

## 4.5 ライフライン等への地震対策への利用

### 4.5.1 ライフラインの地震対策上の特徴と耐震性能

ライフラインの地震対策は都市や地域の地震防災のうえで重要な意味をもつ。特に、震災直後から復旧に至る間、ライフラインの機能の低下や回復は被災地域の復旧そのものに大きな影響を及ぼす。広義に、ライフラインには次の施設が含まれる。

- ・供給系： 水道、電気、燃料（ガス、LNG、石油等パイプライン）
- ・情報系： 通信、放送
- ・交通系： 陸上（道路、鉄道等）、海上（港湾）、航空（空港）
- ・処理系： 下水道

ライフラインに共通する特徴は、広域に設置される施設であること、ネットワークシステムとして機能を発揮することである。このため、地震の影響を受ける施設範囲が広く、ネットワークシステムの構成要素が「同時に」「複数」「異なる程度で」被害を受ける可能性を考慮しなければならない。また、ライフラインには埋設管のように地中に長く敷設される構造物を含む場合が多いので、地震の影響として、地盤加速度の大きさそのものでなく、速度振幅や、地震動の水平方向への伝播に伴う位相差が重要な地震動指標になることがある。

兵庫県南部地震以前には、これらライフラインに対する耐震設計用の地震荷重として、工学的基盤での設計震度 0.15 程度を標準の大きさとする設計法が体系化され、対象構造物によって設計法は、震度法、応答変位法などが使い分けられていた。動的解析法は、これら簡易法が適用しにくい特殊な地盤や構造物の条件の場合に適用されたり、簡易法によって設計された構造物の詳細照査や被害想定に適用されたりしていた。

兵庫県南部地震以降、その観測地震動を踏まえての耐震診断や、設計基準の見直しがなされた。設計基準の見直しでは、大部分の場合、設計用地震動としてレベル 1 地震動とレベル 2 地震動の 2 段階が導入されている。レベル 1 地震動は、それ以前の標準設計震度 0.15 と同等の大きさとされているのが一般的である。一方、レベル 2 地震動は将来起こりうる最大級の地震動とされ、周期特性の大きく異なる海溝型地震と活断層型地震とが考慮されている。地震動予測地図との関連では、このレベル 2 地震動の策定法がシナリオ型地震動に大きく関係していると考えられるが、一般的な設計の実務では詳細な地震動予測を行わずに、基準や文献に記載の標準的な応答スペクトルやそれに適合する地震動が用いられることも多い。

レベル 1 地震動に対しては無損傷か軽微な損傷に留まる耐震性能を要求している一方で、レベル 2 地震動に対しては対象構造物の機能や重要度に応じて要求する耐震性能に違いが見られる。たとえば、ハザードの高い燃料の輸送施設（ガスパイプラインなど）や関連貯蔵施設（タンクなど）では、レベル 2 地震動に対して内容物が外部へ漏洩したり爆発したりしない「安全性」が耐震性能になるが、施設自体のハザードが低い水道施設、港湾施設、

送変電施設などでは、一部が損傷しても広域や長時間の機能低下（断水、停電）にならない「使用性」がレベル2地震動に対する耐震性能になる。実際には、ライフラインの「使用性」が被災地域の人命の「安全性」に直結するシナリオもあるので、それほど単純ではないが、ライフラインの地震対策と地震動レベルを考えるうえでこのような認識をもつことは必要である。「使用性」を問題とする場合、損傷を受けたライフラインシステムの機能（供給機能、交通機能など）を評価しなければならず、「安全性」の照査とは異なった難しさがあり、研究途上の課題も多くある。

#### 4.5.2 ライフラインの地震リスクマネジメントー電力流通設備を例としてー

ここでは、ライフラインの特徴である「使用性」に注目して補強の箇所や優先度を検討する地震リスクマネジメントについて最近の考え方<sup>1)</sup>を述べる。その中で、地震動予測（シナリオ型地震動、確率論的な地震動）がどのように適用できるのかを考察する。事例として電力流通設備を構成する変電設備を対象とする。変電設備は、主回路と呼ばれる重要機器では動的地震力（地表面で0.3G）による設計が1970年代の終わりころから適用されてきている。兵庫県南部地震を含め、この設計法によった機器の被害が重大な供給支障につながった例はないが、今後予想される地震動のレベルが設計基準で考慮している動的地震力を超過する可能性がある場合には、適切な補強対策などが求められる。

