

経年50年の海底トンネル健全度調査 DURABILITY RESEARCH OF AN UNDERSEA TUNNEL AFTER 50 YEARS OF SERVICE

江村康博*・宮武洋之**

Yasuhiro EMURA, Hiroyuki MIYATAKE

This paper presents the test results of the physical and chemical properties as well as dynamic properties of lining concrete in an undersea tunnel (Kanmon railway tunnel) after 50 years of service.

The results of these tests show that the lining concrete of this tunnel is durable enough at present.

It is necessary to continue to research into durability in the quality of the lining concrete in the future on basis of these test results.

Keywords: properties of lining concrete, durability research, undersea tunnel

1. まえがき

関門鉄道トンネル（以下、関門トンネルという）は、本州と九州を結ぶ輸送の大動脈として、現在もその使命を果たしている。この関門トンネルは、上下単線並列トンネルとして造られ、下り線は1942年に開通し海底という特殊環境の中で50年を経た。この間における関門トンネルの社会的貢献度は計り知れないものであり、今後もその使命は不変のものと考えられる。長年にわたり使用されてきた海底トンネルの現況を調査することは、今後の保守管理のあり方や健全度等を判定するうえで極めて重要である。

このような観点から、今回、漏水量調査、背面空洞、ライニングコンクリートの品質等の調査を行い、トンネルの健全度を把握した。特に、本調査においては、50年間海底という特殊条件下に置かれた海底部のライニングコンクリートに着目し、その物理・化学的性状、力学的性状等について詳細な調査を行ったので、以下に報告する。

2. 調査項目

調査は、海底部のトンネルの各部位から採取したコアを用いて行った。表-1に調査項目と試料数ならびに調査方法を示す。また、図-1に採取位置を示す。なお、コアの径は側壁部、インバート部は $\phi 10\text{cm}$ 、ク

* 正会員 九州旅客鉄道(株)施設部

** 正会員 九州旅客鉄道(株)門司保線区

ラウン部はφ5.5cm である。

表－1 調査項目

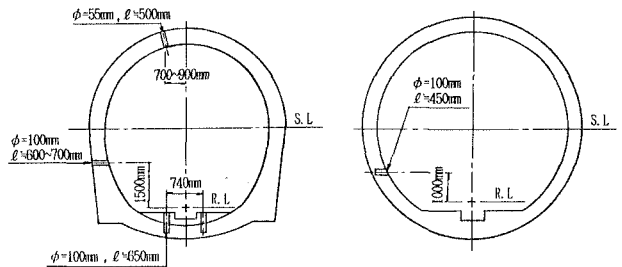
目	的	調 査 項 目	試料数	方 法
コンクリートの品質	物理的性状	搬入時供試体密度	53	電子天秤 水銀圧入式ポロメーター
		比重	34	
		吸水率（対搬入時）	32	
	化学的性状	示差熱重量分析	9	示差熱天秤 X線回折定性分析
		粉末X線回折	20	
		化学成分分析	20	
	力学的性状	動弾性係数	29	共振振動法動弾性係数測定器
		圧縮強度	30	
		引張強度（割製）	14	
	自然環境による影響	中性化調査	28	pH指示薬の発色
		塩分浸透調査	34	

3. 物理的性状

(1) 搬入時供試体密度、比重、吸水率（対搬入時）

図－2 に搬入時供試体密度、図－3 に比重、図－4 に吸水率を示す。なお、コアNo 1～6 は普通工法区間、7 はシールド工法区間から採取したものである。

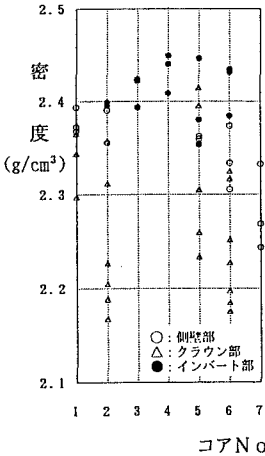
側壁部の供試体密度は、2.243～2.393g/cm³（平均密度2.348g/cm³）、クラウン部は2.167～2.414g/cm³（平均密度2.275g/cm³）、インバート部は2.243～2.393g/cm³（平均密度2.348g/cm³）であった。クラウン部では空隙部に注入材が充填されたものがみかけられ、ばらつきが大きくなったものと考えられ、ばらつきが大きくなったものと考えられる。



