

住民との合意形成を考慮した道路橋橋脚の目標耐震性能に関する研究

The target seismic performance of highway bridge based on consensus building with inhabitants

古田 均*, 柏木 宙**, 藤井久矢***, 片岡宏文****, 堂垣正博*****

Hitoshi FURUTA, Hiroshi KASHIWAGI, Hisaya FUJII, Hirofumi KATAOKA, and Masahiro DOGAKI

- * 工博 関西大学教授 総合情報学部 (〒569-1095 高槻市霊仙寺町 2-1-1)
- ** 学士 (工学) 関西大学大学院総合情報学研究科博士課程前期課程知識情報学専攻学生 (〒569-1095 高槻市霊仙寺町 2-1-1)
- *** パシフィックコンサルタンツ(株)大阪本社交通技術部保全マネジメントグループ (541-0052 大阪市中央区安土町 2-3-13)
- **** 日本技術開発(株)大阪支社交通部門構造・橋梁 G (〒531-0072 大阪市北区豊崎 5-6-10)
- ***** 工博 関西大学教授 工学部都市環境工学科 (〒564-8980 吹田市山手町 3-3-35)

Recently, there causes some conflicts among clients, civil engineers, and inhabitants in public works, because of the lack of their accountability for the inhabitants. Therefore, the consensus building among the clients, civil engineers, and inhabitants is very important to complete the public works smoothly. At the present, the design method of infrastructures is shifting to the performance-based design after the Great Hanshin-Awaji Earthquake. The inhabitants have also learned the meaning of performance of infrastructures in the performance-based design. Then, it is very effective to improve the accountability of the public works for the inhabitants.

In this study, an attempt is made to take into account inhabitants' opinion in the process of deciding the demand performance in the performance-based design. A method is proposed, which decides a target level of seismic performance for the infrastructures considering the trade-off relations between economy and safety. The target reliability index is determined, corresponding to a target seismic performance of infrastructures.

Keywords: Earthquake-proof safety, Community participation, performance-based design, game theory

キーワード: 耐震安全性, 住民参加, 性能設計, ゲーム理論

1. はじめに

近年, 社会資本整備事業を進めるにあたって, 住民の価値観の多様化や住民に対するアカウンタビリティの不足から, 住民との間に軋轢 (コンフリクト) が生じている。国民は公共事業に対して不信感を抱くようになり, 公共事業に対する国民の目は年々厳しいものとなっている。それゆえ, 住民との合意形成に向けて, 計画の初期の段階から住民に情報を開示し, 住民の参加を促進するパブリック・インボルブメントと呼ばれる手法が注目されている。これは, 計画の初期の段階から事業取り組みへの住民の参画を呼びかけることで, 住民に対するアカウンタビリティの向上を図り, 住民との合意形成をコーディネートするものである。このように, 住民参加に対する取り組みが強くなる一方で, 合意形成を困難にする要因として, 物的な豊かさが達成されたことによる意識と価値観の多様化, 物的な関心から心の豊かさを志向す

るライフスタイル, より高度な安心・安全で快適な生活への要求などが考えられる¹⁾。

現在, 土木分野における設計法は, 国内外を問わず, 従来の仕様設計から性能設計へと移行しつつある。性能設計では, 構造物の保有する性能が要求される性能を満足しておれば, どのような構造形式や工法・材料を用いてもよい²⁾ので, 設計の自由度が広く, 工期の短縮や建設コストの縮減が図れるとされている。また, 設計者を含めて, 住民も構造物の保有性能を知ることができる。土木分野の構造物の多くは公共構造物であるため, その事業展開のために国民が納めた税金が用いられる。そのため, 性能設計の要求性能を決定する過程で事業者や技術者の意見だけでなく, 住民の意見も聴き, 可能な限り計画案や設計案などの事業展開に反映させるべきである。

社会基盤整備を行う上で, 住民の意見を反映することは重要であるが, 住民との合意形成は容易ではない。これは, 住民の価値観や意識が多様化し, 意見の集約が

難しいからである。住民と事業者との合意形成だけでなく、住民間でも意見が異なるため、住民間の合意形成も必要である。それゆえ、すべての意見を取り入れることは不可能で、相互が理解・合致・両立・妥協の上での同意に至らざるを得ない³⁾。

社会基盤整備計画の初期の段階からそれに関する情報を公開し、住民の事業への参加を促進することで住民に対するアカウンタビリティの向上を図り、住民・事業者・技術者間の合意が図れれば、事業を推進する上で有意である。そのためにも、合意形成を円滑に進めるシステムを確立することは極めて重要である。

本研究では、性能設計体系における要求性能の決定過程に住民の意見を取り入れ、耐震安全性と経済性に着目した構造物の目標耐震性能を決定する方法について提案する。決定した構造物の目標耐震性能に対応した目標信頼性指標についても明らかにする。

