

舗装体を考慮した閉リブ鋼床版の局所応力について

主としてアスファルト層に生じる引張りずみについて

北海道大学工学部 正会員 ○ 荻澤 寛吉

北海道大学工学部 正会員 茅本 仁

1. まえがき

橋梁構造における死荷重を軽減するために床版には鋼床版が採用されることが多い。鋼床版はRC床版に比べて変形しやすく、それが舗装体のひびわれの原因の一つと考えられている。特に、縦リブや縦桁の上面におけるひびわれ破壊は、橋軸直角方向の引張りずみに原因するものであると推測されている。しかし、それについての理論的な裏付けを与えている研究はあまりなく、アスファルト層内部のひずみに関しては不明な点が多い。このような鋼床版を解析するには、床版のアスファルト層と鋼のデッキポレートが一体となって板としての挙動を示しているものと考えなくては、このためには二層板の理論を用いる必要がある。しかし舗装された鋼床版を二層問題として取扱った研究はまだない。

また、アスファルト層のひびわれは疲労破壊によるものであると推測されているが、実際に走行する車両によってアスファルト層のひずみが時間的にどういった変動をしているのか、言い換えれば、いかなるひずみ波形となるのかという問題が重要になる。このひずみ波形を明らかにした報告は、路盤や路床などの下部層をもつ場合については行われているが、鋼床版のような上下の両面に自由面をもつ構造については明らかにされていない。

アスファルト舗装体の力学的性状は、それが粘弾性体であることから十分に把握することは困難であるが、低温時または載荷時間がきわめて短い場合には弾性体としての挙動を示すことが知られている。しかしその場合でも、アスファルト層の変形係数(スティフネス)は温度および載荷時間に大きく依存するので、理論計算においてはその変動領域を十分に検討しなくてはならない。アスファルト層のポアソン比についても同様である。

アスファルト層を弾性体として取扱ひ、床版を二層

板として鋼床版構造の局所応力または局所ひずみを解析する場合にはできる限り厳密な立体解析を行うことが望ましい。その意味で本報告においては析板理論を構造解析に適用した。局所応力の解析における析板理論の有用性については、実物大鋼床版の実験による実験値との比較より検討済みである。

この報告においては、舗装された鋼床版に自動車車輪荷重が作用した場合に生じるアスファルト層のひずみについて次の点を明らかにする。

- (1) 車輪荷重によって発生するアスファルト層のひずみの分布。
- (2) 最大引張りひずみの発生する位置。
- (3) アスファルト層のポアソン比が発生するひずみに与える影響。
- (4) アスファルト層の変形係数が発生するひずみに与える影響。
- (5) 走行車両によるアスファルト層のひずみ波形。

2. 構造解析

2.1 二層板の基礎方程式

図1に示すように座標軸をとり、二層の板厚 h 、材料の弾性係数 E 、ポアソン比 ν を添字1,2をつけて表わすと、二層板の基礎方程式は、

$$D^{xx} \nabla^4 w = p(x, y) \quad (1)$$

$$B \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{2} (B - B_\nu) \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{1}{2} (B + B_\nu) \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} = 0 \quad (2)$$

$$B \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{1}{2} (B - B_\nu) \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{1}{2} (B + B_\nu) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} = 0 \quad (3)$$

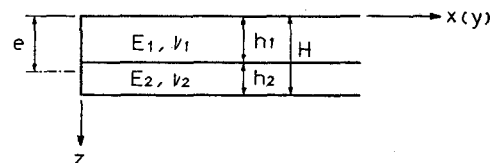


図1 二層板

となる。ここで、 u, v, w は $z=e$ 面 (重心面) での x, y, z 方向の変位である。(1) 式は二層板の曲げに関する式であり、 $p(x, y)$ は二層板に垂直に作用している面荷重強度、 D^{**} は二層板の曲げ剛性で、

$$D^{**} = D - \frac{C^2}{B} \approx D - ec$$

ここで、

$$D = \frac{E_1 h_1^3}{3(1-\nu_1^2)} + \frac{E_2 (H^3 - h_1^3)}{3(1-\nu_2^2)}$$

$$C = \frac{E_1 h_1^2}{2(1-\nu_1^2)} + \frac{E_2 (H^2 - h_1^2)}{2(1-\nu_2^2)}$$

$$B = \frac{E_1 h_1}{1-\nu_1^2} + \frac{E_2 (H - h_1)}{1-\nu_2^2} \quad (\text{伸び剛性})$$

$$\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4}$$

(2), (3) 式は二層板の面内変形に関する式であって、

$$B_y = \nu_1 \frac{E_1 h_1}{1-\nu_1^2} + \nu_2 \frac{E_2 (H - h_1)}{1-\nu_2^2}$$

