

# AE 法と耐震工学の融合による地震後の橋梁用ゴム支承の 損傷度評価指標の開発

立命館大学理工学部 准教授 川崎佑磨

## 1. 背景と目的

1995 年に発生した兵庫県南部地震以降、積層ゴム支承（以下、ゴム支承と記す）は橋梁に積極的に採用されるようになった。しかし、兵庫県南部地震から 25 年以上が経過し、ゴム支承の経年劣化が顕在化している。また、ゴム支承が供用されている間は、交通振動や使用環境による負荷、地震が起こったときの変形などによって、内部損傷が発生する。あるいは将来的に発生する可能性がある。近年では、2011 年の東北地方太平洋沖地震でゴム支承の破断が初めて報告された。また、2016 年に発生した熊本地震においてもゴム支承の破断が報告されており、2024 年に発生した能登半島地震においても写真-1 に示すように、ゴム支承の破断



写真-1 T 橋のゴム支承破断事例

を確認した。上述したゴム支承の破断原因として、ゴム支承の内部に存在する損傷領域に大きな負荷が加わったことが考えられる。しかし、ゴム支承は全体が被覆ゴムで覆われており、目視で内部損傷が存在しているかどうかを判断することができない。そのため、地震に伴う大きなせん断ひずみを経験して破断しなかったゴム支承について、性能に基づく取り替えの必要性やそのタイミングを判断することは非常に難しい。そのような判断をするためのゴム支承の検査方法や維持管理に関する明確な手法が確立されていないのが現状である。著者らの既往研究では、ゴム支承に対して、せん断変位が 100%, 200%, 300% のせん断試験を行った。そして、せん断試験の前後で交通振動を模擬した繰返し圧縮載荷試験を実施し、AE 計測を行った。しかし、せん断試験で与えられたせん断変位は実際に供用されているゴム支承に対して加わったせん断変位とは異なるものであった。また、ゴム支承の残存耐震性能と得られた AE データとの関係性については検討されていなかった。

そこで本研究では、ゴム支承に与えるせん断変位として、地震模擬波形を与えた。この地震模擬波形は、過去に実際にゴム支承が破断した場合の地震波形を模擬した波形である。地震模擬波形を与えた後に実施した性能確認試験で得られた残存耐震性能と、せん断試験を経験したゴム支承に対して繰返し圧縮載荷試験を行ったときに得られた AE データとの関係について検討した。

## 2. 手法の概要

AE とは、アコースティックエミッション（Acoustic Emission）の略で、固体が変形あるいは破壊する際に、それまで蓄えていたひずみエネルギーが解放されて、その一部が弾性波（AE 波）として放射される現象と定義されている。本研究で用いた AE 法の適用方法を図-1 に示す。ゴム支承に対して繰返し圧縮載荷試験を実施し、そのときにゴム支承内部にある損傷によって発生した空隙が開閉す

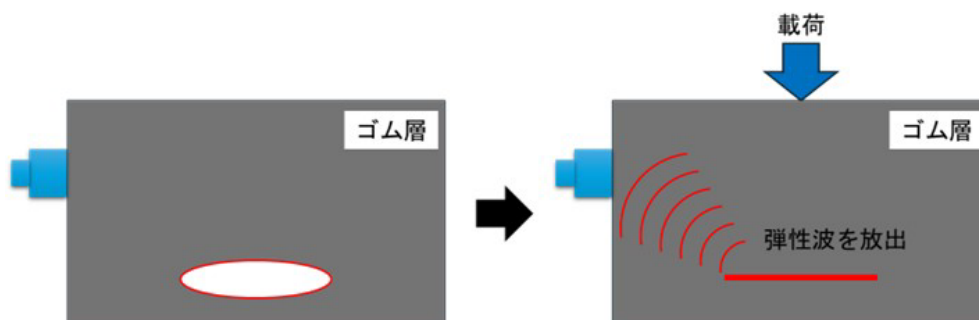


図-1 ゴム支承内部の AE 波検出イメージ

ることで放出された弾性波をゴム支承表面に設置した AE センサで検知し、AE 波形などの AE 信号を取得することを想定している。AE 信号波形は、AE センサからの出力信号波形である。AE 波形の例を図-2 に示す。AE ヒット数とは、検知した AE 信号数で AE 信号のひとつかたまりを 1 ヒットとする。本研究では、RMS 値を使用するが、RMS 値とは、包絡線検波した値を二乗して相加平均し、その平方根をとった値である。AE 信号の実効値は AE 信号の大きさを表すとともに、特に連続型 AE の場合には AE の発生率を評価できるものとされており、連続型 AE が多く検出される本研究において有用であると考えられる。