2. 合意形成支援システムの概要

住民・事業者・技術者の意見を反映した目標耐震性能を決定するための合意形成支援システムを提案する。合意形成支援システムの流れ図を図-1に示す。

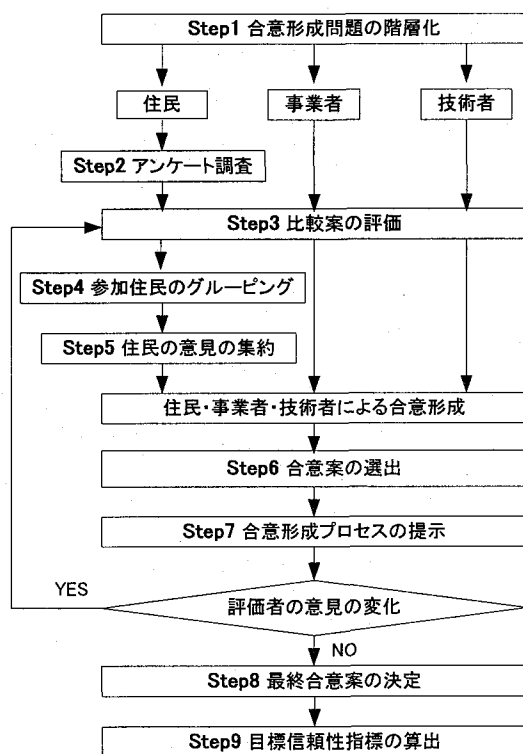


図-1 合意形成支援システムの流れ

Step 1: 合意形成問題の階層化

合意形成問題を総合目的・評価基準・比較案の3層に階層化し、耐震性能マトリクスに基づいて目標耐震性能の異なる比較案を作成する。

Step 2: アンケート調査

住民を対象に、評価基準とする「安全性」と「経済性」に関して、一対比較によるアンケートを行う。また、目標耐震性能の異なる比較案に対する住民の評価をアンケートし集約する。

Step 3: 比較案の評価

アンケート結果に基づき評価基準とする「安全性」と「経済性」の重み付けを行う。つぎに、支配代替案法によって比較案を評価する。基準となる比較案を設定し、その基準案と比較案を一対比較によって評価する。

Step 4: 参加住民のグルーピング

比較案の評価結果に基づき、クラスター分析法で同一見解を持つ集団に住民をグループ化する。

Step 5: 住民の意見の集約

集団意思決定ストレス法を用い、各住民グループの意見を1つに集約する。

Step 6: 初期合意案の選出

評価者を住民・事業者・技術者とし、意思決定ストレス法によって初期合意案を選出する。

Step 7: 合意形成プロセスの提示

評価者に、各評価者の見解、比較案の評価および合意形成過程における評価者の位置づけなど、合意形成プロセスの内容を提示する。

Step 8: 最終合意形成案の決定

合意形成プロセスを重ねるごとに評価者の意見が変化することを考慮し、進化ゲーム理論を用いて最終合意案を決定する。

Step 9: 目標信頼性指標の算出

得られた最終合意案（目標耐震性能）に対応した目標信頼性指標を算出する。

3. 住民・事業者・技術者による目標耐震性能の決定

社会基盤整備事業のうち、橋梁建設に注目し、住民・事業者・技術者の求める目標耐震性能の初期合意案を集団意思決定ストレス法で選出する。その後、合意形成プロセスを重ねることで評価者の意見が変化することを考慮し、進化ゲーム理論で目標耐震性能の最終合意案を決定する。

3.1 合意形成問題の階層化

合意形成問題を図-2のように総合目的・評価基準・比較案の3層に階層化する。比較案は、耐震性能マトリクス²⁾をもとに表-1のように作成される。ここに、基準案は文献2)に与えられる重要構造物の耐震性能、A～C案は基準案よりも耐震性能の優る案、D～F案は基準案よりも劣る案とする。

3.2 橋梁への耐震性能のアンケート調査

住民が考えている橋梁への耐震性能を調査するため、20代～70代の男女83名を対象に、評価基準である橋梁

の「安全性」と「経済性」に関して一対比較によるアンケートを行った（表-2）。有効回答数は73であった。また、目標耐震性能の異なる比較案に対する住民の評価もアンケートで集約した。

3.3 比較案の評価

まず、アンケート結果に基づいて、評価基準となる「安全性」と「経済性」の重み付けを行う。本研究では、7つの比較案を設定したため、従来型 AHP による一対比較では、1つの評価基準について21回の一対比較を必要とする。そこで、評価者の負担を少しでも軽減するため、支配代替案法⁴⁾によって比較案 A~F を評価する。支配代替案法では、評価基準の重みならびに各比較案の重みは、「ある特定の比較案を基準にイメージして初めて決定できる」という考えに基づく。支配代替案法は、基準となる比較案を設定し、設定した比較案との一対比較を行う。それゆえ、1つの評価基準について6回の一対比較でよく、評価者の負担が大幅に軽減される。