これらの基礎方程式の解は容易に得られ、それより二層板の撓性マトリクスが誘導され、折板理論の適用が可能となる。

2.2) 鋪装体を考慮した鋼床版の解析

鋼床版の解析においては、デッキフロートを上層はアスファルト層で下層は鋼の二層板とし、閉リブは腹板、底板とともに橋軸方向に伸びた矩形板として折板理論³⁾⁴⁾を適用する。デッキフロートとリブの接合条件は鋼層の中央面で考えて解析が立体的に行われ、変形ならびに内部応力などが得られる。

3. アスファルト層に生じる引張りすみ

3.1) 鋼床版と荷重

解析する鋼床版を図2に示す。鋼床版は3本の閉じた縦リブによって補剛されていて、その境界条件は周辺単純支持である。アスファルト鋪装厚 8 cm、鋼デッキフロート厚 12 mm、リブ板厚 6 mm とした。ここで、橋軸方向中央断面のリブとデッキフロートの接合部のアスファルト層表面の位置を O, A, B, C と記号しておく。荷重は自動車輪荷重を想定し、図3のように等分布する面荷重とし、衝撃および鋪装体による荷重の分散効果は考えない。荷重の強度は、 $P = \int p dA = 1t$ と定める。

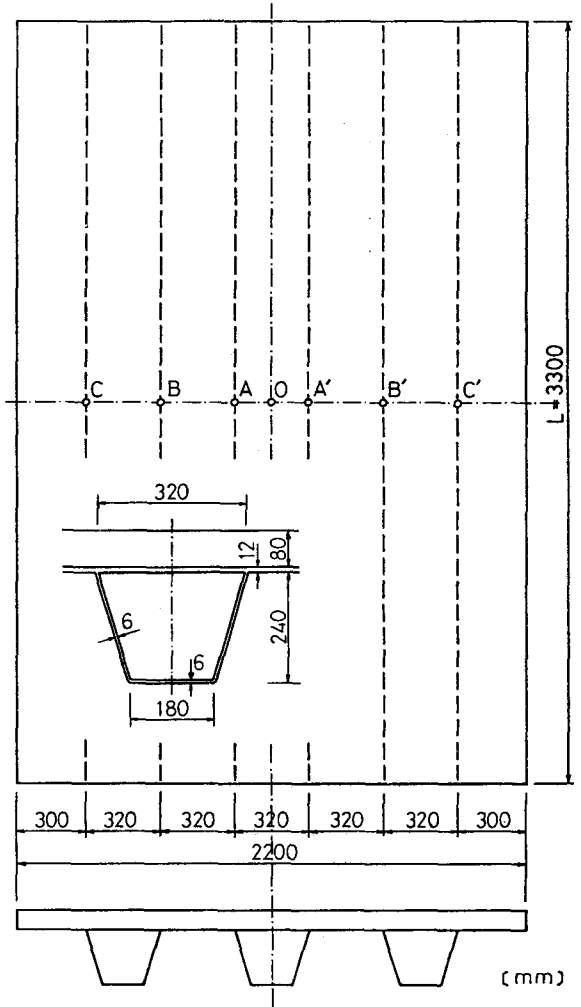


図2 鋼床版(周辺単純支持)と閉リブ断面

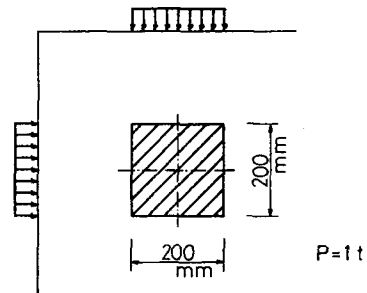


図3 荷重

3.2) 材料の力学的特性

鋼についてはヤング係数 $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 、ポアソン比 $\nu_s = 0.3$ と弾性定数を決める。しかし、アスファルト層の変形係数は温度および載荷時間の関数となり、低温時または載荷時間が極めて短い場合には変形係数は大きくなり、その逆の場合には変形係数は小さくなる。その範囲はふつう $100 \sim 100\,000 \text{ kg/cm}^2$ といわれている。寒冷地における鋪装体または高速載荷される鋪装体を取扱うことを想定すると、アスファルト層の変形係数は $E_a = 3\,000 \sim 100\,000 \text{ kg/cm}^2$ の範囲で検討するのが適当であろうと判断した。(参考文献2)の表-6によると、鋪装体の温度が $-15 \sim 35^\circ\text{C}$ 、車両走行速度 $10 \sim 120 \text{ km/h}$ の範囲における変形係数の値は、 $0.81 \sim 7.4 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ という結果である。) また、アスファルト層のポアソン比については、その測定の実験などによるものと思われるが、それに関する研究はほとんどない。しかし一般的に $\nu_a = 0.30 \sim 0.45$ の範囲であるものと思われる。

