

資料 1—4 ダムの距離減衰式に含まれる各種パラメータの設定方法

ダムの距離減衰式^{1) 2)}を用いてダム地点の地震動を推定する際には、ダムの距離減衰式に含まれるパラメータを設定するため、あらかじめ文献資料等をもとにダム地点周辺に位置する活断層やプレート境界について以下の情報を整理する必要がある。

- ① 断層面の位置と範囲
- ② ダム地点と断層との距離（最短距離および等価震源距離）
- ③ 当該断層で発生する地震の規模（マグニチュード）

しかし、文献資料等からこれらの全ての情報が得られるとは限らず、断層長さ等の限られた情報しか得られない場合も少なくない。このような場合の取り扱いを含め、ダムの距離減衰式を用いて地震動推定を行う場合に、同距離減衰式に含まれる各パラメータを設定するための方法を以下に述べる。

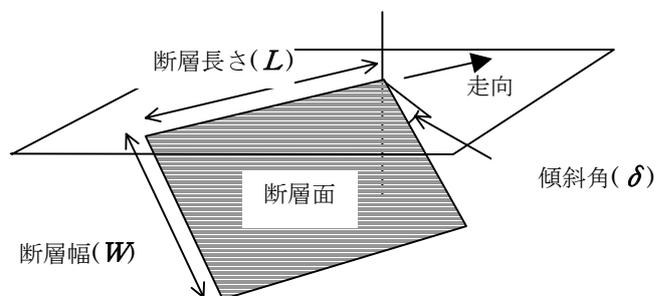
なお、断層モデルの設定にあたっては、地震調査研究推進本部地震調査委員会が公表している強震動評価のレシピア³⁾（強震動評価における震源特性、地下構造モデル、強震動計算方法、予測結果の検証の手法や設定にあたっての考え方まとめたもの）やレベル2地震動の設定手法に関する最近の調査研究成果⁴⁾等、照査を行う時点で最新の考え方について示されている資料についてもあわせて参考にするのがよい。

1. 断層面の位置と範囲

ダムの距離減衰式による地震動推定においては、当該断層で発生すると想定される地震の規模（マグニチュード）、断層面とダム地点間の距離、断層面中心の地表からの深さ等のパラメータを設定しなければならない。これらの各パラメータの設定にあたっては、まず断層面の位置と範囲についての情報を整理する必要がある。

断層面の位置と範囲に関する情報としては、具体には ①断層長さ L と走向、②断層幅 W 、③断層面の傾斜角 δ などがある（図—1.4.1）。

文献資料に基づきこれらを設定する場合に一般的に想定される方法について、内陸の活断層に起因する地震を想定する場合と、プレート境界地震を想定する場合について、それぞれ以下に述べる。



図—1.4.1 断層面の位置と範囲を規定するために必要となるおもな情報

(1) 内陸の活断層に起因する地震を想定する場合

①断層長さ(L)および走向

断層長さおよび走向は、ダム地点周辺に位置する活断層を地質学的あるいは地震学的な調査研究成果に基づく文献資料等（活断層の分布図等）に示されている断層の位置図を参照して設定することができる。

ここでいう断層長さは、単に一本の断層の長さではなく、一回の地震に対応して活動する一連の断層の長さを意味している。このため、多数の断層が密集する断層群（全体として帯状をなす場合は断層帯とも呼ばれる）あるいは複数の区間（セグメント）から構成されているものとして評価されている一連の断層については、それらが1つの地震として同時に活動する可能性について考慮した上で、断層長さを適切に設定する必要がある。

例えば、文献資料等において複数の区間から構成され、そのうち各区間の活動の可能性が示されている場合、同時に活動する可能性が高いと評価されている区間については、その全体を断層長さとみなして検討するのが適切と考えられる。

なお、文献資料等からそのような情報が得られない断層群や断層帯については、例えば松田ら⁵⁾による「起震断層の設定基準」が参考となる。この基準は、日本列島陸域の既知の活断層をそれぞれ独立して1つの大地震を起こす単位（起震断層）にまとめる際に採用された考え方で、以下の活断層または活断層群を、大地震を起こすひとまとまりの断層（帯）として評価している。