地震波形について、紙面の都合上、以下に簡潔に説明する。熊本地震による免震橋のゴム支承破断事例に着目し、実際の地震動を模擬した波形を解析により作成した。ゴム支承を有する単柱 RC 橋脚モデルに対し、KiK-net 益城 (KMMH16) における 2016 年熊本地震の強震観測を入力地震動として地震応答解析を実施し、ゴム支承の時刻歴相対変位波形を算出した。地震応答解析には、非線形時刻歴応答解析プログラム TDAP III を用いた。数値積分法は Newmark の  $\beta$  法 ( $\beta = 1/4$ ) を用いて、積分時間間隔は 0.01 秒とした。本解析モデルは、道路橋の耐震設計に関する資料に掲載されている免震橋梁を対象としてモデル化した。ゴム支承を有する単柱 RC 橋脚モデルに対し、熊本地震の強震観測を入力地震動として地震応答解析を実施し、ゴム支承の時刻歴相対変位波形を算出した。算出したゴム支承の時刻歴相対変位波形の主要部より、勾配変化点の座標値（時間、相対応答変位）をいくつか選択し、相対応答変位をゴム支承の高さで除することでせん断ひずみに変換し、実験用せん断ひずみ時刻歴波形を作成している。最大せん断ひずみは、175%、250%になるように振幅倍率を調整した。実際に与えたせん断ひずみの時刻歴を図-3、図-4 に示す。

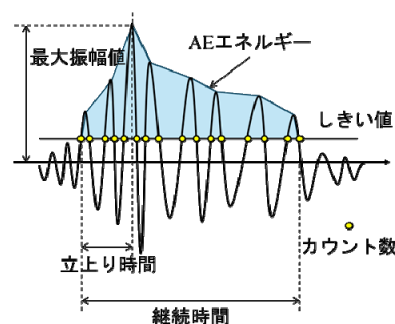


図-2 AE 波形とパラメータ

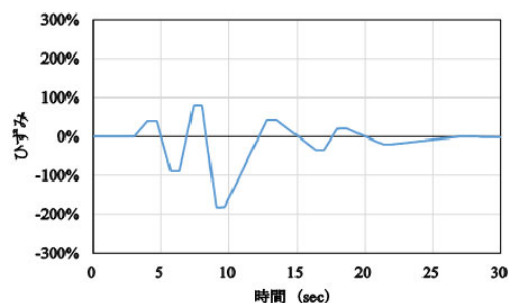


図-3 せん断ひずみ時刻歴 (175%)

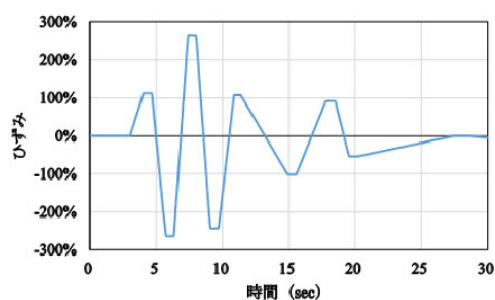


図-4 せん断ひずみ時刻歴 (250%)

表-1 供試体諸元

| 寸法                                  | 250mm×250mm×96mm      |
|-------------------------------------|-----------------------|
| 上下鋼板 (SM490A)                       | 32mm×2 枚              |
| 内部鋼板 (SS400)                        | 3.2mm×5 枚             |
| ゴム (HDR-S, G=1.2N/mm <sup>2</sup> ) | 5mm×6 層               |
| 一次形状係数                              | S <sub>1</sub> =12.00 |
| 二次形状係数                              | S <sub>2</sub> =8.00  |