以下にはレベルの異なる5段階のリスクマネジメント手法を提案する。レベルが進むにつれて、より詳細手法となるが、解析に必要なデータも増える。

##### (1) レベル0

レベル0は、現行の設計地震力を設備に作用させた場合、最も応力が集中する部位に生起する発生応力（ $STRSS^{occur}$ ）と許容応力（ $STRSS^{accept}$ ）との関係で、補強・更新の判断を行う方法である。現実の電力流通設備は膨大な数であり、その中には現行の設計基準の適用以前に設置された設備も多くあることから、現行基準を満たしているか否かのスクリーニングをするには有効な手法といえる。補強・更新の判定は、式(4.5.1)の判定式により行う。

$$Z = \frac{STRSS^{occur}}{STRSS^{accept}} \begin{cases} Z \geq 1 & (\text{耐震補強・更新が必要}) \\ Z < 1 & (\text{耐震補強・更新の必要なし}) \end{cases} \quad (4.5.1)$$

ここで、 $Z$ は、補強・更新の判断をする指標となる。

この方法の範囲では地震動を予測することは不要である。しかしながら、近年、設計地震力として想定されている加速度レベルを越える加速度が数多く記録されていることを考えると、特に断層近傍の地域に位置する設備の耐震性は保証できない。また、問題がある設備を特定できたとしても、耐震補強・更新の対象となる設備数が多い場合、対策の優先順位の決定を客観的に行うことが難しい。

(2) レベル 1

レベル 1 は、対象となる地域にシナリオ地震を設定し、確定的に被害想定を行う方法である。一般に自治体やライフライン事業者における被害想定に用いられる方法である。シナリオ地震をもとに、各設備に作用する地震動強度（地表面最大加速度など）を想定し、設備に発生する応力等を推定する。損傷の有無の判断は式(4.5.1)と同様である。この方法によれば、補強・更新の対象となる設備をある程度絞り込むことが可能となる。ただし、対象となる地域に支配的となるシナリオ地震を特定できない場合はこの方法は適用しにくいので、レベル 0 の方法に準拠するなどする。

(3) レベル 2

レベル 2 は、レベル 1 の方法論を確率的に扱ったものである。対象となる設備に作用する地震動強度を推定するために、シナリオ地震または確率論的な地震動を導入した評価を行う。一方、想定される地震動強度に対する各設備の被害の可能性は、各設備の部材（がいしなど）の材料強度のばらつきを考慮したり、既往の地震被害の統計データを活用したりして確率的に評価する（一般に、フラジリティ評価と呼ばれる）。ハザードおよびフラジリティの評価から個々の設備の被害確率を計算し、その値がある閾値を超えているかどうかで、損傷の判定を行う。式(4.5.2)に被害確率の定義を示す。

$$P_i(R < S) = \int_0^{\infty} f_{R_i}(r) \left\{ \int_r^{\infty} f_{S_i}(s) ds \right\} dr = \int_0^{\infty} f_{R_i}(r) \{1 - F_{S_i}(r)\} dr \quad (4.5.2)$$

ここで、 $P_i(R < S)$  は、対象となる設備  $i$  直下に作用する地震動強度  $S$  が、設備耐力  $R$ （本論では、地表面の地震動強度の関数として与える）を超える確率を示す。 $f_{R_i}(r)$  は、設備  $i$  直下に作用する地震動強度の関数として与えられる設備耐力  $R$  の確率密度関数を示す。 $f_{S_i}(s)$  は、設備  $i$  直下に作用する地震動強度  $S$  の確率密度関数を示す。 $F_{S_i}(r)$  は、地震動強度  $S$  の確率分布関数を示す。なお、 $1 - F_{S_i}(r)$  は地震動強度の超過確率に相当する。

上記で示したレベル 0～2 は、部材に発生する最大応力が許容応力を超えているかどうかを判断基準にする考え方である。すなわち、想定地震力に対して設備に被害が生じないように補強・更新対策を行うことを前提とする。ただし、レベル 2 の方法論では、個々の設備に対する被害の生じやすさが確率値として評価されるが、補強・更新を行う判断基準（許容する被害確率）は予め明確にしておく必要がある。

(4) レベル 3

レベル 3 は、耐震対策以外の効果も総合的に評価して、補強・更新すべき設備の優先順位を決定することを主な目的としている。すなわち、設備の耐震性、システムの持つ冗長性および事後の復旧対応能力を考慮した地震後のシステム性能評価を基に、個々の設備の補強・更新がシステム性能に与える影響の感度を見ながら優先順位を設定することを意図している。

