品質工学の土木工学問題への適用に関する基礎的研究

阿南工業高等専門学校・専攻科　正会員　松保明憲

１．まえがき　品質工学は、機械・電気等の分野で用いられ、廉価な部品を用いても製品のバラツキを抑え、頑強性のある高品質の製品を、安く製造する手法である。1999年には米国の産業界で殿堂入りを果たし注目を浴びているが、土木分野の問題においては適用例が未だ少ない。本研究では、品質工学を紹介[1),2)]し、国際規格を意識した性能照査型設計・発注法が本格化してきた土木分野の問題への適用を検討する。

２．品質工学の概要　生産技術には、第１に低コストの製品を開発すること、 第2にクレームの出ないようにすること、第3に開発速度を速めることが求められる。品質工学では、第1の課題にはシステムや製品特性のバラツキを小さくすることで対応する。第2の課題には、開発段階で材料・工程の変動、使用環境の変動、経時変化に対する安定性を向上させることで対応し、第3の課題には、開発時に弊害項目を一つずつ潰していくのではなく、システムや製品の本来の機能を考え、その機能の頑健性を高めることで対応する。品質工学は技術そのものを取り扱うのではなく技術的な最適条件を能率良く求める汎用技術であるので、出荷後の製品を扱うQCとは異なり色々な分野に適用できる。課題解決は、(1)システムの設計またはその選択、(2)パラメータ設計、(3)許容差設計の三段階で行われる。段階(1)ではアイデアの開発・機能設計と言われる過程で、どのようなものを問題に適用するか等の作業が行われる。段階(2)ではSN比を用いて設計定数が見つけられる。段階(3)は段階(2)が終了した後、最も経済的な代替案を選び出す決定を行う方法である。

2-1　パラメータ設計　製品の機能特性がずれたり機能停止となるのは、製品の構成材料・部品が劣化等によって定数変化するためである。機能性能が高くても、各種雑音によって性能がばらつく品物は使いにくく品質上問題がある。開発設計段階で、たとえ2級部品を使ってでも安定性の高い頑健な品物としておけばコストダウンにもつながる。品質工学では、機能特性に対するバラツキの尺度としてSN比ηが用いられる。ηは、大きいほど良い代替案であると考えられ、ηの求め方は特性値の種類によって異なる。特性値は望小特性、望大特性、望目特性に大別される。望小特性とは非負であるが小さい方が良い特性値で、摩耗量、偏心、曲がり等がある。この場合、バラツキが大でも平均が大でも良くなく、$\eta=-10\log\sigma^2$、$\sigma^2=(y_1^2+\cdots+y_n^2)/n$で計算される。望大特性とは非負で大きければ大きいほど良い特性で、例えば増幅率、出力、強さ、収量等がある。$\eta=-10\log\sigma^2$、$\sigma^2=(y_1^{-2}+\cdots+y_n^{-2})/n$で計算される。望目特性は、多くの品質特性がそれに分類され、与えられた目標値(設計値)より小さくても大きくても悪く、目標値に近いほど良い特性である。望目特性は、目標値との差をとって望小特性とすることはできないが、目標値の絶対値が大きい時には望小特性として近似できる。$\eta=10\log\{(S_m-V_e)/(nV_e)\}$、$S_t=y_1^2+\cdots+y_n^2$、$S_m=(y_1+\cdots+y_n)^2/n$、$V_e=(S_t-S_m)/(n-1)$であるが、例外として、非負の特性値、長さ、質量、経過時間、寸法等の時には$\eta=10\log\{(\text{平均値})^2/\sigma^2\}$で表される。

2-2　損失関数　契約上は規格値内の品物は良品、規格値外の品物は不良品であるが、実際は、規格値の前後で品質上の不連続はあり得ない。特性値が設計値mのとき最も良好で、mから外れると外れるほど悪さが増大する。ある値(機能限界)Δ_0を超えるまでは直接的なトラブルとはならないがΔ_0を超えると損害A_0が発生する。Δ_0の手前までは当面上の損害は見えないが０ではない(潜在的損害)。品質工学では、それを損失関数$L=(A_0/\Delta_0^2)(y-m)^2=(A_0/\Delta_0^2)\sigma^2$で表す(望目特性、図１)。$A_0$は製造コスト、製品価格とは無関係に決められる。

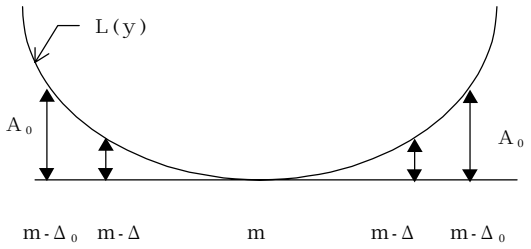

図１　損失関数(望目特性の場合)

