

(56) 外ケーブル偏向部のフレッチング疲労特性に関する研究

住友建設(株)	技術研究所	正会員	○梅津健司
同上	同上	正会員	藤田 学
同上	土木設計部	正会員	新井英雄
北海道大学	工学部	正会員	上田多門

1. はじめに

互いに押しつけられ接触している2物体が、相対的に微小振幅の繰り返しすべり運動を行う現象をフレッチング (fretting) と称す。PC鋼材におけるフレッチング疲労は、軸方向応力変動に伴い、鋼材間に微小な相対変位による摩耗が起り、疲労強度が低下する現象である。外ケーブル構造は、大偏心配置 (エクストラード) 型も含めて我が国で普及する時期にあるが、この問題となる疲労特性に関する研究は、外国で数例あるのみで、国内における研究実績はほとんどないのが現状である。そこでPC鋼材のフレッチングに着目した疲労試験を行った。

外ケーブル方式の橋梁において活荷重 (LB 荷重) による変動応力は一般に、箱桁内部に配置された外ケーブルで 1 kgf/mm^2 以下、大偏心外ケーブルで 5 kgf/mm^2 以下であるが、今回の疲労試験では、PC鋼材のフレッチングによる破断性状を明らかにするため、それらより高応力である 12 kgf/mm^2 の振幅で行った。本稿では試験成果である、外ケーブル偏向部におけるマルチストランドの疲労寿命や破断性状について報告する。

2. 試験の概要

2. 1 試験装置

試験装置を図-1に示す。アクチュエータ直下に取り付けたコンクリートブロックは、箱桁内のデビエータをモデル化したものでケーブル曲げ半径を3.0m、偏向角を14度とした。

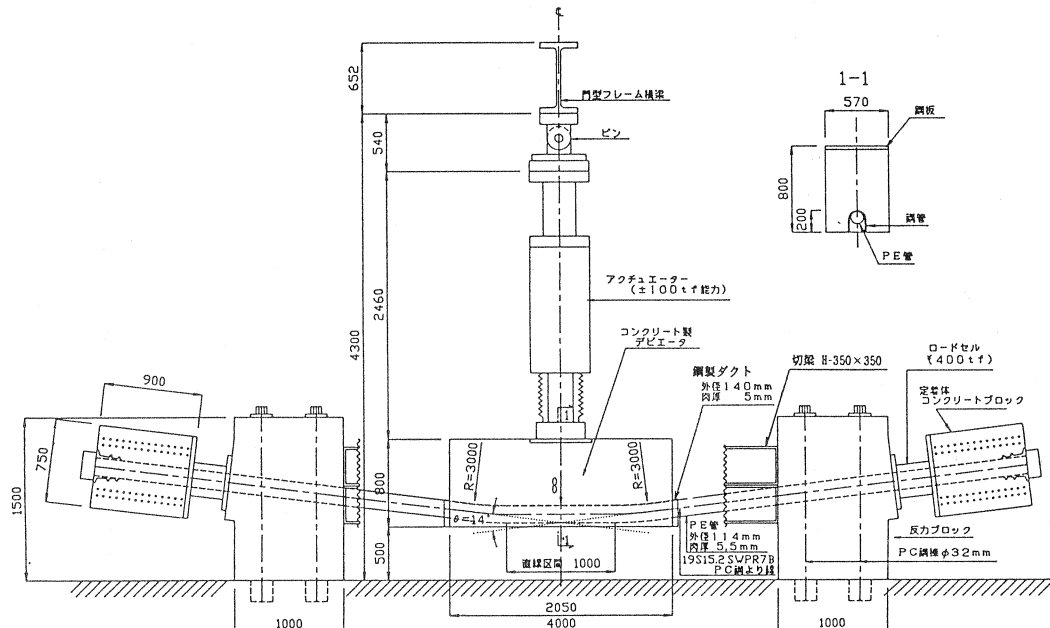


図-1 試験装置図

2. 2 試験体

試験体ケーブルは、P C橋に用いられる外ケーブルと同一スケールとし、その構成は下記とした。

鋼材 : P Cストランド19S15.2 SWPR7B 断面積=2673.3mm² (試験成績書より)

