

土砂災害対策工法の総合的な評価における 定量化指標の提案

原田 紹臣¹・小杉 賢一朗²・里深 好文³・水山 高久⁴

¹ 正会員 博士(工)／博士(農) 京都大学大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)
E-mail:harada3@kais.kyoto-u.ac.jp

² 正会員 博士(農) 京都大学大学院農学研究科 教授 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)
E-mail: kos@kais.kyoto-u.ac.jp

³ 正会員 博士(工) 立命館大学理工学部 教授 (〒525-8577 草津市野路東 1-1-1)
E-mail:satofuka@se.ritsumeai.ac.jp

⁴ 非会員 農博 京都大学名誉教授 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)
E-mail:mizuyama@kais.kyoto-u.ac.jp

現在、斜面崩壊等の土砂災害に対する対策工法の検討に際して、国土交通省より示された共通仕様書等に基づいて、経済性に加えて、施工性や環境面等にも考慮した総合的な比較検討の実施が求められている。しかしながら、環境や施工性の高度化と経済性とは、トレード・オフの関係になることが多く、アカウンタビリティの観点より、これらの比較における根拠の明確化（例えば、定量的な指標）は重要であると考えられる。一方、i-Construction の推進における二次製品の積極的な活用による効率化に向けて、これらの比較検討時においても定量的な指標の提案が望まれる。しかしながら、土砂災害の発生に関する明確な機構については未解明な点も多く存在しているとともに、これらの定量的な指標については、これまで十分に議論されていない。そこで、本研究では土砂災害対策における一般的な崖地（斜面崩壊）対策や土石流対策の工法に関して、試行的に、設計実務者が工法比較検討時に際して考慮する経済性、施工性、環境等の着眼点に関する重みについて、複数の管理者、学識経験者、コンサルタント等を対象にしたアンケート調査および AHP 分析により定量的に把握するとともに、その活用方法について例示している。

Key Words: AHP, economics, quantitative evaluation, SABO facility, workability

1. はじめに

近年、地球温暖化等に伴う集中豪雨や地震等に起因して発生する土砂災害（例えば、大規模な斜面崩壊や土石流等）が全国的に報告^{例えば、1)}されており、これらに対する対策施設によるハード整備が急務な課題となっている。また、林業の衰退による山林の荒廃等に伴い、山林より流出する流木の対策として、鋼製部材（二次製品）等で構成された透過型砂防堰堤（例えば、図-1）を活用した流木対策等の更なる推進が求められている²⁾。さらに、土砂災害発生後の災害復旧工事における二次的被害防止（例えば、土砂の再侵食に伴う二次移動）に対して、二次製品を有効に活用した迅速な応急対応が求められている（例えば、図-2）。

ここで、一般的な対策工における主要な建設資材（例えば、H型鋼材やセメント）の価格³⁾に関する約40年間

（ただし、集中的な建設時期以降）における推移を図-3に示す。図-3に示すとおり、コンクリート材料のセメントについては顕著な変化は見られず、これまで比較的一定で推移している。また、H型鋼材については、一部で顕著に変動しているが、近年においては約40年前と同等の値で推移している。なお、各年度毎における物価指