３．問題への適用　ここでは、土木の分野への適用を考える。

Key word：品質工学、適用、頑強、品質、コスト　連絡先：〒774-0017阿南市見能林青木 Tel.0884-23-7100

3-1　交通標識の色の組合せ問題　交通標識は慣例によって色の組合せが決まっている。例えば、警戒標識は黄色地に黒、案内標識は青地に白(高速道路では緑地に白)、規制標識は赤地に白等である。ここでは、夜間での視認性を考慮して色の組合せを考える。A:赤地に白、B:黒地に白、C:黄地に黒、D:黒地に黄、E:白地に青の場合の5通りにおいて標識の所在を確認できる最大距離、標識の内容を判読できる最大距離を、昼間は17:00～17:30、17:40～18:00の2回、夜間は21:10～21:40の1回、計3回づつ測定し評価を行う。各色の組合せに対する識別距離を表１に示す。識別できる距離は長いほど良いので望大特性となり、各代替案に対するηは、A:η=40.02、B:η=40.20、C:η=39.43、D:η=39.55、E:η=40.22となる。A_0は、標識が見えないことによる事故で平均2人の死者(2.5億円×2人＝5億円)、両方の車の損害(2百万円×2台=4百万円)を仮定するとA_0=5.04億円となる。一方、Δ_0は次のように計算できる。判読してからブレーキを踏むまでの距離L_0=TV (T:判読してから減速するまでの時間、V:車の速度)はT=1秒、V=60km/hとするとL_0=17m、車が平均Vから完全停止するまで27m必要なので、標識を判読してから停止するまでの距離はL_T=17+27=44mとなる。L_Tが各色の判読できる平均距離54.2m(夜間)を超えると事故となるのでΔ_0=54.2/44=1.23となり、A:L=33186、B:L=31858、C:L=38109、D:L=36848、E:L=31699となる。慣例では注意を喚起させる順番にC,E,Aの順番で用いられているが、視認性に注目すると、品質工学では、E,B,A,D,Cとなる。夜間の視認性大のほうが昼間の視認性との差が少なく、総合的にバラツキが小となることを示している。

表１　各色の組合せに対する識別距離[3)]

測定内容	測定時間	赤地に白	黒地に白	黄地に黒	黒地に黄	白地に青
標識の所在を確認できる最大距離（m）	5:00～5:30 p.m.	353	268	343	271	327
	5:40～6:00 p.m.	351	269	340	260	309
	9:10～9:40 p.m.	83	76	86	76	92
標識の内容が判読できる最大距離（m）	5:00～5:30 p.m.	136	146	144	142	150
	5:40～6:00 p.m.	139	144	139	133	132
	9:10～9:40 p.m.	55	60	48	53	55

3-2　断面の最適化問題　正規分布に従う軸方向集中荷重$P=N(m_P, \sigma_P)=N(10^t,1^t)$が作用し、圧縮強度$f'_c$=240 kg/cm^{2}を有する高さH=20cmのコンクリート円柱断面の最適設計を考える。問題では、断面の信頼性と経済性を考えて、断面半径rを決定する。信頼性解析においては、実働応力$\sigma=P/(\pi r^2)$が許容応力σ_aを越えると危険(安全余裕$M=\sigma_a-\sigma$)と仮定する。この時、Mの期待値$m_M=\sigma_a-\{m_P/(\pi r^2)\}$、分散$\sigma_M^2=\sigma_P^2/(\pi^2 r^4)$となり、SN比$\eta=10\log\{(m_M/\sigma_M)^2\}$、信頼性指標$\beta=m_M/\sigma_M$、損失関数$L=(A_0/\Delta_0^2)\times\sigma_P^2/(\pi^2 r^4)$となる。Lの計算においては、$A_0$はコンクリートの価格(1m^{3}当たり6450円として円柱体積に換算する)とし、Δ_0はコンクリートの安全率1.3を仮定する。以上の式を用いて、種々のrに対するη、β、Lを計算すると表２のようになる。表より、rの大きさとともにηとβが大きくなり、Lは逆に小さくなるのが分かる。β=4～5を目標に、これらの間でトレードオフを行えば、最適解r_{opt}=5.0 (cm)が得られる。

表２　各断面に対するSN比η(db)、信頼性指標βおよび損失関数L

r (cm)	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
η (db)	6.29	14.43	18.94	22.15	24.68	26.79	28.61
β	1.16	2.97	4.99	7.23	9.67	12.33	15.20
L(円)	2121	1676	1357	1122	943	803	693

４．あとがき　η、Lは、その絶対値と物理的大きさとの間に関係を見出すのが困難な場合がある。これは工学的判断が困難であることを意味する。このような場合は信頼性工学を援用して解決することも一法である。

参考文献　1) 田口玄一：品質工学講座①開発・設計段階の品質工学，日本規格協会，1988.　2) 矢野宏：おはなし品質工学増補版－タグチメソッド入門，日本規格協会，1995.　3) 片平信貴：道路工学，技報堂，1956.