は特にクレーンでは重要であり、表2に示すように「移動式クレーン構造規格」において溶接部の許容応力が定められている⁹⁾。油圧ショベルでは各社で独自に基準を定めているが、溶接継手部に関しては3章でも触れたとおり、後述の疲労強度から許容応力が決められることが多い。

4.3.2 疲労強度

建設機械の構造物では疲労き裂発生による事故例が見られる。き裂発生部位は溶接ビード止端部もしくは未溶着部のルートであり、溶接継手部では特に疲労強度が問題になる。クレーンではJIS B8821「クレーン鋼構造部分の計算基準およびクレーン構造規格」において疲労設計荷重、疲

労設計線図が定められ、溶接継手ごとに疲労等級が分類され疲労設計手順も示されている⁷⁾。一方、油圧ショベルでは前述の日本鋼構造協会の疲労設計指針⁹⁾、IIW 疲労設計指針⁹⁾等に加え、各社独自の溶接継手の疲労試験（図11）⁸⁾などにより溶接継手部の疲労強度を定めている。

疲労強度の評価法としては公称応力による評価以外にも局部ひずみ法¹⁰⁾、応力拡大係数法¹¹⁾等による局所評価も行われている。また疲労強度を向上させる方法としては、溶接ビード形状を改善し応力集中を低減させるためグラインダーで溶接ビードを滑らかに仕上げたり、溶接ビード止端部への化粧溶接、TIG ドレッシング施工等が行われている。例えば図10において、油圧シリンダブラケットの溶接止端部では溶接ビードを長く伸ばした上でグラインダー処理するなど応力緩和に気を遣っている。

疲労強度に影響を与える引張残留応力に対しては、これを除去するため残留応力除去焼鈍を施す場合がある。またピーニング技術等も検討されている¹²⁾。他の疲労強度向上法としては、板材のフォーミング加工により溶接継手になる部位のみ板厚を厚くする方法も研究されている（図12）¹³⁾。

4.3.3 靱性

靱性に対する要求としては、特に高強度な高張力鋼を用いるクレーンでは日本クレーン協会から材料強度、板厚によるシャルピー吸収エネルギーの値が提案されている（表3）⁹⁾。他の建設機械においても各社ごとに規定が決められている。

4.4 品質管理

溶接部の品質としては割れ、アングカット、オーバラップ、クレータ、スラグ巻き込み、ブローホール等で有害なものがあるとはならない。溶接後の検査としては上記を目視で確認するとともにRT（放射線透過試験）、UT（超音波探傷試験）、PT（浸透探傷試験）、MT（磁粉探傷試験）等の非破壊検査も実施されており、欠陥が見つかった場合は速やかに補修する。