- 1) 周辺 5km 以内に他の活断層線のない、孤立した長さ 10km 以上の断層
- 2) 互いの相互間隔が 5km 以内である、ほぼ同じ走向の断層群
- 3) 断層線の midpoint の位置が主断層線から 5km 以上離れている、走向を異にする断層（付随断層あるいは分岐断層）⁶⁾

②断層幅(W)

断層面の範囲を設定するには断層長さとともに断層幅に関する情報が必要となる。断層幅は、過去の地震記録等から当該断層付近で発生した小地震の発生域を調べることで推定できる場合もあるが、断層幅に関する情報が文献資料等から得られる場合は少ない。

しかし、内陸の活断層に起因する地震に関するこれまでの調査研究により、ある規模までの地震では断層長さに比例して断層幅も大きくなるが、ある規模以上の地震では推定される断層幅がほぼ一定になる傾向があると指摘されている⁷⁾。この傾向を踏まえた式 (1.4.1) のような断層長ささと断層幅に関する経験的な関係式を用いれば、断層幅に関する情報が不明の場合にも断層長さに関する情報をもとに、ある程度の精度で断層幅を推定することができる⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。

$$W = \begin{cases} k \cdot L & (L < W_{max} \text{ の場合}) \\ W_{max} & (L \geq W_{max} \text{ の場合}) \end{cases} \quad \text{-----} \quad (1.4.1)$$

ここに、

W : 断層幅、 k : 比例定数、 L : 断層長さ、 W_{max} : 断層幅 W の上限値 ^{注)}

なお、ある規模以上の地震において断層幅がほぼ一定になる理由は、地震により破壊される断層面の幅が上部地殻の地震発生層の厚さ W_s （微小地震の発生範囲と対応し、その深さ分布から推定できる¹¹⁾。）により、断層幅が $W \leq W_{max} = W_s / \sin \delta$ （ δ : 地表面に対する断層面の傾斜角）に制限されるためと考え

られている。

注) 式 (1.4.1) 中に含まれるパラメータの値 (k および W_{max}) については、例えば武村⁷⁾ によれば $k=2/3$ 、 $W_{max}=13\text{km}$ 、Somerville et al.⁸⁾ によれば $k=1$ 、 $W_{max}=W_s/\sin \delta$ ($W_s \leq 20\text{km}$)、入倉ら⁹⁾ によれば $k=0.955$ 、 $W_{max}=16.6\text{km}$ とその評価がやや異なる。これは主に検討対象とした地震等、統計解析の前提条件が異なることに起因する相違であると考えられる。なお、地震調査研究推進本部地震調査委員会が公表している強振動評価のレシピア³⁾では $k=1$ 、 $W_{max} \leq 20\text{km}$ と示されている。

③ 断層面の傾斜角 (δ)

ダム地点から震源となる断層面までの距離を求める際には、地表面に対する断層面の傾斜角に関する情報が必要となる。これらの情報は、文献資料等で断層面の傾斜角が示されている場合はその値を用いることが基本となる。しかし、トレンチ調査等をもとに断層面の傾きが推定されている場合や、過去の地震記録等から当該断層付近で発生した小地震の発生域を調べることでその値を推定できる場合等を除き、断層面の傾斜角について文献資料等からは直接情報を得ることができない場合が多い。明確な情報が得られない場合には、横ずれ断層か縦ずれ断層か、また周辺の地質構造等に関する知見等からの仮定や、幾つかのケースを設定してダム地点への影響を検討するなどの対応も考えられる。

④ その他

図一1.4.1では、断層面の上端を地表面としているが、断層によっては、微小地震の観測結果により求められる地震発生層の範囲から、文献資料等において断層面の上端の深さ (d) に関する情報が得られる場合もある。このような場合には、これを考慮してもよい。

ダムの距離減衰式に含まれるパラメータのひとつに、断層面中心の地表からの深さ (H_c) がある。この値は、断層面の形状を矩形と仮定して上記のような考え方で断層面の位置と範囲を設定することができれば、その中心点の地表からの深さとして算出できる。

