Architectural Institute of Japan

【カテゴリーI】

日本建築学会構造系論文集　第511号，149-156，1998年9月
J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No. 511, 149-156, Sep., 1998

特殊用途建築物に適用可能な機能に基づく耐震設計の考え方

PERFORMANCE BASED SEISMIC ENGINEERING FOCUSING ON FUNCTION OF BUILDING

中村紀吉*，成川匡文*，岸野泰章*，福島誠一郎**
岩田　衛***，和田　章****
Noriyoshi NAKAMURA, Masafumi NARIKAWA, Yasunori KISHINO,
Seiichiro FUKUSHIMA, Mamoru IWATA and Akira WADA

This paper proposes performance based seismic engineering, which is applicable to special use buildings, focusing on functions of the buildings. The concept is that functions of a building after an earthquake depend on damage of elements, structural one, contents etc., and the performance of elements is defined on the basis of the required functions. Two performance matrices are proposed. The first matrix incorporates function level with design loads and building grade. And the second one shows design criteria of elements. Further, detailed criteria and a method to evaluate a seismic load are described for a thermal power plant building.

keywords : *performance based engineering, seismic design, minimum total cost principle, special use building, thermal power plant building*
性能設計、耐震設計、総費用最小化原理、特殊用途建築物、火力発電所建屋

1．序論

現行の建築基準法の耐震設計の考え方は、中小の地震動に対しては構造物の損傷はひび割れ程度に抑え建築物の機能の維持を確保し、極めて頻度の少ない大地震動に対しては人命の確保を前提に機能が失われることおよびかなりな構造物の損傷を認めるという、いわば、耐震設計の最低水準を規定するものである。一方、先の兵庫県南部地震の被害やその後の社会的混乱を鑑みるに、一般公衆に建築基準法の考え方が正しく認識されていたとは言い難く、一般の建築主や建築物使用者と、構造設計者との間に耐震安全性に対する意識のずれが見られた。また、生活の高度化や高機能化が進んだ現代社会においては、建築物に要求される性能も複雑かつ多岐にわたってきており、建築基準法に規定される「中小地震動に対し機能確保」、「大地震動に対し非倒壊」との目標性能だけでなく、「修復性」、「機能の早期回復」、「内容物の損傷防止」など建築物の機能に配慮した設計が必要である。

近年、目標とする耐震安全性をより明確にし、一般公衆と構造設計者の意識の差を埋めるべく、建築物の性能を明確にした設計法に関する研究が各所で進められ、性能を具体的に記述する手段である要求性能マトリクスが提案されている[1)~4)]が、性能の具体的な表現や実設計への適用方法など、未だ試行錯誤の段階にある。特に、病院や発電所、工場など地震時あるいは地震後に要求される機能が一般の事務所や住宅と異なる特殊用途の建築物については、性能設計の考え方自体が明瞭ではない。また建築物の用途や機能の違いに着目した耐震設計の考え方については、Kanda and Shah[5)]による各種建築物の地震時被害費用を定量化し最適な信頼性レベルを設定する研究が見られるが、複数の性能レベルまでの展開はなされていない。

また、建設省建築研究所・(社)鋼材倶楽部[1)]、SEAOC[2)]、稲田ら[3)]が、建築物あるいは主要構造体のグレードに応じて3ないし4点の設計ポイントを要求する性能マトリクスを提案しているのに対し、松本[4)]は1点を設計ポイントとする耐震メニューを示している。複数の設計ポイントを用いた場合、各地震動レベルに対し建築物がどのような状態にあるか明確ではあるが、通常のS造、RC造では、設計上の煩雑さを伴う恐れがある。特に、構造形式を問わずに要求性能に基づく限界状態を規定し、地震動レベルと関連づけると、設計ポイント毎の安全余裕が異なり、結果として、明示したはずの性能が不明瞭になる恐れがある。従って、RC造とするか、S造とするか、あるいは免震構造や制振構造を採用するかなど、構造形式が未定の基本計画段階においては、建築物に要求する性能に応じて、設計ポイントを任意に選択できる共通の要求性能マトリクスが現実的である。

本論では、特殊用途建築物と一般建築物の根本的な違いは建築物の機能にあると考え、機能の違いを要求性能に反映させることにより、一般建築物と連続性のある各用途の建築物の耐震設計法を構築することが可能と考える。この考えに基づき、一般建築物と連続性を持ち各種用途の建築物に対しても適用可能な“建築物の機能”に着目した要求性能に基づく耐震設計法の考え方を示す。具体的には、Fault Tree Analysis（FTA）におけるモデル化の考え方を取り入れ、

本論文は，文献6)～9)に加筆したものである。

* 東京電力株式会社　Tokyo Electric Power Company
** 東電設計株式会社　Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.
*** 新日本製鐵株式会社　工博　Nippon Steel Corporation, Dr. Eng.
**** 東京工業大学建築物理研究センター　教授・工博　Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

建築物がある機能を満足するためには、建築物を構成する各要素が対応する何らかの性能を保持すべきと考え、地震後の建築物の機能レベルに応じた各要素の設計法を提案する[6]。また、基本計画段階において建築主の要求を取り入れた合理的な構造計画が可能となるよう、建築物の機能に応じて任意に設計ポイントを選択できる要求性能マトリクスを提示する。さらに、特殊用途建築物の例として火力発電所タービン建屋を取り上げ具体的な設計のクライテリアの検討[7]を行うとともに、設計用地震力を設定するための考え方[8),9)]を示す。

2. 建築物の機能と構成要素の性能

人が生活を営むための空間が建築物であるととらえると、建築物の機能とは、その建築物内で業務を含む日常の生活活動を確保することと考えることができる。従って、地震時、あるいは地震後に、人命の確保、人の出入り、生活活動が営めるかなどが、その建築物の機能を判断する目安となる。

地震の後に、柱・梁などの構造要素や内容物など、建築物を構成する要素が健全であり、かつライフラインなども健全であるとすれば、上述の建築物の機能は満足される。一方、構造要素が健全であっても、いずれかの内容物が被害を受け、補修や交換が必要となり、再使用できないような状況に陥ると建築物の機能は損なわれることから、地震後の建築物の機能レベルは、構造要素だけでなく内容物の損傷度合いにも依存する。すなわち、FTAの考え方を用いれば、「建築物の機能喪失」をトップ事象と考え、建築物の構成要素が「ANDゲート」で連結され、それらのいずれかが損傷するとトップ事象に至るツリーによりモデル化が可能である。従って、建築物に対する地震後の機能要求を定めることにより、構造要素など構成要素の目標性能レベルが明確化され、部材の耐震設計クライテリアを規定することが可能となる。

