

報告 海洋環境下におけるコンクリート中の塩分測定のばらつきに関する研究

中村 秀明^{*1}・高橋 順^{*2}・江本 久雄^{*3}・宮本 文穂^{*4}

要旨：塩害の劣化予測を行う際には、現場で採取したコアからコンクリート内部に浸透している塩分量を測定し、見かけの拡散係数や表面塩分量を求めることがある。コンクリートは非均質な物質であるため、塩分の浸透は場所によって異なっている可能性がある。コアから測定した塩分量にどの程度ばらつきがあるのかを把握することは、劣化予測結果の信頼性を把握するため重要である。そこで本研究では、岸壁コンクリートにおいて、同一箇所から 5 本のコアを採取し、その塩分量を測定し、そのばらつきについて検討を行った。

キーワード：塩害、ばらつき、塩分量、フィックの拡散則、見かけの拡散係数

1. はじめに

塩分が浸透しているコンクリート構造物の将来の塩害劣化予測を考えた場合、測定が必要な項目としては、塩化物イオン濃度（塩分量）が挙げられる。塩分量の測定では、コアを採取し、深さごとに塩分量が測定される。一般的にコアの採取は、構造物にダメージを与えることから、場所ごとに 1 本採取される場合が多い。しかしながら、コンクリートは非均質な物質であり、また締め固めの程度も場所ごとに異なることが考えられる。コアから測定した塩分量にどの程度ばらつきがあるのかを把握することは、劣化予測結果の信頼性を把握するため重要なである。塩分量の測定に関しては、これまで多くの測定事例が報告されているが、1 箇所で複数の試料を採取し、そのばらつきについて考察されたものは少ない¹⁾。

そこで本研究では、東京湾に面する岸壁コンクリートの 4 箇所について、1 箇所から 5 本のコアを採取し、その塩分量を測定し、そのばらつきについて検討を行った。さらに、測定された塩分量から見かけの拡散係数や表面塩分量を推定し、そのばらつきについても検討を行った。

2. 塩分量の測定と結果

2.1 塩分量の測定

(1) 測定場所

コンクリート中の塩分量の測定は、東京湾に面した千葉県市原市の岸壁コンクリートからコアを採取し行った。岸壁のコンクリートは、北西が海に面しており 1964 年に施工されたもので、施工後 44 年経過している。使用されたセメントは普通セメントで、設計での水セメント比は 65% である。コアは 1 箇所につき 5 本採取し、岸壁の H.W.L より上部分から 5 本、H.W.L 付近から 5 本、H.W.L と L.W.L の中間部分から 5 本、床版部分から 5 本の計 20 本採取した。コア採取箇所の詳細を図-1 に示す。

コア形状は、塩分分析の粗骨材の影響を考慮して $\phi 75\text{mm}$ とし、深さ方向に 70mm 以上とした。前垂れ壁のかぶりは約 80mm 程度、床版のかぶりは 30mm 程度である。コアは水平方向に 60cm 間隔で 5 本抜いている。

(2) 塩分分析

一般にコンクリート中の塩分量は、現場においてコアを採取し、そのコアから試料を作成して化学分析される。化学分析の方法としては、JIS A 1154 (2003 年) の「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」があげられる。それ以前は、日本コンクリート工学協会の JCI-SC4 (1987 年) の「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」および SC5 が使用されていたが、2003 年に上述の JIS および土木学会の JSCE-G 573 (2003 年)

「実構造物におけるコンクリート中の全塩化物イオン分布の測定方法(案)」が制定された。本研究では、塩分の分析は、JIS A 1154 に準じて、全塩分量と 50°C 热水に溶出する可溶性塩分量を電位差滴定法により算出した。コアの深さ方向の分析スライスは、0~10mm, 10~30mm, 30~50mm, 50~70mm の 4 点とした。

(3) 中性化試験

中性化試験では、海洋構造物であり湿潤状態が高いことから、ほとんど進行していないと考えられるが、フェノールフタレンインエタノール 1% 溶液による呈色反応試験を実施した。

2.2 塩分量の測定結果

採取したコアの外観は、鏽汁や浮き等もなく、劣化の顕在化は見られなかった。ただし、コア①-5 については 0.2mm のひび割れが見られた。塩分量および中性化深さの計測結果を表-2 および表-3 に示す。表-2 は、全塩分量であり、表-3 は、可溶性塩分量である。また、図-2 および図-3 には、各箇所、深さごとに 5 点の塩分量の値をプロットしたものを示す。