図-1 透過型砂防堰堤（二次製品）による流木等捕捉事例³⁾



図-2 斜面崩壊対策として提案された二次製品例⁴⁾

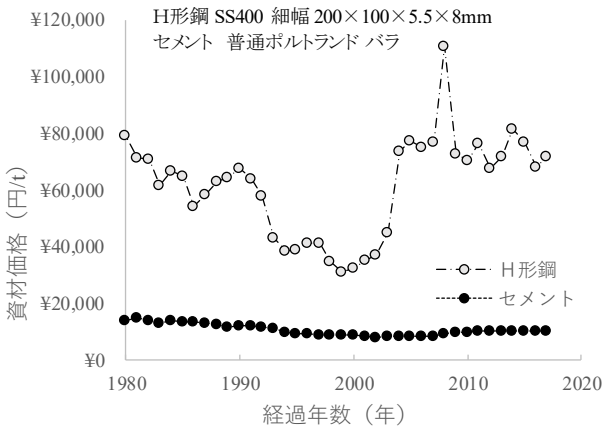


図-3 主要な資材（セメント等）の単価⁵⁾に関する時間的な変化

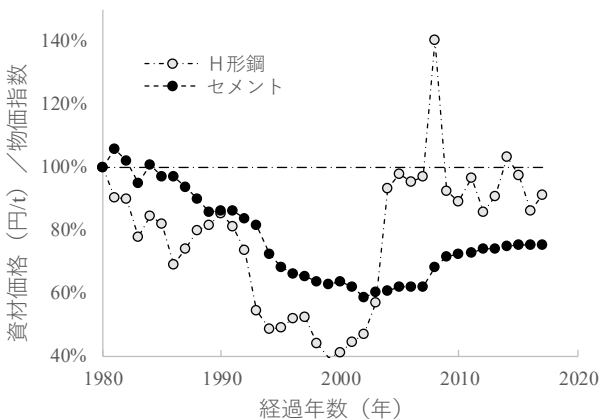


図-4 物価指数⁶⁾を考慮した資材価格⁵⁾に関する時間的な変化

数⁶⁾ および約40年前の値で除して無次元化した場合、低下（約2～3割程度）している傾向が確認される（図-4）。

一方、現地での土木作業工事における主要な施工単価⁹⁾（現地でのコンクリート型枠工および鉄筋工の工事費）について、同様に、物価指数⁶⁾ および約40年前の値で無次元化した推移を図-5に示す。図-5に示されるとおり、1990年代の景気動向指数が顕著に高い時代や、2009年頃の建設低迷期以降においては、比較的高い価で推移している（例えば、型枠工事は約3～4割程度の上昇）。

これらの傾向や、今後の少子高齢化に伴う建設労働者の縮小化に備えるため、更なる二次製品の開発や、普及に伴う安価な二次製品の提供による建設工事における効

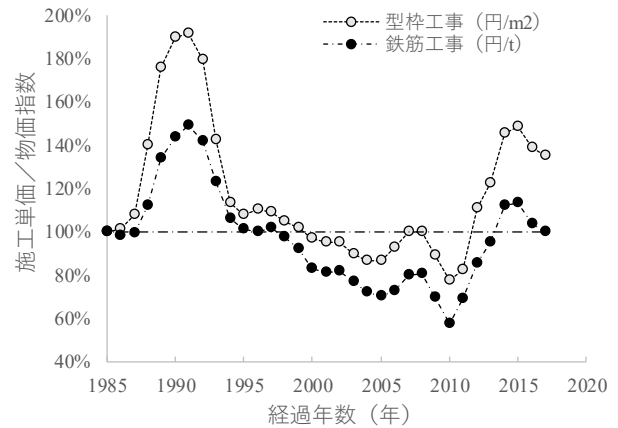


図-5 物価指数⁶⁾を考慮した施工単価⁹⁾に関する時間的な変化

率化の推進が望まれるとともに、環境配慮からの視点による更なる合理化した取り組みが望まれる。このような背景の中、近年、国土交通省において「ICTの全面的な活用（ICT 土工）」等の施策や二次製品を、建設現場に導入することによって、建設生産システム全体の生産性向上を図り、更なる魅力ある建設現場等を目指す取組である i-Construction が進められている。なお、これらの取り組みや二次製品を決定する各対策工の計画・設計段階においては、これまで国土交通省より示された共通仕様書⁷⁾等に基づいて、経済性に加えて、施工性や環境面等にも考慮した総合的な工法比較検討の実施が求められている。しかしながら、一般的に、現在における二次製品の経済性は、従来からの現地で構築されたコンクリート構造物と比較すると、付加経費（例えば、新規開発費や工場からの運搬費、現地指導費）によって不利になる傾向が見られ、会計検査への対応より、二次製品の採用が困難となることが多い。また、環境や施工性の高度化と経済性とは、トレード・オフの関係になることが多く、アカウントビリティーの観点より、これらの比較における根拠の明確化（例えば、定量的な指標）は重要であると考えられる。一方、i-Construction の推進における二次製品の積極的な活用による効率化に向けて、これらの比較検討時における定量的な指標の提案が望まれる。しかしながら、土砂災害の発生に関する機構については未解明な点も多く存在しているとともに、これらの定量的な指標については、これまで十分に議論されていない。

そこで、本研究では土砂災害対策における一般的な崖地（斜面崩壊）対策や土石流対策の工法に関して、試行的に、設計実務者が工法比較検討時に際して考慮する経済性、施工性、環境等の着眼点に関する重みについて、複数の管理者、学識経験者、コンサルタント・エンジニアならびに施工業者等を対象にしたアンケート調査および AHP 分析により、定量的に把握するとともに、その活用方法について例示する。

