

(68) 和泉層群泥岩の工学的特性について

大阪市立大学理学部
大阪市立大学理学部
(株)建設企画コンサルタント

○ 三田村 宗樹
林 田 精郎
岡 島 信也

Engineering characteristics of Izumi Group (Cretaceous) Mudstone

Muneki MITAMURA, Osaka City University
Yoshiro HAYASHIDA, Osaka City University
Sinya OKAJIMA, Construction Project
Consultants Co., Ltd.

Abstract

Izumi Group (Uppermost Cretaceous) predominates along the Median Tectonic Line from west Shikoku to west Kinki, and mainly consists of sandstone and mudstone in rhythmical alternation. Recently, big construction projects and works, developed for the area of Izumi Group, are progressing. Especially, mudstone of Izumi Group has noticeable property for engineering. So we studied this mudstone through several laboratory tests about physical characteristics.

Crush test(KODAN 109), Tumbling test(JIS A 1121) and Slaking test(KODAN 110) showed that the mudstone is easily broken into granule size through repetition of dry and wet. Through the bending and swelling tests and X-ray examinations about clay mineral arrangement in test specimen, tension strength of the mudstone is weaker in normal direction to lamination, so this mudstone swells up larger in this direction than other directions.

1. はじめに

近畿地方の地質は、和歌山県の紀ノ川沿いに東西に走る中央構造線により、北部の内帯と南部の外帯に区分されている。この構造線は、淡路島の南部をかすめて、四国の吉野川に沿って西に走っている。この構造線のすぐ北側の内帯側に和泉層群と称されている中生代白亜紀に形成された地層群が東西に細長く分布している。

和泉層群はいくつかの累層に区分されているが、工学的には、砂岩・泥岩のリズミカルな互層としてとらえられ、主たる構成岩である砂岩および泥岩の物性と岩体としての構造や断裂系が重要である。

大鳴門橋で代表されるように、近年和泉層群分布地域で大型の建設工事が実施されたり、新たに計画されたりしている。関西新空港とその関連する工事の一部には和泉層群分布地域を対象にしたものがある。この報告は和泉帯の工学的問題を大きく支配する泥岩の物性の一部を紹介するものである。

なお、用いた試料は淡路島洲本市内田の泥岩と大阪府泉南地域の泥岩試料（I 試料：阪南町，D 試料：泉南市堀河）である。なおここに報告した内田泥岩の物理的特性に関するデータの一部分は大阪大学災害科学研究所の資料より引用したものである。

2. 破碎特性

日本道路公団仕様による方法による内田泥岩の破碎率は図-1に示すように15~20%の範囲であったが、特筆することは表-1に示す一軸圧縮強度と比較すると、一軸圧縮強度が大きいB試料の破碎率が他のものよりやや大きいことである。

3. スレーキング特性

日本道路公団仕様による試験を採用したが、乾燥時の温度を30度、70度、110度としたことと、湿潤処理の水を清水にしたものと標準海水にしたものがある。測定結果によると内田泥岩のスレーキング率は図-1に示してあるように15～87%であることから、内田泥岩は乾湿の繰り返しによって容易に細粒化が進むことが分かる。また乾燥温度の相違によるスレーキング率の違いは図-2に示してあるように必ずしも一定の傾向がなく、乾燥温度の高い方がスレーキング率が高いこともあり、その逆の場合もある。海水処理と清水処理の関係も同じ図に示してあり、海水処理の方がスレーキング率がやや高いことがあり、膨潤理論と整合しないばかりか膨潤試験の結果とも一致しない。

4. すり減り特性

岩石のすり減り特性を知るために、JIS 1121に規定されたロサンゼルス試験機によるすり減り試験を行った。その結果内田泥岩のすり減り減量は図-1に示してあるように30～40%の範囲であった。

内田泥岩の破碎特性、スレーキング特性、すり減り特性などの結果から、内田泥岩は他の和泉層群の泥岩と同じように乾湿の繰り返しを継続することによって細粒化が促進されることが分かった。