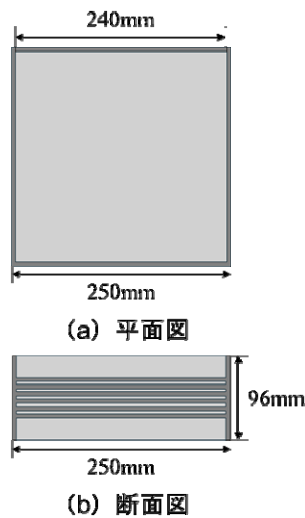


図-5 供試体概要

表-2 試験の流れ

| 試験内容             | 試験内容             |
|------------------|------------------|
| 要素試験             | 地震模擬波形 (250%) 载荷 |
| 繰返し圧縮载荷試験・AE 計測① | 繰返し圧縮载荷試験・AE 計測⑤ |
| 性能確認試験①          | 性能確認試験⑤          |
| 地震模擬波形 (175%) 载荷 | 繰返し圧縮载荷試験・AE 計測⑥ |
| 繰返し圧縮载荷試験・AE 計測② | 性能確認試験⑥          |
| 性能確認試験②          | 地震模擬波形 (175%) 载荷 |
| 地震模擬波形 (250%) 载荷 | 繰返し圧縮载荷試験・AE 計測⑦ |
| 繰返し圧縮载荷試験・AE 計測③ | 性能確認試験⑦          |
| 性能確認試験③          | 地震模擬波形 (250%) 载荷 |
| 性能確認試験③'         | 繰返し圧縮载荷試験・AE 計測⑧ |
| 繰返し圧縮载荷試験・AE 計測④ | 性能確認試験⑧          |
| 性能確認試験④          | 地震模擬波形 (250%) 载荷 |
|                  | 繰返し圧縮载荷試験・AE 計測⑨ |
|                  | 性能確認試験⑨          |

### 3. 実験概要

本研究では HDR を使用して実験を行った。供試体は合計 3 体使用したが、本報告書ではそのうちの 1 体について概要ならびに結果を報告する。その 1 体は、本研究の前に「要素試験（以下、要素試験供試体とする）」と呼ばれる試験を前に経験しており、すでにある程度損傷を抱えていると思われる供試体である。HDR の平面図・断面図を図-5、供試体諸元を表-1 に示す。供試体の試験の流れを表-2 に示す。地震模擬波形载荷⇒繰返し圧縮载荷試験・AE 計測⇒性能確認試験を基本的に 1 セットとして実験を実施した。しかし、要素試験供試体の 4 回目と 6 回目の AE 計測については、性能確認試験の影響を確認するため、直前に地震模擬波形载荷は行わなかった。事前に行われていた要素試験の概要を表-3 に示す。一般的に、せん断ひずみ 250%が設計限界変位で、ゴムのハードニング現象が起こるとされており、300%が破断の可能性が高くなる。そのため、事前に受けた要素試験はせん断ひずみ 300%を受けており、内部損傷を複数内在している可能性が高いと思われる。なお、外観上に支承の変形や表面のひび割れは確認されていない。

残存耐震性能を算出するために、繰返し圧縮载荷試験・AE 計測の後に性能確認試験を実施した。性能確認試験内容を表-4 に示す。性能確認試験はゴム支承の出荷前には必ず実施されている。2～10 サイクル目の結果から、残存耐震性能を評価する指標として用いられる等価剛性と等価減衰定数を算出した。水平荷重－せん断変位曲線の例を図-6 に示す。また、等価剛性の算出式を式 (1)、等価減衰定数の算出式を式 (2) に示す。

$$K_{eq} = \frac{F_{max} - F_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (1)$$

$$h_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi F_{max} X_{max}} \quad (2)$$

表-3 要素試験の概要

| ひずみ<br>(%) | 加振変位<br>(mm) | 鉛直荷重<br>(kN) | 鉛直変位<br>(mm) | 加振周波数<br>(Hz) | 加振回数<br>(回) |
|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-------------|
| 70         | 21.0         | 5~10         | 固定           | 0.076         | 11          |
| 175        | 52.5         |              |              | 0.031         | 11          |
| 250        | 75.0         |              |              | 0.022         | 6           |
| 300        | 90.0         |              |              | 0.018         | 2           |

表-4 性能確認試験の概要

| ひずみ<br>(%) | 加振変位<br>(mm) | 鉛直荷重<br>(kN) | 鉛直変位<br>(mm) | 加振周波数<br>(Hz) | 加振回数<br>(回) |
|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-------------|
| 175%       | 52.5         | 345.6        | 固定           | 0.5           | 11          |