2. 土砂災害対策工法の比較検討における総合的な定量的評価指標の提案

土砂災害に対して対策を講じる際に、工法の比較検討時における現在の管理者や設計実務者等の経済性、施工性、環境等の着眼点に対する重要度の認識について把握するため、管理者、学識経験者、コンサルタント・エンジニア等を対象にしたアンケート調査および AHP 分析により、これらの定量的な重要度（重み）を示す。以降に、その調査・分析方法および得られた結果を示す。

(1) 調査・分析方法の概要

実施したアンケート調査の対象は、一般的に当該分野に精通した関係者や専門家等が集うと考えられる「平成 30 年度 砂防学会研究発表会」に参加した中から、任意に抽出された比較的熟年である、施設管理者（ただし、国土交通省や地方公共団体の発注者等）、大学教員等の学識経験者、コンサルタント・エンジニア、メーカー従事者・施工関係者（ただし、技術担当者や営業担当者）、その他関係者に対して、それぞれ、約 8 名から 10 名程度までの計 50 名（有効回答数：50 名）とした。

アンケートに際して、一般的に想定される内容で設定した崖地対策工事（ただし、急傾斜地崩壊防止対策事業）および土石流対策施設（砂防堰堤）工事に関する施工条件や環境条件（施工規模等）について、それぞれ表-1 および表-2 に示す。表-1 に示すとおり、崖地対策に関しては、一般的に、これまで住宅家屋裏等において対策が講じられている待受式対策工とし、主に、従来のコン

表-1 崖地対策における施工・環境条件（ヒアリング条件）

項目	内容
対策事業	急傾斜地崩壊防止対策事業 (一般的な崖地対策)
対策場所	住宅家屋裏での対策
対策工	待受式対策工（ただし、二次製品も含むものとし、安定性は満足する構造）
対策規模	延長 200m
地形・地質	花崗岩、顕著な地形的变化無
費用負担	国庫補助事業（受益負担金無）
環境条件	その他特筆すべき制約条件無

表-2 土石流対策における施工・環境条件（ヒアリング条件）

項目	内容
対策事業	土石流危険渓流における土石流対策事業
対策場所	山間部（ただし、谷出口付近）
対策工	砂防堰堤工（ただし、安定性は満足する構造）
対策規模	堰堤高 10m, 堤長 20m, 土砂捕捉量 4,500m ³
地形・地質	花崗岩、顕著な地形的变化無
費用負担	国庫補助事業
環境条件	人家から 250m 程度の位置、下流渓流保全工有、管理用道路有、人家から眺望可、最大礫径 d_{85} : 1m, その他特筆すべき制約条件無

クリート等で現地構築される重力式擁壁や、近年の二次製品（例えば、図-2）等による対策工の比較検討を想定している。ここで、対象とする対策工法は、現地の地形条件等を考慮し、想定される外力に対して構造的に安定しているものとしている。一方、土石流対策工事（ただし、流木対策を含む）に関しては、表-2 に示すとおり、土石流危険渓流の谷出口（例えば、扇状地頂部）において、一般的に構築されている透過型砂防堰堤（鋼製部材とコンクリート部とで構成される構造：例えば、図-1）とし、主に、透過部構造に対して製造メーカーがそれぞれ提案している二次製品（鋼製部材）等による比較検討を想定している。なお、同様に現地の地形条件等も考慮して十分な機能や構造安定性を有しているものとする。

各対策工法の比較検討に際して考慮する着眼点については、設計業務委託等で用いられる共通仕様書⁷⁾に基づくものとし、崖地対策工事については「経済性、施工性および環境」を、土石流対策工事については「経済性、施工性、環境および維持管理の難易」を対象としている。なお、着眼点に対する具体的な内容（定義）については、一般的に考えられる内容で設定している（表-3、表-4）。

分析手法として今回検討に用いる AHP⁸⁾ について、以降に概説する。一般的に、意思決定する上で重要だと考えられる評価項目 I_n （ただし、 n 個）の相対的な重み（重要度）を W_1, W_2, \dots, W_n とした場合、2つの評価項目 I_i と I_j の間の一体比較は、

$$a_{ij} = W_i / W_j \quad (1)$$

で表される。なお、 n 個の評価項目に対する一体比較の結果（行列 A ）は、

$$A = \begin{bmatrix} \frac{W_1}{W_1} & \frac{W_1}{W_2} & \dots & \frac{W_1}{W_n} \\ \frac{W_2}{W_1} & \frac{W_2}{W_2} & \dots & \frac{W_2}{W_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{W_n}{W_1} & \frac{W_n}{W_2} & \dots & \frac{W_n}{W_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