この考え方は、地震後に要求される機能が一般の建築物と異なる病院や発電所など特殊な用途の建築物についてもあてはまる。表1に特殊な用途の、あるいは特殊な機能が要求される建築物と、各々の地震後に要求される機能の例を示すが、例えば、病院の集中治療室の機能を地震後も確保するためには、構造要素、天井材などの非構造要素、照明器具などの建築設備機器が本来の性能を満足するだけでなく、医療機器や非常用電源などの固有の内容物も健全である必要がある。また、これらのいずれかが性能に支障を来すと集中治療室の機能は損なわれる。従って、集中治療室に対する地震後の機能要求を明確にすることにより、各構成要素の目標性能レベル、すなわち耐震設計のクライテリアを設定することができる。

耐震設計を行うにあたって基本となる、地震後の建築物の機能レベルを表2に示す。DF0は、建築物本来の機能に支障はなく、何らかの損傷を被ったとしても通常のメンテナンスの範囲で対処できる状態とする。次に、DF1、DF2は機能が部分的、あるいは全面的に停止しているが、補修や部品交換などにより、本来の機能を回復することが可能な状態である。なお、補修に要する期間によって、短期的な機能障害（数時間から数日）や長期的な機能障害（数ヶ月から年単位）に分けることも考えられるが、現状では期間的な評価を行うことは難しいことから、期間を無視して考える。DF3は人命の確保を前提とするが、建築物の被害が甚大であり、補修等による建築物の機能回復が不能の状態である。DF4は、DF3を越え、人命に危害を及ぼす倒壊レベルを考える。これらの状態は、建築物の用途によらない共通の尺度として定義されるものである。表2では表現しきれない特殊用途建築物の機能レベルについては、その機能に応じて各機能レベルの状態を補足説明することにより、一般の建築物の機能レベルと連続性を保つことが可能となる。

次に、建築物を構成する各要素について、地震後の建築物の機能要求を満たすために必要な性能レベルを考える。筆者の一部ら[1]は、建築物の構成要素として、構造要素、非構造要素、内容物を定義し、それらの損傷と建築物の被害を関連付けた構造設計の考え方を示している。本論では、幅広い用途の建築物に対処するため、内容物をいずれの建築物でも通常設置される「建築設備機器」と、建築物の用途に応じて設置され建築物の機能に依存する「固有内容物」の2つの要素に分離する。上述のように、地震後の機能レベルが各要素の損傷度合に依存すると考えると、建築物の機能を満足するために必要な各要素のあるべき状態を表3のように表し、各要素の耐震設計

表1 特殊建築物の例

建築物	地震後に要求される機能	固有内容物
原子炉施設	放射線漏洩の防止	原子力機器、放射性物質、遮蔽壁
病院	集中治療室・手術室の機能維持	医療機器、非常用電源
発電所	発電機能	発電機、制御機器
美術館	美術品の保護	美術品
銀行	顧客情報・金庫のｾｷｭﾘﾃｨ	金庫室
計算機ｾﾝﾀｰ	計算機・ﾃﾞｰﾀの保護	計算機

原子炉施設は、内蔵する放射性物質に応じて耐震重要度分類、設計用地震力、許容限界が明確に規定されている[10]ことから、本論の対象外とする。

表2 建築物の機能レベル

DF0	機能に支障なし
DF1	機能は完全停止ではないが低下している。何らかの補修を行うことにより、機能を回復することが可能
DF2	機能は完全に停止するが、何らかの補修を行うことにより、機能を回復することが可能
DF3	補修による機能回復が不能、ただし人命は確保される
DF4	補修による機能回復が不能であり、人命に危害を及ぼす

表3 機能要求を満足するために必要な構成要素の性能レベル

機能レベル	構造要素	非構造要素	建築設備機器	固有内容物
DF0	DM1	DN1	DQ1	DC1
DF1	DM2−	DN2−	DQ2−	DC2−
DF2	DM2＋	DN2＋	DQ2＋	DC2＋
DF3	DM3	DN3	DQ3	DC3

構造要素：柱・梁・ブレース・耐震壁・基礎・杭・地盤．．．
非構造要素：間仕切り壁・仕上げ材・雑壁．．．
建築設備機器：電気設備機器・空調設備機器・衛生設備．．．
固有内容物：当該建築物の用途に応じて設置される上記以外の物
DM1：簡易補修要、早急な補修は不要
DM2−：早急な補修が必要（部分的）
DM2＋：早急な補修が必要（全面的）
DM3：補修不能、非倒壊
DN1,DQ1,DC1：補修の必要なし
DN2−,DQ2−,DC2−：一部補修または部品交換しないと本来の性能がない
DN2＋,DQ2＋,DC2＋：全面的補修または部品交換しないと本来の性能がない
DN3,DQ3,DC3：本来の性能回復不可能

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

の目標とすることができる。ここで、各要素の性能レベルは、最左欄の機能レベルを満足するために最低限必要な性能と定義され、いずれか1つでも下位になると機能要求を満足できないことを表している。また、各要素の状態は互いに独立とし、他の要素が全て健全であるとしたとき、機能要求に応じた当該要素のあるべき状態を示している。すなわち、建築物の各機能レベルがトップ事象であり、その事象を満足するための各要素の状態が下位事象である。

表3において、柱・梁などの構造要素を例に取ると、建築物本来の機能に支障のないDF0を満足するためには、多少のクラックや塑性変形が生じたとしても早急な補修を要さない状態としてDM1を考える。機能低下、あるいは機能停止を伴うDF1、DF2に対しては、補修や取り替えによる復旧が可能であることを前提に、その規模が部分的な場合にはDM2－、全体的な場合にはDM2＋とする。この状態は、梁端部の塑性化、ブレース座屈などが対応する。機能回復は不可能であっても人命確保を前提とするDF3では、補修は不能であるが非倒壊の状態であるDM3を定義する。フレーム構造では、全層の梁にヒンジが形成され、倒壊は免れるものの建替えが必要な状態が対応する。また、DF4に対応する構造要素の性能は、DF3を越える状態であり目標性能レベルとなり得ないことから定義しない。さらに、非構造要素や設備機器等についても、補修や部品交換の要否、それが部分的であるか全面的であるかによって、DF0～DF3に対応する性能レベルが各々定義できる。