一軸圧縮強度とスレーキング率の関係をみると、前述したように一軸圧縮強度の大きいB地点の泥岩がスレーキング率が高く、D、Cと強度の順にそれが低くなり、強度が大きいものほどスレーキング率が高くなる傾向がみられる。また内田泥岩のロサンゼルス試験によるすり減り減量は30～40%であるが、一軸圧縮強度が大きいBの泥岩がすり減り減量が最も高い値であった。スレーキング率が大きいものはすり減り減量も大きい傾向があることも図-1から分かる。圧碎率は15～20%の範囲で3試料とも大差がなかった。

図-1でポイントロード指数とスレーキング率の関係をみると、ポイントロード指数が低い、つまり引っ張り強度が低いものの方がスレーキング率が高い、スレーキングが膨潤の結果とすれば、これは当然のことである。

図-3には和泉層群の各種岩石について測定されたポイントロード指数の平均値を示してあるが、内田泥岩は他の岩石より強度が低い傾向がある。

5. 曲げ特性

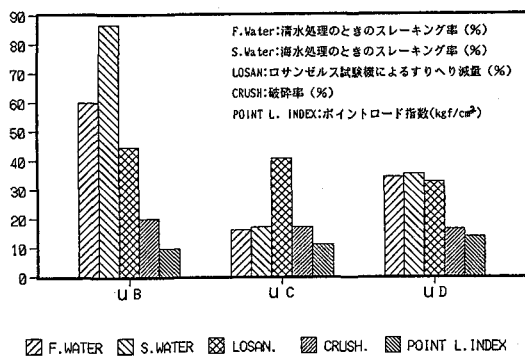


図-1：内田泥岩のスレーキング率、すり減り減量、破碎率、ポイントロード指数の関係

表-1：内田泥岩の超音波伝播速度 (Vp)、一軸圧縮強度 (S)、ヤング率 (Es) および弾性比

SAMPLE No	Vp (m/s)	S (KG/CM2)	Es (kg/cm2)	MODULUS R
B-1A	5280	271	46900	173
1B	5170	230	54700	238
2A	5660	406	77800	192
2B	5620	529	72200	136
2C	5680	232	75100	324
3A	5240	362	77100	213
3B	5200	406	73800	182
C-1A	4770	357	38100	107
1B	4840	346	36300	105
2A	4570	309	25700	83
2B	4670	365	35300	97
3A	4880	296	36600	124
3B	4680	255	37700	148
D-1A	4940	373	42600	114
1B	4750	290	47200	163
2A	5020	506	42400	84
2B	4920	422	39900	95
3A	4820	293	36400	124
3B	4790	294	37100	126

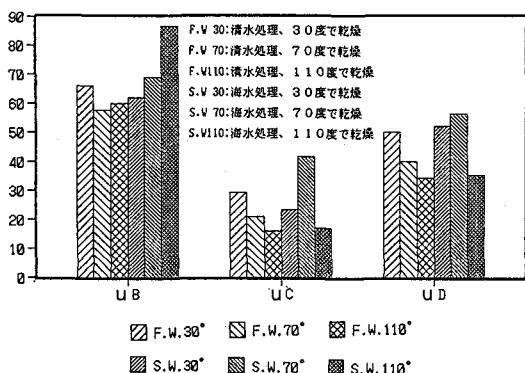


図-2：内田泥岩の乾燥温度および処理水の違いとスレーキング (%)

同一の岩塊から、図-4に示してあるように葉理を基準にして、幅と高さの二乗の積が1cm³程度で、長さが11~15cm程度の角柱に整形した試料の下端面に電気抵抗線ひずみゲージを貼付け、3週間程室内で風乾した試料と湿潤状態の試料について、曲げ強度と曲げひずみの測定を行った。

