

報告 既設 RC アーチ橋の耐震検討

渡辺 典男^{*1}・北沢 正彦^{*2}・幸左 賢二^{*3}

要旨：既設 RC アーチ橋について、大規模地震時における耐震検討を実施した。解析モデルは、全要素を Degrading Tri-linear モデル（武田モデル）により非線形性を考慮した。まず、予備検討として静的解析を行いアーチ橋の耐荷力機構を検討した。次に、動的解析を行い曲率塑性率およびせん断力を照査した。その結果、本橋は耐力的にはほぼ満足しており RC アーチ橋の耐震性の高さが伺えた。

キーワード：RC アーチ橋、非線形動的解析、振動モード、塑性ヒンジ

1. はじめに

阪神高速道路公団の「既設長大橋梁の耐震安定性評価に関する検討会」ではスパン 100 m 以上の既設特殊橋梁（アーチ橋、斜張橋、トラス橋等）の耐震検討を実施している。本報は、その中 RC アーチ橋について耐震検討結果を報告するものである。

アーチ橋は現行の道路橋示方書 V 耐震設計編（平成 8 年 12 月）（以下、道示 V）¹⁾では地震時の挙動が複雑なため地震時保有水平耐力法（以下、保耐法）の適用性が限定される橋として位置づけられ動的解析による検討が規定されている。対象橋梁の耐震設計は旧道路橋示方書（昭和 55 年）に基づき修正震度法により行われているため、道示 V に基づき耐震性を検討することとなった。以下に、本橋の振動特性を確認し静的解析により耐荷力機構を把握するとともに、動的解析結果および耐力照査結果を報告する。

2. 対象橋梁の概要

本橋の全体一般図を図-1 に示す。

- ・構造形式：RC 上路式固定アーチ橋
- ・上部構造：RC 中空床版
- ・下部構造：直接基礎、深礎基礎
- ・橋長：186m
- ・アーチ支間長：100m, アーチ矢高^{*}：25m
- ・幅員：12.829 m ~ 14.917 m
- ・平面線形：R = 2000 m ~ ∞
- ・地盤種別：I 種地盤
- ・使用材料：コンクリート設計基準強度

$$\sigma_{ck} = 27 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{鉄筋降伏強度 } \sigma_{sy} = 295 \text{ N/mm}^2$$

本橋は長大 RC アーチ橋として標準的な寸法を有する。支承はメナーゼヒンジ支承およびすべり支承を使用している。本橋の耐震設計は、旧道路橋示方書（昭和 55 年）に準拠して修正震度法により静的解析を行い許容応力度法および終局強度設計法により実施された。設計水平震度は、面内方向：kh=0.23、面外方向：kh=0.18 である。

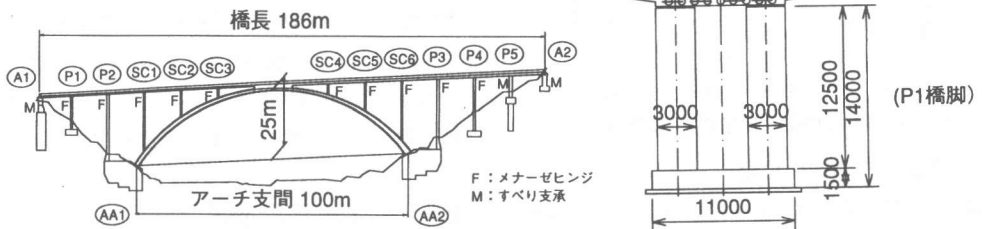


図-1 全体一般図

*1 大成建設株式会社 土木設計第一部橋梁設計室 工修 (正会員)

*2 阪神高速道路公団 工務部設計課課長 工博

*3 阪神高速道路公団 工務部設計課課長補佐 Ph.D (正会員)

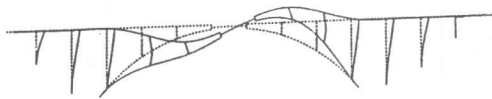
3. アーチ橋の振動特性

3.1. 橋軸方向振動

表一および図-2に振動数10Hz以下、刺激係数8.0以上の固有値解析結果を示す。橋軸方向では1次モードが卓越しその他の主要モードとして6,13,21次モードがある。1次モードは、アーチリブの変形が中心となり、アーチリブに追従して補剛桁が変形し全体としてアーチクラウン部を中心とした逆対称型となる。6次モードは、橋脚高の高い橋脚が独立して振動し、支承および基礎の条件から、上端をピン、下端を固定とした柱の振動となる。13次モードは、アーチリブの逆対称モードと鉛直材の振動モードとの複合型となる。