(2) プレート境界地震を想定する場合

ダム地点周辺に位置し、その再来を想定して地震動推定の対象とする過去のプレート境界地震については、その震源として提案されている震源モデル¹²⁾ や、推定されているプレート境界の形状等をもとに、断層面としてのプレート境界の位置と範囲 (長さ L 、走向、幅 W 、傾斜角 δ 等) を設定することができる。

2. ダム地点と断層との距離

ダムの距離減衰式による地震動の推定では、震源までの距離を最短距離により評価する方法と等価震源距離により評価する方法がある。それぞれの場合の考え方について以下に述べる。

なお、震源位置は推定されているものの、震源となった断層が特定されていない歴史地震に関する情報をもとに、同様の地震の再来を想定してダム地点における地震動を推定する場合には、震源を点とみなしてダム地点との距離を算出することとなる。

(1) 最短距離 (R)

最短距離は、対象とする断層面の位置と範囲が設定できれば、その断層面のうち、ダム地点から最も近い点とダム地点を結ぶ直線の長さとして求めることができる。

(2) 等価震源距離 (X_{eq})

断層面から発散される地震のエネルギーと等価となる仮想的な点震源とダム地点間の距離として定義される等価震源距離は、断層面を多数の小領域に分けた上 (図一1.4.2) で、次式によって算出することができる。

$$X_{eq}^{-2} = \sum_k M_{ok}^2 X_k^{-2} / \sum_k M_{ok}^2 \quad \text{-----} \quad (1.4.2)$$

ここに、 M_{ok} : 断層面内の小領域 k における地震モーメント

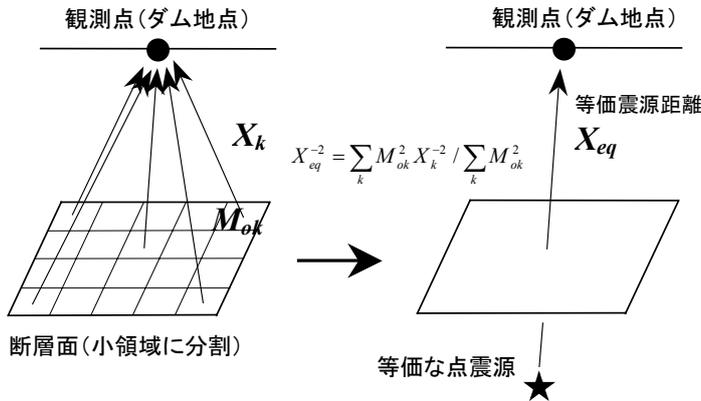
X_k : 断層面内の小領域 k から観測点 (ダム地点) までの距離

なお、断層面内の小領域における地震モーメント M_{ok} は、当該小領域における地震によるすべり量、地盤の剛性率および小領域の面積の積である。断層破壊理論に基づき断層は断面全体の地震規模を表す物理指標として用いられる地震モーメント M_o は、この M_{ok} を地震により破壊される断層面全体にわたって積分することにより求められる。

また、断層面を小領域に分割した場合、一般には各領域で M_{ok} の値は異なると考えられるが、その分布に関する情報が得られない場合も多い。このような場合には、便宜的に M_{ok} を断層面全体で一様と仮定することにより、等価震源距離の算定式 (1.4.2) は、次式のようになる。

$$X_{eq}^{-2} = \frac{1}{N} \sum_k X_k^{-2} \quad \text{-----} \quad (1.4.3)$$

ここに、 N : 断層面の小領域への分割数



図一1.4.2 等価震源距離の概念

3. 当該断層で発生する地震の規模 (M)

ダムの距離減衰式における地震の規模 M は、気象庁マグニチュード M_j により与えることとされている。したがって、当該断層で発生すると考えられる地震の規模が、文献資料等において M_j により示されている場合には基本的にその値を用いることができる。しかし、断層によっては文献資料等からは位置と長さしか判明せず、地震の規模についての情報が得られない場合や、断層で発生する地震について地震モーメント M_o の値が推定されている場合 (主要なプレート境界地震等) もある。

以下では、特にこのような場合にダムの距離減衰式に用いる地震の規模 M を推定する方法について述べる。

(1) 内陸の活断層に起因する地震を想定する場合

当該活断層に起因すると考えられる地震の地震モーメント M_o が与えられている場合は、次の換算式を用いることにより、ダムの距離減衰式に用いる地震の規模 $M (=M_j)$ を設定することができる。

$$\log M_o [\text{dyne-cm}] = 1.17 M_j + 17.72 \quad \text{-----} \quad (1.4.4)^{13)}$$

