

建設分野における構造解析への品質工学的手法の適用

鹿島建設(株) 正会員 ○山沢 哲也 大川 真里奈

1. 建設分野における高度分業化の弊害と他業種における状況

計算機の高性能化や汎用コードの浸透に伴い、構造解析が手軽になった一方で、表裏一体であった構造物設計と構造解析との間には、高度分業化の深い溝が形成されている。例えば、全体構造に対する要求性能を整理しないまま各々の詳細構造を最適化しても、部材全体・構造全体の性能が最適化されるとは限らず、開発後期になって大きな手戻りが発生することがある。この場合、原因究明のため設計パラメタは増え、解析ケース数は膨れ上がることになる。

このような状況は、他業種（特に自動車業界）でも同様であったが、品質工学的アプローチによって、ロバスタな製品開発手法が提唱されると、業界一丸となって諸品質改善活動に取り組んだ。近年では、さらに国際競争力確保のため、適用範囲を拡大し、電気自動車開発を含めたガイドライン・準拠モデルの策定作業が推進されている²⁾。本稿では、他業種と比較すれば、まだまだ入口に到達したばかりの段階ではあるものの、筆者らが新規構造開発業務に品質工学的手法を適用した事例を通じて、その直接的・間接的効用について述べる。

2. 感度分析への直交表の利用

設計対象は、鋼製柱の箆合接合（スリップジョイント）部である。図-1に示すように、外管（部材1）と内管（部材2）とが所定の箆合区間長Lで二重構造となっており、両者は接触面での摩擦で力をやりとりする。送電柱や変電器柱等では実用化されているものの³⁾、風車支持物のような大型土木構造物への適用は国内では例がない。当構造は、鋼部材の製作初期形状不整によって、内管と外管とが局所で接触することで応力集中が

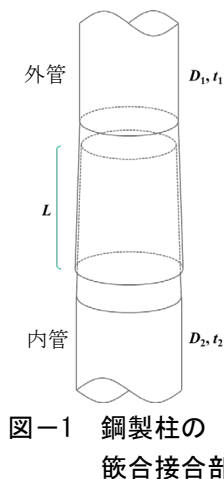


表-1 初期形状不整の感度分析（直交表L9）

標本番号	モードA	モードB	モードC	モードD	接合部の最大応力度[MPa]
1	1	1	1	1	56.3
2	1	2	2	2	261.7
3	1	2	3	3	263.5
4	2	1	2	3	126.8
5	2	2	3	1	326.6
6	2	2	1	2	280.2
7	2	1	3	2	178.4
8	2	2	1	3	280.5
9	2	2	2	1	245.8

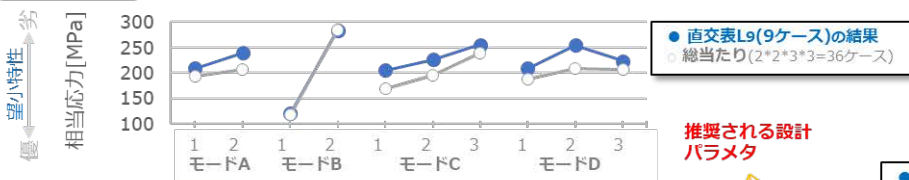
注1 各モード列における数字は水準を意味する
注2 材料降伏応力度は335MPa

表-2 設計パラメタの感度分析（直交表L18）

標本番号	設計パラメタX	設計パラメタY	設計パラメタZ	初期不整形モードC	設置精度	接触面状態	荷重条件	初期不整形モードD
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

※各列の数字は水準を意味する

①検証ケース



②設計方針決定ケース

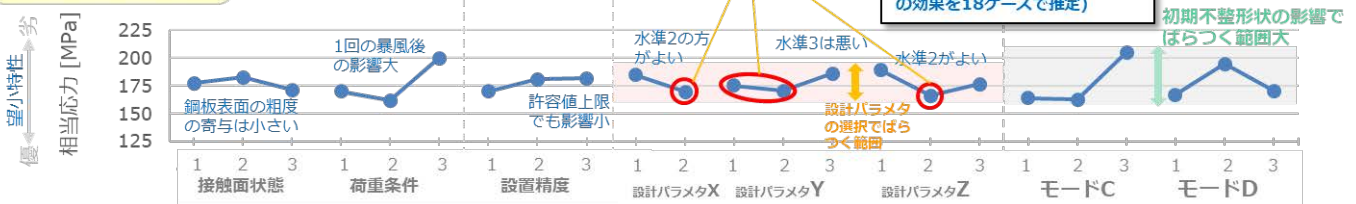


図-2 外管(部材1)における最大発生応力度(要因効果図)

