

6. 油圧ショベルの動的安定性評価

建設省土木研究所 境 友昭*・斉藤英晴

1. まえがき

油圧ショベルの作業時の安定性（動的安定性）を大きく支配しているのが車体の揺動現象であり、機械の安全性や性能を評価する上での重要な項目の一つである。この動的安定性の良否は、実作業時における運転員の精神的、肉体的な疲労や作業能率に影響を与えることが知られている。^{1), 2)}

したがって、油圧ショベルの動的安定性の評価尺度を構成しようとする場合、Dose としての揺動現象の物理特性と、Response としての揺動現象に対する運転員の心理特性を把握し、両者の関連性を分析する必要がある。本論文は、これらの調査、分析をもとに物理特性から、作業時の揺動現象の良否を定量的に評価する方法を開発したので報告するものである。

2. 調査方法

2.1 揺動現象（物理量）の試験要領に関する実験

油圧ショベルの揺動現象の物理的特性を記述する要因を規定するため、(a)バケット内荷重、(b)バケット降下高さ、(c)機関回転数を要因として、揺動実験を行った。試験は、アームを完全に押し出した状態で、ブームレバーのみを操作してバケットを急降下させ、バケットフットピンがブームフットピンの高さと同じ位になった時にブームレバーを中立点に急速に戻し急停止させ、この時の作業機に生じる慣性力で揺動させる方法とした。

2.2 運転員の意識調査

実作業現場で働く運転員を対象に、油圧ショベル作業に関する意識調査を実施した。調査票は、(1)安定性、不安感に感ずる意識 (2)疲労感に関する意識 (3)操作性に関する意識 (4)作業能率に関する意識の把握を目的として質問を構成した。

3. 調査結果

3.1 揺動物理量の記述

オペレータはフロント部を操作して作業を行うが、この時の慣性力と衝撃力によって車体は揺動する。このように油圧ショベルの揺動は内部力によるものであり、機械の状態量として与えられる。作業時の揺動現象が現場の条件などによって変動しても、油圧ショベルが揺動運動に対して線形であれば、作業中に生じる揺動現象のアンサンブル平均は、機械固有のものであり、一定条件下での揺動の物理量によってその特性を記述することができる。ところで、油圧シ

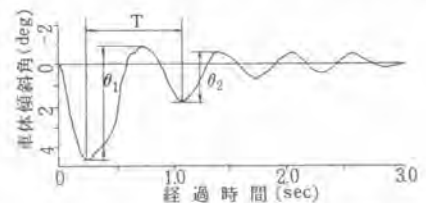


図 - 11 車体のピッチング波形

ショベルの揺動現象は、約3Hz以下のピッチング運動であり、車体の傾斜は、図-1に示すような減衰振動となる。この運動は最大傾斜角(θ_1)、対数減衰率($\ln \theta_1/\theta_2$)、および揺動周波数($1/T$)によって記述できる。

3.2 試験条件の検討

油圧ショベルの揺動現象の物理的な試験要領を作成する上で、揺動現象に影響すると思われるバケット降下高さ(要因B)、バケット内荷重(要因C)、機関回転数(要因D)の各要因について分散分析によりその効果を分析し、試験条件として規定することの必要性について検討した。表-1は各要因の有意性の検定結果を示すものである。バケット降下高さによる有意性は認められず、どの高さより降下しても車体揺動は一定である。バケット内荷重については要因の効果が大きく、また機関回転数については機種によって対数減衰率に有意性が認められる。これらの結果よりJIS³⁾に準拠し、揺動試験における機械の状態を「バケット内荷重は標準荷重、機関回転数はフルスロットル」と定めた。

表-1 分散分析結果

機種	要因	揺動周期	対数減衰率	最大傾斜角
(0.25)	B			
	C	**		**
	D		**	
(0.70)	B			
	C	**		**
	D			

**は有意水準 | *で有意

3.3 意識調査の結果

意識調査は、揺動の物理量を把握した油圧ショベルと同一機種を所有する事業所の運転員を対象に郵便調査法により実施した。回答した運転員の数282、このうち有効回答数は203であった。無効回答の内訳は、対象機種外72、質問の大半に答えていないなどによる不良回答が7であった。

3.4 被調査者の属性

意識調査に回答した運転員の年齢、運転経験年数および運転経験台数を図-2に示す。

29才以下	30~39才	40~49才	50~59才	60才以上
18.2%	45%	28%	83%	0.5%
(a) 年齢				
2年未満	2~5年未満	5~10年未満	10年以上	
8.6%	19.8%	31.2%	40.4%	
(b) 運転経験年数				
1台	2~3台	4~5台	6~9台	10台以上
3%	24.4%	30.6%	22.2%	19.8%
(c) 運転経験台数				