表一 橋軸方向の主要モードに対する固有値

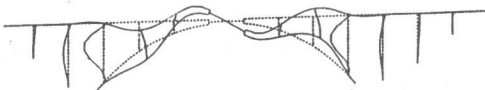
モード 次数	振動数 (Hz)	刺激 係数	備考
1	1.02	21.0	面内逆対称振動モード
6	3.20	8.5	橋脚および鉛直材の振動モード
13	3.55	8.0	面内逆対称振動モード
21	7.09	10.8	面内補剛桁の振動モード



a) 1次モード (f=1.02 Hz)



b) 6次モード (f=3.20Hz)



c) 13次モード (f=3.55 Hz)

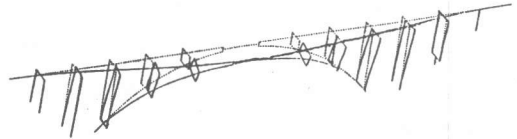
図-2 橋軸方向の代表的な振動モード

3.2. 橋軸直角方向の振動

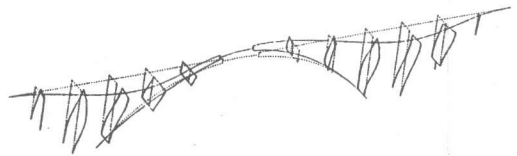
表二および図-3に振動数10Hz以下、刺激係数8.0以上の固有値解析結果を示す。橋軸直角方向では2次モードが卓越しその他の主要モードとして14,23次モードがある。2,14次モード形状は、橋の軸線を中心とした対称型となる。

表二 橋軸直角方向の主要モードに対する固有値

モード 次数	振動数 (Hz)	刺激 係数	備考
2	2.00	24.9	面外対称振動モード
14	4.22	10.7	面外対称振動モード
23	7.46	8.0	面外逆対称振動モード



a) 2次モード (f=2.00 Hz)



b) 14次モード (f=4.22 Hz)

図-3 橋軸直角方向の代表的な振動モード

4. 静的解析による耐荷力機構の検討

4.1. 解析目的および解析方法

動的解析に先立ち非線形静的解析により橋軸方向の耐荷力機構を検討する。検討方法は構造系全体に一樣な加速度を漸増載荷し慣性力とアーチクラウン部の水平変位との関係を調べる。

図-4に解析に用いた骨組みモデル図を示す。橋脚は、図-1のように2本柱式であり1本毎にモデル化した。構成要素は、全てDegrading Tri-linear型の非線形履歴モデル(武田モデル)を使用した。コンクリートの応力度-ひずみ曲線は、図-5に示す道示Vおよび道示IIIコンクリート橋脚²⁾を採用した。これまでの国内外の基準によれば設計基準強度 $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ 程度のコンクリートの終局ひずみ ϵ_{cu} は0.003~0.004を有することから³⁾、道示Vにより算出した終局ひずみ ϵ_{cu} が0.0035以下の場合は従来型の道示IIIを使用し、上回る場

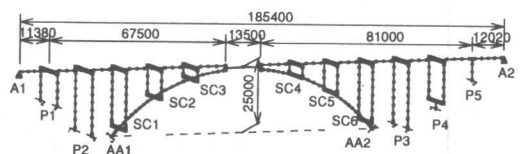
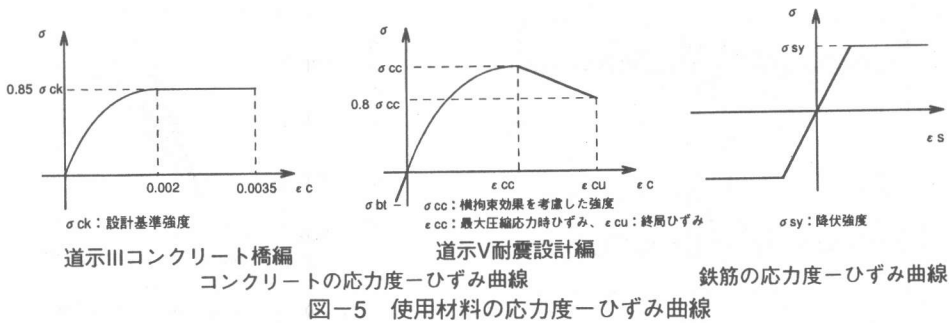