また試作評価時には、各部の応力測定や構造物単位でのベンチ耐久試験、悪路走行耐久試験、掘削耐久試験等により様々な面から耐久性の確認を行っている。製品供用後も

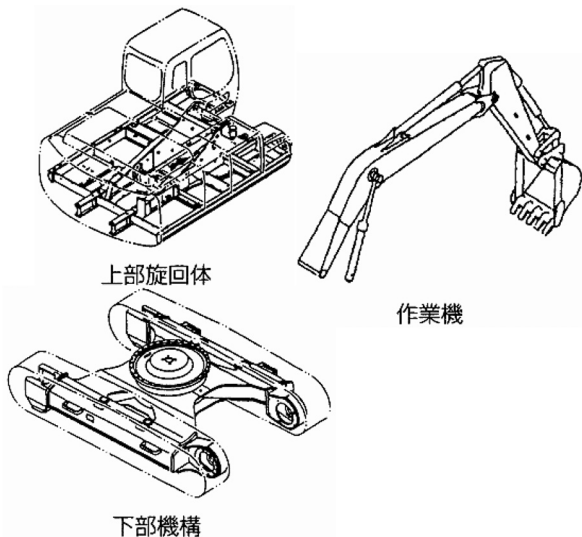


図9 油圧ショベルの主要構造物

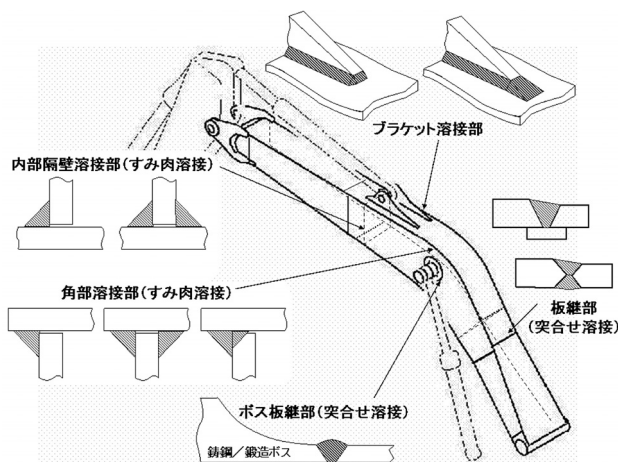
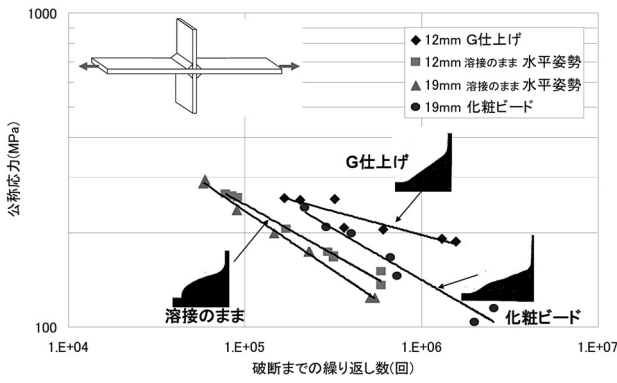


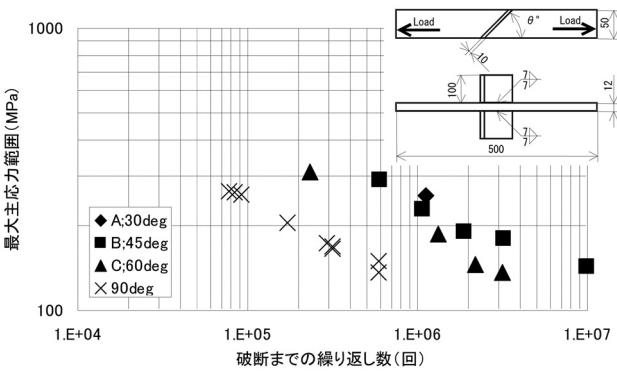
図10 油圧ショベルブームの主な溶接継手

表2 移動式クレーンの許容応力⁹⁾

		応力の種類	許容応力	計算に用いる断面	
溶接部分	突合せ	引張	鋼材種類 A	$0.840 \times \sigma_a$	純断面
			鋼材種類 B	$0.800 \times \sigma_a$	
		圧縮	鋼材種類 A	$0.945 \times \sigma_a / 1.15$	総断面
			鋼材種類 B	$0.900 \times \sigma_a / 1.15$	
	曲げ	引張側	鋼材種類 A	$0.840 \times \sigma_a$	純断面
			鋼材種類 B	$0.800 \times \sigma_a$	
		圧縮側	鋼材種類 A	$0.840 \times \sigma_a / 1.15$	総断面
			鋼材種類 B	$0.800 \times \sigma_a / 1.15$	
	せん断	鋼材種類 A	$0.840 \times \sigma_a / \sqrt{3}$	総断面	
		鋼材種類 B	$0.800 \times \sigma_a / \sqrt{3}$		
すみ肉	引張	鋼材種類 A	$0.840 \times \sigma_a$	のど厚で	
		鋼材種類 B	$0.800 \times \sigma_a$	計算	
	圧縮	鋼材種類 A	$0.840 \times \sigma_a / 1.15$	のど厚で	
		鋼材種類 B	$0.800 \times \sigma_a / 1.15$	計算	
	曲げ	鋼材種類 A	—		
		鋼材種類 B	—		
せん断	鋼材種類 A	$0.840 \times \sigma_a / \sqrt{3}$	のど厚で		
鋼材種類 B	$0.800 \times \sigma_a / \sqrt{3}$	計算			



(a) ビード形状と疲労強度の関係⁶⁾



(b) 斜めリブ十字継手の疲労強度⁹⁾

図11 メーカーでの疲労試験例

定期検査においてき裂有無の検査等が行われ、さらにはユーザーの使用環境で実働負荷を測定し、設計品質の確認と次期製品への設計フィードバックも実施されている。

5. おわりに

建設機械市場の多極化ならびに作業用途の多様化が進み、これに伴って標準仕様以外の製品の数および比率が高まっている。また従来の性能・機能を向上させるだけでなく、IT活用やロボット化などこれまでに無い新たな役割を担う展開も予想される。