表-3 崖地対策工法の検討時における着眼点⁷⁾とその定義

着眼点	内容 ^{例として、8)}
経済性	建設費（初期）、維持費等のライフサイクルコスト
施工性	現場工期の長短、省人化、施工技術の難易、施工スペース等
環境	周辺環境との調和、騒音・振動（施工時）、地形改変規模等

表-4 土石流対策工法の検討時における着眼点⁷⁾とその定義

着眼点	内容 ^{例として、8)}
経済性	建設費（初期）、維持費等のライフサイクルコスト
施工性	現場工期の長短、省人化、施工技術の難易、施工スペース等
環境	周辺環境との調和、騒音・振動（施工時）等
維持管理の難易	施工周期、点検の容易さ、補修作業の難易等

で表される。ここで、この一体比較行列 A に、重みベクトル $W [W_1, W_2, \dots, W_n]$ を乗じると、

$$AW = nW \quad (3)$$

で表される。ここで、 W は固有ベクトルで、 A のランクは 1 であるため、 n は固有値 (ただし、0 でない) となる。これらより、評価項目の重要度の評価は、これらの一体比較行列を用いた固有値問題に帰着することが可能となり、結果的に、この固有ベクトルが評価項目 (着眼点) の相対的な重要度 (重み) を表すことが可能となる。その他の詳細については、既往文献⁹⁾ を参考されたい。

(2) 分析結果

実施したアンケート調査 (各着眼点の相互関係に対す

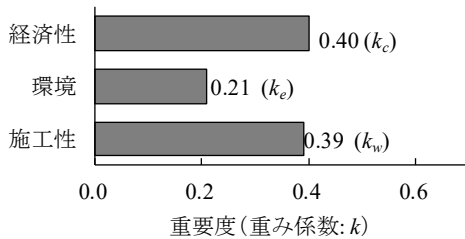


図-6 崖地対策 (待受式対策工) の比較検討時における着眼点の重み係数 k (重要度)

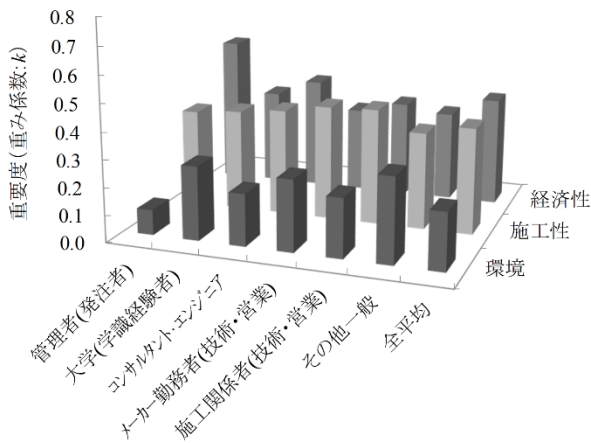


図-7 崖地対策 (待受式対策工) の比較検討時における着眼点の重み係数 k (回答者別の分析結果)

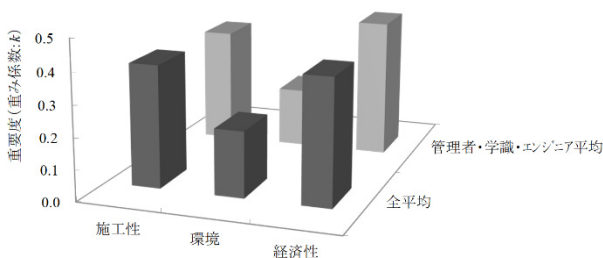


図-8 崖地対策 (待受式対策工) の比較検討時における着眼点の重み係数 k (集計別の分析結果)