S15.2は素線7本の撚り線に付、19S15.2の全素線数は、133本(=7×19)である。

定着具 : ディビダーク外ケーブルMCシステム (アンカーディスク端面にポリエチレンスペーサ付き)

保護管 : 高密度PE (ポリエチレン) 管 (外径φ114mm、肉厚5.5mm)

保護管内 : グラウト (普通ポルトランドセメント、水セメント比=45%、混和剤:コンベックス208T) 注入

2. 3 載荷条件

表-1 載荷条件

P C鋼材応力 (kgf/mm ²)			アクチュエータ 鉛直変位 全振幅(mm)	振動数 (Hz)
全振幅 Δσ _p	下限 σ _{pmin.}	上限 σ _{pmax.}		
12 (=0.06σ _{pu})	114 (=0.60σ _{pu})	126 (=0.66σ _{pu})	20.0	0.4

ここに、σ_{pu} : 引張強度(=190kgf/mm²)

載荷条件を表-1に示す。鋼材の導入引張応力度(下限応力度)は、引張強度の60%である114kgf/mm²とした。応力振幅は、アクチュエータによりデビエータブロックに鉛直方向の一定変位振幅を与えることにより、ケーブル試験体に軸方向ひずみを生じさせ与えた。

アクチュエータは変位制御とした。

2. 4 計測システム

計測管理項目と使用機器の対応を表-2に示す。

表-2 計測管理項目と使用機器

計測管理項目	使用機器
ケーブル引張力	定着体と反力ブロック間に配置したロードセル、ストランドに貼り付けたひずみゲージ
ケーブル鉛直分力	アクチュエータ
デビエータ鉛直変位	アクチュエータ、切梁より設置したデビエータ
素線の破断	加速度計(±5G)、ロードセル

疲労試験中のストランド素線破断の感知は、加速度を加速度計で、張力をロードセルで動的に計測することによって行った。そのシステムを図-2に示す。素線が破断すると試験体の6ヶ所に取り付けた加速度計には、破断箇所に近い順に衝撃波形が届く。加速度計感知波形の一例を示した図-3では、デビエータの緊張側円弧部の近くに取り付けた加速度計No. 4が波の立ち上がりが最も早く、かつ初めの加速度も大きい。

よってこの場合、加速度計No. 4の近傍で素線が破断したと推定される。疲労試験中は、このように加速度計6ヶ所の同時波形を比較することにより破断箇所を推定した。その推定結果は試験終了後の解体調査結果と整合しており、加速度計による破断感知は精度よく行えたことが確認された。

3. P C鋼材と偏向部の摩擦係数

試験装置の偏向部では、鋼製ダクト(SGP)と、P C鋼材の保護管であるPE管とが接触している。

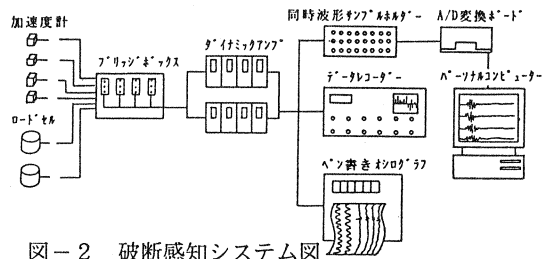
試験体ストランドは、片引き緊張により引張強度の60%の張力を導入した。緊張端ロードセルにおいて320.2tf導入を示した時、固定端ロードセルは308.4tfを示した。これより偏向部における角変化1ラジアン当たりの摩擦係数実測値を計算すると、0.15となる。なお長さ当たりの摩擦係数は0とした。

緊張定着後、試験体保護管内にグラウトを注入し、5日後に疲労試験(繰返し載荷)を開始した。試験開始のグラウト発現圧縮強度は270kgf/cm²であった。

4. 疲労寿命とS-N線図

繰返し載荷に連れた、加速度計によるストランド素線の破断感知の計上回数を図-4に示す。これより素線の破断は、6回目以降に発生ピッチが急激に速まったことが認められる。

疲労寿命を、全素線数の2%が破断したときとする



規準(アメリカのPTIにおける斜張ケーブルを対象にした試験規準¹⁾)と5%が破断したときとした試験実績²⁾がある。本試験における、2%破断(3本の素線が破断したとき)と5%破断(7本の素線が破断したとき)の結果を表-3と図-5に示す。