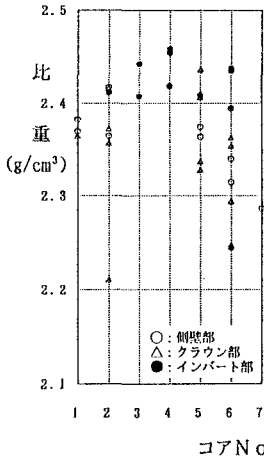
普通工法区間

シールド工法区間

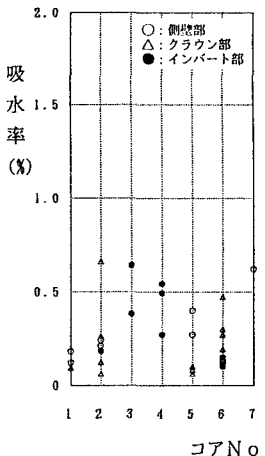
図－1 コアの採取位置



図－2 搬入時供試体密度



図－3 比重



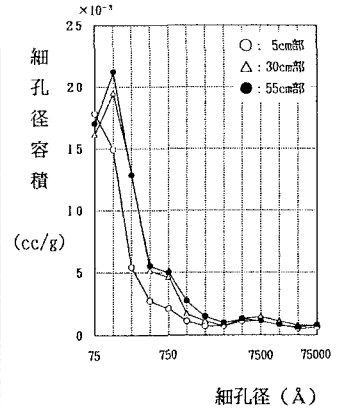
図－4 吸水率

(2) 細孔径分布

表－2 および図－5 にコアNo 5（普通工法区間）のトンネル内面側から深さ方向（5cm, 30cm, 55cm）におけるモルタル中の細孔径の分布状況を示す。表から、トンネル内面側から深さ方向に細孔量が多くなる傾向がみられるが、その平均細孔径は82～113 Å程度で大きな差は見られない。また、図表からコアの採取部位および深さにかかわらず、いずれも240 Å以下の細孔量が多いことが知られ、各部位の全細孔量に対する240 Å以下の細孔径が占める割合は、側壁部71～72%、クラウン部67～89%、インバート部48～64%でコンクリート中の細孔容積は240 Å以下の微細な空隙が大半を占めており、水酸化カルシウム等の溶出による細孔径の粗大化の傾向は見られない。

表－２ 細孔径分布

採取場所	深さ cm	細 孔 径 分 布 (×10 ⁻³ cc/g)													全細孔量 ×10 ⁻³ (cc/g)
		35Å 75人	75	140	240	440	750	1400	2400	4400	7500	14000	24000	44000	75000
側壁	5	17.8	14.9	5.4	2.7	2.1	1.1	0.7	0.7	1.1	1.1	0.8	0.5	0.6	49.5
	30	16.1	19.5	13.0	5.1	4.6	1.7	1.1	0.7	1.3	1.5	1.1	0.8	0.8	67.3
	55	17.0	21.2	12.8	5.5	5.0	2.7	1.5	1.0	1.3	1.1	0.8	0.6	0.8	71.3
クラウン	5	14.3	9.0	1.5	0.9	1.2	0.9	0.5	0.5	0.9	0.9	1.0	0.4	0.5	32.5
	30	19.1	12.9	3.5	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	1.3	1.1	1.0	0.7	0.1	43.8
	55	9.5	3.2	0.8	0.5	0.8	0.8	0.7	0.4	0.8	1.1	0.9	0.7	0.2	20.4
インバート	5	4.1	0.0	1.2	0.9	0.6	0.9	0.5	0.5	0.7	0.7	0.5	0.5	0.4	11.5
	30	7.4	3.8	2.0	1.2	1.5	1.1	0.9	1.0	1.6	1.6	1.1	0.1	0.3	23.6
	55	10.1	3.8	1.5	0.6	1.1	1.0	0.7	0.7	1.1	0.9	0.8	0.6	0.9	23.8