また、構造要素の過度の変形による非構造要素の損傷や、大きな応答加速度による美術品や計算機の被害を避けるために、非構造要素や固有内容物の性能レベルに応じて、構造要素に課される層間変形角や応答加速度の制限を別途考慮する必要がある。

3．　建築物の機能に基づく耐震設計法

前節では、地震後に要求される建築物の機能レベルと、それに応じた建築物を構成する各要素の目標性能レベルを示した。本節では、荷重（地震動）レベルと機能レベルを関連づけ、地震後の機能要求に基づく耐震設計を行うための基本となる要求性能マトリクスを示す。

3．1　基本要求性能マトリクス

表2に示した建築物の機能レベルと、想定すべき荷重レベルを組み合わせることにより、表4の要求性能マトリクスが得られる。ここで、L1～L4で表す荷重（地震動）レベルの具体的な数値の議論は本論の検討対象外とするが、建築研究所の例りによれば、それぞれ再現期間20年、100年、500年、1000年などの地震動レベルが考えられる。また、例えばL1≒（C_0=0.2）、L2≒（25kine）、L3≒（50kine）≒（C_0=1.0）とすると、現行の耐震設計法はA0-C3、高層建築はB0-C3と位置付けられる。本論では、表4を基本要求性能マトリクスと呼ぶ。

基本要求性能マトリクスは、基本計画段階に建築主と構造設計者が議論する際に用いられることを前提とし、構造種別は特定せず、また建築物のグレード間の関連はなく設計ポイントを任意に複数選択できるものとする。そうすることにより、例えば、ある程度高い地震動レベルまで機能に支障のないことが要求される病院や防災拠点となる建築物では「L3またはL4に対しDF0を目標機能レベルとし、C0またはD0の１点で設計する」、あるいは、多少大きめの地震動に対しては機能低下を許容するが、大地震動に対しても人命を確保する必要のある建築物では、「L4地震動に対してDF3（グレードD3）を基本条件に、L1地震動に対しDF1（グレードA1）であることを確認する」といった選択を行うことができる。ただし、ライフラインの停止などに対する配慮は別途必要である。さらに、建築物の用途や構造形式を問わず、この基本要求性能マトリクスを共有することにより、当該建築物が他に比べどのような位置づけにあるかを対比することが可能となる。

3．2　２次要求性能マトリクス

表3に示した構造要素の性能レベル（DM1～DM3）では、具体的な構造形式は特定されておらず、各構造形式毎に構造要素の性能レベルを明示する必要がある。構造要素の一般的な性能レベル（DM1～DM3）と個材の具体的な性能の関係を、構造形式毎に表5、及びそのイメージとして層の荷重－変形関係の概念を図1に示す。表3では、構造要素の最低の性能レベルとして、多少のクラックや塑性化を許容する状態としてDM1を定義したが、ここでは、現行の建築基準法との対応、並びに設計の簡便さを考慮し、許容応力度レベルとして新たにDM0を定義する。DM0は構造要素に何ら損傷が生じていない状態であり、DF0に対し、DM0、DM1のいずれを選択しても良いものとする。在来のＳ造、RC造のフレーム構造では、ブレース

表4　基本要求性能マトリクス

荷重ﾚﾍﾞﾙ		L1	L2	L3	L4
機能レベル	DF0	A0	B0	C0	D0
	DF1	A1	B1	C1	D1
	DF2	A2	B2	C2	D2
	DF3	A3	B3	C3	D3

A0～D3：建築物のグレード

表5　２次要求性能マトリクス

構造要素の性能	Ｓ造、ＲＣ造		免震構造			制振構造（パッシブ型）	
	柱・梁	ブレース	上部構造	アイソレータ	ダンパー	主体構造（柱・梁）	制振部材
DM0	許容応力度内	許容応力度内	許容応力度内	弾性域内	ほぼ弾性域内	ほぼ弾性域内	塑性化
DM1	梁にヒンジが形成されていない	局部座屈	－	－	－	－	－
DM2－	梁に部分的にヒンジ形成	一部が全面座屈、破断	－	一部ハードニング	一部が大きく塑性化、破断	－	一部が大きく塑性化
DM2＋	梁にヒンジ形成	全面座屈、破断	梁にヒンジ形成	一部破損	大きく塑性化、破断	一部塑性化	大きく塑性化、破断
DM3	保有耐力以下	－	保有耐力以下	限界変形以下	－	終局変形以下	－

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

に多少のクラックや局部座屈が生じているとしても梁は全塑性モーメント以下でヒンジが形成されておらず、早急な補修は不要な状態をDM1、またDM2では、梁にヒンジは形成されても補修可能な状態、DM3は崩壊メカニズムを形成する保有耐力以下の状態を考える。免震構造については、上部構造が降伏耐力を越えると塑性変形が急激に進展する恐れがあり[12]、塑性域での応答の制御は難しいことから上部構造が塑性化すると全面的な改修が必要になるものとする。またアイソレータやダンパーの損傷は、建築物の機能低下や停止を伴うことから、DM1の状態は存在しないことになる。ただし、DM0の状態を高い地震動レベルまで確保しやすいことが免震構造の特徴である。柱梁など常時荷重を支持する主体構造とダンパーなどの制振部材から構成されるパッシブ型制振構造では、補修可能な状態であるDM2＋まで主体構造は正の剛性を有する必要があるため、主体構造の塑性化は一部の部材にとどめる必要がある。

以上の表中の表現が設計におけるクライテリアに対応する。あらかじめ構造形式毎に性能レベルを定義しておくことにより、表4にて設計ポイントを選択すれば、自動的に荷重と設計クライテリアを結びつけることが可能になる。本論では、表5に示す要素の一般的な性能レベルと個材の具体的な性能の関係を２次要求性能マトリクスと呼ぶ。２次要求性能マトリクスは、基本要求性能マトリクスの補足資料と位置づけられ、構造形式を選択する際の基本的な情報を与えるものである。また、非構造要素や設備機器等についても、同様な２次要求性能マトリクスを考える必要がある。