同図に設計疲労強度式によるS-N線として、土木学会コンクリート標準示方書³⁾式(解3.3.2)のPC鋼より線に対するもの、同「コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)」⁴⁾のPC鋼線に対するもの、アメリカの幹線道路及び運輸機関の協会であるAASHTO⁵⁾の"Redundant Load Path Structures"に適用する3部門のものを示す。AASHTOのB・C・D線は、鋼橋設計用に鋼製部材の表面の平滑性やフランジ寸法・溶接状況に応じてランク分けされ、提示されているものである。これらは、多数の疲労試験のデータを基に安全側を与える設計疲労強度式として定められたものである。但しこれらは、繰り返し応力が作用する環境での疲労を想定しており、フレッチングが同時に生じる環境を考慮したものではない。

K. Ryals, J. E. Breenら²⁾はPC鋼材のフレッチング疲労に着目した実験成果より、内部または外部ポストテンション方式コンクリート桁の疲労設計は、AASHTOの部門C曲線に従うことを推奨した。

今回の試験結果が、設計疲労強度式として示されている線を下回ったことは、PC鋼材においてフレッチングが伴うと、疲労寿命が縮まることを示していると推察される。

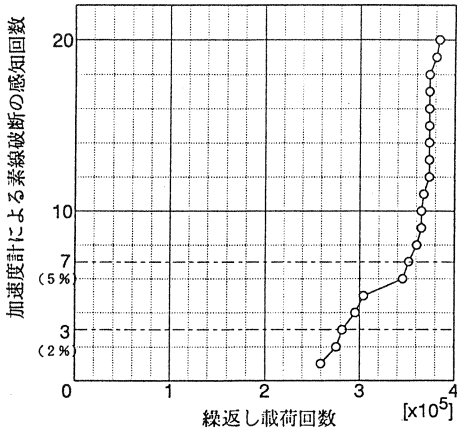


図-4 繰返し载荷回数と加速度計感知回数との関係

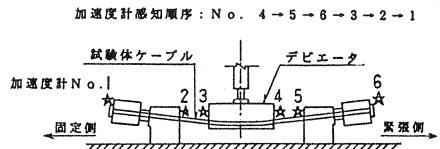
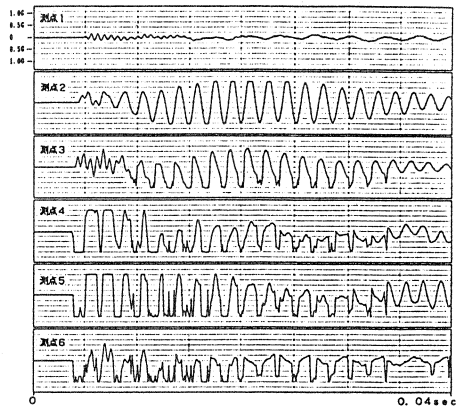


図-3 加速度計感知波形例

表-3 疲労試験の結果

初破断 (素線1本破断)	繰返し载荷回数		停止時間数	デビエータ での素線 破断箇所数
	2%破断 (素線3本破断)	5%破断 (素線7本破断)		
259,500	281,600	351,900	385,000	22