3.3) アスファルト層表面のひずみ

図2の鋼床版の橋軸方向中央に図3の荷重が載荷した場合を解析した。アスファルト鋪装体内に発生するひずみの最大値は常に上表面にあるので、解析結果として中央断面におけるアスファルト層表面の橋軸直交方向のひずみの分布を示すと図4となる。橋軸直交方向には、三つの典型的な荷重の位置を考えてみた。この場合のアスファルト層は $E_a = 30\,000 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\nu_a = 0.35$ であり変動範囲の中間値である。この E_a 、 ν_a の変動による影響については後で検討する。

図4の分布曲線で、+側が引張りひずみ、-側が圧縮ひずみの発生を表わしており、アスファルト層のひびわれの原因である引張りひずみに注目すると、図より、(1) 輪荷重のような部分荷重によってアスファルト層に引張りひずみが発生する箇所がある (2) 引張りひずみの最大値 $\epsilon_{\max}$ はリアとデッキフロートの接合部の上面の位置 (A, B, C) で生じている (3) $\epsilon_{\max}$ の大きさは荷重位置が橋軸方向に移動してもほぼ同じ値となり、その大きさは $2.0 \sim 2.4 \times 10^{-5} / 1\text{t}$ である、ということが知られる。この解析例で、 $\epsilon_{\max}$ が必ずしも荷重に最も近いリア位置に発生するとは限らないこともわかるが、これについては後で述べる。

3.4) アスファルト層のポアソン比がひずみに与える影響

アスファルト層のポアソン比が引張りひずみの大きさにどのような影響を与えるのかを調べる目的で、鋼床版の中心に荷重が載荷したときのアスファルト層の最大引張りひずみを、 $\nu_a = 0.30, 0.35, 0.45$ に対して計算した結果を表1に示す。 $E_a = 30\,000 \text{ kg/cm}^2$ で一定としてある。この計算結果より、アスファルト層

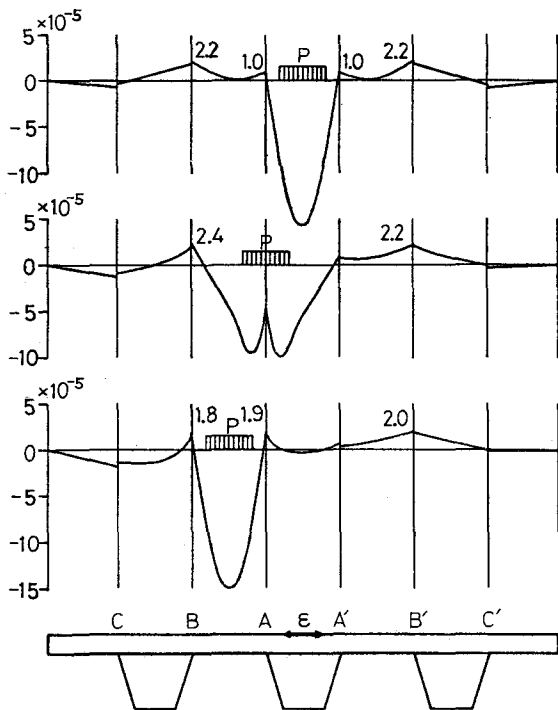


図4 アスファルト層表面のひずみ分布

($P = 1\text{t}$, $E_a = 30\,000 \text{ kg/cm}^2$, $\nu_a = 0.35$)