年齢構成では30~40歳台が、また運転経験年数では5年以上がそれぞれ全体の7割を占めており、熟練者が対象になっていると思われる。また大多数の運転員が複数の機種の運転経験を有しており、機械の違いによる揺動特性の違いについてある程度の知見を持っているものと期待できよう。

図-2 運転員の属性

3.5 運転員の意識の数量化

意識調査票に表現された運転員の意識は、質問項目に対する肯定、否定といった質的尺度(名義尺度)によって構成されており、それ自体は動的安定性の良否やその順序をあらわしていない。しかし、動的安定性を定量的に評価するには、これら質的尺度を量的尺度に変換する必要がある。このための統計的手法を数量化理論といい、数種の数量化モデルがある。ところで、動的安定性を評価する外的基準は明らかではないが「阻害感(揺動によって運転操作が中断させられたり、車体との一体感が損なわれ精神の安定が乱されること)の大きさ」が運転員の評価基準となっているものと思われる。したがって、このような「阻害感」に関する質問項目を設定した場合、運

転員の反応は日頃乗車している機種が運転員に与える阻害感のマグニチュードの影響を受けていると思われる。運転員の反応がこのような構造を持つとき反応パターンの似ている運転員には互いに近い数値を与え、同時に運転員が似たような反応をする質問項目には近い数値（固有値ベクトル）を与えることにより、動的安定性を量的に評価することができる。このような分析方法をデータが名義尺度で与えられる場合の主成分分析（数量化理論Ⅲ類）という。

本調査では、カテゴリに23問の質問項目を用いて分析を実施したが「阻害感の大きさ」に相当する第1相関軸の固有値（寄与率）は34%であり、この種の意識調査としては良好な結果と思われる。表-2は、この分析に用いた23の質問項目を第1相関軸での固有値ベクトルに相当するトランスフォームド・スコアの大きさに順に並び換えたものである。正のスコアには「むち打ち症になるくらいひどいショックをたびたび受けている」、「法面や均平作業の仕上げに苦勞する」など阻害感を示す項目が、逆に負のスコアには「今の油圧ショベルは体との一体感が得られやすい」、「作業のしやすさの面では満足している」など乗車機種に対する好意的な質問項目が並んでおり、またこれらの並びが阻害感の大きさを意味することは明らかである。このことから第1相関軸が、油圧ショベルの動的安定性の評価を示していることがわかる。表-2に示すスコアによって、各質問項目を量的に扱くと、揺動現象に対する運転員の評価を第1相関軸のスコアとして数量化できる。次に乗車機種に対する直接的な評価と、第1相関軸上での評価量との関係について検討してみた。これは評価量を質問項目に対する選択枝別に集計し、その平均値を算出したものである。これによると、「作業のしやすさに対する満足度」の問に対し「満足（-0.25）、やや満足（0.05）、やや不満（0.22）、不満（0.63）」また「ゆれやショックに対する満足度」の問に対し「満足（-0.30）、やや満足（-0.06）、やや不満（0.11）、不満（0.31）」と各項目に対する満足度と第1相関軸での評価量がよく一致していることがわかる。

表-2 第1相関軸の意味解釈

質問項目	トランスフォームド・スコア
(1) 作業を1日やるとイキになってしまう。	2.2380
(2) 油圧ショベルの作業はイライラすることが多い。	1.7190
(3) むち打ち症になるくらいひどいショックをたびたび受けている。	1.6893
(4) 油圧ショベルの作業は苦勞な作業だと思う。	1.2966
(5) 作業の終わったあとは体がだるくなってしまう。	1.2694
(6) ブーム操作を急停止すると車体がガクつくことがたびたびある。	1.2055
(7) 車体の揺れがなかなか止まらないことがたびたびある。	0.8809
(8) 油圧ショベル作業では肩や腰が凝ることが多い。	0.7375
(9) 法面や均平作業の仕上げには苦勞する。	0.3116
(10) 車体が大きくゆれると不安になる。	0.2526
(11) 車体の揺れやショックが長く続くとおえられない。	0.1970
(12) 油圧ショベル作業に車体の揺れやショックはつきものだ。	0.1286
(13) 車体が揺れると細かい作業がやりにくい。	0.0769
(14) 油圧ショベルの作業は細かい神経を使う。	0.0626
(15) 今の油圧ショベルはたいいの作業がこなせる。	-0.1597
(16) 今の油圧ショベルは体との一体感が得られやすい。	-0.3548
(17) 今の油圧ショベルは乗りごちがよい。	-0.3745
(18) 車体が揺れないよう気をつけて操作する方だ。	-0.3750
(19) 油圧ショベルの作業はそれしきで疲れない。	-0.3890
(20) 馬力や作業にスピードなどの性能面では満足している。	-0.5818
(21) 作業のしやすさの面では満足している。	-0.7239
(22) 揺れやショックについては満足している。	-0.8757
(23) 総合的には満足している。	-0.9815