*1 山口大学大学院 理工学研究科環境共生系専攻教授 博士(工学) (正会員)

*2 電気化学工業(株) 中央研究所 博士(工学) (正会員)

*3 (有) ミツワ電器 情報システム開発室 博士(工学)

*4 山口大学大学院 理工学研究科環境共生系専攻教授 工博 (正会員)

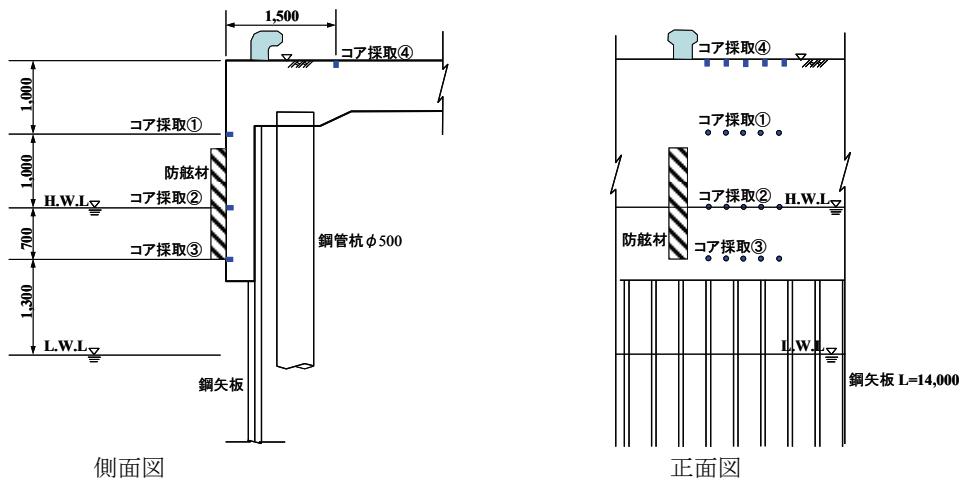


図-1 コア採取場所

表-1 塩分量測定結果（全塩分量）

場所	試料No.	塩化物イオン濃度 (kg/m³)				中性化深さ (mm)	外観状況
		0~10mm	10~30mm	30~50mm	50~70mm		
前垂れ H.W.Lより上 (GL-1000)	①-1 全塩分	9.69	8.51	5.42	2.99	0	劣化の顕在化は特になし（錆汁、浮き等もなし）
	①-2 全塩分	5.97	8.14	5.03	3.30	0	"
	①-3 全塩分	6.68	7.49	5.24	2.90	0	"
	①-4 全塩分	7.56	6.93	4.17	2.36	0	"
	①-5 全塩分	9.34	6.96	4.90	4.08	0	ひび割れ0.2mm（錆汁、浮き等なし）
	全塩化物量の平均	7.85	7.61	4.95	3.13		
前垂れ H.W.L付近 (GL-2000)	全塩化物量の標準偏差	1.63	0.71	0.48	0.63		
	全塩化物量の変動係数(%)	20.77	9.33	9.69	20.15		
	②-1 全塩分	10.04	9.73	5.59	3.44	0	劣化の顕在化は特になし（錆汁、浮き等もなし）
	②-2 全塩分	12.83	11.99	13.96	3.77	0	"
	②-3 全塩分	9.44	10.97	5.95	3.80	0	"
	②-4 全塩分	6.62	4.40	3.15	2.42	0	"
前垂れ H.W.Lより下 (GL-2700)	②-5 全塩分	8.71	8.77	6.52	3.44	2	"
	全塩化物量の平均	9.53	9.17	7.03	3.37		
	全塩化物量の標準偏差	2.25	2.93	4.08	0.56		
	全塩化物量の変動係数(%)	23.61	31.95	58.00	16.60		
	③-1 全塩分	6.18	9.65	7.28	5.74	5	劣化の顕在化は特になし（錆汁、浮き等もなし）
	③-2 全塩分	6.28	8.82	6.28	4.85	5	"
床版 天端 (GL-0)	③-3 全塩分	7.61	9.27	6.29	3.94	7	"
	③-4 全塩分	6.06	9.91	6.61	4.82	3	"
	③-5 全塩分	7.64	10.14	7.02	5.04	5	"
	全塩化物量の平均	6.75	9.56	6.70	4.88		
	全塩化物量の標準偏差	0.80	0.52	0.44	0.64		
	全塩化物量の変動係数(%)	11.84	5.44	6.57	13.12		
前垂れ H.W.Lより上 (GL-1000)	④-1 全塩分	8.60	8.76	5.38	3.83	0	劣化の顕在化は特になし（錆汁、浮き等もなし）
	④-2 全塩分	7.69	9.79	5.18	3.71	3	"
	④-3 全塩分	6.01	11.48	6.62	4.42	5	"
	④-4 全塩分	4.49	9.49	5.69	3.90	2	"
	④-5 全塩分	4.75	11.34	7.87	5.13	5	"
	全塩化物量の平均	6.31	10.17	6.15	4.20		
前垂れ H.W.L付近 (GL-2000)	全塩化物量の標準偏差	1.80	1.19	1.11	0.59		
	全塩化物量の変動係数(%)	28.54	11.70	18.05	14.05		