ν_a	$\epsilon_{\max}$
0.30	2.3×10^{-5}
0.35	2.2×10^{-5}
0.45	2.0×10^{-5}

表1 アスファルトのポアソン比と最大引張りひずみの関係

($P = 1\text{t}$, $E_a = 30\,000 \text{ kg/cm}^2$)

のポアソン比は引張りずみには大きな影響を与えないことが明らかとなる。

3.5) アスファルト層の変形係数(スティフネス)がひずみに与える影響

アスファルト層の変形係数が引張りずみに与える影響を調べるために、 $E_a = 100\,000, 30\,000, 10\,000, 3\,000 \text{ kg/cm}^2$ と変化させた場合のひずみ分布を計算した結果が図5である。荷重は鋼床版の中心位置にあり、 $\nu_a = 0.35$ とした。図5は上の図より下の図に向ってアスファルトの変形係数の大きい場合から小さい場合に並べられており、これを具体的に鋪装体の環境条件で言い換えるれば、低温時の状態から中温時および比較的高温時の状態に並んでいる、または、上の図は載荷時間の

極めて短い場合、下の図は載荷時間の比較的長い場合に相当する、ということである。

図5において注目すべき点は、アスファルト層の変形係数 E_a の低下により、表面に発生する最大引張りずみは著しい増大となることであり、 E_a が1オーダー低下すると数倍の引張りずみが発生することが明らかとなった。(図5においては下の図に向うほど縦軸が縮尺されていることに注意されたい。) また、最大引張りずみの発生する位置は、 E_a が大なる場合には荷重位置より離れた縦リブ位置 B, B' であるが、 E_a の低下に伴って荷重の最近傍のリブ位置 A, A' において $\epsilon_{\max}$ が発生することがわかる。これはアスファルト層の剛性のデッキポレート全体の剛性に寄与している割合の変化によるもので、この問題に関してはむしろ、 E_a が大きい値をとる場合(低温時または高速載荷時)には最大引張りずみは荷重より離れたリブ位置に生じるという点に注意する必要がある。

3.6) 走行車両によるアスファルト層表面のひずみ波形

車両が鋼床版上を走りぬける時のアスファルト層のひずみの変化を解析するために、荷重 $P = 1 \text{ t}$ を図6のように横軸方向に移動させ、その時の中央断面縦リブ上の位置 A におけるひずみを計算した結果を、荷重位置を横軸にとって図7に示す。このときのアスファルトのポアソン比 ν_a は 0.35 で、変形係数 E_a は $3\,000 \sim 100\,000 \text{ kg/cm}^2$ の範囲で計算した。

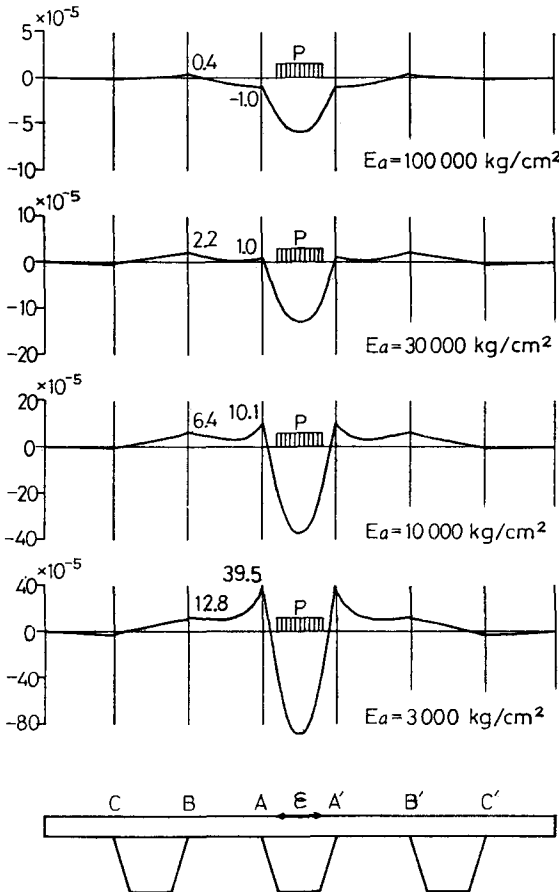


図5 アスファルトの変形係数が変化したときのアスファルト層表面のひずみ分布 ($P = 1 \text{ t}$, $\nu_a = 0.35$)