る一体比較ヒアリング) 結果および AHP 分析により得られた結果について、以降に示す。崖地対策 (待受式対策工) の比較検討時に際しての着眼点の重み係数 k (重要度) の関係性を図-6 に示す。図-6 に示されるとおり、表-1 および表-3 に示す内容での工事の場合、「経済性」が最も優位 (約 4 割程度の重み) であり、次に「施工性」が優位となった。ただし、これらの顕著な差は見られなかった。なお、「環境」については、約 2 割程度の重みであった。ここで、崖地対策に関する回答者別に整理した分析結果 (着眼点の重み) を図-7 に示す。図-7 に示されるとおり、「施工性」については、回答者別における顕著な違いは確認されなかったが、「経済性」および「環境」については興味深い違いが確認され、今後、これらの要因に対する更なる検討が望まれる。ここで、対策工の設計において、一般的に、これらの比較検討に関与すると考えられる「管理者」、「コンサルタント・エンジニア」および「学識経験者」による平均値と、今回の全回答者における平均値 (図-6) との比較を図-8 に示す。図-8 に示されるとおり、ほぼ両者において同じ傾向であることが確認され、今後、この 3 つの視点からの比較検討結果の平均値で代替可能であると考えられる。

次に、土石流対策 (透過型砂防堰堤工) の比較検討時における着眼点の重み k (重要度) の関係性を図-9 に示す。図-9 に示されるとおり、表-2 および表-4 に示す内容での工事の場合、「維持管理」が最も優位 (約 3 割程度の重み) であり、次に「経済性」および「施工性」が優位であった。一方で、「環境」については、崖地対策と同様に約 2 割程度の重みであった。なお、土石流対策に関する回答者別に整理した分析結果を図-10 に示す。図-10 に示されるとおり、全ての因子において、それぞれの特徴的な違いが確認され、今後、これらの要因について更なる検討が望まれる。最後に、「管理者」、「コンサルタント・エンジニア」および「学識経験者」の平均値と今回の全回答者における平均値 (図-9) との比較を、図-11 に示す。図-11 に示されるとおり、ほぼ両者において同じ傾向であることが同様に確認された。

これらの分析結果より、崖地対策や土石流対策の工法比較検討における着眼点の重み (重要度) に関して、概

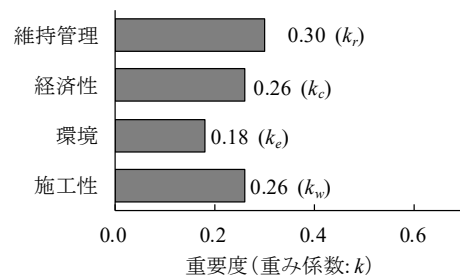


図-9 土石流対策施設 (透過型砂防堰堤工) の比較検討時における着眼点の重み係数 k (重要度)

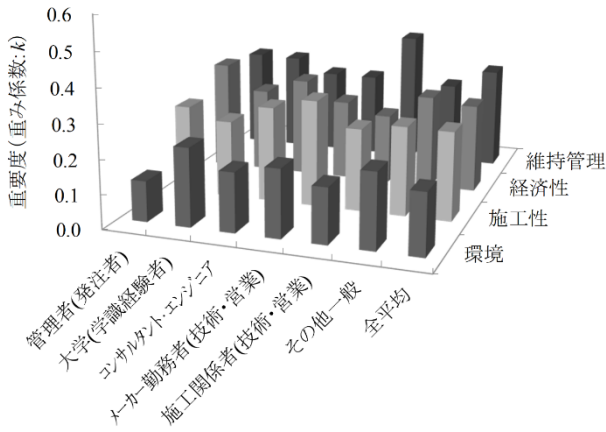


図-10 土石流対策施設（透過型砂防堰堤工）の比較検討時における着眼点の重み係数 k （回答者別の分析結果）

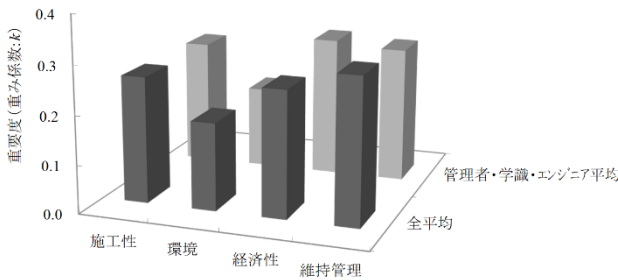


図-11 土石流対策施設（透過型砂防堰堤工）の比較検討時における着眼点の重み係数 k （集計別の分析結果）

略的に定量化した値を示すことができた。ただし、本検討は、一般的に想定される仮定での条件による検討であり、今後、更なる検討による精査や、本検討結果等を活用した対策工法検討の高度化や合理化が望まれる。

