# コンクリート構造物の施工時における<br>施工障害・不具合の発生率に関する確率モデル

(株)篠塚研究所 正会員 ○鮫島 貴裕　　筑波大学 正会員 庄司 学　　元筑波大学 正会員 山本 泰彦

**１．目的**　コンクリート構造物の施工には多岐にわたる工種が存在し，それぞれの工種には施工上の様々な制約が生じることが多い。このようなコンクリート構造物の施工に際しては，構造物の機能・性能に影響を与える様々な施工障害や不具合が発生しやすく，これまでにもそれらの発生を抑制するために，材料特性の改善等の観点から多くの研究が成されてきた[1][2]。しかし，施工障害・不具合の発生率に関しては十分に実態が明らかになっているとはいえず，定量的な評価方法が確立しているとは言えない。そこで本研究では，4 種類のコンクリート構造物の施工に携わった経験を有する技術者に対して実施されたアンケート調査の結果[3]を基に，施工障害・不具合発生率の確率モデルを構築し，それらの定量的評価を試みた。

**２．施工障害・不具合発生率の確率モデル化**　アンケートの回答者 $i$ が経験した施工障害・不具合 $j$（全 22 種類）の経験工事数（$D_j^i$）を回答者 $i$ の従事工事数（$E^i$）で除し，施工障害・不具合 $j$ の 1 工事あたりの発生率 $f_j^i$ を定義する（$f_j^i=D_j^i/E^i$）。中高層 RC 集合住宅 126 件，橋梁上部工 116 件，橋梁下部工 143 件，ボックスカルバート 65 件の回答が得られていることから，これらに応じた発生率 $f_j^i$ のヒストグラムおよび相対頻度分布が作成できる。これらの分布は**図１**に示すような 4 つのモデルに類型化できた。Extreme 型とは低発生率（$f_j^i=0$）の相対頻度が全体の 80%以上となる分布型であり，発生率の期待値 $\mu_j$ が低くなることから，この分布型に分類される施工障害・不具合は極めて発生しにくいことを示している。標準型とは高発生率へ向かって相対頻度が漸減する分布型であり，発生率の期待値 $\mu_j$ は Extreme 型に比して高くなる。混合分布 1 型とは標準型の分布に，施工障害・不具合を必ず経験する $f_j^i=1$ の相対頻度が離散的に複合する分布型であり，混合分布 2 型とは，標準型の分布に中程度の発生率（$f_j^i=0.5$）と $f_j^i=1$ の相対頻度が離散的に複合する分布型である。混合分布型は，Extreme 型，標準型に比べ，発生率の期待値 $\mu_j$ が更に高くなる傾向にあるため，混合分布に分類される施工障害・不具合はその発生に特に注意を必要とする。次に，得られたヒストグラムに基づいて，指数分布，ベータ分布，シフトしたガンマ分布によるモデル化を行った（次式）。

$$f_X(x)=\lambda e^{-\lambda x},\qquad f_X(x)=\frac{1}{Beta(q,r)}\frac{(x-a)^{q-1}(b-x)^{r-1}}{(b-a)^{q+r-1}}\quad(a\le x\le b),\qquad f_X(x)=\frac{\nu[\nu(x-\gamma)]^{k-1}}{\Gamma(k)}\exp\left[-\nu(x-\gamma)\right]\qquad(1)$$

式(1)の確率密度関数のパラメータは，ヒストグラムから得られる期待値 $\mu$，分散 $\sigma^2$，ひずみ $s$ を用いて算定した。Extreme 型に分類される施工障害・不具合発生率の分布をシフトしたガンマ分布，標準型および混合分布型に分類される発生率の分布を指数分布またはベータ分布によってモデル化した。モデル化に際しては，ヒストグラムの区間幅を変動させ，$\chi^2$ 適合度検定を実施することで最適区間幅を算出し，最適モデルを選定した。**表１**に，一例としてボックスカルバートの施工における 22 種類の施工障害･不具合発生率に対する確率モデルおよびそのパラメータを示す。