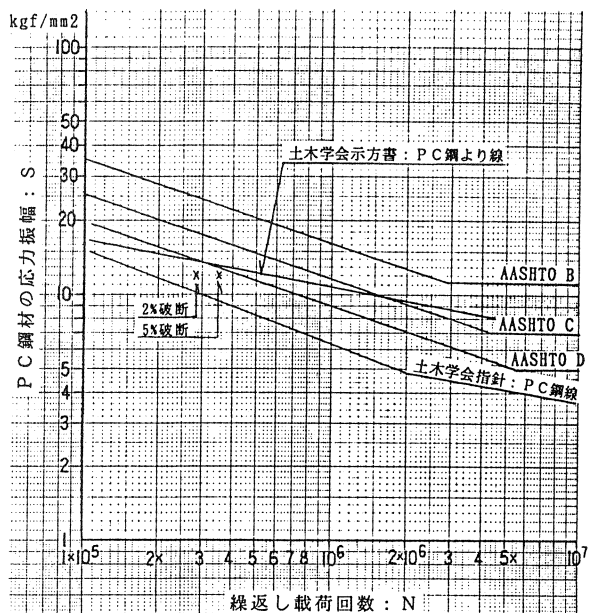


図-5 S-N線図

5. 素線破断状況

5.1 破断箇所の分布

疲労試験後、試験体を解体し調査を行った。デビエータでのストランド素線破断箇所の分布を図-6, 7に示す。

円弧部の「固定側」

「緊張側」とは、ストランドに下限応力を片引き導入したときの定着端関係を意味する。

破断、亀裂素線を●で示す。

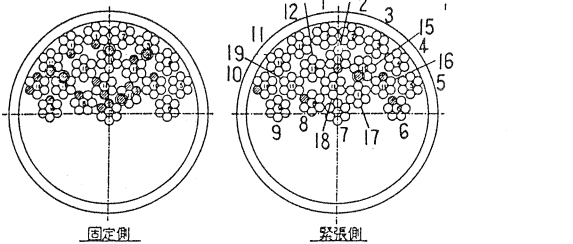


図-6 デビエータ円弧部におけるケーブル断面

5.2 破断面の性状

ストランドの破断箇所を写真-1、素線の破断面を写真-2に示す。観察された性状は下記である。

- ①破断起点の全数に、フレッチングコロージョンによる錆の発生が見られた。発生した錆を写真-3に示す。
- ②破断起点は全てストランドの外周側にあったので、ストランド同士のフレッチングによって亀裂(疲労破面)が入ったと推察される。
- ③素線にまずフレッチングが原因と推察される疲労破面が入り、続いて素線軸方向に対し斜めにせん断破面が発生し、破断に至ったと推察される。
- ④マルチストランドのため、デビエータ内円弧配置部ではストランドが多段に重なる。この場合内側のストランドほど、腹圧力を大きく受ける。しかし断面における破断箇所の分布(図-6)はランダムで、腹圧力の違いによる破断箇所の偏りは見られなかった。
- ⑤素線の外観調査の結果、破断以外に、フレッチング疲労によると推察される亀裂が9ヶ所見られた。

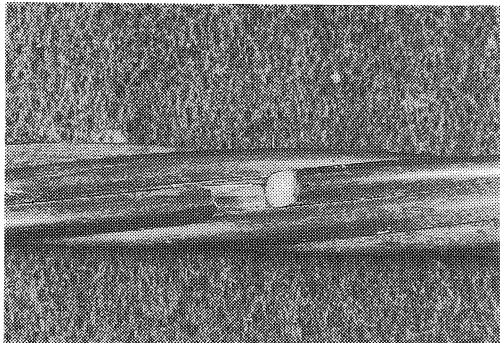
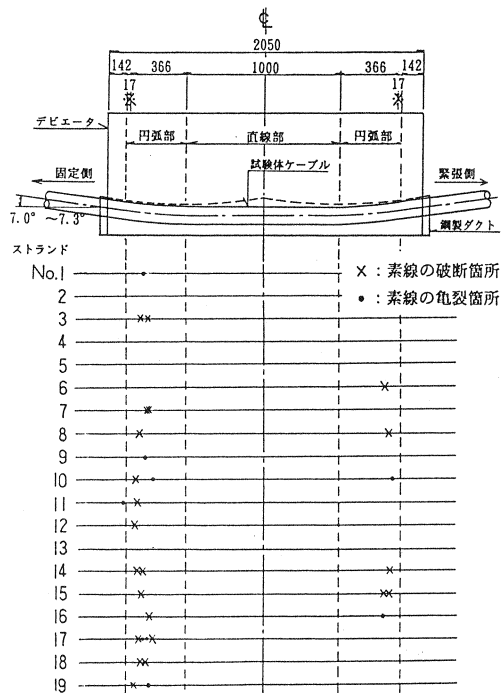