この場合、地震動強度の確率分布  $F_{si}(r)$  は、確率論的な地震動のような地震の発生頻度を考慮しないで、シナリオ地震による強度分布として定義される場合が扱いやすい。その理由は、確率論的な地震動では、複数の地震の影響が同時に広域のライフライン施設への地震動として現れるので、ライフラインのシステムとしての機能損傷が正確に求められないことによる。これを克服するためには、影響の大きい（ライフラインシステムのどこかにレベル2地震動を与えらると思われる）複数の地震シナリオを確率論的地震ハザードの再分解の方法などにより設定し、それらに対して個別にネットワークの機能損傷評価を行い、システムに影響の大きな地震シナリオを抽出する。

システムの性能は、リスクカーブによって評価する。図4.5.1は、リスクカーブの概念図を示す。本論では、対象とする電力システムの供給支障電力とその超過確率との関係を定義した曲線を、リスクカーブと呼ぶ。たとえば、想定地震力に対して発生した供給支障電力が、補強・更新により低減されると、リスクカーブは左下方にシフトする。このため、リスクカーブの相対的な比較から、補強・更新すべき設備の優先順位を決定することが可能となる。

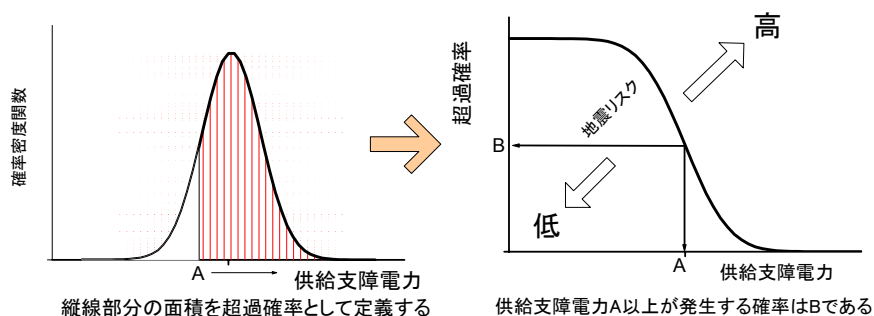


図 4.5.1 リスクカーブの概念<sup>1)</sup>

#### (5) レベル4

レベル4はライフサイクルマネジメントであり、レベル3の考え方をさらに進め、コスト評価に基づく費用対効果分析にポイントをおいた考え方である。想定地震力に対する地震対策コストと損失との間にはトレードオフの関係がある。地震対策コストを多くとれば、リスクレベルは低くなり、損失も小さく抑えることができる。逆に、地震対策コストを少なくすれば、リスクレベルは高いままとなり、損失が大きくなってしまふ。このような地震対策コストと損失の関係を定量的に分析することで、適切な設備投資を実現する補強・更新戦略が策定できる。

図4.5.2は、コスト評価で一般に必要な費用項目を示す。地震対策コストは、事前対策費用・事後対策費用およびリスク転嫁費用からなる。被害コストは、供給者サイドと需要家サイドに二分される。供給者サイドに生じる被害コストは、復旧コスト・地震被害により生じる電力販売収入減（損失）および供給支障により需要家に支払わなければならない

い補償コストからなる。需要家サイドに生じる被害コストは、停電コストである。こうしたコスト評価を行い、費用負担が発生する対象者（電気事業者や電力市場）が誰になるのかを明確にして、それらに関わる総費用がもっとも少なくなるように補強・更新を検討することが、レベル4の基本的考え方となる。

なお、実務の現状では、電力流通設備の更新戦略を策定する場合、低頻度で発生する地震リスクは、更新優先順位決定に反映されていない。これを改善するために、レベル4の考え方では、地震リスクはもとより、経年劣化や塩害など通常の更新計画で考慮されるリスクに対処するため、トレードオフの関係にある費用構造を他の災害事象（マルチハザードと呼ぶ）に対しても検討する。すなわち、レベル4では、設備のライフサイクルにわたって問題となるマルチハザードを対象として、費用対効果分析が可能となることを目標としている。現状では、マルチハザードについての研究は途上であり、ハザードによる影響が互いに独立であると仮定しての扱いは可能な段階にあるが、複数ハザードによる影響に関係が認められるようなケース（たとえば、地震+津波、地震+火災）の扱いについては今後の課題である。