図-4 解析骨組モデル図



合は道示Ⅴを使用した。計算に用いる横拘束鉄筋については帯鉄筋および中間に配置されているせん断補強鉄筋を全て考慮した(帯鉄筋比:アーチリブ0.3~0.6%, 柱部材0.17%~0.4%)。

4.2. 耐力機構

水平方向の慣性力を漸増させると橋全体が1次振動モードに近い変形をした。図-6に慣性力を静的に漸増させたときの塑性ヒンジの形成過程を、図-7に水平震度とアーチクラウンの水平変位との関係を示す。本報では、塑性ヒンジの形成を最外縁の軸方向鉄筋の降伏で定義する。塑性ヒンジは、 $kh=0.280$ のときに最も短い鉛直材SC3の下端において最初に形成され、 $kh=0.372$ のときにアーチスプリング部において発生した。図-7より、この時点でのアーチ橋全体の剛性の低下は、緩やかなものであることがわかる。その後、塑性ヒンジは鉛直材SC2,SC5下端に形成され、 $kh=0.417$ にアーチリブにおける鉛直材SC3との接合部付近で塑性ヒンジが発生した。このとき、アーチリブには4つの塑性ヒンジが形成され、全体剛性が急激に低下し水平変位が増加することがわかる。以上より、本橋は、静的に水平慣性力を載荷させる方法では水平震度 $kh=0.42$ 程度でアーチリブ全体が降伏に達することが判明した。

5. 動的解析

5.1. 解析方法

解析方法は、静的解析と同様のモデルに対し時刻歴応答解析を行った。数値解析法は Newmark- β 法 ($\beta=0.25$) を採用し積分間隔を 0.0005sec とした。各部材の減衰は履歴減衰と Rayleigh 減衰を考慮した。履歴減衰は、非線形履歴モデルにより部材ごとに自動的に考慮される。Rayleigh 減衰は、

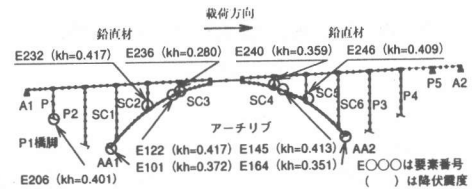


図-6 静的解析による塑性ヒンジの形成過程 (橋軸方向)

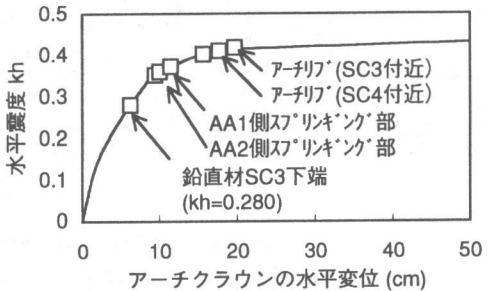


図-7 慣性力とクラウン部水平変位との関係

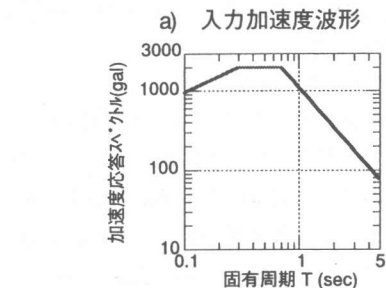
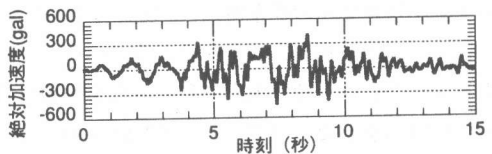


図-8 入力地震波 (タイプⅡ地震動Ⅰ種地盤)