写真-1 破断状況



	固定側	緊張側	合計
破断	17	5	22ヶ所
亀裂	7	2	9ヶ所

※振幅サイクルにおいて配置形状が直線、円弧に交替する区間

図-7 ストランド素線の破断及び亀裂箇所

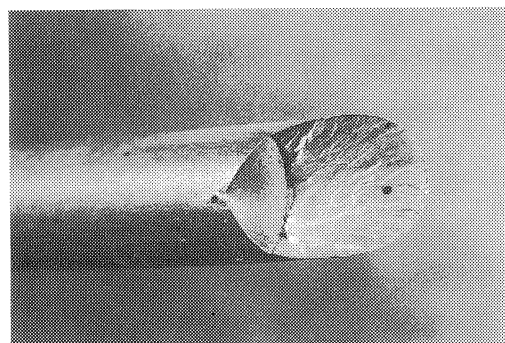


写真-2 素線の破断面

5.3 破断分布に関する考察

デビエータにおける素線破断は、図-7に示すように円弧端付近に集中した。原因は次のふたつが考えられる。

①ケーブル試験体の自由長部(直線配置部)の仰角の振幅は、0.3度である。このため振幅サイクル内で、円弧端では外ケーブルの配置形状が直線から円弧に交番する部分がある。この交番部付近でフレッチング疲労が促進した可能性が考えられる。

②配置形状が直線と曲線によって構成されている、マルチストランドを用いた外ケーブルでは、円弧の内側を通過する延長と外側を通過する延長が僅かに異なるため、軸方向に一樣伸びを生じた場合、内側ストランドと外側ストランドのひずみは異なるものとなる。これによりストランド同士に、微小な相対変位(滑り)が生じる。図-8に、試験体軸方向における内外に隣り合うストランド同士の相対変位分布を示す。算出に用いた仮定及び要領を以下に説明する。

内側ストランドと外側ストランドに関して1)から3)を算出した。

- 1) 振幅最小時と最大時における定着端間延長を座標より算出した。
- 2) 振幅最大時延長と振幅最小時延長の差が伸びであり、これよりひずみ: ϵ を算出した。
- 3) 配置区間の摩擦(例えば、ケーブルと鋼製ダクトとの摩擦)を無視することによりストランド全長に関してひずみは一定と仮定し、伸び後(振幅最大時)の定着端からの距離は、伸び前(振幅最小時)の距離に $(1 + \epsilon)$ を乗じて算出した。
- 4) 振幅最小時、最大時の各々で、内外における定着端からの距離の差を算出し、振幅最小時と最大時のその値の差を相対変位とした。

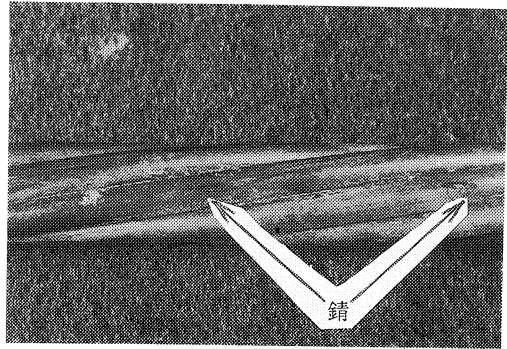


写真-3 フレッチングコロージョンによる錆

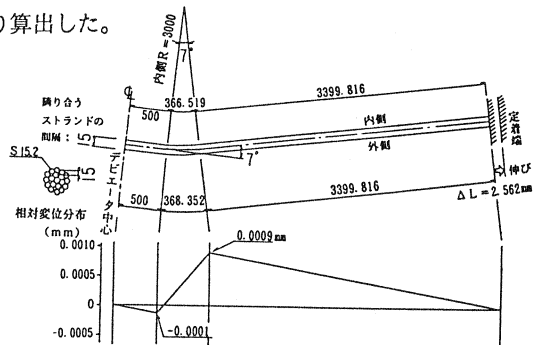


図-8 相対変位分布

図-8より、円弧部では端部に行くほど相対変位量が大きいと推定される。このためフレッチング疲労が促進され、破断が集中したものと思われる。隣り合うストランド同士の計算上の相対変位最大量は、わずか0.0009mmであるが、このような微小な滑り量であっても、フレッチング疲労が生じることを示すものである。

6. ストランドの引張試験

疲労試験後解体したストランドから、未破断のストランドについて静的引張試験を行った。その結果、直線配置部のストランドは全て母材の引張強度を示し、引張強度の低下はなかった。デビエータ部のストランドでは、引張強度の80%で破断するものがあったが、破断面を観察したところ写真-4に示すような疲労破面があった。このことから偏向部ストランドには、目視はできないが疲労試験を続行していれば破断に至るような亀裂が多く入っていたと推察される。写真-4