3. 提案する定量化指標の活用事例（試行例）

前述までに示した AHP 分析⁹⁾により得られた着眼点の定量化指標（重み係数： k 、図-6 および図-9）に関して、今後の具体的な活用方法について、崖地対策を対象に例示する。なお、比較する工法としては、工法 A（二次製品：新工法）、工法 B（二次製品：従来工法）、工法 C（現場での構築製品：従来工法）を対象に、経済性、施工性および環境に着眼して、比較検討する。

経済性に着眼して検討した結果を表-5 に示す。なお、経済性に関して、最終的に評価する経済性評価 V_C は、

$$V_C = C_{min} / C \quad (4)$$

$$C = c_y + c_m \quad (5)$$

$$c_y = c_c / y_m \quad (6)$$

表-5 崖地対策工法の比較検討事例（経済性）

	工法A	工法B	工法C
耐用年数(年): y_m	30	50	50
初期建設費(千円): c_c	40,000	55,000	50,000
建設投資費(千円/年): c_y	1,333	1,100	1,000
維持管理費(千円/年): c_m	300	100	100
支出額計(千円/年): C	1,633	1,200	<u>1,100</u>
評価値: V_C	67	92	<u>100</u>

表-6 崖地対策工法の比較検討事例（施工性）

	工法A	工法B	工法C
評価①(現地工期の長短)	○	○	△
v_{w1}	100	100	50
評価②(省力化)	○	○	△
v_{w2}	100	100	50
評価③(施工技術の難易)	△	○	○
v_{w3}	50	100	100
Σv_{wn}	250	<u>300</u>	200
評価値 V_W	83	<u>100</u>	67

で表される。ここで、 c_c は初期建設費（千円）、 y_m は耐用年数（年）、 c_y は建設投資費（千円/年）、 c_m は維持管理費（千円/年）、 C は支出額計（千円/年）、 C_{min} は支出額計 C における最小値（ここでは、1,100 千円/年）である。なお、表-5 および式 (4) から (6) に示されるとおり、各工法で期待される耐用年数後において、大規模な更新または改築工事を予定するものとし、検討における簡素化のため、社会的割引率、劣化速度の違い等については考慮しないものとしている。また、ライフサイクルコストとしての検討のため、筆者らが提案するライフサイクルコスト指数 LCI ¹⁰⁾の概念に基づいて、建設費（初期） c_c に要す費用を耐用年数 y_m で除した費用 c_y と、一年あたりに要すと想定される維持（管理、事務含む）費 c_m を合計した費用 C をそれぞれ算出し、最終的に最小となる値 C_{min} で無次元化した値を、経済性評価値 V_C としている。

施工性に着眼して検討した結果を表-6 に示す。なお、施工性に関して、最終的に評価する経済性評価 V_W は、

$$V_W = \Sigma v_{wn} / \Sigma v_{wnmax} \quad (7)$$

$$\Sigma v_{wn} = v_{w1} + v_{w2} + v_{w3} \quad (8)$$

で表される。ここで、 v_{w1} は現地工期の長短に対する項目の評価結果、 v_{w2} は省力化の項目に対する評価結果、 v_{w3} は施工技術の難易に対する評価結果、 Σv_{wn} はこれらの各項目の合計値、 Σv_{wnmax} はそれぞれの合計値 Σv_{wn} における最大値である。なお、表-6 および式 (7) に示されるとおり、各評価項目における検討については、簡素化のため、従来の一般的なこれまでにおける経験的な知見に基づくものとし、それぞれ、3段階（○：100、△：50、×：0）による検討としている。また、最終的に最大とな

表-7 崖地対策工法の比較検討事例（環境）

	工法A	工法B	工法C
評価①(周辺環境との調和) v_{e1}	○	○	△
評価②(騒音・振動:施工時) v_{e2}	△	○	○
評価③(地形改変規模) v_{e3}	○	○	△
Σv_{e_n}	250	<u>300</u>	200
評価値: V_E	83	<u>100</u>	67

表-8 崖地対策工法の比較検討事例（総合評価）

	工法A	工法B	工法C
経済性評価値 $V_C (k_c=0.4)$	67	92	100
施工性評価値 $V_W (k_w=0.39)$	83	100	67
環境評価値 $V_E (k_e=0.2)$	83	<u>100</u>	67
総合的評価値 $V_V (\Sigma V_n \cdot k_n)$	76	<u>96(○)</u>	80