非線形動的解析では部材の弾性挙動に対する減衰を与えるため、主要な固有振動数に対して求めたエネルギー比例型モード減衰により設定した。こ

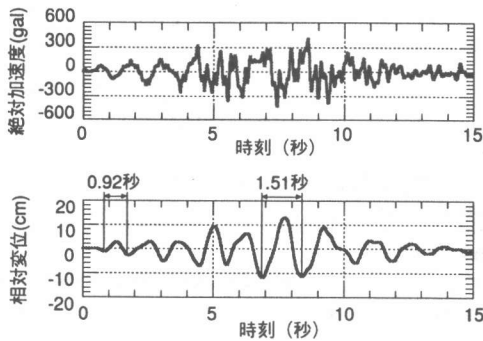


図-9 時刻歴応答波形（アーチクラウン部）
（橋軸方向）

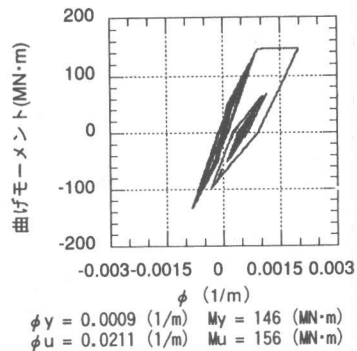


図-11 M- ϕ 履歴曲線（アーチスプリング部）
（橋軸方向）

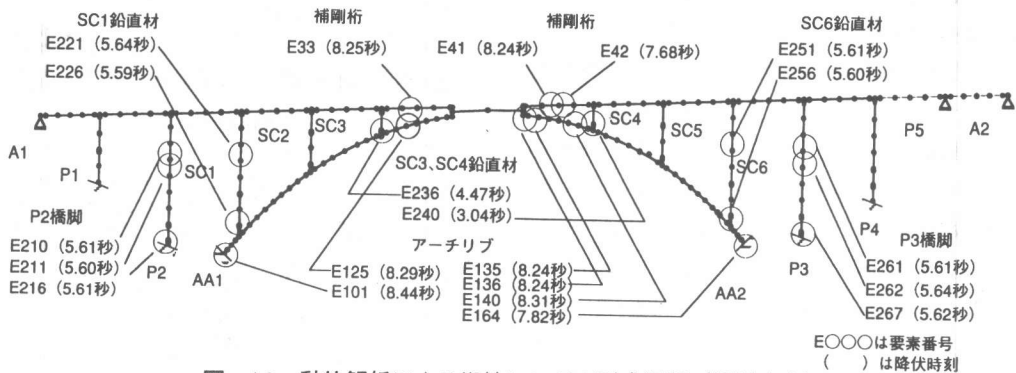


図-10 動的解析による塑性ヒンジの形成過程（橋軸方向）

ここで、各部材の減衰定数は道示Vを参考にして2%とした。入力地震波は、保耐法レベルのタイプII地震動I種地盤用の標準波形⁴⁾を使用した。図-8に入力加速度波形および加速度応答スペクトル図を示す。これは、神戸海洋気象台波形を振動数領域で振幅調整したもので、データ間隔は0.01sec、最大加速度は812galである。入力時間は主要動を含む15秒間とした。

5.2. 橋軸方向の解析結果

(1) 絶対加速度波形および相対変位波形

図-9にアーチクラウン部における水平方向の絶対加速度および相対変位応答波形を示す。相対変位波形において、各波形のピーク間は、初期時刻2秒付近では1次振動モードの周期に近い0.92秒に対し、最大断面力の発生時刻7秒付近では構造物が塑性化しており1.51秒まで延びていることが判明した。

(2) 塑性ヒンジの発生箇所および発生時刻

図-10に塑性ヒンジの発生箇所とその時刻を

示す。橋軸方向の特徴は、1次振動モードだけでなく他次振動モードの影響を受けて塑性ヒンジが形成されるところにある。塑性ヒンジの形成は、約3秒のときに最も短い鉛直材SC4下端において始まり、約5.6秒で脚柱部材の下端および中央部が降伏した。8秒前後でアーチスプリング部、アーチリブと補剛桁のアーチクラウン部周辺に発生した。塑性ヒンジの発生箇所について静的解析結果と比較すると、静的解析において初期段階で塑性化する部位（アーチスプリング部や鉛直材SC3,SC4下端）は同様の位置に見られるが、静的解析の後半でみられる部位（アーチリブの上方および柱部材）は動的解析のそれとは異なり、アーチ橋のような地震時の挙動が複雑な橋では動的解析により評価する必要があることがわかる。また、塑性ヒンジの形成位置および形成過程は入力地震波と構造物の振動特性から決まり一義的に断定することが難しいため、動的解析においてアーチ橋全体の耐力評価は非常に困難となることがわ