表-2 塩分量測定結果（可溶性塩分量）

場所	試料No.	塩化物イオン濃度 (kg/m³)				中性化深さ (mm)	外観状況
		0~10mm	10~30mm	30~50mm	50~70mm		
前垂れ H.W.Lより上 (GL-1000)	①-1 可溶性塩分	8.30	6.58	4.14	2.30	0	劣化の顕在化は特になし（錆汁、浮き等もなし）
	①-2 可溶性塩分	5.38	6.30	3.93	2.53	0	"
	①-3 可溶性塩分	5.75	5.93	4.05	2.28	0	"
	①-4 可溶性塩分	6.53	5.54	3.34	1.86	0	"
	①-5 可溶性塩分	7.68	5.54	3.98	3.22	0	ひび割れ0.2mm（錆汁、浮き等なし）
	可溶性塩化物量の平均	6.73	5.98	3.89	2.44		
前垂れ H.W.L付近 (GL-2000)	可溶性塩化物量の標準偏差	1.24	0.46	0.32	0.50		
	可溶性塩化物量の変動係数(%)	18.43	7.69	8.23	20.51		
	②-1 可溶性塩分	8.37	7.34	4.44	2.69	0	劣化の顕在化は特になし（錆汁、浮き等もなし）
	②-2 可溶性塩分	10.53	9.34	5.36	2.92	0	"
	②-3 可溶性塩分	8.07	8.07	4.74	3.04	0	"
	②-4 可溶性塩分	5.77	3.54	2.60	1.91	0	"
前垂れ H.W.Lより下 (GL-2700)	②-5 可溶性塩分	7.20	6.58	4.92	2.69	2	"
	可溶性塩化物量の平均	7.99	6.97	4.41	2.65		
	可溶性塩化物量の標準偏差	1.74	2.17	1.07	0.44		
	可溶性塩化物量の変動係数(%)	21.78	31.12	24.25	16.60		
	③-1 可溶性塩分	5.52	7.22	5.64	4.60	5	劣化の顕在化は特になし（錆汁、浮き等もなし）
	③-2 可溶性塩分	5.59	6.58	4.83	3.75	5	"
床版 天端 (GL-0)	③-3 可溶性塩分	6.58	6.79	4.85	3.17	7	"
	③-4 可溶性塩分	5.29	7.27	5.08	3.80	3	"
	③-5 可溶性塩分	6.72	7.31	5.31	3.91	5	"
	可溶性塩化物量の平均	5.94	7.03	5.14	3.85		
	可溶性塩化物量の標準偏差	0.66	0.33	0.34	0.51		
	可溶性塩化物量の変動係数(%)	11.11	4.69	6.61	13.26		
前垂れ H.W.Lより上 (GL-1000)	④-1 可溶性塩分	7.52	6.81	4.35	3.08	0	劣化の顕在化は特になし（錆汁、浮き等もなし）
	④-2 可溶性塩分	6.62	7.36	4.09	2.99	3	"
	④-3 可溶性塩分	5.24	8.40	5.08	3.43	5	"
	④-4 可溶性塩分	4.12	7.18	4.49	3.11	2	"
	④-5 可溶性塩分	4.46	8.69	6.26	4.05	5	"
	可溶性塩化物量の平均	5.59	7.69	4.85	3.33		
前垂れ H.W.L付近 (GL-2000)	可溶性塩化物量の標準偏差	1.44	0.81	0.87	0.43		
	可溶性塩化物量の変動係数(%)	25.75	10.54	17.92	12.91		