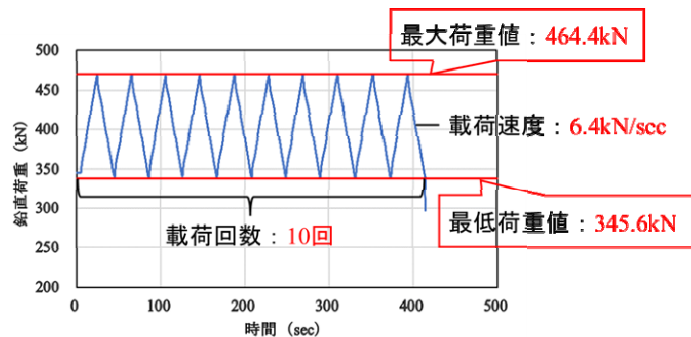
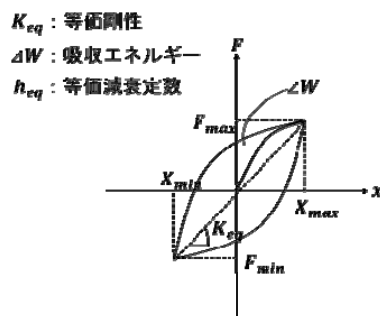


図-6 水平荷重-せん断変位曲線の例 図-7 繰返し圧縮荷重試験で与えた鉛直荷重履歴

本研究では、実橋梁においてゴム支承が受ける交通振動を仮定して、繰返し圧縮荷重試験を実施した。繰返し圧縮荷重試験の荷重履歴を図-7に示す。最低荷重値から最大荷重値までを10回の繰返しサイクルで荷重した。最低荷重値は、死荷重相当の支承設計値が面圧 6MPa に相当する圧縮力とされているため、本供試体では 345.6kN (=240mm×240mm×6MPa) に設定した。最大荷重値は、既往研究では、荷重面が 180mm×180mm の供試体に対して、50%繰返し圧縮荷重試験では 206.6kN としている。この値はゴム支承の一次形状係数によって決まる許容最大圧縮応力度から算出された 259.2kN から最低荷重値 153.6kN (面圧 6MPa から算出) を引いて得られた値 105.6kN の 50%を 153.6kN に加えることで算出している。今回は死荷重が 2.25 倍になっていることから、最大荷重値を 464.4kN とした。

AE センサは共振周波数 60kHz の共振型センサを 8 個使用した。AE センサの設置箇所を図-8 に示す。ゴム材料は引張に弱いため、ゴム支承内部で最も大きな引張応力を受け、脆弱であると考えられる箇所に設置している。しきい値は 40dB よりも低く設定するとノイズを検出したため、40dB に設定した。得られた AE 現象のうち、AE パラメータのカウント数が 1、AE エネルギーが 0、平均周波数が 30kHz~90kHz 以外の AE 現象は分析対象外のデータとして除去し、最初に 345.6kN を超えるまでの時間に発生した AE 現象も、対象時間外として除去した。

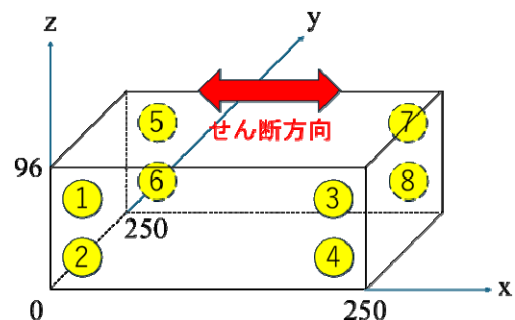


図-8 AE センサの設置位置

## 4. 実験結果と考察

等価剛性と等価減衰定数を算出し、それらの値から供試体の安全度評価を試みた。等価剛性の設計値との差(%)を横軸、等価減衰定数の設計値との差(%)を縦軸にとった散布図を図-9に示す。なお、図中には本報告では取り上げない他の2種の供試体も混在している。等価剛性・等価減衰定数の両方が設計値から10%以上低下している場合を危険領域(図-9中の赤色部分)、等価剛性・等価減衰定数のどちらか一方が設計値から10%以上低下している場合を注意領域(図-9中の黄色部分)とした。設計値から10%低下している場合を基準として定めた理由は、道路橋支承便覧において、高減衰積層ゴム支承の実験データに基づく設計モデルの検証で、設計値に対する実験値の基準として10%を用いていたからである。要素試験供試体は性能確認試験③'で注意領域に入り、性能確認試験⑤で危険領域に入っていることが分かる。要素試験供試体は破断しておらず、外観上変化は確認できていないが、免震支承としての機能を十分に果たせない可能性が考えられる。