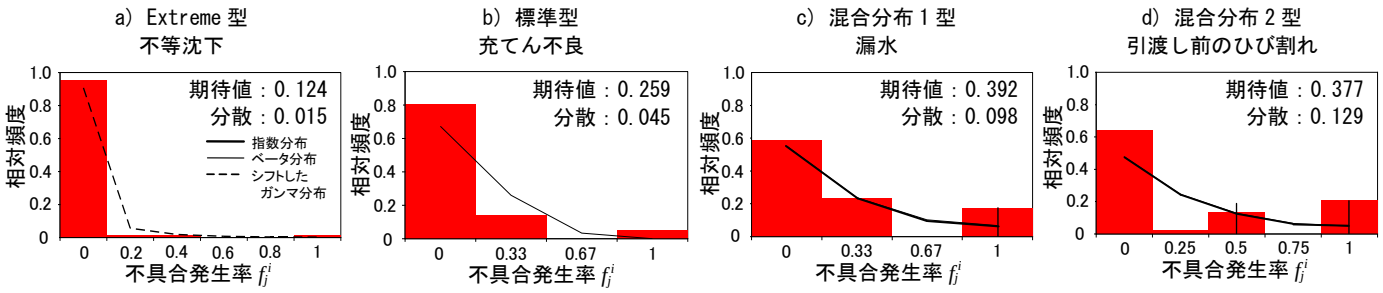



図１　4 つの分布型モデル（一例としてボックスカルバートの場合）

キーワード　コンクリート構造物，施工障害，不具合，発生率，確率モデル，リスクマネジメント

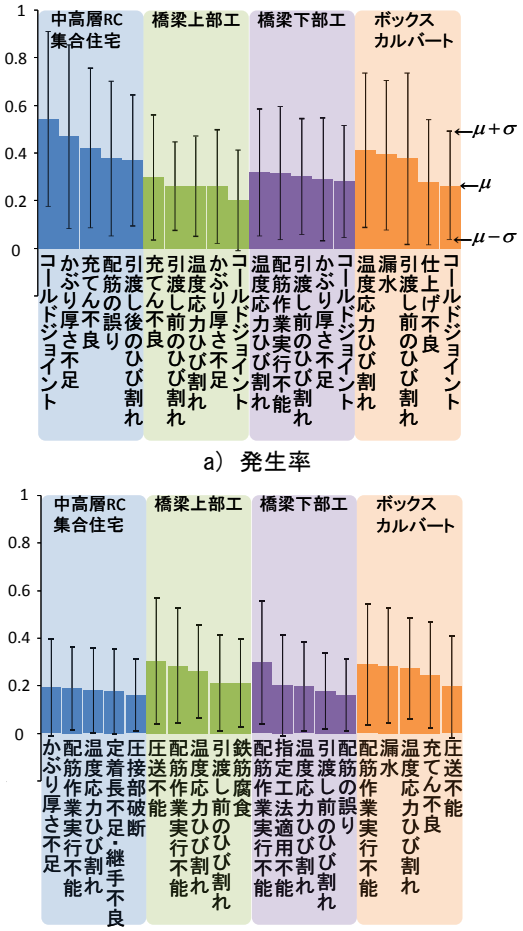
連絡先　〒160-0023　新宿区西新宿 4-5-1 幸伸ビル 3 階　(株)篠塚研究所　TEL 03-5351-3781