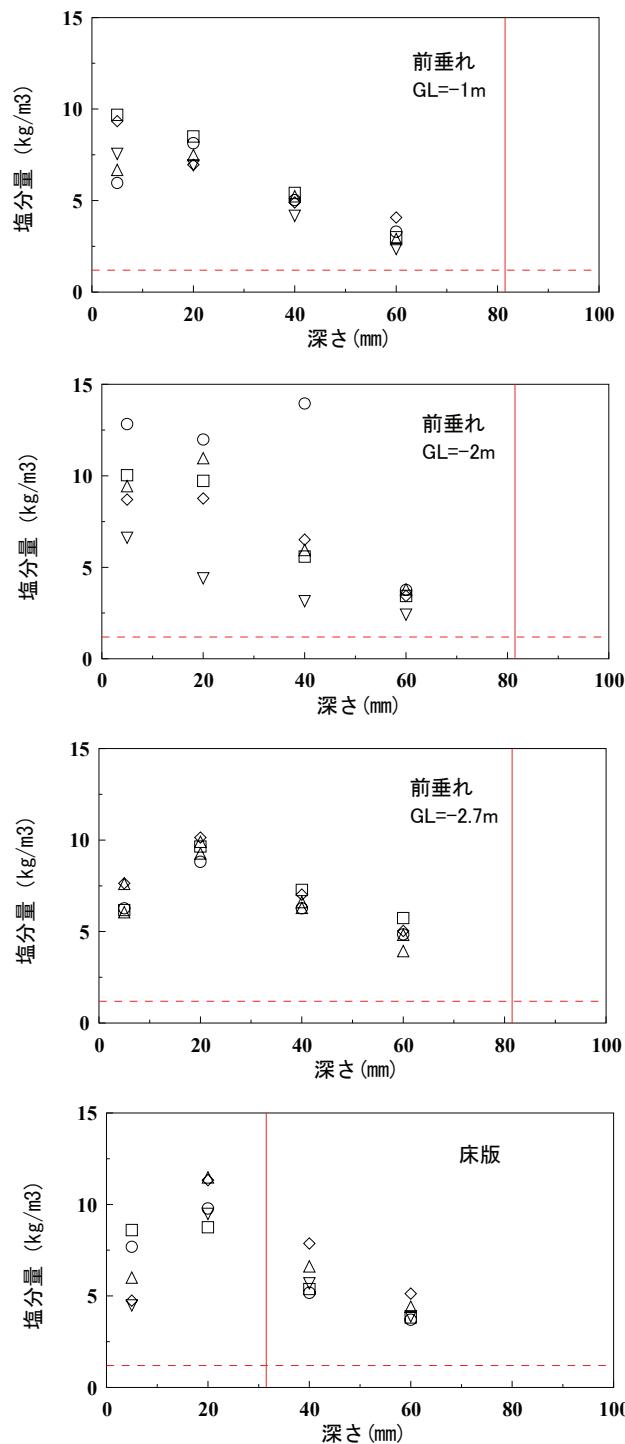


図-2 全塩分量のばらつき

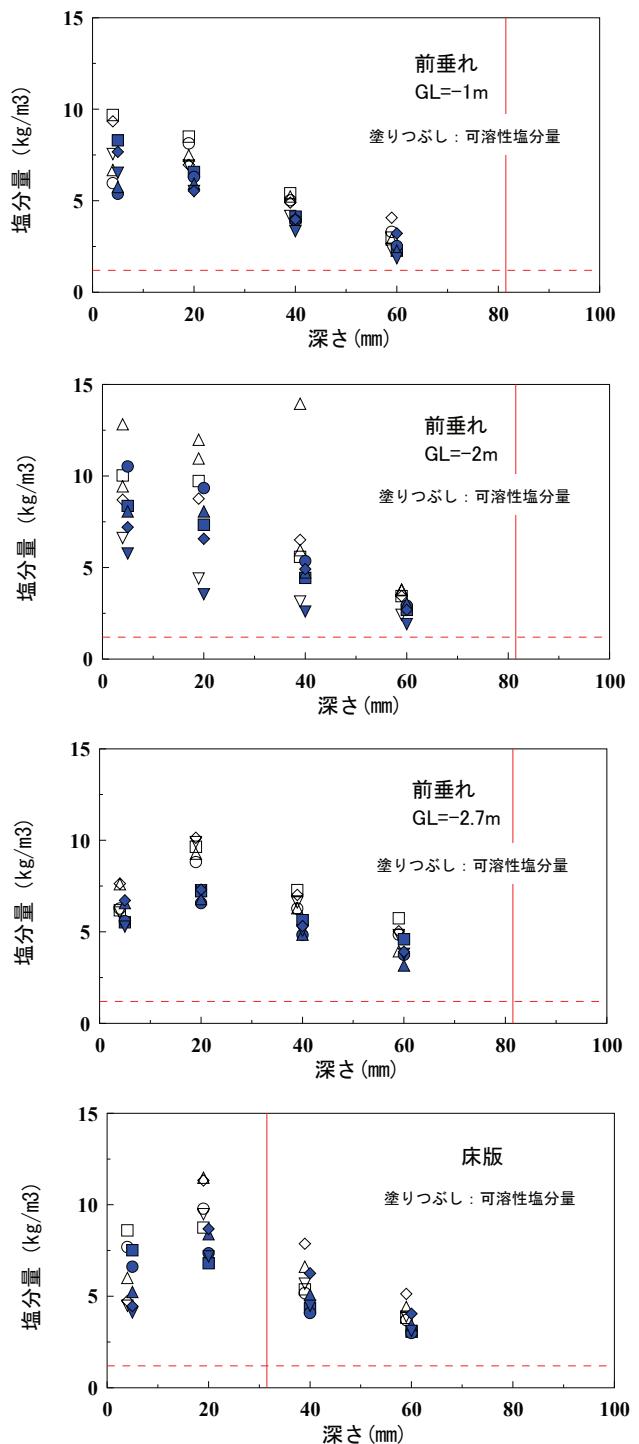


図-3 可溶性塩分量のばらつき

2.3 塩分量の測定結果の考察

表-1, 2 および図-2, 3 を見ると同じ箇所で比較的近い位置 (60cm 間隔) であってもコアによって塩分量が違うことがわかる。特に表面から浅い位置 (0~10mm) および深い位置 (50~70mm) の塩分量のばらつきが大きい。浅い位置は、波しぶきや雨水等の環境の影響を一番受けやすいためばらつきが大きいものと思われる。また、深い位置は、塩分量が少ないためばらつきが大きくなっ

ていると思われる。表面の塩分量は、雨水や海水に洗われるためか、予測される値より低い塩分量を示している。

各箇所ごとの変動係数を図-4 に示す。GL=-2.7m のコア (試料 No.③) は、潮間帯より下であり、満潮時は海中であるため、塩分量のばらつきは小さい。GL=-2m のコア (試料採取 No.②) は、ちょうど潮間帯であるため、ばらつきは大きい。岸壁コンクリートは、普段は海水により湿っているため、中性化はほとんど進行していない。