その結果は表-2と3に示してあるように、曲げ強度、伸長弾性係数ともにP方向の試料とL方向の試料では、L方向のものがやや大きい、大差はない、しかしV方向の試料は強度、弾性係数ともに著しく小さく、その値は前二者の二分の一程度である。この傾向は葉理の方向との関係で最も曲げやすい方向または引っ張り強度が最も小さくなる方向がV方向であることを示しており、予想される結果とよく一致している。

D試料について風乾試料と湿潤試料の値を比較すると、何れの方向の試料でも、湿潤状態のものの方が強度、弾性係数ともに著しく小さな値を示している。こうした傾向は他の堆積岩でごく普通にみられることではあるが、湿潤強度が乾燥強度の二分の一程度になることは異常といえる。

6. 膨潤曲げ特性

図-4のように、同一の岩塊から葉理を基準にして、厚さhが2~5mmの板状に試料を切出し、長さaが6~7cm、幅bが3cm程度に整形した試料を3週間程風乾した後に、その下端面に電気抵抗線ひずみゲージを貼付け、上端面に濾紙を乗せ、間隔5cmのナイフ・エッジの上にセットし、そして試料の上にダイヤル・ゲージをセットした後に、試料の上端面にイオン濃度の異なる溶液を滴下して試料上面を均一に湿らした。

このようにして試料の変形を観測した結果、イオン濃度が低い溶液を作用させたとき、試料は下端面を内側にして反り返る変形をした。ダイヤル・ゲージと電気抵抗線ひずみ計の動きから、溶液を滴下し始めると図-5に示すように、間もなく上面が伸びる、その影響で下端面が圧縮されるが、時間の経過とともに下端面にも伸びが現れる。ダイヤル・ゲージの動きは50分前後で停止するが、電気抵抗線ひずみゲージの方は300分を経過するまで動いていることが多く、500分を経過するとほぼ一定の値になり安定する。このようにして電気抵抗線ひずみ計の値が一定になったときのひずみ量を読み取り、作用させた溶液のイオン濃度との関係を求めた。

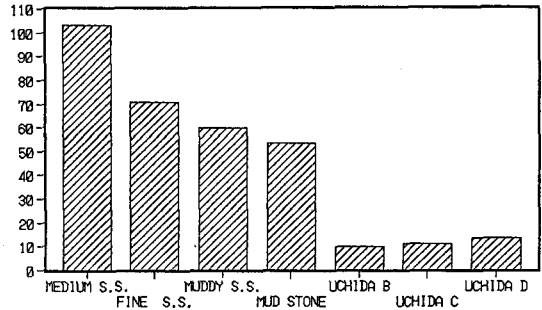


図-3：和泉層群の各種岩石のポイントロード指数；単位は(kgf/cm²)

	I 試料				D 試料			
	b cm	h cm	σ kgf/cm²	$E \times 10^5$ kgf/cm²	b cm	h cm	σ kgf/cm²	$E \times 10^5$ kgf/cm²
P 方 向	1.20	0.97	251	4.65	1.75	1.49	92	1.92
	2.02	0.97	259	4.17	1.64	1.03	355	4.07
	1.02	1.81	264	4.77	1.04	1.49	157	4.14
	平均		258	4.53	平均		201	3.38
L 方 向	1.92	1.05	284	4.75	1.54	1.02	255	3.55
	1.20	0.87	295	4.62	1.72	1.05	205	3.70
	2.18	0.89	269	4.21	1.52	1.03	316	3.75
	1.85	1.06	248	4.76	1.85	1.07	209	3.53
	平均		274	4.59	平均		246	3.63
V 方 向	1.47	1.49	124	2.24	1.60	1.38	94	2.00
	1.66	0.87	173	2.42	1.52	1.37	85	1.43
	2.05	1.48	126	2.42	1.37	1.35	111	1.94
	2.15	0.88	96	2.04	1.37	1.45	91	1.32
	平均		130	2.28	平均		95.3	1.67

