

論文 コンクリートの衝撃摩耗特性に関する研究

豊福俊泰^{*1}・宮川邦彦^{*1}・豊福俊英^{*2}

要旨：コンクリートの衝撃摩耗におよぼす要因を明らかにするため、コンクリートの品質、表面の状態、補修材の種類、外力（鋼球）の質量および速度を変化させ、摩耗量と外力の大きさおよびコンクリートの圧縮強度との関係を実験によって求めたものである。

試験の結果、供試体の種類および外力の大きさを変えた場合のいずれについても、これらの要因と摩耗量とは、累乗関数との相関性が強いことを明らかにした。

キーワード：コンクリート、摩耗、外力、圧縮強度

1. まえがき

コンクリート構造物のうち、コンクリート舗装やダムの水叩きなどのように、著しい外力が表面に作用するものは、摩耗が生じる。このため、摩耗現象を解明して対策を講じるべく各種の研究¹⁾が進められてきており、コンクリート舗装に対しては、耐用性を定量的に推定する方法を提案した²⁾。本研究は、この継続であり、衝撃摩耗に対して、コンクリートの品質、表面の状態、外力（衝撃力）の大きさおよび速度の相違が及ぼす影響を、試験によって検討した³⁾。

2. 試験方法

摩耗試験は、タイヤチェーンの作用によるコンクリート舗装の摩耗および岩石の作用による水叩きの摩耗をモデル化し、図-1の装置で、外力として鋼球を落下させる方法^{2)・6)}によって行った。試験計画は、表-1、表-2、表-3および表-4に示すように、供試体の種類、表面の状態、鋼球の質量および落下速度の水準を組み合わせてそれぞれ変えた。供試体は、普通コンクリート8種類（水中養生、材齢28日）、岩石3種類（岩石Aは普通コンクリート用粗骨

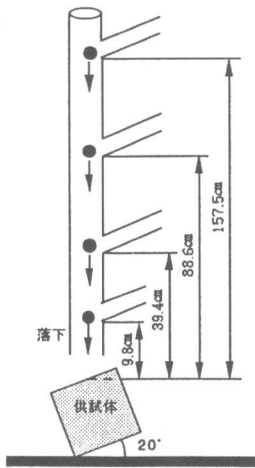


図-1 摩耗試験装置

表-1 試験計画

供試体		外力（鋼球）	
供試体の種類	表面の状態	質量 (g) 注1)	落下速度 (km/h) 注2)
普通コンクリート8種類	普通面	100 (φ30)	5 (9.8)
		300 (φ42)	10 (39.4)
		500 (φ50)	15 (88.6)
岩石3種類	岩石面	800 (φ58)	20 (157.5)
		500 (φ50)	15 (88.6)
普通コンクリート4種類	粗骨材露出面	500 (φ50)	15 (88.6)
補修材4種類	普通面	500 (φ50)	15 (88.6)

注1) () 内は鋼球の直径(mm) 注2) () 内は落下高さ(cm)

表-2 普通コンクリートの種類

供試体	単位セメント量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	混和剤	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (28日) (N/mm ²)
普通A	192	165	85.9	49.1	A E減水剤	5.8	3.3	17.8
*普通B	237	163	68.8	48.3	〃	2.7	3.1	29.2
普通C ₁	314	163	51.9	45.2	〃	8.1	5.3	25.7
*普通C ₂	314	163	51.9	45.2	〃	8.1	4.4	29.6
*普通D	448	170	37.9	41.1	〃	10.7	5.7	33.5
普通E	473	180	38.1	39.4	〃	8.6	5.4	38.2
普通F	555	183	33.0	35.9	高性能A E減水剤	3.4	4.0	46.8
*普通G	700	196	28.0	29.4	〃	13.8	2.2	71.3

注) 普通面は塗装合板の型枠面 * : 粗骨材露出面の供試体も作製

*1 九州産業大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

*2 関西大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

表-3 岩石の種類

供試体 (注)	産地	種類	圧縮強度 (N/mm ²)
岩石A	福岡県古賀町	結晶片岩	106.7
岩石B	中国福建省	花崗岩	108.7
岩石C	福岡県久山町	輝緑岩	132.6