側壁部

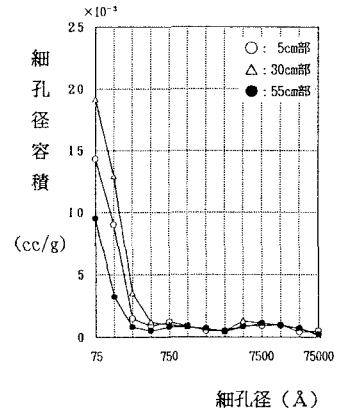
図－５ 細孔径分布

４．化学的性状

(1) 示差熱重量分析

表－３にコアNo５のトンネル内面側から深さ方向(5cm, 30cm, 55cm)におけるモルタル中の示差熱重量分析結果を示す。この分析では、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の脱水量、 CaCO_3 の脱炭酸量を測定した。

表中、③、④はそれぞれ測定値を用いて算出した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 CaCO_3 の量を表し、⑤は CaCO_3 量から推定される炭酸化前の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量を表している。また、⑥に③と⑤との合計を炭酸化しなかった場



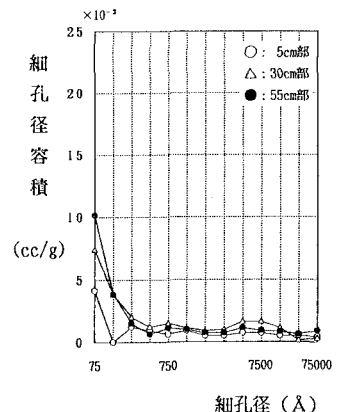
クラウン部

図－５ 細孔径分布

表－３ 示差熱重量分析結果

採取部位	深さ cm	① $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の脱水量 (g)	② CaCO_3 の 脱炭酸量 (g)	③ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量 (g)	④ CaCO_3 量 (g)	⑤ CaCO_3 の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 換算量 (g)	⑥ =③+⑤ 全 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量 (g)	⑦=⑥/④ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ から CaCO_3 に変化 した量 (%)
側壁部	5	0.74	2.21	3.04	5.03	3.72	6.76	55.0
	30	1.00	1.75	4.11	3.98	2.95	7.06	41.8
	55	1.00	1.74	4.11	3.96	2.93	7.04	41.6
クラウン部	5	0.75	1.25	3.08	2.84	2.10	5.18	40.5
	30	0.50	1.00	2.06	2.27	1.68	3.74	44.9
	55	0.75	0.75	3.08	1.71	1.27	4.35	29.2
インバート部	5	1.22	0.98	5.02	2.23	1.65	6.67	24.7
	30	1.74	1.74	7.16	3.96	2.93	10.09	29.0
	55	1.48	1.23	6.09	2.80	2.07	8.16	25.4

*③=① $\times$ ($\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{H}_2\text{O}$)=① $\times$ (74.0927/18.0153)=① $\times$ 4.1128
 *④=② $\times$ ($\text{CaCO}_3/\text{CO}_2$)=② $\times$ (100.0872/44.0098)=② $\times$ 2.2742
 *⑤=④ $\times$ ($\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{CaCO}_3$)=④ $\times$ (74.0927/100.0872)=④ $\times$ 0.7403
 *⑥: 炭酸化しなかった場合のモルタル中の全 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量を示す



インバート部

図－５ 細孔径分布

合のモルタル中の全Ca(OH)₂量として表し、⑦は⑥に対する炭酸化に用いられたCa(OH)₂量の割合を百分率で表している。表から、最大調査深さ55cmの位置においても炭酸化が認められるものの、元来、原セメント（高炉セメント）のCa(OH)₂の生成量が少ないことや硬化後にポゾラン反応によってCa(OH)₂が更に消費してしまうことなどから、分析結果をもとに算出した全Ca(OH)₂量に対する各試料の炭酸化率は約25～55％でCa(OH)₂が約75～45％残存していることが確認された。

(2) 粉末X線回析

表－4 にコア No 5 のトンネル内面側から深さ方向(5cm, 30cm, 55cm) におけるモルタルの粉末X線回析結果から認められる水和物の生成の程度を示す。なお、表中のX線回析結果の評価は、試料の水和生成のX線回析強度のピーク高さをを用いて相対的に評価し、◎：多く認められる、○：かなり認められる、△：少し認められる×：認められないで表している。粉末X線回析結果から、示差熱重量分析結果を裏付けるものとして炭酸カルシウムが同定され、またエトリンガイトおよびフリーデル氏塩も同定されたが、エトリンガイトの生成量は微量であり、後述の中性化・塩分浸透調査等をあわせて判断すると、Cl⁻イオン以外のイオンによる影響は少ないものと考えられる。