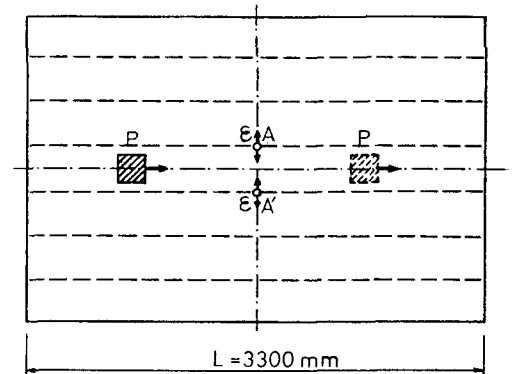


図6 走行車両を想定した荷重の移動

図7の曲線は、縦リブ上のアスファルト層表面のひずみ波形を表わすことになるが、これより次の点が明らかとなる。(1) アスファルト層のひずみ波形はアスファルトの変形係数に大きく依存する。(2) 変形係数が $100\,000\text{ kg/cm}^2$ のように極めて大きい場合をのぞいて、ひずみ波形は引張りひずみと圧縮ひずみの両領域を変動する。(3) ひずみ波形はいわゆる Bell Shape Wave である。

ここで具体的に述べると、走行する車両が鋼床版上に載ると縦リブ位置のアスファルト層表面Aにおいて

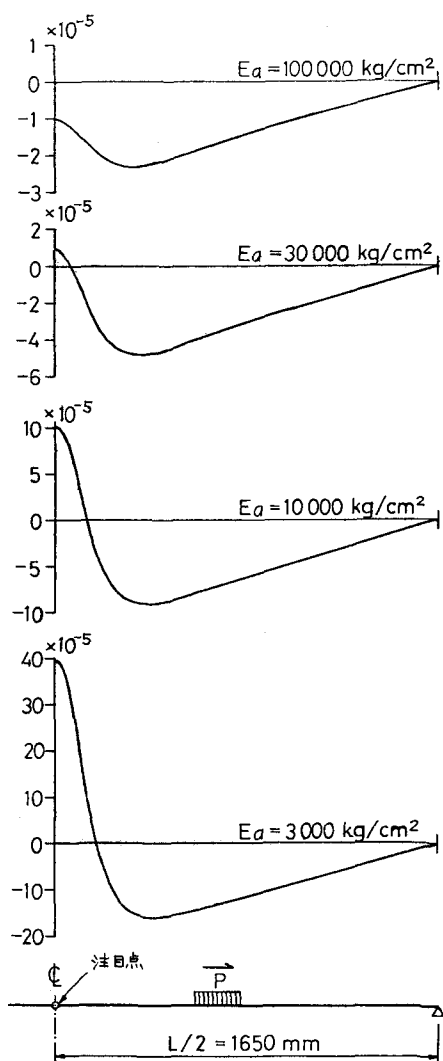


図7 アスファルト層表面のひずみ波形 ($P=1\text{ t}$, $\nu_a=0.35$)

圧縮ひずみが発生し、車両の接近とともに圧縮ひずみが増大し、注目点Aの近傍(解析例では $10\sim 20\text{ cm}$)に近付くと急激にひずみの逆転を起し引張りひずみとなり、最近接位置において最大引張りひずみを生じ、通過後は逆の傾向をたどって減少していくことを図7は示している。