注) 岩石面は原石をカッタ機で切断した面

表-4 補修材の種類

供試体	材料の種類	フロー値 (mm)	圧縮強度 (28日, N/mm ²)
補修材A	ポリマーセメントモルタル	170	25.2
補修材B	ポリマーセメントモルタル	20.6 *	36.8
補修材C	レジンコンクリート	22.0 *	64.4
補修材D	ポリマーセメントモルタル	190	68.1

* スランプ(cm)

材の原石) および補修材 4 種類 (市販品) で、寸法 15×15×15cm である。普通コンクリートは、セメントに普通ポルトランドセメント、細骨材に海砂 (比重 2.54, 吸水率 1.3%, 粗粒率 2.67), 粗骨材に古賀町産砕石 (最大寸法 20mm, 比重 2.75, 吸水率 0.8%, 実積率 59.5%, すりへり減量 11.1%) を使用した。粗骨材露出面は、打継目処理剤の散布によって作製した。

試験は、供試体の表面が湿潤状態、鋼球の落下回数 800 回までとし、落下速度は落下高さを変える方法で変化させた (図-1 参照)。摩耗量としては、摩耗体積 AV (cm³), 摩耗面積 AA (cm²), 平均摩耗深さ AD_A (=AV/AA, mm) および最大摩耗深さ AD_M (mm) を測定した。摩耗体積は、摩耗部分に注水してその水量を計量する方法で測定した。

3. 試験結果と考察

3.1 供試体の種類と摩耗量との関係

供試体の種類と摩耗量との関係は、供試体として普通コンクリート A (圧縮強度 17.8N/mm²), C₂ (同 29.6N/mm²), F (同 46.8N/mm²), G (同 71.3N/mm²) の 4 種類, 外力として鋼球の質量 500g, 落下速度 15km/h の場合を代表例とすると, 図-2~図-5 に示すとおりである。摩耗量を摩耗深さでみると, 摩耗深さと回数 N との関係は, 累乗関数との相関性が良く, 供試体表面のモルタル厚さに相当する摩耗深さ 2mm 程度までは, ほぼ直線的に進行している。深さ