次に、非構造要素等の性能レベルによって構造要素に要求される制限値を考える。非構造要素の耐力が無限ではなく、ある程度合理的な値であるとすれば、構造要素を設計する際、変形などの応答量が制約される。設備機器や固有内容物などについても、この考えは当てはまるものと考えられることから、構造要素を設計する際には、純粋な構造的クライテリアだけでなく、他の要素の性能レベルに応じて、応答加速度や層間変形角等の制限が課される。表6には、建築学会指針[13]に示される軽量鉄骨下地フレキシブルボードの実験データに基づき設定した構造要素に課される層間変形角の制限値の例を示す。この表では、非構造要素の損傷を許容しない場合（DN0）には、層間変形角を1/200以内に抑える必要があることを表している。ただし、非構造要素側の支持方法等で対処する場合には、この値は緩和される。また上記指針に従って入力地震動の基準震度を0.3として設計された非構造要素は、これを越える入力に対する保証はないこと、また指針による設計用水平震度式と応答加速度の違いに留意する必要がある。いずれにしても、内容物は無論、非構造要素についても制限値は明瞭ではないのが実状である。建築物の機能に着目した設計体系を考えるにあたっては、構造要素以外の要素についても、破壊機構などの性能を明確にする必要があろう。特に、非構造要素などの性能を非構造要素側のみで確保するのか、あるいはそれを満足するために応答層間変形角や応答加速度をあるレベル以下に抑える必要があるかにより、構造要素の設計クライテリアが異なる。

表6　非構造要素の性能と構造要素の応答制限の例

性能レベル	層間変形角
DN0	1/200
DN1	1/125
DN2－	1/30
DN2＋	－
DN3	－

3．3　総費用最小化原理に基づく荷重評価

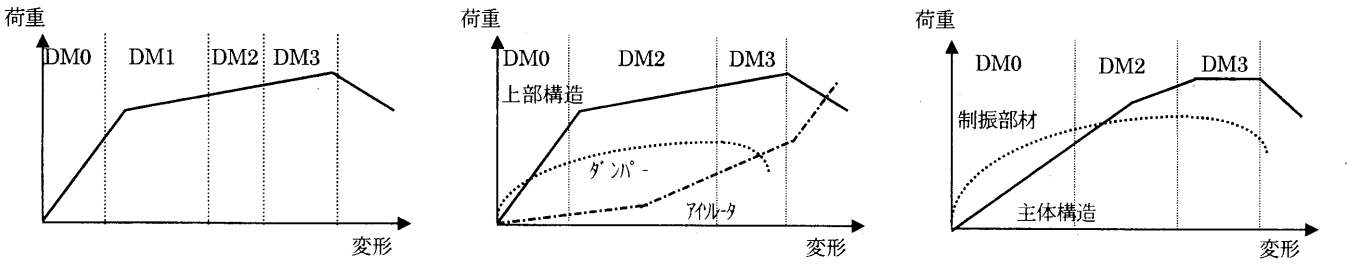
建築物の機能、荷重、並びに構成要素の設計クライテリアが関連づけられた。ここでは、基本要求性能マトリクスを用いて設計ポイントを選択する際の荷重評価に関し、建築物の初期建設費用、被害発生時の費用（被害費用）を考慮した方法を述べる。

荷重qで設計された建築物の期待総費用C_Tは、初期建設費C_I、被害費用C_F、被害発生確率P_Fを用いて(1)式で表される。

$$C_T(q) = C_I(q) + \sum_{i=1}^{n} \{{}_iP_F(q) \times {}_iC_F\} \quad (1)$$

ただし、iは考慮する被害事象を表す。

総費用最小化原理[14]によれば、設計荷重qの上昇に伴い、右辺第1項の初期建設費は増加し第2項の期待被害費用は減少することから、複数の荷重レベルに対し期待総費用を試算し、期待総費用の最小値を与える荷重qが、最適荷重となる。建築物の限界状態として終局状態のみを考え、その時の破壊時損失費用（被害費用）の初期建設費用との比率（g：破壊時損失指標）から目標とする最適な信頼性レベルを略算する手法は神田[15]により提案されており、gをもとに建築物の荷重評価を行うことが可能である。また、gが大きくなると最適信頼性指標βが大きくなり、設計荷重も大きくなることも指摘されている。本論で述べてきたように、建築物の複数の機能レベルを考慮する場合には、この考え方を拡張し、各機能レベルを超過したときの被害費用をもとに期待総費用を算出するとともに、その期待総費用に影響する機能レベルを評価する必要がある。各建築物毎に最適荷重の評価を行うことは煩雑さを伴い現実的ではないが、少なくとも、他に比べ期待被害費用が極めて大きくなる恐れのあるものについては個別の評価を、また建築物の用途に応じて設計荷重の



a)　S造、RC造　　b)　免震構造　　c)　制振構造（パッシブ型）

図1　構造形式毎の性能レベルの概念

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

定性的な傾向を事前に評価しておく必要があろう。

以上述べてきた基本要求性能マトリクス、２次要求性能マトリクス、並びに考慮すべき荷重の考え方は、建築物の用途を問わず適用できるものであり、特殊な用途の建築物についても用途や機能に応じて表2を補足することにより、一般の建築物と連続性を保った耐震設計を行うことができる。建築主、並びに構造設計者は、基本計画段階において、表4～6、並びに(1)式をもとに、当該建築物の設計ポイント、及び最適な構造形式を選択することになる。

4．　火力発電所タービン建屋の設計法

本節では、特殊用途建築物の一例として、内容物のコスト、地震後に要求される機能の面から特殊性が高い、ACC型（高効率ガスタービン型）火力発電所タービン建屋を取り上げ、3節で述べた設計法の具体的な展開を図る。対象建築物は、平面形が約150m×60m、高さ約40mの3階建て鉄骨ブレース構造であり、内部に4系列の発電機器を有している。発電機器が設置される3階は、部屋区分のない平面形が約150m×60mの大空間になっており、スパン長約60mのトラス梁が用いられている。なお、本節では建屋の耐震性を検討することを目的とし、内部に収容される発電機器類の耐震性については建屋の耐震性を評価する上で考慮するが、機器類の耐震性そのものを論じるものではない。