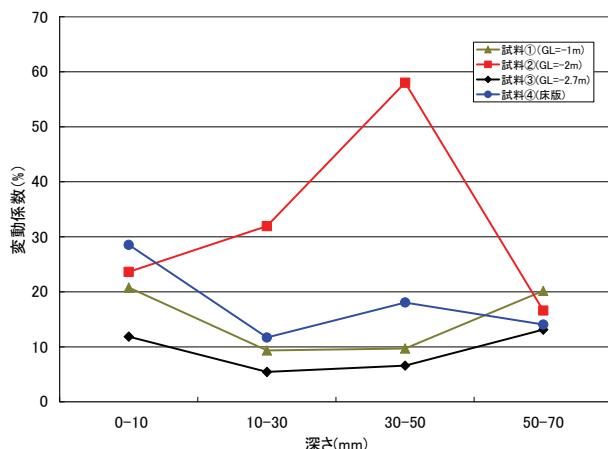


図-4 各箇所ごとの変動係数

ただし、潮間帯より下のコア（試料 No.③）は、海水中の CO₂ との反応により若干中性化が進んでいる。

床版部分は、塩分量は他のものとほぼ同様であるが、中性化が他のものに比べて若干進んでいるが最大で 5mm であり思ったより進んでいない。

3. 見かけの拡散係数および表面塩分量の推定

3.1 見かけの拡散係数と表面塩分量

コアから測定したコンクリート中の塩化物の深さ方向の塩分量の分布を式(1)に示す Fick の拡散方程式で回帰することにより、塩分浸透の見かけの拡散係数と表面塩化物量を推定した。実際の推定では、最小自乗法等は用いられるることは少ない。これは、雨水等の影響で測定した表面塩分量が実際のものより少し小さくなっていることを考慮できないためであり、実際には、表面塩分量と見かけの拡散係数を随時変え、曲線を見ながら一番フィットする値を推定者の判断で推定する場合が多い。