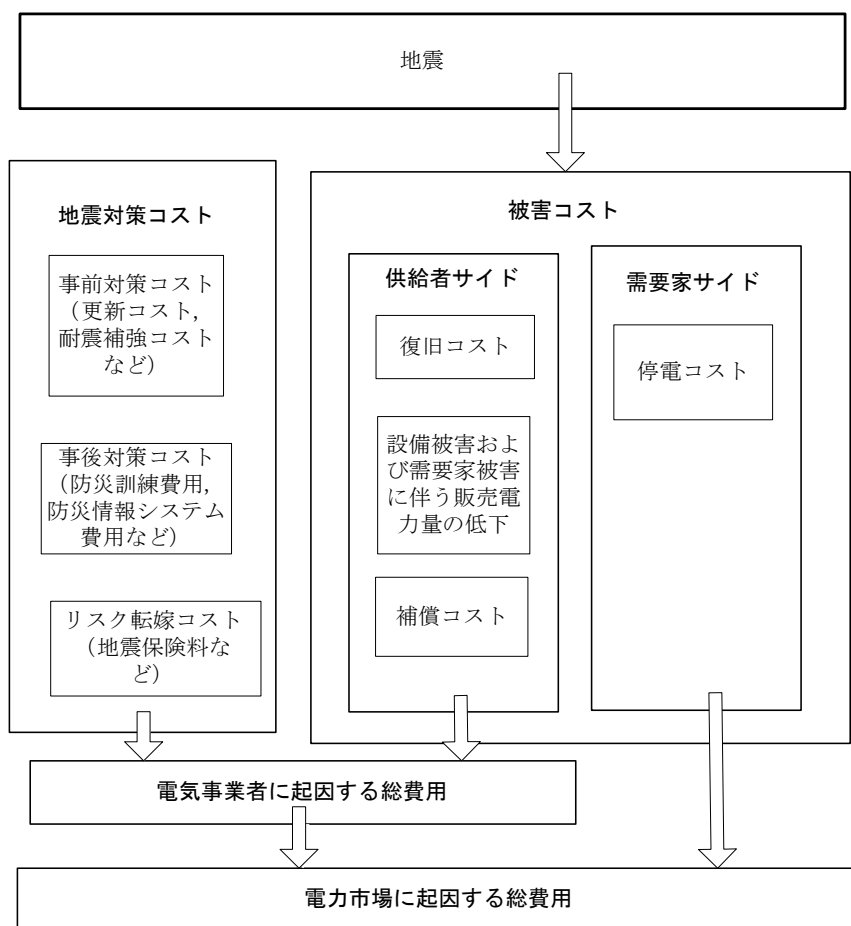


図 4.5.2 レベル4で考慮する地震に関わる費用項目<sup>1)</sup>

マルチハザードに対してリスクマネジメントを計画する場合、それぞれのハザードに対してのリスク指標が共通であることが望ましい。たとえば、停電の場合であれば、年間の停電発生時間が分かりやすい指標になる（通常、供給信頼度と呼ばれる）。そのためには、ハザードに関しても、年発生確率の情報が必要である。塩害によるがれし汚損であれば、過去の統計からの台風の襲来確率がベースとなる。劣化であれば、常時の事故統計やメンテナンス記録から、対象機器の年間故障率がベースとなる。地震の場合についても、ここで発生頻度の導入が必要になる。研究途上の課題ではあるが、対象のライフラインシステムに脅威となるシナリオ地震の発生頻度分布や最新活動時期などの研究成果を反映していくことが期待される。

#### 4.5.3 まとめ

- ・ライフラインの耐震性能評価のための地震動指標としては、地震動の位相差や地盤ひずみが問題となることがあり、予測地震動に関してはそのような指標への変換ができる必要がある。
- ・ライフラインは、その機能上の特性に応じて、レベル2地震動に対する安全性照査もしくは機能性照査を適切に行う必要がある。
- ・ライフラインの地震リスクマネジメントには5つの異なったレベルの手法を提案することができる。
- ・地震リスクマネジメントのレベルに応じて、地震動予測地図におけるシナリオ型地震動や確率論的な地震動を適切に用いる。
- ・ライフライン構成要素個々の耐震対策のためにはシナリオ型地震動や確率論的な地震動を用いることができる。
- ・ライフラインのシステム機能を問題とする場合では、構成要素全体の同時損傷が問題となるので、シナリオ型地震動が有用である。この場合、複数のシナリオを検討することが望ましく、地震シナリオの設定には発生確率、貢献度、再分解などの情報が活用できる。
- ・マルチハザードに対するライフラインのマネジメントを計画する場合には、供給信頼度のような共通リスク指標が必要であり、確率論的な地震動の情報が有用になる。

#### 参考文献

- 1) 朱牟田善治:リスクマネジメントによる電力施設の保生(第3回)－電力流通設備のリスクマネジメント－, 電力土木, 2003, No.306, pp.81-84.