4．1　要求性能マトリクス

タービン建屋に要求される機能は、発電機器類を内部に収容し天候に左右されることなく発電機能を維持すること、また定期点検（約1年に1度）を円滑に行えることである。そして、これらの機能を満足するために、発電機、タービン、配管、ケーブル、制御機器、大型クレーン等が設置され、建屋内に大規模な点検スペースが確保されている。これら発電機器類が建屋建設費の数倍という非常に高価なものであり水平震度0.3Gに対し耐震設計されていること、大地震に見舞われた際、早期に復旧し電力を供給する義務を負っていること、また通常の運転時には内部にほとんど人がいないことが本建屋の特徴である。さらに、ACC型タービン建屋は複数系列の発電システムを収容しており、各系列が独立に発電を行うことが可能である。

要求性能マトリクスを構築するに先立ち、タービン建屋の機能レベルを考える。上述のように、特殊機能としては、「発電機能」及び「定期点検の実施」の２つがあげられる。地震後に構造要素、非構造要素、建築設備機器が健全であるとしたとき、発電機能レベルは発電機器類の被害状況に依存し、逆に、いずれかの要素の損傷により建屋の機能が損なわれると、発電機能も同時に損なわれる。そこで、建屋の機能として発電機能を考え、発電機器類を建屋を構成する要素の一つと考える。次に、「定期点検の実施」については、「広義の発電機能」を満足するためには「定期点検の実施」が不可避であることから、「定期点検の実施」を「発電機能」を満足するための構成要素の一つとして扱う。このように考えることにより、タービン建屋の機能は、表2に示した通常の建築物としての機能に、タービン建屋固有の機能である「発電機能」を加味し、表7のように表現できる。DF0～DF3の建築物としての機能に対応するタービン建屋固有の機能は、DF0では発電、並びに定期点検の実施に支障がないこととし、仕上げ材の落下による機器類の損傷は無論、補修のために大規模な足場を組むことも避ける必要がある。DF1は、ACC型の特徴である複数系列の発電システムを収容していることを勘案し、当建屋の使用を一部中止し、1ないし2系列は発電ができないが、他の系列については発電可能な状態を考える。また、点検スペースに足場などを組むことにより、定期点検の期間や方法を見直す必要がある場合も、DF1とする。DF2では、建屋や機器の補修作業のために、全面的に発電不能であるが再発電が可能な状態を考える。また、DF3は、建屋の倒壊にまでは至らないものの、配管類の破断、あるいは発電機基礎の大破などにより、補修によっても当建屋での発電を再開することが不可能であり、建て替えが必要な状態とする。

次に、各機能レベルを満足するために必要となる各要素の性能は、構造要素、非構造要素、建築設備機器については表3と共通であり、固有内容物として発電機器の状態、定期点検の実施方法が新たに加わり表8のように設定できる。各要素の性能が満足されない場合には、建屋機能である発電機能が満足されないことになる。また、発電機器や定期点検の詳細な性能レベルは検討の対象外ではあるが、発電機器の性能を満足するために建屋の応答層間変形角や応答加速度が制約されることがあることから、タービン建屋としての機能レベルに応じたこれらの性能を考慮する必要がある。

構造要素や非構造要素の設計クライテリアとなる2次要求性能マトリクスは、基本的には表5と共通である。表9に、上部構造と、液状化の恐れのある地盤に立地し鋼管杭で支持されることを前提とした基礎構造を合わせ、当建屋の2次要求性能マトリクスを示す。なお、ここでは、大スパンを有することから、RC造は選択の対象外とする。表6に示したような、発電機器等からの構造要素の応答の制限については、評価に耐えるデータが乏しいのが実状である。現状では、応答加速度として機器の設計地震力レベル程度、応答層間変形角とし

表7　火力発電所タービン建屋の機能レベル

機能レベル	建築物としての機能（表2による）	タービン建屋固有の機能
DF0	機能に支障なし	発電、定期点検に支障なし
DF1	機能低下、機能回復可能	当建屋の使用を一部中止（1 or 2 系列発電不能）定期点検時期、方法を見直す必要あり
DF2	機能停止、機能回復可能	当建屋の使用を全面中止
DF3	機能回復不能、人命確保	当建屋での発電再開不能

表8　機能要求を満足するために必要な要素の性能レベル

機能レベル	構造要素	非構造要素	建築設備機器	発電機器	定期点検の実施
DF0	DM1	DN1	DQ1	DP1	DI1
DF1	DM2－	DN2－	DQ2－	DP2－	DI2－
DF2	DM2＋	DN2＋	DQ2＋	DP2＋	DI2＋
DF3	DM3	DN3	DQ3	DP3	DI3

DM1～DM3、DN1～DN3、DQ1～DQ3　：表3による
DP1　：補修の必要なし
DP2－　：一部補修または部品交換しないと本来の機能がない
DP2＋　：全面的補修または部品交換しないと本来の機能がない
DP3　：本来の機能を回復不可能
DI1　：支障なく定期点検可
DI2－　：定期点検の時期・方法の見直し
DI2＋　：当面、定期点検の実施不可能
DI3　：定期点検実施不可能

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

ては通常用いられる1/100などを採用せざるを得ない。また、非構造要素や設備機器についても、発電機器への影響を加味した同様なマトリクスを構築する必要がある。

4．2　設計地震力レベルの評価

1)　検討条件

上述の(1)式を用いて、総費用最小化原理に基づき、上部構造を在来のS造としたタービン建屋を対象に設計地震力レベルを評価する。地震時の機能被害として、表7に示したDF0～DF3の4段階を考える。機能被害に対応する各要素の限界状態は、構造要素については、DM1、DM2－、DM2＋、DM3に対しそれぞれ限界層間塑性率1.0、1.5、2.0、3.2を越えた状態、非構造要素については、DN1、DN2－、DN2＋、DN3に対し層間変形角1/200、1/150、1/100、1/50を越えた状態と規定する。限界塑性率は、既設建屋の保有耐力時の塑性率を勘案して定めた。

発電機器の損傷については、建屋の設計地震力レベルを評価することが本論の目的であることから、建屋の損傷に起因してのみ損傷するものとし、表10のように条件付き確率を与える。建屋損傷に起因する機器被害（DP1～DP3）としては、機器設置レベル以下の下層部の大変形に伴う機器配管類の損傷、及び機器より上層部が過大に変形し天井材等が落下することによる損傷を考慮する。さらに、発電機器の損傷（DP1～DP3）に対応して、電力の供給障害（DF0～DF3）が生じるものとする。