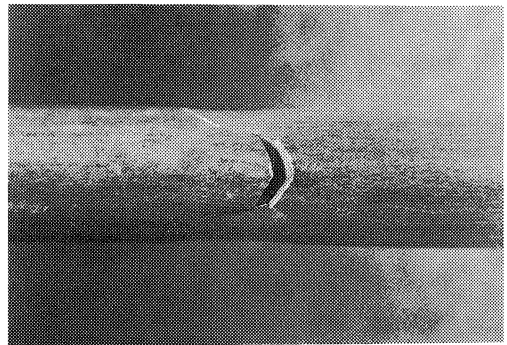


写真-4 静的引張試験による破断面(突き合わせて撮影)

7. PE管のストランドめり込み状況

試験体解体後における、デビエータ円弧部に位置したPE管内面を写真-5に示す。ストランドがPE管にめり込んだ痕跡が認められる。めり込み深さは、深いところでは0.8mmであった。PE管全厚は5.5mmに付き、0.8mm程度のめり込みは致命的ではないと判断され、フランスや我が国における研究^{6) 7)}でも確認されているとおり、これはストランド緊張時の腹圧力と伸びによる擦れにより生じたものであり、グラウト硬化後の進行はないものとほとんど考えられる。また疲労試験の繰り返し载荷によって、PE管に亀裂等の変状は見られなかった。

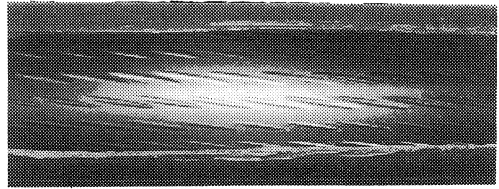


写真-5 PE管内面におけるストランドめり込みの痕跡

8. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- ①疲労試験の結果、ストランド素線の外周側破断起点には、フレッチングコロージョンによる錆の発生が見られたので、ストランド同士のフレッチングが主原因で素線に亀裂が入り、破断に至ったと推察される。
- ②フレッチング疲労が生じる偏向部マルチストランドについて、応力振幅が 12kgf/mm^2 のとき2%破断が282,000回、5%破断が352,000回という疲労寿命が得られた。これは、フレッチングが生じない環境でのストランドの疲労寿命に比べて、短寿命である。
- ③マルチストランドでは、偏向部においてストランドが多段に重なるため、内側のストランドほど腹圧力を大きく受ける環境に在る。しかし断面における破断箇所分布は、ランダムで内外の偏りは見られなかった。
- ④本試験装置で得られた、PC鋼材と鋼製ダクト上の保護管(PE管)との角変化1ラジアン当たりの摩擦係数は、0.15であった。
- ⑤偏向部PE管には、ストランドのめり込み痕跡は見られたものの、亀裂等の変状は見られなかった。

本稿では、応力振幅を 12kgf/mm^2 とした試験結果のみ報告したが、現在他の応力振幅による疲労試験を継続しており、それらの結果は別の機会に報告したい。

なお、試験体ストランドの解体調査及び引張試験に御協力して頂いた住友電工(株)、富士化工(株)に紙面を借りて深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Post-Tensioning Institute: Recommendations for Stay Cable Design, Testing and Installation by Post-Tensioning Institute Committee on Cable-Stayed Bridges, August, 1993
- 2) Karen Ryals, Gregor P. Wollmann, John E. Breen, Michael E. Kreger: Fretting Fatigue of External Tendons in Segmental Bridge Deviators, Workshop - Behaviour of External Prestressing in Structures, AFPC June, 1993
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書[平成8年制定]設計編、平成8年3月
- 4) 土木学会: コンクリートライブラリー第52号「コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)」、昭和58年11月
- 5) American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc.: Standard Specifications for Highway Bridges, Fourteenth Edition, 1989
- 6) B. Foure, L. H. Hoang: Experimental Study of the Local Behaviour of Cables and Sheath inside the Deviators, Workshop - Behaviour of External Prestressing in Structures, AFPC June, 1993
- 7) 諸橋明、中積健一、石井祐二、白鷺和夫: 外ケーブル用中密度ポリエチレン保護管の静的挙動について、土木学会第51回年次学術講演会 第V部門 平成8年9月