要素試験供試体の累積AEヒット数・RMSの推移を図-10に示す。横軸の番号の下にある内容は、各回のAE計測前に実施したせん断試験内容と最大せん断ひずみを表している。地震模擬波形(175%)载荷後のAE計測②の結果では、その前に実施したAE計測①と比較して、累積AEヒット数は増加し、RMSは上昇した。最大せん断ひずみ175%はゴム支承の出荷前に必ず実施される性能確認試験と同等であり、一般的には175%で損傷が進展あるいは新しい損傷が発生する可能性は低い。しかし、このような結果となったのは、本研究より前に実施された要素試験の影響があったと考えている。すなわち、要素試験で最大せん断ひずみ300%を受けているため、すでにゴム支承内部には損傷が存在している可能性が高い。内部損傷がない状態で175%のせん断ひずみを受けても損傷が進展することは考えにくい。内部損傷がある状態で175%のせん断ひずみを受けると損傷が進展する可能性も考えられる。このことは、性能確認試験のみを実施してAE計測を行ったAE計測④とAE計測⑥からもいえる。前述した安全度評価でも、AE計測④後の性能確認試験④で注意領域に入り、AE計測⑥後の性能確認試験⑥で危険領域に入っていることから、損傷が進展したことで、残存耐震性能が低下した可能性が考えられる。地震模擬波形(175%)後に実施したAE計測⑦の結果では、その前に実施したAE計測⑥と比較して、累積AEヒット数は増加したが、RMSは低下した。これは上述した地震模擬波形(175%)後の傾向とは異なる。累積AEヒット数が増加していることから、微小な空隙は増加していると考えられ、RMSが低下していることから、損傷領域の進展も想定される。地震模擬波形载荷を何度も受けたことによって、同じ地震模擬波形(175%)を受けた場合でも内部損傷の進展の様子が変化したことが考えられる。地震模擬波形(250%)载荷後のAE計測③、AE計測⑤、AE計測⑧、AE計測⑨では、それぞれの前の