3.4 住民間における合意形成

住民間で目標耐震性能に関する見解の違いが予測され、比較案の評価が多岐にわたると考えられる。そこで、本研究では、まず住民の意見を集約する。

(1) 参加住民のグルーピング

住民の比較案の評価結果をもとに、クラスター分析によって住民をグループ分けする。すなわち、同じ見解の住民でグループを括る。

アンケート結果を分析したところ、住民を5つにグループ分けできた。それぞれのグループの比較案の重みを表-3に示す。

クラスター分析の結果から、グループごとにそれぞれ算術平均した比較案の重みを各グループの比較案の重みとする。すなわち、

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n} \quad (1)$$

となる。ここに、

$\bar{X}_i$: 各グループの比較案の重みを算術平均した値

n : グループの数

x_{ij} : 各比較案の重みである。

(2) 住民の意見の集約

各住民グループ間において意見の違いが見られたため、まず住民間の合意を図る。「意見を集約した集団案に対する各評価者の不満の総和を最小化する」という集団意思決定ストレス法によって住民の意見を集約する。集団意思決定ストレス S は、つぎのように定義される⁵⁾。

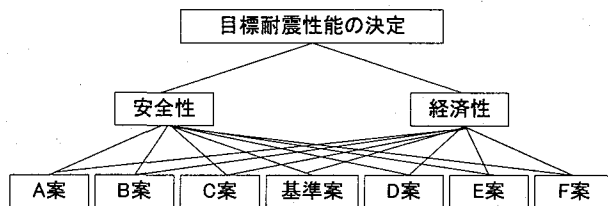


図-2 合意形成問題の階層化

表-1 比較案

地震の規模	基準案	A案	B案	C案	D案	E案	F案
レベル2 タイプI	小損傷	無損傷	小損傷	無損傷	中損傷	小損傷	中損傷
レベル2 タイプII	中損傷	小損傷	小損傷	中損傷	中損傷	大損傷	大損傷

表-2 アンケート調査の概要

配布場所	新淀川大橋(阪急南方駅周辺)
有効回答	73(男:38, 女:35)
年齢	20歳代~70歳代
主な職業	社会人:55.5% 学生:18.9% 主婦:8.1%
調査項目	①安全性と経済性の一対比較 ②安全性の観点からのA~F案の満足度 ③経済性の観点からのA~F案の満足度 ④個人属性(性別, 年齢, 職業, 住まい)

表-3 各住民グループの比較案の重み

	A案	B案	C案	基準案	D案	E案	F案
住民グループ1	0.319	0.262	0.264	0.069	0.050	0.022	0.014
住民グループ2	0.419	0.364	0.092	0.085	0.023	0.005	0.012
住民グループ3	0.671	0.127	0.060	0.096	0.021	0.014	0.012
住民グループ4	0.155	0.109	0.160	0.298	0.097	0.091	0.090
住民グループ5	0.012	0.015	0.022	0.108	0.027	0.795	0.022
平均	0.315	0.175	0.119	0.131	0.044	0.185	0.030

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (2)$$

$$e_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (w_i \cdot x_{ij}) \quad (3)$$

$$S = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (w_i \cdot x_{ij} - e_j)^2 \quad (4)$$

ここに、

i : 評価者($i=1 \dots n$)

j : 評価基準($j=1 \dots m$)

x_{ij} : 評価者による評価基準の評価結果

w_i : 評価者の意見の反映度(合計を1とする)

e_j : 評価基準に関する集団評価の平均

である。

つぎに、意思決定ストレスを最小化するに至った各グループの意見の反映度を求める。式(2)を制約式とし、式(4)を最小化する w_i の値 w_i^* をラグランジュの未定乗数法によって求める。評価者 i の全評価基準の評価結果を X_i 、評価者間の意見の反映度を W^* とすれば、

$$X_i = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ \vdots \\ x_{ij} \\ \vdots \\ x_{im} \end{bmatrix} \quad W^* = \begin{bmatrix} w_1^* \\ \vdots \\ w_i^* \\ \vdots \\ w_n^* \end{bmatrix} \quad (5)$$

である。求める意見の反映度 W^* は、

$$\begin{bmatrix} (n-1)'X_1X_1 & -'X_1X_2 & \cdots & -'X_1X_n & 1 \\ -'X_2X_1 & (n-1)'X_2X_2 & \cdots & -'X_2X_n & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ -'X_nX_1 & -'X_nX_2 & \cdots & (n-1)'X_nX_n & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1^* \\ w_2^* \\ \vdots \\ w_n^* \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

を解いて求められる。ここに、

λ : ラグランジュの未定乗数

t : 転置行列

である。

$0 < w_i^* < 1$ のため、 W^* は評価者間の意見の反映度の配分を示す値となる。

比較案の重みの平均値を集団案とみなし、各グループの意見の反映度を $w_i=1/5$ として、式(4)から意思決定ストレスを算出すると、0.0352 となった。つぎに、表-3 の比較案の重みを用いて式(2)を制約条件とし、式(4)の意思決定ストレスを最小化する各グループの意見の反映度 w_i^* を算出した。意思決定ストレス改善後の集団案の重みを表-4 に示す。