表－4 粉末X線回析結果

採取部位	コア No	深さ cm	水和生成物					
			Ca(OH) ₂	CaCO ₃	3CaO・Al ₂ O ₃ ・3CaSO ₄ ・32H ₂ O	3CaO・Al ₂ O ₃ ・CaCl ₂ ・10H ₂ O	3CaO・Al ₂ O ₃ ・CaCO ₃ ・12H ₂ O	4CaO・Al ₂ O ₃ ・13H ₂ O
側壁部	①	5	△	△	△	○	△	△
		30	○	△	△	△	△	△
		55	○	△	△	×	△	△
	⑤	5	◎	○	△	○	×	△
		30	◎	△	△	△	△	△
		55	◎	△	△	○	×	○
クラウン部	①	5	○	△	△	△	×	△
		30	△	△	△	○	×	△
		55	△	△	△	○	×	△
	⑤	5	○	△	△	×	×	×
		30	○	△	△	×	×	×
		55	○	△	×	×	×	×
インバート部	②	5	◎	△	△	○	×	×
		30	◎	△	×	×	×	×
		55	○	△	△	△	×	×
	⑤	5	◎	△	△	△	△	△
		30	◎	△	×	×	△	△
		55	◎	△	△	△	△	△

(3) 化学成分分析

表－5 に採取コアのトンネル内面側から深さ方向(5cm, 30cm, 55cm) におけるモルタル部の化学成分分析結果を示す。表には化学成分の中から外的要因により増減が考えられるものとして、強熱減量、CaO、MgO、SO₃、Na₂Oの分析結果について示した。この化学成分分析結果については、原セメントの成分が不明のため現時点では判断できないが、今後の指標になるものと考えている。

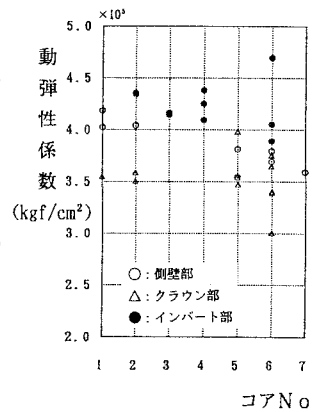
表－5 化学成分分析結果

採取部位	コア No	深さ cm	強熱減量 %	CaO %	MgO %	SO ₃ %	Na ₂ O %
側壁部	①	5	15.6	18.9	0.6	0.7	1.3
		30	14.0	18.0	0.5	0.5	1.3
		55	14.3	15.6	0.5	0.5	1.1
	⑤	5	11.1	15.0	0.7	0.3	0.9
		30	10.9	15.7	0.7	0.3	1.0
		55	11.4	15.0	0.7	0.3	1.0
クラウン部	①	5	13.2	18.1	0.7	0.5	0.8
		30	15.4	16.2	0.8	0.6	1.0
		55	15.6	14.9	0.6	0.5	1.0
	⑤	5	11.2	14.0	1.0	0.7	1.1
		30	11.4	14.3	0.9	0.6	1.1
		55	12.9	17.0	1.1	0.7	1.0
インバート部	②	5	14.6	22.9	1.1	0.4	0.9
		30	13.4	23.0	0.8	0.4	0.9
		55	13.4	18.5	0.9	0.7	1.0
	⑤	5	15.4	20.0	0.7	0.7	0.8
		30	11.8	19.2	0.7	0.3	1.0
		55	12.7	18.3	1.0	0.3	1.0