3.6 油圧ショベルの動的安定性と揺動特性との関係

油圧ショベルの動的安定性を運転員の意識から量的に評価することが可能となったが、これらの心理的な評価量と乗車機種の揺動特性や車両諸元などとの関係を把握することが重要な問題である。もし評価量に影響を与える揺動特性を抽出できれば、動的安定性はこれらの物理的に計測可能な揺動特性の関数として示すことができる。ここでは、次に示す9項目の揺動特性と心理的な評価量との相関をステップワイズ重回帰分析により求めた。

x_1 : 最大傾斜角 (deg) x_2 : 対数減衰率 x_3 : 揺動周波数 (Hz) x_4 : ブーム降下速度 (deg/sec)

x_5 : 作業時安定度 (前方) x_6 : 重心高比率 (重心高/接地長) x_7 : 全装備重量 (ton)

x_8 : 作業機重量比 (作業機重量/全装備重量) x_9 : 掘削能力比 (最大掘削力/転倒荷重)

表-3は回帰式に取り入れられた説明変量と各ステップにおける重相関係数を示すものである。ステップ1では最大傾斜角が取り入れられ説明力が最も強い変量であることを示している。ステップ2以降で対数減衰率などが回帰式に取り入れられているが、作業時安定度などは回帰の改善に寄与せず、この分析では無相関と思われる。最終的に得られた重回帰式は次のとおりである。

表-3 ステップワイズ回帰

ステップNo.	取り入れた説明変量	重相関係数
1	最大傾斜角(x_1)	0.3872
2	対数減衰率(x_2)	0.5772
3	重心高比率(x_6)	0.6110
4	作業機重量比(x_8)	0.6242
5	揺動周波数(x_9)	0.6539
6	全装備重量(x_7)	0.7118

$$Y = -1.127 + 0.0278x_1 - 0.172x_2 + 1.024x_3 - 0.23x_6 + 0.0208x_7 + 0.159x_8$$

この方程式のスコアが正となる時は、動的安定性が標準(スコア0)より劣る機種、また負の時は優れた機種を意味しており、説明変量が動的安定性の評価に与える影響の強さは回帰係数によって決定される。車体の揺動特性に関しては、最大傾斜角が大きく、対数減衰率が小さく、かつ揺動周波数の高い機種ほど動的安定性の評価が劣る傾向にあることがわかる。4名以上の運転員によって評価された機種について、推定式による評価量と運転員による評価量の両者の関係を図-3に示す。大多数の機種は、動的安定性の良否の判断が一致する第1、第3象限に布置されており、動的安定性が揺動特性の評価関数であらわされることがわかる。

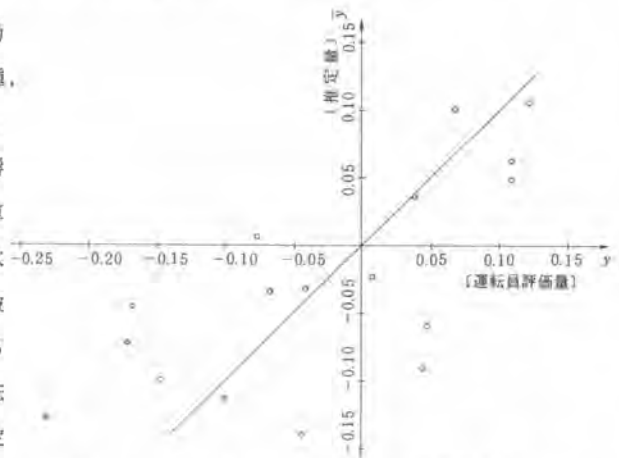


図-3 オペレータ評価量と相定量の関係

4. あとがき

動的安定性の評価関数を線形重回帰方程式で示すとすれば、上記の推定式によって、物理量から心理評価量の推定が可能である。図-3に示すとおり、17機種のうち13機種については、動的安定性に対する運転員の評価と、物理量からの推定量の傾向は一致しているが、まだ十分な推定精度が得られているとは言えない。この原因の一つは、運転員の反応の安定性が十分でないことと考えられ、今年度更に意識調査のサンプル数を増し、推定精度の向上を図るつもりである。

- 参考文献 1)村上：パワーショベル動的安定性の定量的評価方法と理論解析、小松技報(24-2)
 2)吉井、伊藤、清崎：油圧ショベルの動的安定性評価、住友重機技報(27=81)
 3)ショベル系掘削機性能試験方法 J I S A 8 4 0 2^{-J 0 7 8}