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{0.1x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (1)$$

ここに、 $C(x,t)$: コンクリート表面からの距離 x (mm), t (年)における塩化物量(kg/m^3), C_0 : 表面における塩化物量(kg/m^3), D : 塩化物の見かけの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$), erf : 誤差関数である。

3.2 見かけの拡散係数と表面塩分量の推定結果

深さ方向の塩分量より、各コア（試料）ごとに見かけの拡散係数を算定した結果を表-3 に示す。見かけの拡散係数は、図-5 に示すように、深さ方向の塩分量にフィットするように表面塩分量と見かけの拡散係数を仮定することより求まる。なお、図-5 にはコア試料 No.①

および試料 No.②の結果のみ示す。この作業は一般に人間の判断に基づく手作業で行われるため、推定者によるばらつきが生じる。表-3 の値は、塩分量の測定を業務としているベテランの分析者 2 名による結果である。

推定者によってばらつきが生じるのは、基本的には、推定者は自分の感覚によって線を引いたときに、一番フィットする係数を推定するが、このとき、推定者 A は、どちらかと言うと表面の塩分量の値も重視しており、推定者 B は、表面の塩分量の測定値は実際より小さい値が出ているため、表面の塩分量をそれほど重視していないためである。このように推定者によって推定結果には差が生じる。

図-6 は、上記方法で求められた表面塩分量を、図-7 は、見かけの拡散係数を示したものである。同じ場所であっても試料が違ったり、推定者が違うと差が生じる。表面塩分量については、潮間帯である GL=-2m のコア（試料採取 No.②）のばらつきが大きい。潮間帯であるため、波しうきの影響が大きく、場所によっては、海水に洗われてしまうためばらつきが大きくなっていると思われる。潮間帯より下である GL=-2.7m のコア（試料 No.③）は満潮時には海水に浸かっているため、毎日一定時間海水に浸かるため表面塩分量のばらつきは小さい。

次に見かけの拡散係数であるが、見かけの拡散係数は、GL=-2.7m のコア（試料 No.③）のばらつきが大きい。No.③は、満潮時には海水に浸かっており表面の塩分量は比較的一定の値であるが、内部への塩分浸透量が一番大きく、そのため見かけの拡散係数が大きくなっているものがある。試料 No.①および No.②の推定者 A で値が大きくはずれているものがあるが、これは、試料 No.①-5 および No.②-4 である。表-3 からわかるようにどちらも表面塩分量が小さく推定されているため、その影響が見かけの拡散係数に表れている。表面塩分量と見かけの拡散係数では、表面塩分量の方が感度が大きいため、どちらかと云うと表面塩分量を正確に求める必要があり、表面塩分量に誤差があると見かけの拡散係数に大きく影響を及ぼす。

最後に図-8 は、表面塩分量と見かけの拡散係数について、推定者 A と推定者 B の差を示したものである。概ね推定者 A と推定者 B の推定値は一致しているが、見かけの拡散係数では、No.①-5 および No.②-4 の試料の差が大きく出ている。これは、上述のとおり、表面塩分量の方が感度が大きいため、表面塩分量の推定に差があれば、見かけの拡散係数は大きく異なってしまう。推定者による差は若干あるものの、推定者による差は比較的小さい。今後は、推定者の主観によらない推定方法の開発が望まれる。