4. 結果と考察

アスファルト層のひずみについて、これまでに得られた結果の主な点をまとめると次のようである。

(1) 最大引張りひずみは縦リブ上のアスファルト層表面に発生する。

(2) アスファルト層のポアソン比の変化は、ひずみの大きさに影響をほとんど与えない。

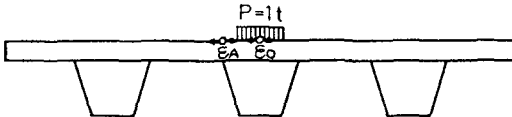
(3) アスファルト層の変形係数(スティフネス)が発生する引張りひずみの大きさに与える影響は極めて大きい。

(4) 時間を横軸にとったひずみ波形は Bell Shape Wave となり、引張りひずみ側と圧縮ひずみ側に変動する。

結果のうち(1)については実際のひびわれ状態などにより推定されていたことを理論的に裏付けることになる。結果の(3)は理論解析における材料の力学的定数の決定には実験によるなど十分に慎重な態度が要求されることを意味する。現在、アスファルト混合物の力学的性状と様々な環境条件の下で明らかにし、力学解析への利用を図る研究が進められているが、この研究の重要性を示す一つの説明となろう。結果の(4)は鋼床版構造における鋪装体のひずみについて初めて明らかにされたもので、この傾向が下層に半無限体としての路盤、路床ともつ鋪装体の下面に発生する半径方向ひずみの波形と全く同様である点は注目値する。さらに、鋪装体のひびわれが引張と圧縮のくりがえしのひずみによる疲労破壊であることが理論的に明らかにされたものと思われる。また、鋼床版のアスファルト層の疲労性状の研究には動的載荷として Bell Shape Wave を採用することが望ましいことになろう。

最後に鋼床版のアスファルト層の引張りひずみの解析におけるアスファルト層の剛性の影響について述べる。表2は変形係数 E_a を変化した場合のアスファルト層表面の二点A, Oのひずみを表わしたもので、アスファルト層の剛性を完全に無視し、鋼デッキフロート

のみで解析して注目点における曲率からアスファルト層のひずみを計算した場合と $E_a=0$ として並記してある。表2より剛性の増大に従ってひずみが減少していくことが知られ、剛性を無視した場合はかなり過大な値を与えることがわかる。これより、この報告においてデッキフロートを二層板として解析したことの妥当性が示されたことになる。



E_a (kg/cm ²)	E_a (10 ⁻⁵)	E_o (10 ⁻⁵)
100 000	-1.0	-6.0
30 000	1.0	-15.7
10 000	10.1	-37.7
3 000	39.5	-88.4
300	132	-209
0	185	-258

表2 アスファルト層の変形係数とアスファルト層表面のひずみの関係

5. あとがき

この報告において鋼床版のアスファルト層のひびわれ破壊に関して、その発生する箇所、破壊の要因、アスファルト層材料の力学的特性がおよぼす影響などを理論的に明らかにすることができた。

この報告の特長を上げれば次の点である。(1) デッキフロートの解析に二層板の理論を用いたこと、(2) 鋼床版全体の解析に厳密な析板理論を適用したこと、(3) アスファルト層のポアソン比および変形係数の変動範囲を十分に考慮して検討を行ったこと、(4) ひずみ波形が Bell Shape となることを明らかにしたこと。

最後に、この報告のまとめにあたり、アスファルト材料学の面から北大工学部土木工学科交通材料学講座の森吉助教授、笠原助手に助言をいただいたことを記し、謝意を表す。

計算は北海道大学大型計算機センターの FACOM 230-75 を用いた。

(参考文献)

- 1) 藤井、沢井、福井：鋼床版の変形特性に関する調査，第30回建設省技術研究会集議要（道路部門），P.77，BB51.11
- 2) 笠原、岡川、菅原：アスファルト混合物の動的性状とその鋪設構造の力学解析への利用，土木学会論文報告集第254号，P.107，BB51.10
- 3) 北大工学部橋梁研究室：鋼床版の構造特性ならびに変形性状に関する研究，本四公団委託研究報告書，P.204，BB51.3
- 4) 芳村、並澤：析板理論解析におよぶ曲線析板の床版応力と有効荷重について，土木学会論文報告集第233号，P.45，BB50.1
- 5) G. Sayegh：Viscoelastic Properties of Bituminous Mixtures, 2nd International Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavement, P.943, 1967