3.5 住民・事業者・技術者による合意形成過程

住民間の意見の違いが予測されるため、まず住民間の意見を集約した。つぎに、住民・事業者・技術者を評価者とし、集団意思決定ストレス法によって住民・事業者・技術者間の合意を図った。

(1) 事業者や技術者の比較案の評価

事業者と技術者についても同様に評価基準である「安全性」と「経済性」の重み付けおよび比較案の重み付けを行った。比較案の重み付けの結果を図-5 に示す。技術者に関しては、アンケート調査をもとに、評価基準と比較案それぞれの重みを算出した。

(2) 初期合意案の決定

住民・事業者・技術者による合意形成過程で集団意思決定ストレス法を用いて3者の不満を最小化した結果、表-6 に示す合意案を得た。1回目の合意形成過程で集団意思決定ストレス法によって決定された合意案を初期合意案とする。

表-4 住民の意見の集約

	A案	B案	C案	基準案	D案	E案	F案	反映度
住民グループ1	0.319	0.262	0.264	0.069	0.050	0.022	0.014	25.9%
住民グループ2	0.419	0.364	0.092	0.085	0.023	0.005	0.012	21.5%
住民グループ3	0.671	0.127	0.060	0.096	0.021	0.014	0.012	15.9%
住民グループ4	0.155	0.109	0.160	0.298	0.097	0.091	0.090	30.3%
住民グループ5	0.012	0.015	0.022	0.108	0.027	0.795	0.022	6.5%
集団案	0.327	0.200	0.148	0.149	0.052	0.088	0.037	

表-5 事業者・技術者の比較案の重み

	A	B	C	基準案	D	E	F
事業者	0.039	0.070	0.125	0.265	0.320	0.133	0.048
技術者	0.055	0.064	0.077	0.386	0.096	0.129	0.193

表-6 初期合意案の比較案の重み

	A	B	C	基準案	D	E	F	反映度
住民	0.327	0.200	0.148	0.149	0.052	0.088	0.037	32.4%
事業者	0.039	0.070	0.125	0.265	0.320	0.133	0.048	34.2%
技術者	0.055	0.064	0.077	0.386	0.096	0.129	0.193	33.5%
初期合意案	0.138	0.110	0.116	0.268	0.159	0.117	0.093	

3.6 合意形成プロセスの提示

各評価者の意見、比較案の評価結果および合意形成過程における評価者の位置づけなど合意形成プロセスの経過を公開する。その結果を受けて評価者の意見が変化すれば、比較案を再評価する。

3.7 最終合意案の選出

住民との合意形成において、1回のプロセスで3者の合意が得られるように計画案を決定することは難しい。通常、事業者や技術者の考えを理解していただくため、ワークショップなどを開催し、住民への説明がなされる。ただし、これは単に理解のために住民に説明がなされるだけでなく、住民の考えを聴き、可能な限り住民の意見を事業の展開に反映させるためのものである。このプロセスを重ねることで、3者の意見も変化していくと考えられる。ここで、プロセスに参加するメンバーが毎回同じとは限らず、新たなメンバーが増えたり、既存のメンバーが参加できなくなるといった可能性も考えなければならない。

そこで、住民・事業者・技術者それぞれの比較案の重み付けの結果をもとに時間の経過とともにどのような比較案の評価を行うのかを、進化ゲーム理論によって比較案の評価の推移をシミュレーションし、最終合意案を検討する。進化ゲーム理論を用いてシミュレーションすることで、プロセスに参加するメンバーが変化しても、対応することが可能である。

ここで、最終的に得られる合意案は必ずしも一意に決められるべきものではなく、あくまでも進化ゲーム理論を用いたシミュレーションを参考に3者の合意できる案を検討するためのものである。

(1) 学習ダイナミクス

2 回目の合意形成プロセスでは、すべての評価者に初期合意案、各評価者の見解、比較案の評価、意見の反映度などの情報をフィードバックし、初期合意案に至った合意形成の過程を公開する。その後、各評価者に意見の変化が生じれば、比較案を再評価する。2 回のアンケート調査から得られた比較案の重み付けをもとにこれ以降にどのような比較案の評価をするのか進化ゲーム理論の学習ダイナミクス⁹⁾によってシミュレーションする。