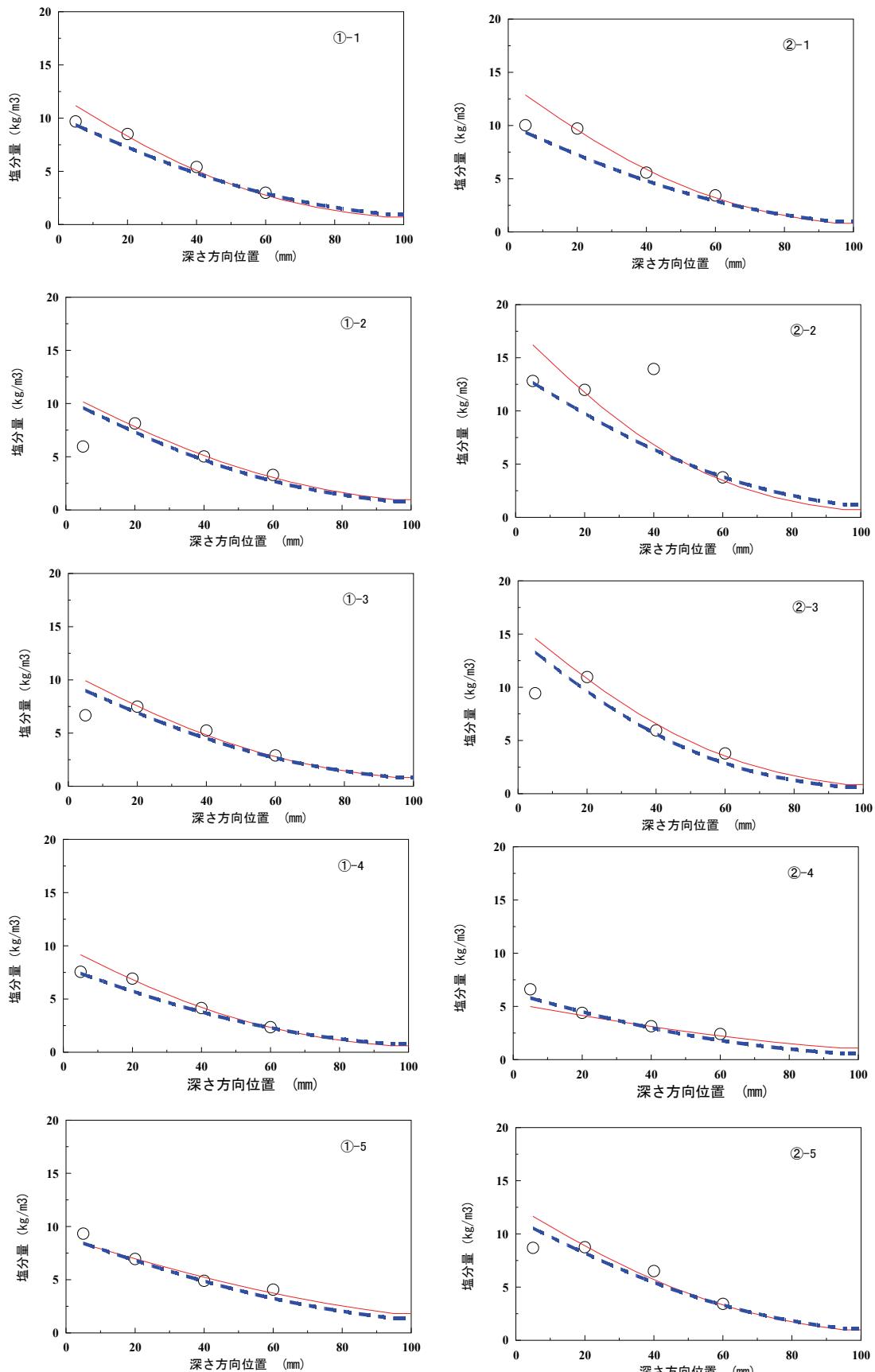


図-5 見かけの拡散係数の推定（青色破線：推定者A、赤色実線：推定者B、○：実測値）

表-3 見かけの拡散係数、表面塩分量の推定結果

試料 No.	表面塩分量		拡散係数	
	kg/m ³		×10 ⁻⁷ mm ² /s	
	推定者A	推定者B	推定者A	推定者B
①-1	13.20	10.82	9.60	12.40
①-2	11.80	11.20	11.90	11.10
①-3	11.60	10.44	11.00	11.70
①-4	10.80	8.56	9.88	12.30
①-5	9.35	9.54	21.50	16.70
②-1	15.20	11.50	9.72	13.30
②-2	19.40	14.68	8.38	11.90
②-3	17.30	15.91	9.40	8.37
②-4	5.56	6.70	21.50	12.40
②-5	13.60	12.19	11.20	12.50
③-1	12.31	11.76	26.70	25.80
③-2	11.70	11.01	21.50	20.40
③-3	13.45	12.58	12.90	12.70
③-4	13.90	12.88	15.80	15.30
③-5	13.80	13.10	17.10	16.40
④-1	11.90	11.78	13.30	12.20
④-2	14.40	13.85	12.00	8.99
④-3	18.10	16.08	9.45	9.84
④-4	13.80	13.02	12.10	11.00
④-5	16.10	15.11	14.50	14.10