一方で、建設機械業界にとっても地球温暖化対策や循環型社会の実現は最優先課題の一つである。製品開発の上では、環境負荷を低減するための低燃費技術の導入やリサイクル率向上への配慮などが求められる。同時に生産面でも、工場の省エネルギー施策やゼロエミッション化に伴う製造ラインの改編が必須となり、これら様々な状況下において設計の最適化・効率化が今後さらに重要になると考えられる。

参考文献

- 1) 建設機械産業のあゆみ－日本建設機械工業会20年誌－，日本建設機械工業会 (2010)。
- 2) 鯉淵，小久保：製品開発のための材料力学と強度設計ノウ

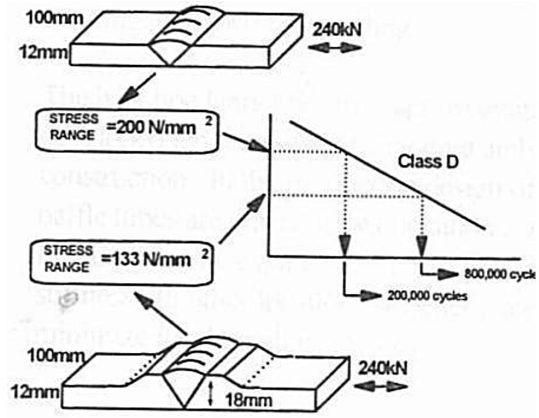


図12 板端部フォーミング加工による疲労強度向上¹²⁾

表3 移動式クレーンの靱性要求値⁹⁾

降伏点 σ_y (MPa)	板厚 B (mm)	最低使用温度	要求吸収エネルギー / 試験温度	
			3個の平均値	1個の最小値
$\sigma_y \leq 460$	$2.5 < B \leq 25$	-20°C	18J / 0°C	13J / 0°C
	$25 < B \leq 50$	-20°C	18J / -20°C	13J / -20°C
$460 < \sigma_y \leq 700$	$2.5 < B \leq 25$	-20°C	27J / 0°C	19J / 0°C
	$25 < B \leq 50$	-20°C	27J / -20°C	19J / -20°C
$700 < \sigma_y \leq 1000$	$2.5 < B \leq 25$	-20°C	40J / 0°C	28J / 0°C
	$25 < B \leq 50$	-20°C	40J / -20°C	28J / -20°C
$1000 < \sigma_y \leq 1200$	$2.5 < B \leq 25$	-20°C	47J / 0°C	33J / 0°C
	$25 < B \leq 50$	-20°C	47J / -20°C	33J / -20°C

ハウ，日刊工業新聞社 (2002)。

- 3) 鋼構造物の疲労設計指針・同解説，日本鋼構造協会 (1993)。
- 4) IIW document XIII-1965-03 / XV-1127-03 (2004)。
- 5) 中村，井上：高張力鋼の溶接の現状，クレーン，48-6 (2010)，31-35。
- 6) 溝口：移動式クレーン構造物の強度計算等に係る新たな提案，クレーン，47-2 (2009)，24-30。
- 7) 橋内：金属疲労－クレーン構造部分の疲労設計概要－，クレーン，42-5 (2004)，4-14。
- 8) 下平，橋本，中門，野中：溶接継手部の形状と疲労強度，日本機械学会関東支部・精密工学会茨城講演会講演論文集 (1995)，153-154。
- 9) 下平，中門，橋本：荷重が斜めに作用する場合のリブ十字すみ肉継手の疲労強度，日本機械学会関東支部・精密工学会茨城講演会講演論文集 (1997)，131-132。
- 10) 大野，鯉淵：局部ひずみアプローチによる溶接構造物の疲労強度評価，日本機械学会論文集 (A編)，53-485 (1987)，1-5。
- 11) J. Samuelsson, B. Jonsson, Z. Barsoum: Service fatigue design of complex welded construction equipment, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 39-10 (2008), 734-739.
- 12) R. L. ADRIAN, D. L. BLUNIER, A. D. DEARING, T. JUTLA: Increasing Fatigue Life of Welded Joints Using Selective Forming, Official Proceedings Annual International Bridge Conference (1995), 265-269.