住民・事業者・技術者をそれぞれ X, Y, Z 、彼らの取りうる行動をそれぞれ $x_i (i=1..N)$, $y_j (j=1..M)$, $z_k (k=1..L)$ とする。ここでの行動とは、どのような比較案の採択するかである。たとえば、後述の表-7 を見ると、住民、事業者、技術者それぞれ3通りの比較案の評価があり、この3通りの中からどのような評価を取るかである。時刻 t で X, Y, Z がそれぞれ行動 i, j, k を取ったとき、 X, Y, Z は利得を得る。ここで、利得とは集団意思決定ストレス法を用いて合意案を選出するときに得られる合意案への意見の反映度とする。すなわち、 X, Y, Z はできるだけ自分の意見が合意案に反映される行動をとるものとする。 X, Y, Z の学習ダイナミクスは、

$$\frac{dx_i}{dt} = \left\{ \beta_X \left[(Ayz)_i - x \cdot Ayz \right] + \alpha_X \left[-\log x_i + \sum_n x_n \log x_n \right] \right\} \times x_i \quad (7)$$

$$\frac{dy_j}{dt} = \left\{ \beta_Y \left[(Bzx)_j - y \cdot Bzx \right] + \alpha_Y \left[-\log y_j + \sum_m y_m \log y_m \right] \right\} \times y_j \quad (8)$$

$$\frac{dz_k}{dt} = \left\{ \beta_Z \left[(Cxy)_k - z \cdot Cxy \right] + \alpha_Z \left[-\log z_k + \sum_l z_l \log z_l \right] \right\} \times z_k \quad (9)$$

となる。ここに、

$\beta_X, \beta_Y, \beta_Z \in [0, 8]$: 学習率,

$\alpha_X, \alpha_Y, \alpha_Z \in [0, 1]$: 記憶の忘却率

$(Ayz)_i = \sum_m \sum_l a_{iml} y_m z_l$: X が行動 i をとったときの利得の平均値

$x \cdot Ayz = \sum_n \sum_m \sum_l a_{nml} x_n y_m z_l$: 全利得の平均値

a_{ijk} : X が行動 i , Y が行動 j , Z が行動 k を取ったときの X が得る利得

である。

式(7)~(9)を連立させ、時間的変化に伴う各評価者の比較案の評価の推移をシミュレーションする。その結果を用いて最終的な合意案を検討する。

(2) 最終合意案の決定

初期合意案の決定に至る合意形成プロセスの提示を受け、意見の変化がある場合、比較案を再評価する。すなわち、再度アンケート調査を実施した。比較案を再評価したところ、表-7 に示すように住民、事業者、技術者それぞれ3通りの比較案の評価が得られた。ここに、

表-7(a) 比較案の再評価(住民)

住民	A	B	C	基準案	D	E	F	選好度
x1	0.327	0.200	0.148	0.149	0.052	0.088	0.037	0.258
x2	0.315	0.208	0.165	0.123	0.065	0.090	0.034	0.308
x3	0.311	0.222	0.178	0.118	0.070	0.071	0.030	0.435

表-7(b) 比較案の再評価(事業者)

事業者	A	B	C	基準案	D	E	F	選好度
y1	0.039	0.070	0.125	0.265	0.320	0.133	0.048	0.311
y2	0.039	0.062	0.233	0.262	0.235	0.122	0.048	0.341
y3	0.038	0.078	0.229	0.258	0.231	0.120	0.047	0.348

表-7(c) 比較案の再評価(技術者)

技術者	A	B	C	基準案	D	E	F	選好度
z1	0.055	0.064	0.077	0.386	0.096	0.129	0.193	0.302
z2	0.041	0.044	0.121	0.203	0.225	0.145	0.220	0.347
z3	0.037	0.040	0.204	0.184	0.204	0.131	0.199	0.352

合意形成プロセスを提示することから過去に行った比較案の評価はいつでも閲覧可能であると仮定し、記憶の忘却率を $\alpha_X = \alpha_Y = \alpha_Z = 0$ とした。学習率 β に関しては、学習率が高ければ時間とともに利得の高い行動、すなわち自分の意見が反映されるように行動すると仮定し、今回は、3者に対して学習率の比較的高い $\beta_X = \beta_Y = \beta_Z = 3.0$ の値を採用した。仮に、学習率 β をさらに高い値にしたとすると、合意形成プロセスの早い段階からより高い利得の得られる行動をとるようになる。住民・事業者・技術者それぞれに対し比較案の再評価後、10 回の合意形成プロセスを想定した場合、どのように評価されるのかを式(7)~式(9)によって求める。学習ダイナミクスのシミュレーションの結果、住民は x_2 、事業者は y_3 、技術者は z_3 の比較案の評価していることがわかった。学習ダイナミクスのシミュレーション結果を示すと、図-3 を得る。

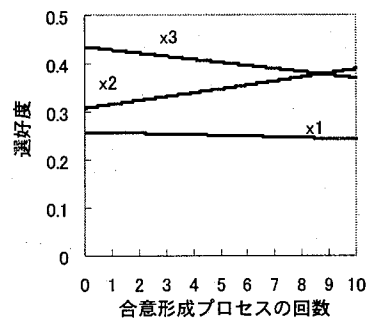


図-3(a) シミュレーション結果(住民)

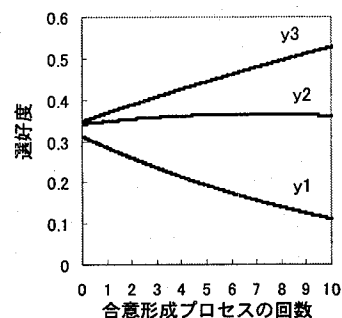


図-3(b) シミュレーション結果(事業者)