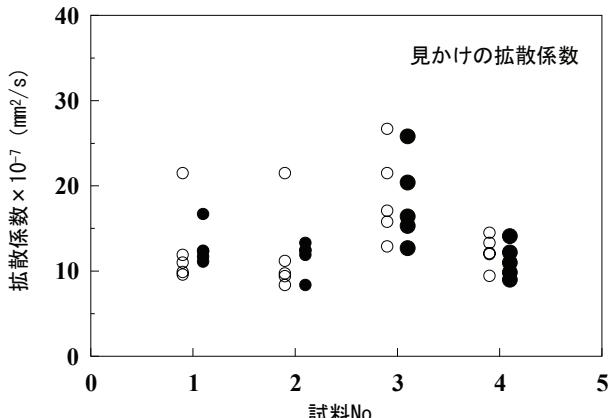


図-7 見かけの拡散係数の推定結果
(○は推定者A, ●は推定者B)

4. まとめ

本研究では、コアから測定した塩分量にどの程度ばらつきがあるのかを把握するため、東京湾に面する岸壁コンクリートの4箇所について、1箇所から5本のコアを採取し、その塩分量を測定し、そのばらつきについて検討を行った。さらに、測定された塩分量から見かけの拡散係数や表面塩分量を算定し、そのばらつきについても検討を行った。

研究の結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 測定された塩分量のばらつきは、潮間帯で最も大きく、
潮間帯より下の満潮時に海水に浸かっている箇所で
最も小さかった。

(2) コンクリート表面付近の塩分量は、海水や雨水に洗わ
れるため、実際よりも小さく測定されるため、Fick の
拡散則より表面塩分量や見かけの拡散係数を推定す

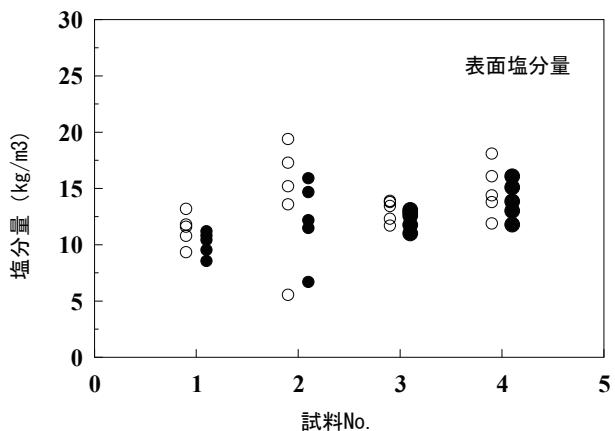


図-6 求められた表面塩分量（○は推定者 A、●は推定者 B）

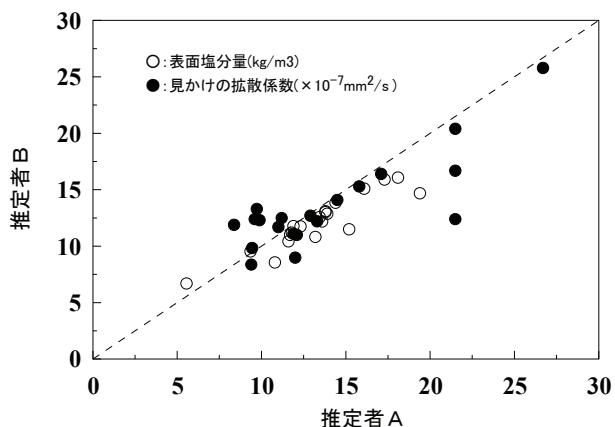


図-8 推定者による表面塩分量および見かけの拡散係数の差（○は推定者A、●は推定者B）

る際には、このことを考慮する必要である。

- (3)コアから測定した塩分量を基に表面塩分量と見かけの拡散係数を算定したところ、同じ場所であってもばらついていることがわかった。推定者間のばらつきは比較的小さかった。

(4)表面塩分量と見かけの拡散係数では、表面塩分量の方が感度が大きいため、表面塩分量の方を正確に求める必要がある。表面塩分量が正確に求まっていないとその影響は見かけの拡散係数の推定に影響を及ぼす。

参考文献

- 1) 加藤絵万, 横田 弘: 海洋環境下のコンクリート部材における塩化物イオンの浸透, 生産研究, 60巻3号, pp.44-47, 2008.
 - 2) 土木学会コンクリート委員会, 土木学会コンクリート標準示方書[設計編], p.119, 2007.3.