なお、人的被害については通常は人の出入りがほとんどないことから、また、定期点検の実施に関わる被害費用については定量的評価が難しいことから考慮せず、建築設備機器は発電機器に含める。

構造要素・非構造要素の各被害レベル毎の被害費用については、兵庫県南部地震における建築物の補修費用の評価例[16]を参考に、図2(a)のように設定する。ここで縦軸は、1次設計用ベースシャー係数C_0=0.2として設計した建屋の建設費（発電機器を除く）に対する比である。また機器被害、供給障害については、発電機器の被害程度に応じてそれぞれ図2(b)のように設定する。なお、以降、DM1とDN1を合わせて「簡易補修」、DM2－とDN2－を「部分補修」、DM2＋とDN2＋を「全面補修」、DM3とDN3を「補修不能」、また、DP2－とDF1を合わせて「一部発電不能」、DP2＋・DF2を「全面発電不能」、DP3・DF3を「発電再開不能」と呼ぶ。供給障害による被害費用は、兵庫県南部地震の際に電力が1週間程度で復旧した事例を参考に、DF1では2系列が1週間発電停止、DF2では4系列全て1週間発電停止、DF3では、4系列全て4週間発電停止とし、その期間の電力の売り上げ損失を見込む。これは、電力設備はネットワークで構成されていること、並びに発電所が被災する場合には供給エリア内でも多数の被害が生じ電力需要が落ち込むことから、補修や建て替え期間全てに対し売り上げ損失を見込むことは過大評価になるとの判断に基づいている。また、比較のために、供給障害による被害費用を無視した場合についても設計地震力を評価する。なお、以上の条件は、筆者らが設計的な判断のもとに定めたものである。

次に、(1)式のqに対応する設計地震力レベルは、現行の設計法が1次設計用のベースシャー係数C_0=0.2を最低基準としていることから、その3倍までの範囲を対象に、C_0=0.2、0.25、0.3、0.35、0.4、0.5、0.6の7ケースを用いる。非構造要素を含めた建屋初期建設費C_Iは、設計地震力がC_0=0.2から0.4に増加すると20%上昇するものとする。この値は事務所ビルを対象とした既往の研究[17]にて言われている5～10%に比べ大きいが、タービン建屋では仕上げ材等が簡素であり、建屋建設費に占める構造要素の比率が高いとの判断に基づき設定したものである。

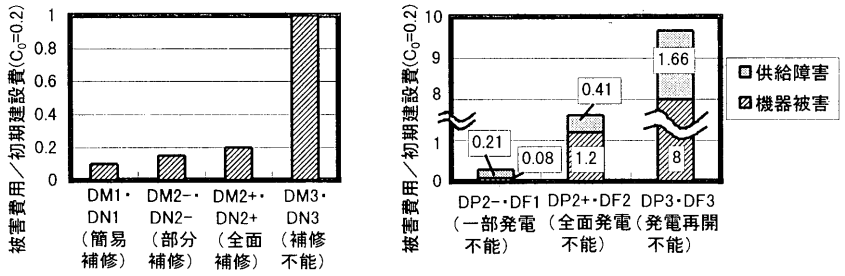
建屋の損傷度解析はTanaka et al.[18]の手法に従い、各設計地震力レベルのケース毎に上記の限界値に対する超過確率を、質点系モデルを用いた非線形応答解析により算定する。各ケースのスケルトン

表9　火力発電所タービン建屋の2次要求性能マトリクス

構造要素の性能	上部構造			基礎		
	S造	免震構造	制振構造	基礎ﾏｯﾄ	杭	地盤
DM1	表5による			降伏強度以下	無被害	部分的な液状化
DM2－				鉄筋一部降伏	杭頭部の一部破損	－
DM2＋				－	杭頭部の破損 杭地中部の一部破損	全面的な液状化
DM3				鉄筋全面降伏 ｱﾝｶｰﾎﾞﾙﾄ破断	杭地中部の全面破損	－

表10　機器被害の条件付き確率

		層間変形角			
		1/200～	1/150～	1/100～	1/50～
下層部の変形による機器被害	DP1	0.2	－	－	－
	DP2－	0.8	0.5	0.2	－
	DP2＋	－	0.5	0.8	－
	DP3	－	－	－	1.0
上層部からの落下による機器被害	DP1	1.0	0.9	0.6	0.3
	DP2－	－	0.1	0.3	0.3
	DP2＋	－	－	0.1	0.3
	DP3	－	－	－	0.1



a)　建屋被害　　b)　機器被害・供給障害

図2　被害レベルと被害費用

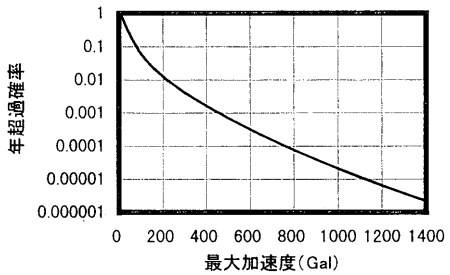


図3　地震危険度曲線

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

カーブは、降伏強度を第1折れ点とするバイリニア型とし、降伏耐力、剛性はそれぞれ設計用ベースシャー係数に比例するものと仮定する。また、地震危険度の評価はAnnaka and Nozawa[9]による手法を用いるものとする。地震危険度曲線を図3に示す。年超過確率10^{-2}で約220Gal、10^{-3}で約450Galとなっている。

2) 期待総費用と設計地震力

建屋の供用期間を30年としたときの、期待総費用の算出結果を図4に示す。縦軸は建屋の初期建設費（C_0=0.2）で基準化している。総費用最小化原理によれば、C_0=0.2から0.6の範囲における最適な1次設計用地震力はC_0=0.6となる。また、同図中の破線は、供給障害による費用を0とした時の期待総費用曲線である。供給障害による被害費用を無視すると最適荷重はC_0=0.5に低下する。図5には、各ケース毎の期待被害費用の内訳を示す。これによると、「発電再開不能」と「全面発電不能」が非常に大きな比重を占めていることがわかる。「発電再開不能」が大きな比重を占めた理由は図2に示したように被害費用が大きいためであるのに対し、「全面発電不能」は事象の発生確率が大きいことに起因している。これは、下層部の応答層間変形角が1/150～1/100に対しDP2＋の条件付き確率を50%と、比較的頻度の高い地震動に対しても生じやすい被害事象と仮定しているためである。また、設計用ベースシャー係数が上がると、「発電再開不能」の期待被害費用は大きく改善されるが、「全面発電不能」や「全面補修」はさほど改善されない。これは、設計用ベースシャー係数の増加に伴い、「発電再開不能」に至らしめる地震動レベルが約400Galから1200Galに増加し、図3に示した地震危険度曲線によると10^{-3}程度超過確率が低下するのに対し、「全面発電不能」や「全面補修」に対応する地震動レベルは約170から500Galであり超過確率の低下量は10^{-1}～10^{-2}とさほど大きくないことに起因している。