る合計値 $\Sigma v_{e_n \max}$ でそれぞれ無次元化した値を、施工性評価値 V_W としている。

環境に着眼して検討した結果を表-7 に示す。なお、環境に関して、最終的に評価する環境評価 V_E は、

$$V_E = \Sigma v_{e_n} / \Sigma v_{e_n \max} \quad (9)$$

$$\Sigma v_{e_n} = v_{e1} + v_{e2} + v_{e3} \quad (10)$$

で表される。ここで、 v_{e1} は周辺環境との調和に対する評価結果、 v_{e2} は騒音・振動（ただし、施工時）に対する評価結果、 v_{e3} は地形改変規模に対する評価結果、 Σv_{e_n} はこれらの各項目の合計値、 $\Sigma v_{e_n \max}$ はそれぞれの合計値 Σv_{e_n} における最大値である。なお、表-7 および式 (9) に示されるとおり、各評価項目における検討については、簡素化のため、同様に、それぞれ、従来の一般的なこれまでににおける経験的な知見に基づくものとし、3段階（○：100，△：50，×：0）による検討としている。また、最終的に最大となる合計値 $\Sigma v_{e_n \max}$ でそれぞれ無次元化した値を、環境評価値 V_E としている。

最終的に、表-5 から表-7 までに示された各評価値（ V_C 、 V_W および V_E ）と、AHP 分析により得られた各着眼点に対する重み係数 k_n とを用いて算出した結果を表-8 に示す。なお、最終的な総合的評価 $V_V (\Sigma V_n \cdot k_n)$ は、

$$V_V (\Sigma V_n \cdot k_n) = V_C \cdot k_c + V_W \cdot k_w + V_E \cdot k_e \quad (9)$$

で表される。ここで、 k_c は経済性に関する重み係数（ただし、0.4）、 k_w は施工性に関する重み係数（ただし、0.39）、 k_e は環境に関する重み係数（ただし、0.2）である（図-6）。なお、表-8 に示されるとおり、最終的に、総合評価値 V_V が最も高い「工法 B」が総合的に優位となる結果となった。ただし、今後、重み係数 k や各評価項目に対する評価方法等について、更なる高度化が望まれる。

4. おわりに

本研究により得られた成果を以下に要約する。

- 1) 土砂災害対策分野における対策工法に関する総合的な比較検討における定量化に関して、様々な立場の専門家や関係者等による試行的なアンケート調査およびAHP分析結果より、新たな知見（指標）が示唆された。
- 2) 今後、これらの定量的な指標に関する更なる検討や、土砂災害対策分野におけるこれらの指標（重み）の活用による新技術の開発や、環境にも配慮した合理的な対策工事の拡大化等が望まれる。

謝辞：本アンケート調査に対して、ご協力いただいた国土交通省・地方公共団体の砂防管理者、土木研究所、大学研究者ならびに民間企業（コンサルタント・エンジニア、メーカー）等の関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 藤田正治：気候変化が土砂災害の素因・誘因に及ぼす影響，砂防学会誌，Vol.65，No.1，pp.14-20，2012.
- 2) 国土交通省 砂防部：事務連絡，平成29年7月九州北部豪雨災害を踏まえた今後の砂防事業における流木対策，2017.
- 3) 建設コンサルタント協会：鋼製砂防構造物設計事例集流木捕捉工の設計事例集，2011.
- 4) 広島県 (<https://www.pref.hiroshima.lg.jp/uploaded/attachment/>)
- 5) 一般財団法人建設物価調査会：月刊建設物価（対象年月）
- 6) 総務省統計局 (<https://www.stat.go.jp/data/cpi/>)
- 7) 国土交通省：土木設計業務等共通仕様書，2019.
- 8) 国土交通省：第6回コンクリート生産性向上検討協議会資料 (<https://www.milt.go.jp/>)，2019.
- 9) Thomas L Saaty: A scaling method for priorities in hierarchical structures, *Journal of Mathematical Psychology* (Impact Factor: 1.62), 15, pp.234-281, 1977.
- 10) 原田紹臣・里深好文・水山高久：ライフサイクルコストを考慮した砂防関係施設の長寿命化計画策定に関する提案，砂防学会誌（投稿中）。

(2020. 5. 31 受付)