なお、地震モーメント M_o の値が不明の場合を含め、文献資料等から地震の規模に関する情報が得られない場合には、例えば、断層長さ L と当該断層で発生する地震の規模の関係について、従来から経験的に得られている次の関係式を用いて地震の規模 (M_j) を設定する方法がある。

$$\log L [\text{km}] = 0.6 M_j - 2.9 \quad \text{-----} \quad (1.4.5)^{14)}$$

また、最近では、断層面積 $S (=L \times W)$ と地震モーメント M_o の関係についての以下のような経験式を用い、断層長さ L に応じ、式 (1.4.1) において $L < W_{max}$ の場合には式 (1.4.6)、 $L \geq W_{max}$ の場合には式 (1.4.7) を用いることにより M_o を推定する方法も提案されている⁴⁾。この方法により、 M_o を推定した上で、式 (1.4.4) により地震の規模 (M_j) を設定することもできる。

$$S [\text{km}^2] = 2.23 \times 10^{-15} \cdot M_o^{2/3} [\text{dyne-cm}] \quad (L < W_{max} \text{ の場合}) \quad \text{-----} \quad (1.4.6)^9)$$

$$S [\text{km}^2] = 4.24 \times 10^{-11} \cdot M_o^{1/2} [\text{dyne-cm}] \quad (L \geq W_{max} \text{ の場合}) \quad \text{-----} \quad (1.4.7)^{15)}$$

(2) プレート境界地震を想定する場合

震源となった断層のモデルが推定されている主要なプレート境界地震については、文献資料等において地震モーメント M_o の値が示されている場合がある。このような場合には、以下に示す M_o と気象庁マグニチュード M_j との関係についての経験式などを用いることにより、ダムの距離減衰式に用いる地震の規模 $M (=M_j)$ を設定することができる。

$$\log M_o [\text{dyne-cm}] = 1.5 M_j + 16.2 \quad \text{-----} \quad (1.4.8)^{12) 17)}$$

なお、地震モーメント M_o の値が不明の場合には、例えば、断層面積 $S (=L \times W)$ と地震モーメント M_o の関係について提案されている次のような経験式を用いて M_o を推定することができる。

$$S [\text{km}^2] = 1.88 \times 10^{-15} \cdot M_o^{2/3} [\text{dyne-cm}] \quad \text{-----} \quad (1.4.9)^{18)}$$

参考文献

- 1) Matsumoto, N., Yoshida, H., Sasaki, T. and Annaka, T.: Response spectra of earthquake motion at dam foundations, Proc. Twenty-first International Congress on Large Dams (2003)
- 2) 松本徳久・吉田 等・佐々木 隆・安中 正: ダムサイトでの地震動の応答スペクトル, 大ダム, No. 186, pp. 69-76 (2004)
- 3) 地震調査研究推進本部 地震調査委員会: 「全国を概観した地震動予測地図」報告書 分冊 2(震源特性

を特定した地震動予測地図の説明) (2005)