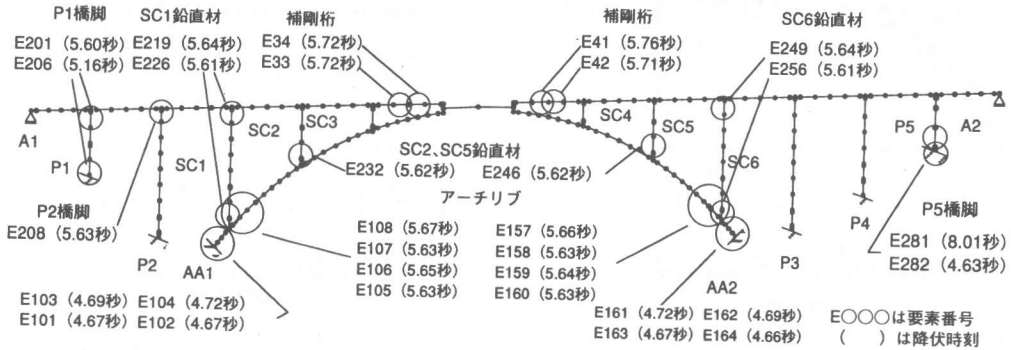


図-12 動的解析による塑性ヒンジの形成過程 (橋軸直角方向)

かる。

(3) M-φ履歴曲線

解析結果よりほとんどの部材でひび割れモーメントを上回る応答が発生していることが判明した。図-11 に代表としてアークスプリング部における M-φ履歴曲線を示す。応答曲げモーメントは降伏曲げモーメントを上回るが、最大応答曲率 φ_{max} は終局曲率 φ_u の 1/10 程度でありアーチリブの損傷程度が小さいことが伺える。他の部材についても応答が比較的小さいことを確認した。これは、部材の塑性化による履歴エネルギー吸収能が増加したことおよび剛性低下により構造物が長周期化したことにより応答が抑制されたためと考えられる。

5.3. 橋軸直角方向の解析結果

塑性ヒンジの形成過程について図-12 に示す。橋軸直角方向の特徴は、塑性ヒンジが主に 1 次振動モードにより形成され剛性の大きいアークスプリング部およびその周辺に集中するところにある。その他の塑性ヒンジの発生箇所として、橋脚・鉛直材では P1, P2, P5, SC1, SC2, SC5, SC6 の天端または下端、補剛桁ではアーチクラウン部周辺がある。塑性ヒンジの形成は、約 4.7 秒のときにアークスプリング部で始まり、約 5.6 秒にアークスプリング部周辺、橋脚・鉛直材および補剛桁へ拡大していることがわかる。

6. 耐力照査

曲げ耐力およびせん断耐力について照査を行い、以下に照査方法とその結果を示す。動的解析結果よりわかるようにアーク橋全体の耐力を算定する

ことが困難なため、各要素について耐力を算定し照査を行った。

6.1. 曲げ耐力照査

(1) 耐力照査方法

曲げ耐力の照査は、式(1), (2)により定義した許容曲率塑性率 μ_a および最大曲率塑性率 μ_{max} を比較して行う。

$$\mu_a = 1 + \frac{\phi_u - \phi_y}{\alpha \phi_y} \quad (1)$$

$$\mu_{max} = \frac{\phi_{max}}{\phi_y} \quad (2)$$

ここに、φ_y:降伏曲率、φ_u:終局曲率、α:安全係数 α=1.5、φ_{max}:最大応答曲率

(2) 耐力照査結果

図-13 に代表としてアーチリブの曲げ耐力照査結果を示す。全部材について最大曲率塑性率が許容値内に収まっており、許容値に対し比較的余裕があることがわかる。この傾向は、せん断耐力の照査についても同様のことがいえる。