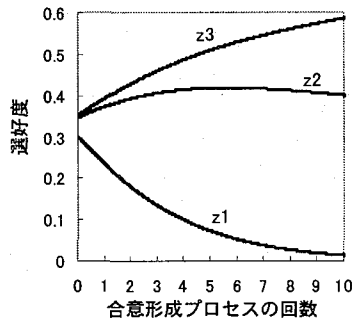


図-3(c) シミュレーション結果(技術者)

学習ダイナミクスのシミュレーション結果を用い、最終合意案を求めた結果、表-8 を得る。表-6 と表-8 の比較から、つぎのような結論を得た。住民の要求する案は A 案から変化はなかったが、事業者は D 案から基準案、技術者は基準案から D 案へ変化している。この場合、事業者はタイプ I 地震動では D 案の「中損傷」から基準案の「小損傷」へと変化し、タイプ II 地震動では D 案と基準案の両案とも「中損傷」で変化はなかった。技術者はタイプ I 地震動では基準案の「小損傷」から D 案の「中損傷」へ変化し、タイプ II 地震動では基準案と D 案の両案とも「中損傷」で変化はなかった。1 回目のプロセスにおける 3 者の意見を集約した初期合意案は基準案であったが、住民は A 案を要求しており、この案では 3 者の合意を得ることは難しい。10 回の合意形成プロセスを経て 3 者の意見を集約した最終合意案は C 案となり、より 3 者の要求に近い案が選出された。

以上のことから、評価者の意見の変化を考慮することで初期合意案よりも 3 者の要求に近く、より合意の得やすい最終合意案が選出できた。

表-8 最終合意案

	A	B	C	基準案	D	E	F	反映度
住民	0.315	0.208	0.165	0.123	0.065	0.090	0.034	29.8%
事業者	0.038	0.078	0.229	0.258	0.231	0.120	0.047	34.3%
技術者	0.037	0.040	0.2038	0.184	0.2044	0.131	0.199	35.9%
最終合意案	0.120	0.103	0.201	0.191	0.172	0.115	0.098	

4. 橋脚の耐震信頼性設計における目標信頼性指標の算出

前述までの合意形成過程において、耐震性能マトリックスをもとに比較案を作成し、集団意思決定ストレス法および進化ゲーム理論を用いて合意案を検討した。得られた合意案は、耐震性能マトリックスに対応した地震動レベルごとの損傷度という形でしか表現されていない。そこで、本研究では、住民との合意形成過程で決定した目標耐震性能に対応する目標信頼性指標をリスク分担原則に基づいて算出する。

4.1 リスク分担原則の考え方

性能マトリックスで指定したある限界状態に関する抵抗を R とする。 R を決定する因子には、ばらつきや不確実性がかならず含まれている。それらはその平均値のま

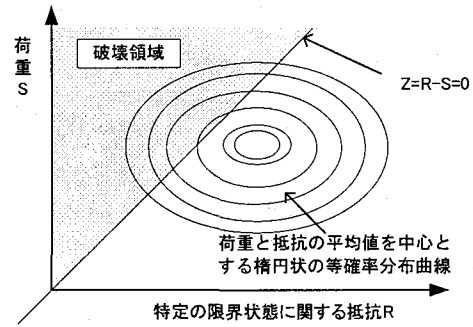


図-4 構造物の限界状態

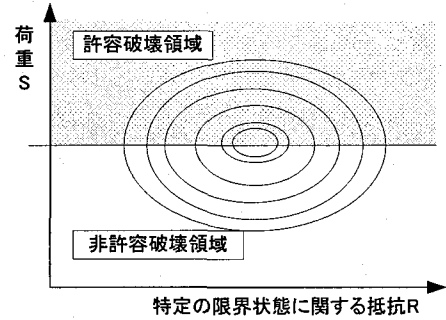


図-5 合意形成により了承した破壊領域

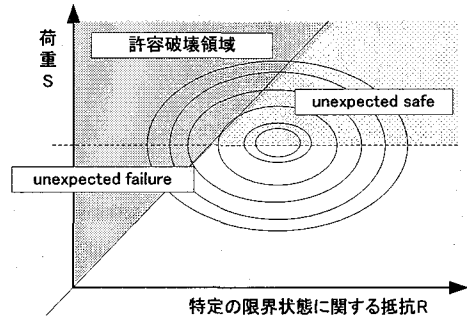


図-6 破壊領域のリスク

わりにある正規確率分布に従ってばらつく。荷重も同様、ばらつく。仮に、ばらつきが正規確率分布に従うものとすれば、図-4 のような荷重と抵抗の平均値を中心とする楕円状の等確率分布曲線が得られる。構造物の破壊は抵抗が荷重に比して小さい場合に生起するので、限界状態関数 Z は

$$Z = R - S \quad (10)$$

で与えられ、その破壊確率 P_f は

$$P_f = P(Z < 0) \quad (11)$$

となる。

住民との合意形成過程において、仮に最終合意案として基準案が選出され、設計地震動をレベル 2・タイプ I 地震動とする場合、「レベル 2・タイプ I 地震動に対して地震による損傷を小損傷にとどめる」ということになり、住民は図-5 に示す破壊領域のリスクを了承したことになる。すなわち、住民は専門知識を有していないため、真の限界状態線を理解しておらず、合意形成で決定した荷重のみで定義された限界線を考えているものとする。しかし、実際には図-4 に示す破壊領域となるため、合意形成により決定した破壊領域のリスクは図-6 のよ