5. 力学的性状

(1) 動弾性係数

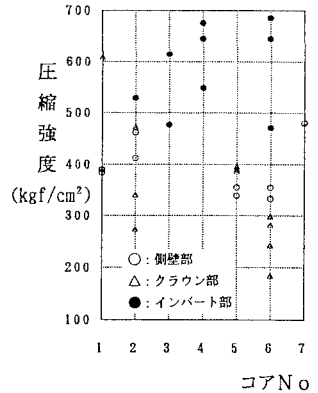
図－6 に動弾性係数の測定結果を示す。なお、測定は24時間水浸吸水させた供試体の動弾性係数を縦振動法による一次共鳴振動により行った。側壁部の動弾性係数は $3.54 \sim 4.34 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ （平均動弾性係数 3.89 kgf/cm^2 ）、クラウン部は $3.00 \sim 3.98 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ （平均動弾性係数 3.53 kgf/cm^2 ）、インバート部は $3.89 \sim 4.69 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ （平均動弾性係数 4.22 kgf/cm^2 ）であった。各部位間の動弾性係数の関係は、インバート部＞側壁部＞クラウン部であり、搬入時供試体密度ならびに比重と同様の傾向を示している。



図－6 動弾性係数測定結果

(2) 圧縮強度

図－7 に圧縮強度の測定結果を示す。側壁部の圧縮強度は $332 \sim 461 \text{ kgf/cm}^2$ （平均圧縮強度 389 kgf/cm^2 ）、クラウン部は $184 \sim 608 \text{ kgf/cm}^2$ （平均圧縮強度 347 kgf/cm^2 ）、インバート部は $470 \sim 675 \text{ kgf/cm}^2$ （平均圧縮強度 587 kgf/cm^2 ）であった。各部位間の圧縮強度の関係は、インバート部＞側壁部＞クラウン部であり、搬入時供試体密度ならびに比重、動弾性係数と同様の傾向を示している。



図－7 圧縮強度測定結果

(3) 引張強度

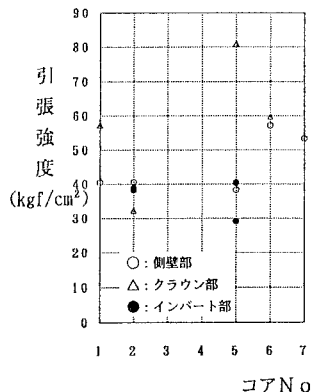
図－8 に引張強度の測定結果を示す。側壁部の引張強度は $38.2 \sim 57.1 \text{ kgf/cm}^2$ （平均引張強度 45.9 kgf/cm^2 ）、クラウン部は $32.1 \sim 80.8 \text{ kgf/cm}^2$ （平均引張強度 76.5 kgf/cm^2 ）、インバート部は $29.0 \sim 40.2 \text{ kgf/cm}^2$ （平均引張強度 37.3 kgf/cm^2 ）であった。各部位間の引張強度の関係は、クラウン部＞側壁部＞インバート部である。

一般にコンクリートの引張強度は圧縮強度の $1/10$ 程度といわれているが、今回の測定結果の引張強度と圧縮強度の平均強度でその関係を見ると、側壁部は11.8%、クラウン部22.0%、インバート部6.4%であり、クラウン部での引張強度が高い傾向を示している。この原因としては、本来、引張試験での載荷状態は線載荷であるが、今回の測定では供試体側面の凹凸による強度への影響を低減するためコンヘアベルトを供試体の上下面に敷き込んで試験を行ったことから、載荷時のコンヘアベルトが供試体に対して面接触状態となり、載荷状態が面載荷となったため、供試体径の小さいクラウン部でその影響が大きくなったものと考えられる。

6. 自然環境による影響

(1) 中性化試験

表－6 に中性化試験に用いた3種類のpH指示薬のpH領域と発色との関係を示し、表－7 に各部位より採取したコア端部における推定pH範囲を示す。一部のコア端部では、pH領域の高いニトラミンによる発色が認められないものもみられたが、大半のコア端部では薄黄色の発色が認められ、その際のpH領域は11.0～11.0以上と推定される。また、全てのコア端部でアリザリンイエローは黄色、フェノールフタレインは赤色の発色が



図－8 引張強度測定結果

認められ、そのpH領域は10.0以上と推定される。pH指示薬による中性化試験結果からは、各部位の採取コアに中性化は認められず、ライニングコンクリートのpHは10.0～12.0の範囲にあるものと推定される。