6.2. せん断耐力照査

(1) 耐力照査方法

せん断耐力の照査は、せん断耐力 P_s と最大応答せん断力 S_{max} を比較して行う。せん断耐力 P_s は、道示 V⁽¹⁾ に準拠する。

(2) 耐力照査結果

図-14 に代表としてアーチリブのせん断耐力照査結果を示す。照査結果より、橋軸方向では最大応答せん断力がせん断耐力以内に収まっていることを確認した。橋軸直角方向では、アーチリブの端部および鉛直材との接合部においてはせん断補強鉄筋間隔が細かく (12.5cm ピッチ) 耐力的に

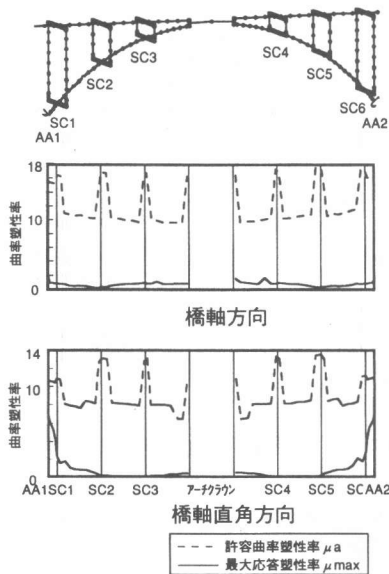


図-13 曲げ耐力の照査結果
(アーチリブ)

余裕があるが、その他の部位においては鉄筋間隔が粗く(25cmピッチ)耐力が低下しており鉛直材SC1-SC2間およびSC5-SC6間では耐力を上回るせん断力が発生した。現行示方書の構造細目の規定通りに密に($a=15\text{cm}$ 以下)配筋し軸方向の鉄筋間隔を変化させなければ、耐力的に問題なかったと考えられる。

7. まとめ

静的解析を行いアーチ橋の耐荷力機構を把握し、地震時保有水平耐力照査法レベルの地震波を用いて既設RCアーチ橋の耐震検討を実施した。塑性ヒンジの発生箇所について静的解析と動的解析結果を比較すると、静的解析において初期段階で塑性化する部位(アーチスプリング部および最も短い鉛直材)は同様の位置に見られるが、静的解析の後半でみられる部位(アーチリブの上および柱部材)は動的解析のそれとは異なり、アーチ橋のような地震時の挙動が複雑な橋では動的解析により評価する必要があることが判明した。耐力照査では、曲率塑性率およびせん断力を用いて部材ごとに耐震性の照査を行った。本検討では、RC固定アーチ橋が耐震性に優れた構造形式であることが伺えた。今回の照査は各部材(アーチリブ、橋脚・鉛直材)について同じ安全率を用いて

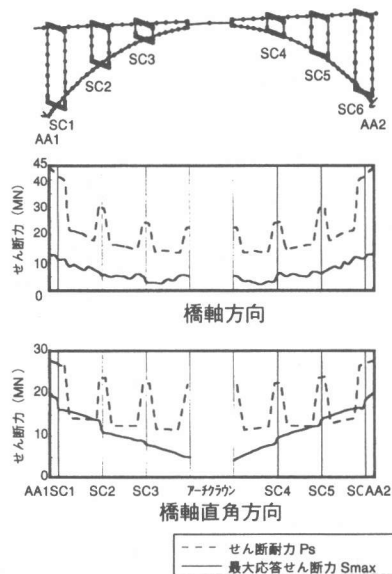


図-14 せん断耐力の照査結果
(アーチリブ)

同じ照査方法で行ったが、アーチ橋のような特殊橋梁では部材ごとに要求すべき耐震性能を考慮して安全率や照査方法を決定した方がより合理的な設計ができると考えられ、特に、アーチリブはアーチ橋の生命線となることや高軸力部材であり補修が困難であること等を考慮するとさらに高い性能を要求すべき部材と考える。

今回の検討は、既設橋梁に対する耐震検討であるが、アーチ橋に対し全要素を非線形モデルによりモデル化した動的解析例は少ないと考えられ、同種の橋梁の耐震設計を行う際に何らかの一助となれば幸いである。本報は軸力変動の影響を考慮しなかったが、現在、ファイバーモデルにより検討中であり、別の機会に報告することにする。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編，平成8年12月
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書IIIコンクリート橋編，平成8年12月
- 3) 土木学会：コンクリート技術の現状と示方書改訂の動向，1994.7
- 4) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，平成9年3月