3) 機器耐力を考慮した設計地震力

上記の検討では、被害費用の大きな機器被害を、建築物の損傷に起因させて生じさせた。つまり、C_0=0.6のケースでは、0.6G程度の応答加速度が生じたとしても、構造要素、非構造要素が弾性範囲にほぼ収まるため、機器が損傷する確率は極めて小さいものとなる。本検討で対象としている機器は、現実には、0.3Gに対し設計されているため、それ以上の応答に対し機器自体が健全である保証はない。厳密には機器の損傷度曲線を評価すべきであるが、評価に耐えうるデータが限られているため、機器の耐力を確定的なパラメータとして検討を行う。

先の検討では、建築物の設計地震力レベルが上がるにつれ、機器の損傷確率を部材の損傷確率に対応して低下させたが、ここでは機器の損傷確率はある設計地震力レベル以上になっても低減されないとの仮定を導入する。具体的には、機器耐力C_0=0.3の場合の機器の損傷確率は、設計用ベースシャー係数C_0=0.3のケースで得られた値以下に低減させず、建屋の設計用ベースシャー係数が0.35から0.6と上昇したケースに対してもC_0=0.3のケースで得られた機器の損傷確率を用いるものとする。なお、機器耐力の変動に伴う機器の建設費用の変動については、建築物の耐震設計レベルを検討することが本論の目的であること、また機器の耐震設計に関わる費用はアンカーボルトなどの支持部材が主であり機器耐力の変動に対し鈍感であると考え無視するものとする。以上の仮定の下に、機器耐力をC_0=0.2～0.5と変動させた際の、各設計用ベースシャー係数毎の期待総費用を図6に示す。図中には先のケース（C_0=∞）も合わせて示す。これによれば、機器の耐力を考慮することにより、建築物の最適設計地震力レベルはC_0=0.25～0.5程度に減少し、機器耐力C_0=0.2のケースを除いて機器耐力と最適地震力は同一になっている。また、機器の耐力レベル以上では、期待総費用曲線は平坦になり、建築物の設計レベルを機器耐力と同等程度としても、期待総費用の観点からは有意な差が見られない。さらに、機器耐力C_0=0.2のケースでは、設計用ベースシャー係数C_0=0.2から0.6まで同一の機器損傷確率を与えていることから、期待総費用曲線は、機器の損傷を無視し建屋損傷のみを考慮したケースに、機器被害・供給障害に関する一律の期待被害

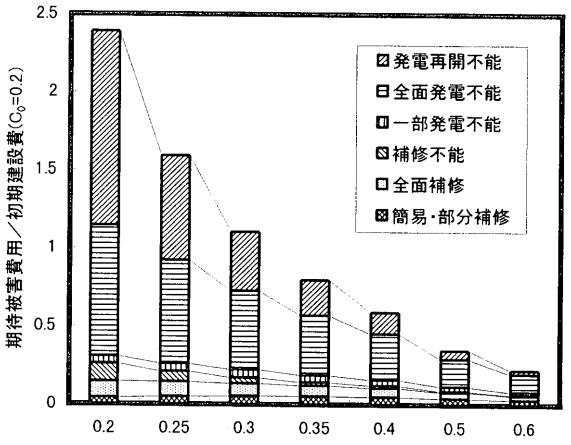


図5 期待被害費用の内訳

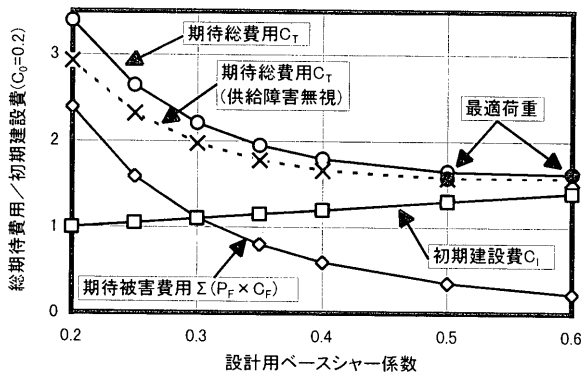


図4 期待総費用

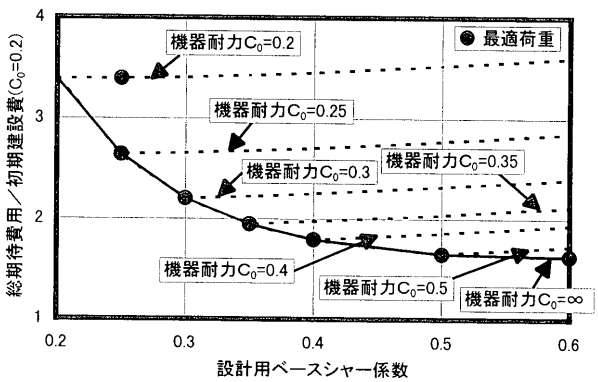


図6 機器耐力を考慮した期待総費用

NII-Electronic Library Service

Architectural Institute of Japan

費用を見込んだものになっている。従って、機器被害・供給障害を無視した場合の最適荷重も0.25となり、本論で用いた機器耐力以上では損傷確率は低下しないとの仮定のもとでは、機器耐力を0.25以下にしても、最適地震力は変動しないことになる。以上述べたように、総費用最小化原理に基づき荷重評価を行う場合には、被害費用の大きい内容物の耐震設計レベルと、建築物の設計レベルを整合させることが合理的である。