表 1 施工障害・不具合発生率に対する確率モデルおよびそのパラメータの一例（ボックスカルバート）

| Extreme型 [1] | | | | | 標準型 | | | 混合分布1型 | | | | 混合分布2型 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 不具合名 | パラメータ シフトしたガンマ分布 $k$ | $\nu$ | $\gamma$ | 区間数 | 不具合名 | パラメータ ベータ分布 [2] $r$ | 区間数 | 不具合名 | パラメータ 指数分布 $\lambda$ | 離散分布値 $f_j$=1 | 区間数 | 不具合名 | パラメータ 指数分布 $\lambda$ | 離散分布値 $f_j$=0.5 | $f_j$=1 | 区間数 |
| 指定工法適用不能 | 0.232 | 4.731 | 0.058 | 7 | 充てん不良 | 2.862 | 4 | 漏水 | 2.550 | 0.176 | 4 | 引渡し前のひび割れ | 2.616 | 0.186 | 0.204 | 5 |
| 配筋作業実行不能 | 0.691 | 3.843 | 0.035 | 5 | | | | | | | | 温度応力ひび割れ | 2.419 | 0.186 | 0.204 | 4 |
| 圧送不能 | 0.562 | 3.375 | 0.085 | 4 | | | | | | | | | | | | |
| かぶり厚さ不足 | 0.604 | 3.352 | 0.031 | 5 | | | | | | | | | | | | |
| 定着長不足･継手不良 | 0.314 | 4.796 | 0.049 | 7 | | | | | | | | | | | | |
| 圧接部破断 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 配筋の誤り | 0.626 | 3.318 | 0.070 | 4 | | | | | | | | | | | | |
| 鉄筋加工精度不良 | 0.385 | 2.899 | 0.097 | 4 | | | | | | | | | | | | |
| 引渡し後のひび割れ | 0.534 | 3.276 | 0.040 | 5 | | | | | | | | | | | | |
| 強度不足 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 鉄筋腐食 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 設計値を超えるたわみ | 0.143 | 4.276 | 0.066 | 7 | | | | | | | | | | | | |
| コールドジョイント | 0.694 | 3.661 | 0.075 | 4 | | | | | | | | | | | | |
| 不等沈下 | 0.110 | 2.667 | 0.083 | 6 | | | | | | | | | | | | |
| 出来形不良 | 0.507 | 3.502 | 0.051 | 5 | | | | | | | | | | | | |
| 型枠の破壊 | 0.522 | 3.263 | 0.042 | 5 | | | | | | | | | | | | |
| 凝結異常 | 0.068 | 4.133 | 0.054 | 9 | | | | | | | | | | | | |
| 仕上げ不良 | 0.835 | 3.489 | 0.039 | 4 | | | | | | | | | | | | |

1) Extreme 型中のパラメータおよび区間数が空欄となっている項目は，アンケートの全回答者において当該施工障害・不具合が発生しなかった（発生率=0）ことを意味する。
2) ベータ分布には，$a$=0，$b$=1 とした標準ベータ分布を用い，また，式(1)中のパラメータ $q$ については $q$=1 と設定した。

**3．施工障害・不具合発生率の特徴**　　図 2a)に，施工障害・不具合発生率の期待値の高いものを 5 項目，構造物ごとに比較した結果を示す。また，図 2b)に，未然防止率に関する同様の結果を示す。未然防止率とは，当該施工障害・不具合に対して事前対処を実施したために，その発生を抑止できた率を表している。図 2a)によると，施工障害・不具合発生率の高い項目として，構造物によらず，コールドジョイントやひび割れに関する項目が挙げられる。特に集合住宅のコールドジョイントに関する期待値は 0.544 となっており，平均的に 2 工事に 1 回以上の割合で不具合が発生することを示している。これは，建築建物に特有な高密度配筋に起因する打重ね部の締固め不足により，当該不具合が発生しやすくなっているためと推察される。また，ひび割れに関する発生率の期待値が高いことは，施工現場の経験的な認識とよく一致する。構造物ごとの特徴としては，集合住宅において期待値の高い項目として，かぶり厚さ不足や充てん不良，配筋の誤りが挙げられる。これには，高密度配筋と断面厚が小さい集合住宅の特徴が表れていると考えられる。橋梁上部工においては充てん不良の期待値が高く，これに関しては，狭隘な部材に鉄筋や PC 鋼材等を密に配置する特徴が表れている。橋梁下部工においては配筋作業実行不能の期待値が高く，柱基部や柱梁接合部において配筋が困難になる場合が多いことを反映していると推察される。カルバートにおいては，漏水や，漏水を誘発する仕上げ不良といった不具合の期待値が高く，地中構造物の特徴を表している。



a) 発生率

b) 未然防止率

図 2 施工障害・不具合の発生率および未然防止率

一方，図 2b)に示した未然防止率に着目すると，発生率の高いひび割れが未然防止率も高い傾向を示しており，事前対処が功を奏しているケースもあればそうではないケースも存在することが示されている。ひび割れの要因が多岐にわたっているためではないかと考えられる。

**4．まとめ**　　本研究では，コンクリート構造物の施工に係わる技術者に対するアンケート調査の結果をもとに，22 種類の施工障害・不具合の発生率に関して確率モデルを構築し，それらの特徴を明らかにした。

**参考文献**

[1] 土木学会：コンクリート標準示方書［施工編］，2002
[2] 日本コンクリート工学協会：コンクリート施工基本問題検討委員会報告書(Ⅰ)(Ⅱ)，2001，2002
[3] 日本コンクリート工学協会：コンクリート施工におけるリスク要因の発生確率調査研究委員会報告書，2008