キーワード 品質工学, 直交表, スリップジョイント

連絡先 〒107-8477 東京都港区元赤坂 1-3-8 鹿島建設(株) 土木設計本部 解析技術部, TEL. 03-6735-3454

生じることや、接触面積に依存して荷重伝達性能に影響を与えることが危惧された。そこで、①さまざまな初期形状不整による応力集中や荷重伝達性能への影響度を把握する目的で、直交表を利用した感度分析を実施した。②前分析によって得られた、寄与の大きい形状初期不整モードを考慮し、設計パラメタである管直径や板厚を変化させ、改めて感度分析を実施した。二段階とした理由は、最初から多因子の直交表を利用すると、解析ケースが大きくなりすぎるためである。このような手順で、最終的には、新構造に対する設計方針・製作方針に関する知見を、開発初期段階で得ることを狙った。

2.1 初期形状不整の感度分析

利用した直交表を表-1に示す。初期形状不整の各モードとも、製作上の許容誤差を勘案し3水準を設定した。荷重条件は、自重載荷後、暴風波浪荷重に相当する水平方向荷重を正負最大10回繰返し載荷した。接合部では材質・板厚とも一定であることから、載荷後に接合部に発生している最大応力度を評価指標とした。なお、構造解析においては、材料・幾何学的・境界非線形性を考慮した複合非線形解析を実施している。1ケースあたりの解析所要時間は、12並列計算(Intel Core i9-10920X 3.5GHz)で約4時間であり、計算コストが大きい問題である。紙面の都合上、解析手法についての仔細は省略する。

図-2 ①に要因効果図を示す。モードBの寄与が特に大きいことが分かる。次いでモードC・モードDの順である。勾配は感度の大きさを示しているから、他のモードよりもモードBの初期形状不整について特に配慮が必要であることが分かる。

なお、これら4因子について、総当たり36ケースの結果と比較すると、最も寄与の大きいモードBをはじめ、傾向はよく一致している。直交表L9ケースの方が概して大きな応力度となっているのは、割付け時にモードA・モードBの第3水準をダミー法で第2水準として割り付けたためである。

2.2 設計パラメタの感度分析

2.1の結果をふまえて、設計パラメタの感度分析には、初期形状不整モードBはすべて水準2として考慮した。さらに、誤差要因として次いで寄与の大きかったモードC・モードDに加えて設置精度を追加した。設計パラメタはスリップジョイントの形状を規定する3パラメタを選択した。これらの条件下、経年変化を考慮するパラメタとして接触面状態や荷重履歴条件を考慮した。利用した直交表を表-2に示す。総当たりでは4374ケースとなる解析ケースを18ケースに縮減できたことになる。解析結果を図-2 ②に示す。設計パラメタXは水準2に近いほど応力低減となり優位であるが、一方で部材製作の難易度は増す。設計パラメタYの水準3は相対的に劣位であることが分かった。水準1に近いほど製作は容易であることから、設計パラメタYは水準1~2の範囲で設計するのがよいことが分かる。設計パラメタZは、水準2が最も優位ではあるものの、水準2から少しはずれると劣位に転じることから、注意が必要である。これら設計パラメタによって生じる発生応力度のばらつきと比して、設置精度は感度が小さいことが分かった。一方で、初期形状不整モードによってばらつく範囲は相対的に大きく、製作側への要求も重要であることが明らかになった。

3. 品質工学的手法の適用による効果

直接的な効果については、前述した通りであるが、品質工学的手法の適用は、次に述べるような副次的効果をもたらした。

(1) パラメタ選定については、基本ケースからひとつのパラメタのみを変動させることの危険性や非効率性を設計者が理解し、同時に設計可能空間を再認識することとなった。結果、設計者は、製作・施工といった場面まで深慮し、慎重に各パラメタの水準を設定するようになった。

(2) 解析結果を要因効果図に整理したのち、設計者・解析者が一緒に要因効果図を見ながら、結果の解釈を実施することで、新構造に限らず何の設計パラメタが何に寄与するか、因果を吟味した結果として構造への理解が深まるといった教育的効果を得た。

(3) 設計とその結果との関係(因果)について、感度が視覚化され、設計方針が明確化されることは、複雑な実現象の説明性向上にもつながった。

なお、例として取り上げた鋼製柱接合部の設計のほか、直接基礎の設計・トンネル掘削時の挙動予測等にも、品質工学的手法を適用している。また、多数解析ケースの実行効率化のため、パラメトリックモデリングによる解析モデル生成の自動化についても推進している。

参考文献

- 1) 鋼構造シリーズ32「既設鋼構造物の性能評価・回復のための構造解析技術」土木学会、2019年。
- 2) 例えば、経済産業省製造産業局「SURIWASE2.0の深化」、2018年。
- 3) 例えば、ヨシモトポール(株)、https://www.ypole.co.jp/tech/expansion_contraction_tube/