- 4) 片岡正次郎・日下部毅明・村越潤・田村敬一：想定地震に基づくレベル2地震動の設定手法に関する研究, 国土技術政策総合研究所研究報告, No.15 (2003)
- 5) 松田時彦・塚崎朋美・萩谷まり：日本陸域の主な起震断層と地震の表一断層と地震の地方別分布関係一, 活断層研究, 19, pp.33-54 (2000)
- 6) 松田時彦：最大地震規模による日本列島の地震分帯図, 地震研究所彙報, vol.65, pp.289-319 (1990)
- 7) Shimazaki, K.: Small and large earthquakes: The effect of the thickness of seismogenic layer and the free surface, Earthquake Source Mechanics, Am. Geophys. Union. Geophys. Monogr, 37 (1986)
- 8) 武村雅之：日本列島における地殻内地震のスケーリング則一地震断層の影響および地震被害との関連一, 地震2, 51巻, pp.211-228 (1998)
- 9) Somerville, P., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N. and Kowada, A.: Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seism. Res. Letters, 70, 1, pp.59-80 (1999)
- 10) 入倉孝次郎・三宅弘恵：シナリオ地震の強震動予測, 地学雑誌, 110巻6号, pp.849-875 (2001)
- 11) Ito, K.: Seismogenic layer, reflective lower crust, surface heat flow and large inland-earthquakes, Tectonophysics, 306, pp.423-433 (1999)
- 12) 佐藤良輔：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会 (1989)
- 13) 武村雅之：日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係, 地震2, 43巻, pp.257-265 (1990)
- 14) 松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震2, 28巻, pp.269-283 (1975)
- 15) 入倉孝次郎：強震動予測レシピ一大地震による強震動の予測方法一, 京都大学防災研究所年報47号A, pp.25-45 (2004)
- 16) 三宅弘恵・岩田知孝・釜江克宏・宮腰研・香川敬生：周期帯域に応じた強震動評価法の高精度化, 地震災害軽減のための強震道予測マスターモデルに関する研究, 平成12年度科学技術振興調整費研究成果報告書, pp.209-233 (2001)
- 17) Sato, R.: Theoretical basis on relationship between focal parameters and earthquake magnitude, Jour. Phys. Earth, 27, pp.353-372 (1979)
- 18) 金森博雄：地震の物理, 地震の物理, 岩波地球科学選書, 岩波書店 (1991)

資料 1—5 ダムサイトにおける地震動の各種推定手法とその特徴

震源等の情報をもとに、ある地点での地震動を推定する手法は、一般に①経験的手法、②半経験的手法、および③理論的手法の3種類に大別される。それぞれの特徴等について以下に述べる。

①経験的手法

距離減衰式等、過去に発生した地震の震源に関する情報と実際に観測された地震動に関する情報との関係等を統計的に分析して得られた結果をもとに、想定する地震によってダム地点において発生する地震動を推定する方法である。過去にダム基礎岩盤で実際に観測された多数の地震動記録に基づき、ダム地点での地震動（加速度応答スペクトル）を推定する「ダムの距離減衰式」（資料 1—1）もこのひとつである。

距離減衰式をはじめとする経験的手法は、地震の発生機構や地震波の伝播過程等をモデル化して考慮するものではないが、想定地震の震源となる断層に関する情報が限られている場合にも適用できることから、実用的な方法である。

②半経験的手法

同じ断層において発生する大規模地震と小規模地震の震源特性の違いは、震源の相似則で説明できるものと仮定して、小規模地震による地震動波形を重ね合わせることで大規模地震による地震動波形を合成する手法である。

この半経験的方法の代表的な手法としては、検討対象とする断層における地震による地震動として当該地点において実際に観測された小規模地震による地震動波形を用いる「経験的グリーン関数法」や、検討対象とする断層に小規模地震による地震波形記録がない場合に人工的に合成した小規模地震による地震動波形を重ね合わせて大規模地震による地震動波形を作成する「統計的グリーン関数法」と呼ばれる方法がある。

いずれも、想定地震の震源となる断層の位置、形状、破壊過程などを適切にモデル化する必要がある。

③理論的手法

断層で発生し地盤中を伝播する地震波を3次元差分法や有限要素法を用いて理論的に計算する方法である。想定地震の震源となる断層のモデル化に加え、断層と地震動予測地点の間の領域（伝播径路）についても適切にモデル化する必要がある。

ただし、地震動の短周期成分については、伝播経路や対象地点近傍の地盤の微細な構造に大きく影響を受けるため、この手法はおおむね周期1 sec以上の長周期成分が適用範囲となるとされている。

このため、長周期成分に対しては理論的方法、短周期成分に対しては半経験的方法を適用し、双方の長所を有効に利用する方法（ハイブリッド法）も提案されている。

資料 1—6 加速度応答スペクトルに適合する時刻歴波形の作成方法

耐震性能照査のための時刻歴応答解析は、レベル 2 地震動の加速度時刻歴波形を入力地震動として行うこととなるが、この加速度時刻歴波形は、地震動の振幅特性に関する情報と位相特性に関する情報があれば、それらをもとに合成することができる。