うになる。ここに、図-6 に示す「Unexpected safe」とは、住民にとって破壊することを了承した荷重において抵抗が十分で破壊しない確率のことを示す。一方、「Unexpected failure」は、住民が破壊することを了承しない荷重において抵抗が不足して破壊する確率(P_r)のことを示し、設計者の保証責任となる。それゆえ、設計者が自分自身の責任において許容値が決定できる確率であるとも考えられる。

「Unexpected failure」に至る確率を非達成確率と呼び、設計者が負うと決心したリスクに対応する許容値を許容非達成確率 P_{ra} として与え、与えられた許容非達成確率に対応する信頼性指標を求める。

4.2 目標信頼性指標の算出方法

リスク分担原則に基づいて信頼性指標を求める際に、非達成許容確率を厳密に求めることは実用的でない。それゆえ、システム信頼性解析法による安全側の近似計算法を利用して信頼性指標を求める。図-7 に示すように、真の限界状態線と、住民との合意形成によって決定した荷重のみの指定に対する限界線の交点において、真の限界状態線に直交する線を引くと、この直交線と真の破壊線とは非相関的な限界線となるので、2 つに共通する事象の確率 P_m は

$$P_m = \Phi(-\beta_T) \Phi\left(\frac{\beta_s - \rho\beta_T}{\sqrt{1-\rho^2}}\right) \quad (12)$$

で表される。ここに、

F : 正規分布に従う累積確率密度関数

β_s : 合意形成において了承した荷重に対する超過確率に対する信頼性指標

β_T : 目標信頼性指標

ρ : 限界状態関数と荷重のみに関する破壊線の相関係数 (仮定)

非達成確率 P_r が許容非達成確率 P_{ra} より大きくなるように信頼性指標を求めなければならないが、 P_m は常に P_r より大きいので、 P_m が P_{ra} と同じになるように信頼性指標を求める。したがって、非達成許容確率と目標信頼性指標との関係は

$$\Phi(-\beta_T) \Phi\left(\frac{\beta_s - \rho\beta_T}{\sqrt{1-\rho^2}}\right) = P_{ra} \quad (13)$$

となる。それゆえ、目標信頼性指標 β_T は、上式を繰り返し反復計算し、その収束値として求められる。

なお、合意形成過程で了承された荷重に関する超過確率に対応した信頼性指標 β_s は、図-8 に示す地震ハザード曲線⁸⁾を用いて算出される。レベル 2・タイプ I 地震動の最大加速度を 400gal、レベル 2・タイプ II 地震動の最大加速度を 800gal と仮定し、0.84 フラクタイル曲線から超過確率に対する信頼性指標 β_s を求めた結果、タイプ I 地震動では $\beta_s=2.74$ 、タイプ II 地震動では $\beta_s=3.35$ を得た。ここで、地震ハザード曲線とは、震源距離分布

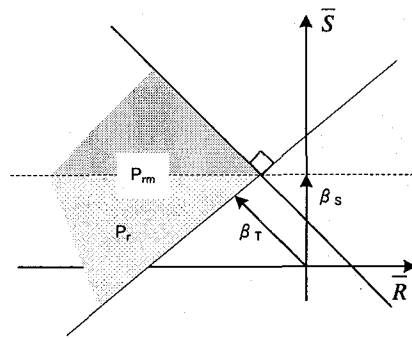


図-7 リスク分担原則による信頼性指標の算出

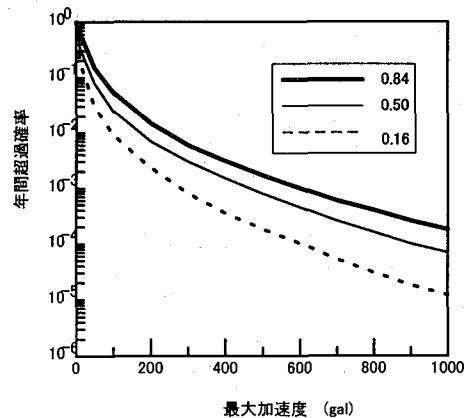


図-8 地震ハザード曲線⁸⁾

および水平最大加速度推定式を考慮し、歴史地震および活断層データからある地点における地震動の年間超過確率を算定し図化したものである。たとえば、図-8 に示す 0.84 フラクタイル曲線は、各加速度に対して 84% の地点のハザードレベルがそれ以下になるようなレベルを結んで得られる曲線である。