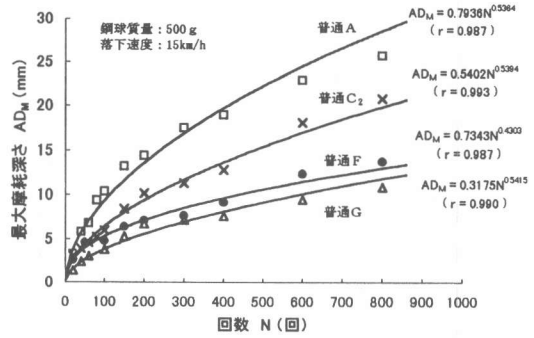


図-2 供試体の種類と最大摩耗深さとの関係

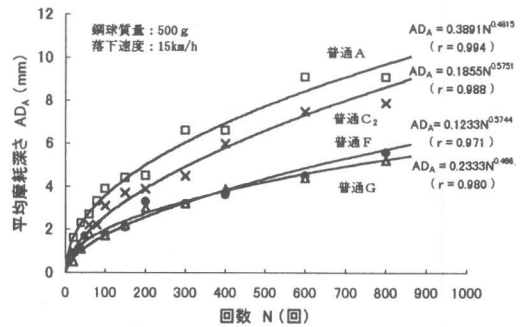


図-3 供試体の種類と平均摩耗深さとの関係

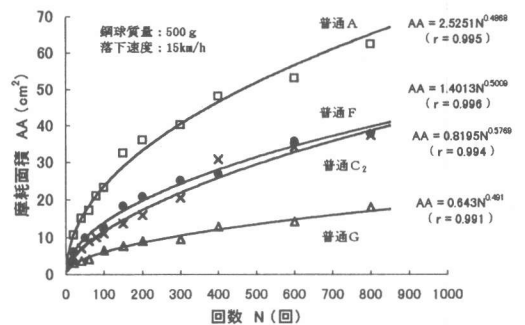


図-4 供試体の種類と摩耗面積との関係

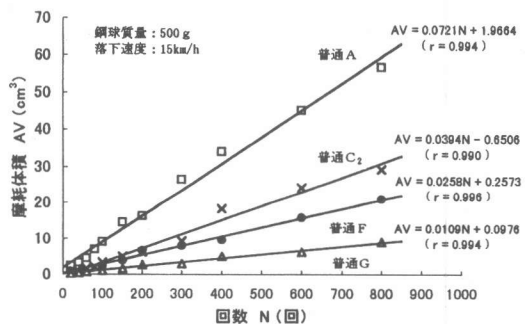


図-5 供試体の種類と摩耗体積との関係

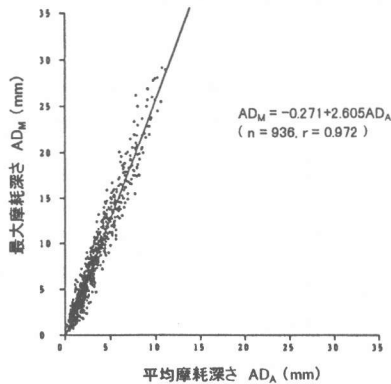


図-6 最大摩耗深さと平均摩耗深さとの関係

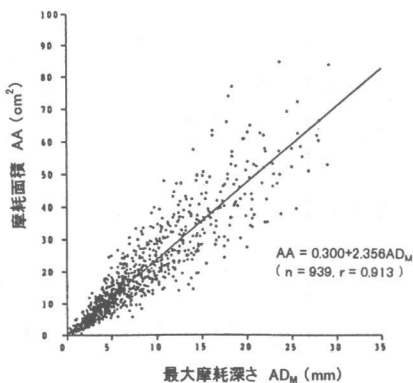


図-7 摩耗面積と最大摩耗深さとの関係

5±3mm 程度では、勾配が次第にゆるやかになる変曲点となっており、摩耗量の差が生じる。さらに、これを超えると再び直線的に摩耗し、供試体の種類による摩耗量の差が大きくなっている。また、最大摩耗深さは、平均摩耗深さとの関係が認められる(図-6 参照, 全データ)。

$$AD_M = 2.6AD_A \quad (1)$$

これに対し、摩耗体積は回数とほぼ直線関係にあり(図-5 参照, 式(2)), 摩耗面積は累乗関数との相関性が良い。

$$AV = a_1 N \quad (2)$$

ここで、 a_1 : 常数

一方、摩耗面積と最大摩耗深さとの関係は、図-7(全データ, 式(3))に示すように、ほぼ直線関係にあり、コンクリートの品質によって摩耗が供試体表面で深さ方向への進行が大きいものと、平面方向への進行が大きいものとの差

が生じている。

$$AA = a_2 AD_M \quad (3)$$

ここで、 a_2 : 常数

また、 AV , AA , AD_A には、次の関係がある。

$$AV = AA \cdot AD_A \quad (4)$$

したがって、(4)式に(2)式、(3)式、(1)式を代入して、次の実験式が得られる。

$$AD_M = a_3 N^{0.50} \quad (5)$$

ここで、 a_3 : 常数

(5)式は、図-2で示した AD_M と N との関係式とも適合している。

このように摩耗量相互の関係が明らかになったこと、コンクリート構造物の維持管理上からは摩耗深さ(わだち掘れ)が修繕の要否の判断値⁷⁾とされることから、以後、摩耗現象は、最大摩耗深さで表すこととした。

3.2 供試体表面の状態と摩耗との関係

コンクリートの摩耗機構を解明するため、供試体表面の状態を粗骨材露出面および岩石面とした場合と比較すると、図-8に示すとおりである。粗骨材露出の場合、表面のモルタル厚さ2mm相当が最初から除去されているため、凸状に骨材が露出しており、この部分の摩耗が急激に進み凸部がなくなると、普通の表面の場合と同様の勾配で摩耗が進行することが示されている。一方、岩石面の場合、普通面の場合と同様に初期段階は摩耗の進行が大きく、次第に増加量が減少し、最大摩耗深さ5mmを超えたあ