以上の結果を先の基本要求性能マトリクスにあてはめると、期待総費用最小化の観点から機器設計荷重と同等の地震力に対し建築物としての機能が損なわれることがないようにベースシャー係数C_0=0.3に対しDF0、また「全面発電不能」による期待被害費用が大きいことから、再現期間500年の地震動に対しDF2といった目標性能を定めることができる。また、免震構造、制振構造についての設計地震力の評価についても同様な方法で可能であり、それらを踏まえた目標性能と、表9に示した2次要求性能マトリクスから最適な構造形式を選択するとともに、個材の設計クライテリアが決定される。

5. 結論

本論では、特殊な用途の建築物に対しても適用可能な建築物の機能に着目した要求性能に基づく耐震設計法を提案するとともに、一例として火力発電所タービン建屋を対象に、具体的な設計クライテリア、並びに設計地震力の考え方を示した。本検討の結果、以下のことが明らかになった。

1）建築物に対する地震後の機能要求を定めることにより、構造要素など建築物を構成する要素の目標性能レベルが明確化され、耐震設計のクライテリアを規定することが可能となる。

2）建築物の機能要求と建築物のグレード、荷重の関係を示す基本要求性能マトリクス、並びに建築物の機能要求に応じた個材の具体的な性能を表す2次要求性能マトリクスを用いることにより、基本計画段階において、設計ポイントを任意に選択し合理的な構造計画が可能となる。

3）本論で示した建築物共通の機能表現、及び要求性能マトリクスをもとに、用途に応じた特殊な機能や固有の内容物を考慮することにより、一般建築物と連続性のある特殊用途建築物の耐震設計が可能である。特に、基本要求性能マトリクスを共有することにより、当該建築物が他に比べどのような位置づけにあるのか対比することができる。

4）期待総費用最小化原理に基づき、建築物の設計地震力の評価を行うことが可能であり、被害費用の大きな機器等を内蔵する場合には、機器の耐震設計レベルと建築物の設計レベルを整合させることが合理的である。

本論で示した方法には、非構造要素の設計クライテリアの定量化や地震時の被害費用の算出方法など解決すべき課題は残されているが、将来的には、実現可能であると考える。特に、要求性能に基づく設計法の実用化へ向け、非構造要素等の性能、並びに非構造要素等からの要求により構造要素に課される変形や応答加速度の制限を明確にしていく必要がある。また、現実の設計において設計ポイントを選択する際には、各グレードに応じて、どのような構造形式となるのか、コストはどの程度か、また既往の地震動に対しどのような損傷状態となるのか、あるいは損傷確率はいかほどか等、自動車のカタログのような補足資料を予め整え、判断の材料とすることが望まれる。

謝辞

設計法の検討、火力発電所タービン建屋の各要素の性能の設定にあたり、新日本製鐵（株）前田泰史氏、東京電力（株）大島豊氏、西村功氏、東電設計（株）青柳隆之氏のご助言をいただきました。また、総費用最小化原理に基づく荷重評価に関し、東電設計（株）安中正氏、太田孝平氏、清水建設（株）高田毅士博士、菊地優博士、神原浩氏の御協力をいただきました。記して深謝いたします。

参考文献

1)建設省建築研究所，（社）鋼材倶楽部：新設計体系研究会報告書，1995.2
2)Structural Engineers Association of California : VISION 2000 Performance Based Seismic Engineering of Buildings- Final Report, 1995.4
3)稲田達夫ほか5名：性能型構造設計法についての考察（その2：要求性能マトリクスの考え方），日本建築学会大会学術講演梗概集，C－1，pp.687-688，1997.9
4)松本光平：安全のレベル設定の試み，日本建築学会・兵庫県南部地震特別研究委員会特定研究課題 WG2 第5回「耐震設計に要求される安全のレベル」連続シンポジウム 「耐震安全性の制御の可能性」 －安全レベルの設定に向けて－，pp.15-18，1997.1
5)Kanda, J. and Shah, H. : Engineering role in failure cost evaluation for buildings, Structural Safety, Vol.19, No.1, pp.79-90, 1997
6)中村紀吉ほか5名：要求性能に基づくプラント建築物の耐震設計法（その1 建築物の機能と設計クライテリア），日本建築学会大会学術講演梗概集，B－1，pp.65-66，1997.9
7)岸野泰章ほか5名：要求性能に基づくプラント建築物の耐震設計法（その2 火力発電所本館の耐震設計の考え方），日本建築学会大会学術講演梗概集，B－1，pp.67-68，1997.9
8)中村紀吉ほか5名：リスクに基づく耐震重要度定量化の試み（その1：事務所建築物），日本建築学会大会学術講演梗概集，B－1，pp.71-72，1997.9
9)福島誠一郎，成川匡文，中村紀吉，岸野泰章：リスクに基づく耐震重要度定量化の試み（その2：プラント建築物），日本建築学会大会学術講演梗概集，B－1，pp.73-74，1997.9
10)原子力安全委員会：発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針，1981.7
11)小波佐和子，岩田衛，田村和夫，和田章：建築物が寿命中に受ける総地震被害に注目した耐震設計に関する一考察，日本建築学会構造系論文集，第502号，pp.165-171，1997.12
12)小崎均：免震建物の地震に対する設計、シンポジウム「免震構造の研究と設計」，pp.1-5，日本建築学会免震構造小委員会
13)日本建築学会：非構造要素の耐震設計指針・同解説および耐震設計・施工要領，1985.11
14)Kanda, J. and Ellingwood, B. :Formulation of load factors based on optimum reliability, Structural Safety, Vol.9, pp.197-210, 1991
15)神田順：重要構造物の要求安全性設定のための破壊時損失指標，日本建築学会大会学術講演梗概集，B，pp.1005-1006、1993.9
16)神田順，平川倫生：終局限界状態以前に発生する破壊時費用の評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，B－1，pp.69-70，1997.9
17)神田順ほか4名：地震荷重を変動させた時の各種建物の建設費について，日本建築学会大会学術講演梗概集，B，pp.15-16、1994.9
18)Tanaka, H., Yashiro, K., Fukushima, S., and Kai, Y. : Application of Fragility Analysis Method to Realistic Structure, 14th SMiRT, Vol. 10, pp.143-150, 1997.8
19)Annaka, T. and Nozawa, Y. : A Probabilistic Model for Seismic Hazard Estimation in the Kanto District, 9WCEE, Vol.II, pp.107-115, 1988.8

（1997年12月10日原稿受理，1998年4月2日採用決定）

NII-Electronic Library Service