しかしながら、加速度応答スペクトルには地震動の周波数領域における振幅特性に関する情報しか含まれていない。このため、ダム地点における地震動の推定をその加速度応答スペクトルの推定式であるダムの距離減衰式を用いて行う際や、照査用下限加速度応答スペクトルを有する地震動の加速度時刻歴波形としてレベル 2 地震動を設定する際には、ある加速度応答スペクトル（強震記録等）をもとに、これに位相特性に関する情報を付与して、目標とする加速度応答スペクトル（ここでは、ダムの距離減衰式により得られたダム地点の地震動の加速度応答スペクトル等）に適合する加速度時刻歴波形を作成することが必要となる。

このような場合の手法としては、振幅特性と位相特性のどちらかを調整するか等によりいくつかの方法が考えられるが、強震記録の位相特性は変化させず、強震記録の加速度応答スペクトルと目標スペクトルが実用上十分な精度で一致するまで、周波数領域における振幅特性を変化させて調整を繰り返す方法がある^{1) 2)}。

このような考え方により、ダムの距離減衰式により得られた加速度応答スペクトル等を目標スペクトルとし、また原種波形として強震記録を用いてダム地点における地震動の加速度時刻歴波形を求め手順は、例えば以下のようなものとなる。また、そのフローを図—1.6.1 に示す。

- 1) 模擬波（原種波形を初期値とする）の応答スペクトル $S_A'(f)$ を求める。
- 2) 模擬波の応答スペクトル $S_A'(f)$ を目標スペクトル $S_A(f)$ と比較することにより、その適合性の判定を行う。なお、適合性の判定方法の一例としては、以下の式による方法がある。

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^k (1-r_k)^2}{k}} \leq 5\% \quad \text{----- (1.6.1)}$$

ここに、

$$r_k = \frac{S_A(f)}{S_A'(f)} \quad \text{----- (1.6.2)}$$

k : スペクトル比較する周波数の数（計算する周波数は、模擬波のフーリエ変換の周波数と一致させる）

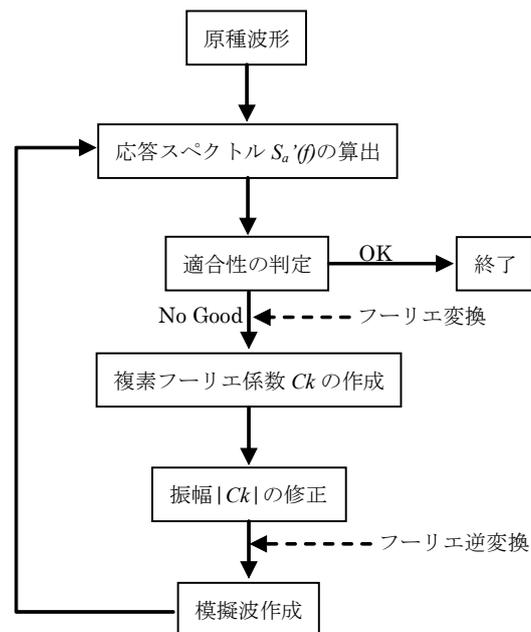
- 3) 適合性の判定により、両者がほぼ一致すると判定されれば、その模擬波が目標スペクトルに適合するよう調整された加速度時刻歴波形となる。一致しない場合には、例えば、以下のような方法により振幅 $|C_k|$ を修正する。

$$|C_k| \leftarrow r_k \cdot |C_k| \quad \text{----- (1.6.3)}$$

ここで、

C_k : 模擬波の複素フーリエ係数

- 4) 修正された振幅と模擬波の位相特性 ϕ_k を用いて、新しい模擬波をフーリエ逆変換により求める。
- 5) 以降、逐次修正された模擬波の応答スペクトルと目標スペクトルがほぼ一致するまで、上記の1)～4)の手順を繰り返すことにより、最終的に目標スペクトルに適合するよう調整された加速度時刻歴波形が得られる。



図一1.6.1 周波数領域における振幅調整による加速度時刻歴波形の作成方法の一例

参考文献

- 1) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会(1994)
- 2) 荒川直士・川島一彦、相沢興：応答スペクトル特性を調整した時刻歴地震応答解析用入力地震動波形，土木技術資料，第26巻，第7号，pp.46-51（1984）