4.3 目標信頼性指標の算出

住民に対して行った目標耐震性能に関するアンケート結果を合意形成支援システムに適用したところ、最終合意案として C 案が選出された。この案の目標耐震性能は、レベル 2・タイプ I 地震動に対して「無損傷」に、レベル 2・タイプ II 地震動に対して「中損傷」に損傷を止めようとするものである。選出された C 案の地震動別の目標耐震性能からリスク分担原則に基づいて安全性の指標である目標信頼性指標 β_T を算出する。ただし、限界状態関数と荷重のみに関する破壊線の相関係数を参考文献 7) を参考に無損傷、小損傷、中損傷、大損傷でそれぞれ $\rho=0.5, 0.707, 0.866, 0.966$ とした。信頼性指標の値と非達成許容確率を求めれば、表-9 のようになる。

表-9 信頼性指標の算出

	無損傷	小損傷	中損傷	大損傷
レベル2タイプ I	3.26	2.54	2.04	
非達成許容確率	0.0005	0.0005	0.02	
レベル2タイプ II	3.71	3.27	2.57	2.05
非達成許容確率	0.0001	0.0005	0.0005	0.02

レベル 2・タイプⅠ地震動を設計地震動とした場合、住民との合意形成過程において、無損傷に止めるという決定がなされ、そのときの目標信頼性指標は $\beta_T=3.26$ となった。現状の基準案では、タイプⅠ地震動の場合、目標耐震性能が小損傷であるため、目標信頼性指標は $\beta_T=2.54$ となる。このことから、レベル 2・タイプⅠ地震動を設計地震動とする場合、住民の意見を反映することで目標信頼性指標が大きく上昇する結果となった。

レベル 2・タイプⅡ地震動を設計地震動とした場合、住民との合意形成過程において、中損傷に止めるという決定がなされ、そのときの目標信頼性指標は $\beta_T=2.57$ となった。基準案においても目標耐震性能が中損傷であることから、レベル 2・タイプⅡ地震動に関しては現状と同じ耐震性能である。

5. おわりに

要求性能を決定する過程に住民の意見を取り入れ、目標耐震性能の異なる比較案を作成し、住民・事業者・技術者の不満を最小化した初期合意案を決定した。合意形成過程では、時間の経過とともに評価者の意見の変化も考えられるので、評価者の意見の変化を考慮した最終合意案を選出した。住民との合意案（目標耐震性能）に対応する目標信頼性指標をリスク分担原則に基づいて算出した。

構築した合意形成支援システムに橋梁の「安全性」と「経済性」に関する住民に対するアンケート調査の結果を適用し、合意形成過程を考察した結果、つぎのような成果を得た。

- 1) 目標耐震性能の異なる比較案を作成し、集団意思決定ストレス法で初期合意案を選出した。その結果、住民・事業者・技術者の不満を最小化することができた。また、初期合意案に対する 3 者の意見の反映度を示した。
- 2) 初期合意案に至る合意形成プロセスを明確に提示し、時間的変化に伴う評価者の見解の変化、学習過程などを考慮し、進化ゲーム理論で最終合意案を選出した。その結果、初期合意案に比して 3 者にとってより合意しやすい案を選出することができた。

- 3) 選出した最終合意案（目標耐震性能）に対応する目標信頼性指標をリスク分担原則に基づいて求めた。その結果、設計者の負うべきリスクが明確化され、住民の意見を反映した目標信頼性指標が算出できた。

謝辞

本研究の遂行に際し、私立大学学術高度化推進事業（学術フロンティア事業）「合意形成のための認知的・数理的情報処理システムの構築」より援助を得た。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 環境負荷低減型土木構造計画および施工法の基礎調査研究委員会編：環境負荷低減型土木構造物設計ガイドライン，土木学会，丸善，2001-4.
- 2) 日本鋼構造協会編：土木構造物の性能設計ガイドライン，JSSC テクニカルレポート，日本鋼構造協会，No.49，2001-10.
- 3) 古田 均・片岡宏文・田淵仁子・小山和宏・堂垣正博：鋼橋の要求性能決定過程への住民参加に関する研究，第 9 回設計工学に関するシンポジウム講演論文集，2005-12.
- 4) 木下栄蔵：AHP の理論と実際，日科技連，2000-6.
- 5) 中西昌武・木下栄蔵：集団意思決定ストレス法の集団 AHP への適用，Journal of the Operations Research Society of Japan，日本オペレーションズ・リサーチ学会，Vol.41，No.4，pp.560-571，1998-12.
- 6) 佐藤譲：ゲーム理論の新展開－第 2 回 多体学習のダイナミクス，数理科学，No.490，pp.76-83，2004-4.
- 7) 香月智：リスク分担原則による目標信頼性指標の決め方，性能設計体系における合意形成・評価手法に関する研究小委員会報告書，土木学会，pp.175-186，2003-12.
- 8) 土木学会地震工学委員会，レベル 2 地震動研究小委員会：レベル 2 地震動研究小委員会の活動成果報告書，2000.

(2005 年 9 月 10 日受付)