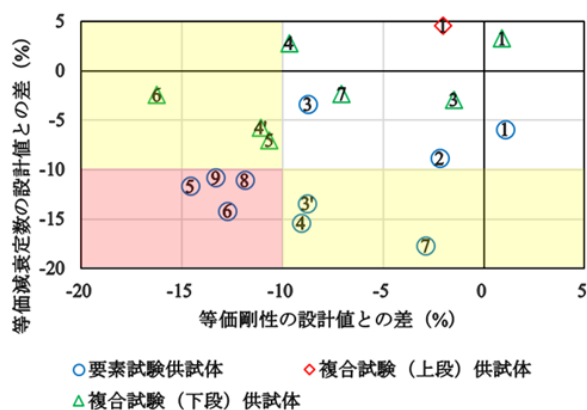


図-9 等価剛性・等価減衰定数の設計値との差

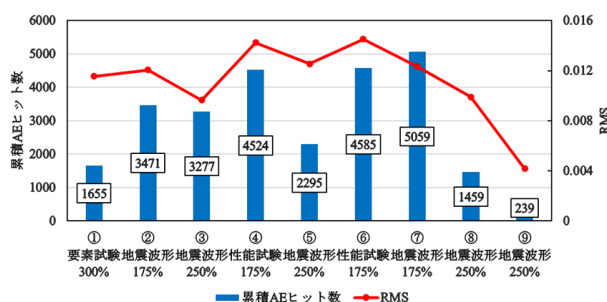


図-10 累積AEヒット数とRMSの推移

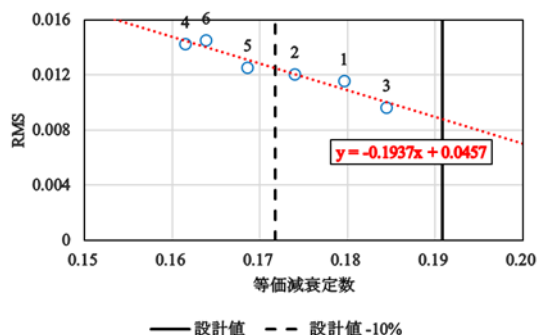
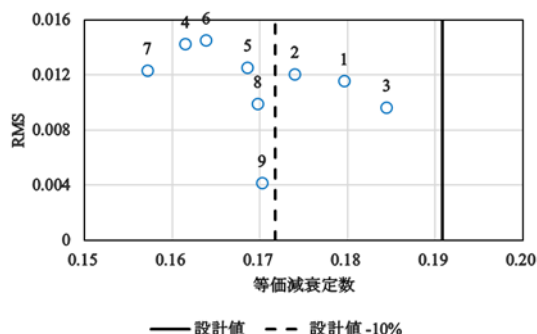


図-11 等価減衰定数と RMS の関係

図-12 AE 計測⑥までの等価減衰定数と RMS の関係

AE 計測結果と比較して、累積 AE ヒット数は減少し、RMS は低下した。損傷した状態でせん断ひずみ 250%を経験したことで損傷領域が拡大したと考えられる。微小な損傷が一つの大きな空隙となったことで、累積 AE ヒット数が減少し、損傷領域が拡大したことで、空隙が十分に開閉しなくなり、RMS が低下したと考えられる。特に、AE 計測⑧と AE 計測⑨では、累積 AE ヒット数が大きく低下し、RMS が大きく低下していることから、上述した損傷進展の傾向が顕著に表れていると考えられる。安全度評価においても危険領域に入っていることから、要素試験供試体は破断の危険性が極めて高いと予想される。要素試験供試体の等価剛性と累積 AE ヒット数、等価剛性と RMS、等価減衰定数と累積 AE ヒット数、等価減衰定数と RMS の関係を確認した。ここでは紙面の都合から、等価減衰定数と RMS の関係を図-11 に示す。等価減衰定数と RMS に一定の相関が確認できた。AE 計測結果に着目すると、内部損傷による空隙が少ない場合だと圧縮荷重時における空隙の開閉が少ないが、内部損傷による空隙が多い場合には圧縮荷重時における空隙の開閉が多くなる。このことから、内部損傷による空隙が多くなるほど AE 発生率を評価できるパラメータである RMS が増加したと考えられる。残存耐震性能に着目すると、内部損傷による空隙が少ない場合だとせん断変形時に摩擦が多く発生するが、内部損傷による空隙が多い場合には比較的せん断変形時に発生する摩擦が減少する。このことから、図-12 に示すように AE 計測⑥までは、内部損傷による空隙の数あるいは体積が増加することで、ゴム同士の摩擦によって発生する熱エネルギーが減少し、振動による運動エネルギーを十分に熱エネルギーに変換できず、等価減衰定数が低下したと考えられる。しかし、AE 計測⑦以降は相関関係を確認することができなくなった。これは損傷領域が拡大したことで、鉛直荷重によって空隙が十分に開閉しなくなったことが原因であると考えている。したがって、相関関係が確認できなくなることが内部の損傷領域拡大を示唆する可能性があると考えられる。

## 5. まとめ

要素試験供試体は、性能確認試験⑤までは試験を重ねるごとに等価剛性が低下したが、性能確認試験⑥、性能確認試験⑦では等価剛性が上昇した。要素試験で一次ハードニング状態になり、その後の地震模擬波形荷重によって二次ハードニング状態に移行したと考えられる。安全度評価において、性能確認試験③'で注意領域に入り、性能確認試験⑤で危険領域に入った。要素試験供試体は破断しておらず、外観上変化は確認できていないが、免震支承としての機能を十分に果たせない可能性が考えられる。AE 計測では、AE 計測⑦以降から等価減衰定数と RMS 値の相関が取れなくなった。損傷領域が拡大したことによって、空隙が十分に開閉されず、繰返し圧縮荷重試験によって RMS 値が小さくなったことが要因と考えられる。したがって、AE 計測によるパラメータを確認すれば、性能確認試験で得られる等価減衰定数を推定できる可能性を示した。一方で、寸法効果、現地での適用性なども検討課題である。