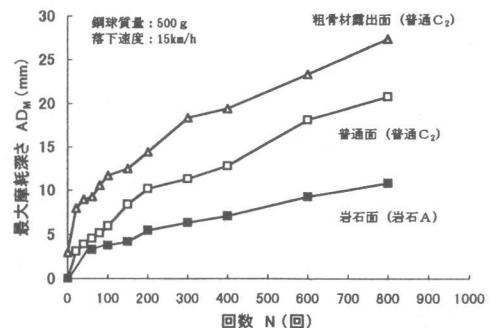


図-8 表面の状態と最大摩耗深さとの関係

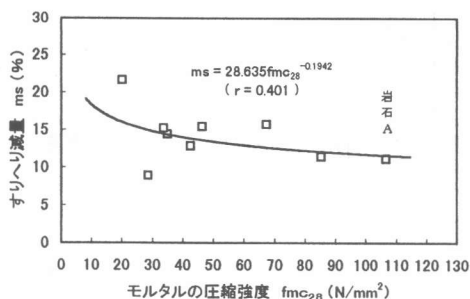


図-9 モルタルの圧縮強度とすりへり減量との関係

たりから（200 回程度）摩耗の進行がほぼ一定となっている。

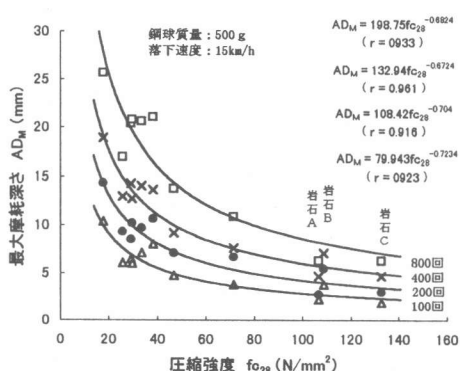
また、図-9 はモルタルの圧縮強度とすりへり減量との関係である。供試体（寸法 40×40×40mm）は、コンクリートの打ち込み時に 5mm ふるいでスクリーニングし、粗骨材とモルタルとを区分することにより作製した。すりへり減量は、粗骨材のすりへり減量試験方法に準じ、C 粒度相当（質量 5,000g、鋼球の数 8）で試験したものである。同図には、岩石 A（粗骨材の原石）のすりへり減量を併せて示したが、圧縮強度とすりへり減量には相関性が認められる。したがって、すりへり減量が多いコンクリートは摩耗量が大きくなっており、モルタルと粗骨材との圧縮強度差（すりへり減量差）が大きい低強度ほど、表面で粗骨材間の凹凸が生じや

すくなることがわかる。

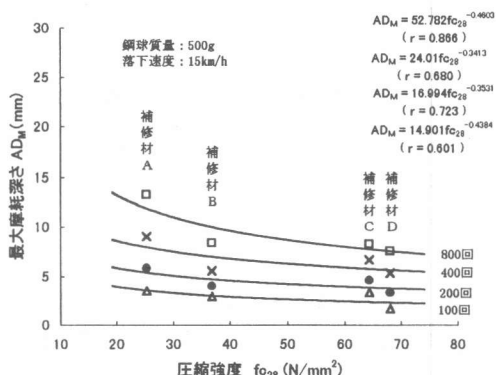
これらのことから、表面が平面である初期段階ほど、外力である鋼球と供試体との接触面積が小さいため（図-4 参照）、単位面積当たりに作用する質量が大きく（接地圧、衝撃応力が大きい）、摩耗の進行が大きくなっているものと推察される。さらに、粗骨材露出面の場合、骨材とモルタルとの凹凸がある初期段階ほど、凸部の粗骨材に作用する外力（鋼球）との接触面積が小さい（接地圧が大きい）ため、摩耗の進行が大きくなっていると説明される。

3.3 コンクリートの品質と摩耗量との関係

摩耗に及ぼすコンクリートの品質の影響は、圧縮強度で代表され相関性があることが、種々の研究でも確認されている⁸⁾⁻¹⁰⁾。図-10 は、供試体の圧縮強度と最大摩耗深さとの関係を、落下回数ごとに示したものである。普通コンクリートの場合、圧縮強度の変域が狭い範囲ではばらつきがあるが、全体的には低強度になるほど摩耗量におよぼす影響が大きくなる傾向が認められる。岩石の場合、節理があるため、圧縮強度試験供試体の寸法をφ5×10cm としたが、コンクリートとほぼ同様に圧縮強度と摩耗量との関係が認められる。一方、補修材の場合には、全体的に圧縮強度に比較して摩耗量が少なく、特に補修材 B はこの傾向が認められる。