(2) 塩分浸透調査

(ア) 塩分浸透深さ

試験はJCI「ポリマーセメントモルタルの塩化物イオン浸透深さ試験方法(案)」に従い、供試体全面に0.1%フルオレセインナトリウム水溶液および0.1N硝酸銀水溶液を噴霧し、この時の呈色反応により塩素イオンの浸透を判別した。しかし、全ての供試体は薄茶褐色に発色し塩分浸透深さの判定はできなかった。原因としては、塩化物の形態あるいは塩化物イオン量による発色限界域が考えられ、塩化物イオン量は、モルタル乾燥重量の約0.25%¹⁾あるいはモルタル1g当り0.02mmol²⁾と言われている。また、発色状況も蛍光色あるいは赤色(白っぽいピンク)を呈すると大きく異なっている。

(イ) 塩分濃度

表-8に採取コアのトンネル内面側から深さ方向(1cm～5cm)における塩分の分析結果を示す。分析は全塩分を硝酸銀滴定法、可溶性塩素をイオンクロマトグラフ法により行った。合わせて表-9にトンネル中央部のセンタードレーンから採取した水の水質分析結果を示す。表-8より、いずれのコアの全塩分および可溶性塩素ともにコア端部の表層1cmでの濃度が一番高く、深さ方向で低くなる傾向が見られ、採取部位では側壁部での濃度が全般的に低く、クラウン部およびインバート部の一部で高い濃度が測定された。

7. あとがき

表-9 水質分析結果

今回の調査は、主にライニングコンクリートの品質について行ったが、建設時

のコンクリートの状態、あるいはセメントの成分等不明点があること、採取データ数が少ないことなど問題もあると思われるが、以上の調査結果から同トンネルのライニングコンクリートは現在も健全な状態にあると判断される。今後も、今回の調査結果をもとにその品質について経時的に把握くしてい必要があると考えている。

8. 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：ポリマーセメントモルタルの塩化物イオン浸透深さ試験方法(案)，コンクリート工学，Vol. 25, No. 8, Aug. 1987.
- 2) 米澤敏男：硬化コンクリート中の塩化物の試験方法，コンクリート工学，Vol. 25, No. 11, Nov. 1987.

表-6 pH指示薬の種類と変色域

指示薬名	7%酸性色	変色域のpH	酸性色
ニトラミン	褐色	13.0～11.0	無色
アリザリンイエロー	黄色	12.0～10.0	無色
フェノールフタレイン	赤色	10.0～8.3	無色

表-7 中性化試験結果

採取位置	コアNo	内 側	外 側
		推定pH領域	推定pH領域
側壁部	1	12.0> ≥11.0	12.0> ≥11.0
	2	12.0> >11.0	12.0> ≥11.0
	5	11.0> >10.0	11.0> >10.0
	6	12.0> >11.0	12.0> ≥11.0
	7	11.0> >10.0	12.0> ≥11.0
	クラウン部	1	11.0> >10.0
	2	12.0> ≥11.0	12.0> >11.0
インバート部	5	12.0> ≥11.0	12.0> ≥11.0
	6	12.0> >11.0	12.0> >11.0
	2	12.0> >11.0	12.0> ≥11.0
	3	12.0> >11.0	12.0> >11.0
	4	12.0> ≥11.0	12.0> >11.0
	5	11.0> >10.0	11.0> >10.0
	6	11.0> >10.0	11.0> >10.0

表-8 塩分分析結果

採取位置	コアNo	全 塩 分 (NaCl) (%)					可溶性塩素 (Cl) (%)				
		1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm	5 cm
側壁部	1	0.11	—	0.08	—	0.11	0.02	—	0.01	—	0.02
	5	0.55	0.50	0.28	0.18	0.29	0.15	0.13	0.10	0.07	0.10
クラウン部	1	0.84	—	0.72	—	0.50	0.39	—	0.34	—	0.25
	2	2.54	—	0.43	—	0.72	1.04	—	0.21	—	0.41
	5	1.43	—	0.99	—	0.82	0.65	—	0.54	—	0.44
	6	0.85	—	0.66	—	0.52	0.39	—	0.29	—	0.21
インバート部	2	1.82	—	1.31	—	1.29	0.86	—	0.55	—	0.50
	3	0.08	—	0.08	—	0.08	0.01	—	0.01	—	0.00
	4	0.08	—	0.09	—	0.08	0.00	—	0.00	—	0.00
	5	2.32	2.11	1.46	1.21	1.08	1.10	0.98	0.56	0.54	0.43