(b) 普通コンクリート



(b) 補修材

図-10 圧縮強度と最大摩耗深さとの関係

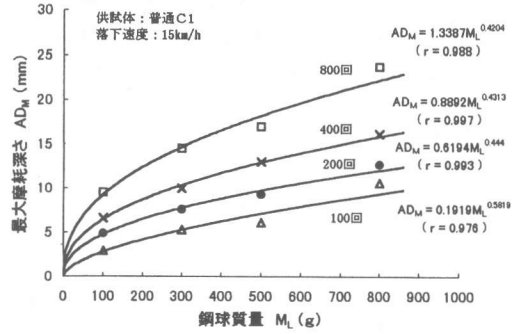
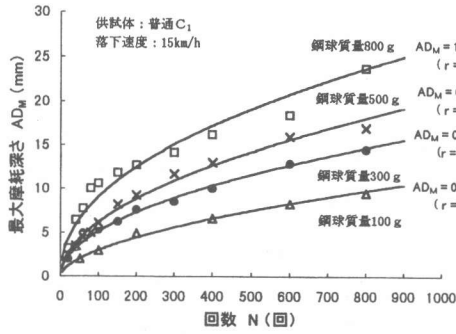


図-11 鋼球質量と最大摩耗深さとの関係

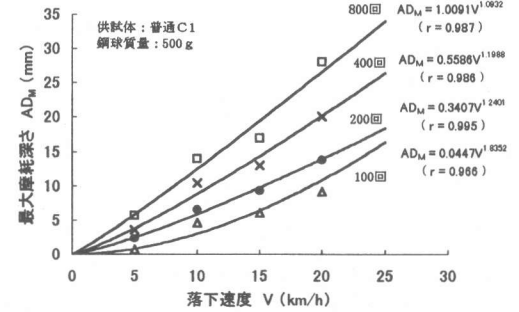
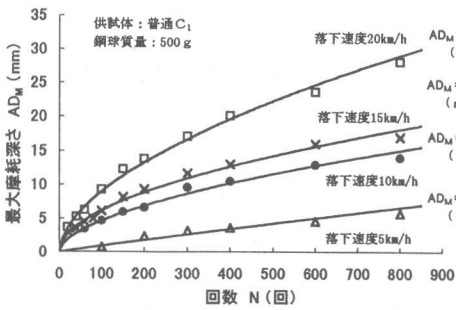


図-12 落下速度と最大摩耗深さとの関係

3.4 外力の大きさと摩耗量との関係

摩耗量と鋼球の質量，落下速度との関係を求めた結果から，それぞれ図-11，図-12を代表例として示す。供試体に与える外力が大きいほど，すなわち鋼球の質量が大きく落下速度が早いほど，打撃による衝撃力が大きく，摩耗量が大きくなっている。特に，速度の変化にほぼ比例して摩耗量が増加しており，鋼球の質量に比較して速度の影響の方が大きい傾向が認められる。

3.5 摩耗量に及ぼす要因の重回帰分析

以上に示したように，供試体の種類および外力の大きさを変えた場合のいずれについても，摩耗量とコンクリートの圧縮強度，外力との関係は，累乗関数で表される高度の相関性が認められる。そこで，各種要因が摩耗に及ぼす影響を，普通コンクリートについて重回帰分析（累

乗関数）を行った結果は，次に示すとおりである（下段の（ ）内は t 値，図-13 参照）。

$$AD_M = 10^{-2.2347} \cdot N^{0.5504} \cdot M_L^{0.4709} \cdot V^{1.2030} \cdot f_{c28}^{-0.5074} \quad (88.2) \quad (44.1) \quad (74.5) \quad (-28.7)$$

($n=944, R=0.965, K=0.931, e_s=1.39\text{mm}, z_s=0.185$)

ここで，R：重相関係数，K：決定係数，
 e_s ：残差(実測値-計算値)の標準偏差

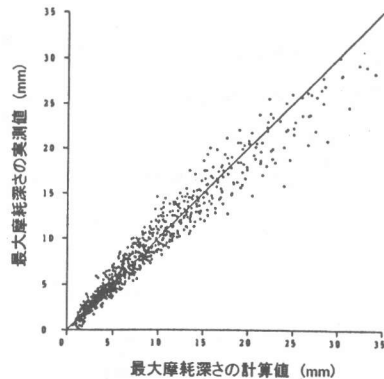


図-13 摩耗量の実測値と計算値との関係

z_s : (実測値/計算値)の標準偏差

計算値は実測値との相関性が良く、相関性が高い順は、次のとおりである。

N, M_L, V, f_{c28}

この傾向は、コンクリート舗装に衝撃摩耗を生じさせるチェーンタイヤについて求めた次の平均摩耗深さ A_{DC} (mm, 文献2) の(9)式, (26)式と同様の傾向となっている。

$$A_{DC} = A_{AC}/3$$

$$A_{AC} = 10^{-2.7908} \cdot N^{0.7418} \cdot M_L^{2.1023} \cdot V^{1.2681} \cdot f_{c28}^{-0.2996}$$

(76.2) (49.0) (39.1) (-3.0)

($n=601, R=0.978, K=0.957, e_s=12.7\text{mm}^2, z_s=0.298$)

(7)

このように、衝撃摩耗に対しては、外力の影響が大きくコンクリートの品質の影響は比較的小さい。摩耗量に対して圧縮強度は、室内試験では高い相関を示すが実道試験では相関が非常に低い結果を示すことが報告されている⁹⁾が、この原因は実道ではコンクリートの品質の変域が小さいためであることが、以上のことから解明される。本研究でも、普通 B, C₁, C₂, D のコンクリート (圧縮強度 25.7~33.5N/mm²) のみでは、むしろ圧縮強度が大きいほど摩耗量が大きくなっており、全体の傾向とは適合していない。

4. 結論

コンクリートに対する衝撃摩耗は、外力を鋼球で代表させた試験の結果、次の結論が得られた。

- (1) 摩耗量は、最大摩耗深さ、平均摩耗深さ、摩耗面積、摩耗体積との間に(1)式~(5)式の関係がある。
- (2) 外力が大きいほど摩耗量が増加し、質量よりも速度の影響が大きい。
- (3) コンクリート (モルタルと粗骨材) の圧縮強度が高いほど、耐摩耗性が向上する。
- (4) 摩耗に及ぼす要因は、累乗関数との相関性がよい。摩耗量を定量的に求める実験式として(6)式を提案する。

(5) 補修材は、それぞれ耐摩耗性が認められる。

参考文献

- 1) 堀口敬：コンクリートの摩耗に関する研究の現状，コンクリート工学，Vol.31, No.10, pp.17-27, 1993.10
- 2) 豊福俊泰，三和久勝，村国誠，豊福俊英，宮崎都三雄，村木宏行：コンクリート舗装の摩耗に関する研究，土木学会論文集，No.556/V-34, pp.87-100, 1997.2
- 3) 豊福俊泰，佐藤武夫：コンクリート構造物の耐摩耗性に関する基礎的研究，平成8年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.850-851, 1997.3
- 4) 小柳治・河合敦・近藤吉信：コンクリートの衝撃摩耗について，セメント技術年報41, pp.237-240, 1987.12
- 5) 小柳治・六郷恵哲・河合敦・近藤吉信：コンクリートの耐衝撃摩耗特性に及ぼす各種要因の影響，コンクリート工学年次論文報告集，10-2, pp.463-468, 1988.6
- 6) 小柳治・六郷恵哲・齋藤保則：コンクリートの衝撃摩耗におよぼす乾湿条件および衝撃角度について，コンクリート工学年次論文報告集，11-1, pp.265-270, 1989.6
- 7) 日本道路協会：路維持修繕要綱，1978.7
- 8) 杉田英明・永松武教・大和竹史：小水力ダムコンクリートの耐摩耗性評価に関する一考察，第8回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.885-888, 1986.6
- 9) 豊島憲明・岡田博明・武井芳一・松尾久幸・丸山武彦・下村恭巳：高強度コンクリートの耐摩耗特性に関する一考察 (その1 衝撃すりへり試験)，土木工学会第47回年次学術講演会，pp.352-353, 1992.9
- 10) 増田隆・松永嘉久・渡邊芳春：高耐摩耗性コンクリート，コンクリート工学，Vol.12, No.7, pp.100-104, 1994.7