b：試料の幅 h：試料の高さ σ ：曲げ強度 E：弾性係数

表-2：泥岩（風乾試料）の曲げ強度と曲げによる伸び弾性係数

表-3：泥岩（湿潤試料）の曲げ強度と曲げによる伸び弾性係数

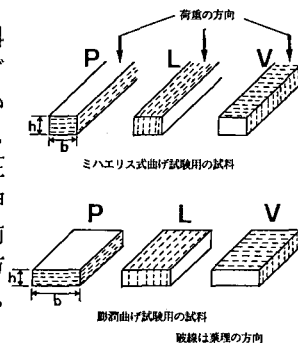


図-4：試験用試料と葉理面の関係

	I 試料				D 試料			
	b cm	h cm	σ kgf/cm²	$E \times 10^5$ kgf/cm²	b cm	h cm	σ kgf/cm²	$E \times 10^5$ kgf/cm²
P 方 向	1.47	1.31	120	2.04	1.31	1.27	110	3.43
	1.33	1.31	87	2.86	1.30	1.41	120	3.29
	平均		104	2.45	平均		106	3.43
L 方 向	1.31	1.38	89	3.57	1.36	1.17	54	1.07
	1.31	1.27	110	3.43	1.18	1.36	42	1.03
	1.30	1.41	120	3.29	1.58	1.31	27	0.55
	平均		106	3.43	平均		40.8	0.83
V 方 向	1.36	1.17	54	1.07	0.36	1.25	40	0.68
	1.18	1.36	42	1.03				
	1.58	1.31	27	0.55				
	平均		40.8	0.83	平均			

b：試料の幅 h：試料の高さ
 σ ：曲げ強度 E：曲げ弾性係数

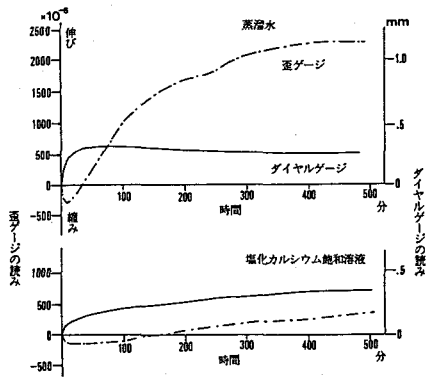


図-5：膨潤曲げ量と経過時間の関係

表-4：純水とCaCl₂飽和溶液で処理したときの曲げひずみ

試料	方向	蒸留水				塩化カルシウム飽和溶液			
		b	h	ひずみ(×10 ⁻⁶)		b	h	ひずみ(×10 ⁻⁶)	
		cm	cm	測定値	平均値	cm	cm	測定値	平均値
I	P	3.15	0.28	534		3.25	0.16	290	
		3.23	0.31	742	638	3.10	0.30	0	145
	L	3.13	0.27	1084		3.21	0.35	38	
		3.17	0.26	865	975	3.12	0.26	108	73
	V	2.99	0.25	2271		3.13	0.21	353	
D		3.14	0.24	2574	2423	3.09	0.33	-11	171
	P	3.08	0.29	1256		3.17	0.25	-118	
		3.14	0.27	1905	1581	3.22	0.27	-51	-85
	L	3.02	0.27	2496		3.19	0.50	-57	
		3.05	0.27	2586	2541	3.14	0.48	-43	-50
	V	3.15	0.36	2967		3.11	0.38	70	
		3.03	0.33	4578	3773	3.14	0.22	432	251

b：試料の幅 h：試料の高さ

測定結果は表-4に示すように、純水を作用させた方がひずみ量が最も大きい、その中でもV方向の試料の方が大きな変形量を記録し、P方向のそれは最も小さい変形量を記録した。さらに、岩質の違いによっても変形量に違いがあることが表から分かる、すなわち曲げ強度と曲げ弾性係数が小さい値をもつD試料の方が膨潤変形量が多い傾向がある。純水を作用させた場合、全ての試料で何れの方の試料でも岩石の破壊に到達するだけの変形が観測されているが、CaCl₂飽和溶液を作用させた場合には僅かな収縮のみみられるだけで、破壊に至るひずみ量は観測されていない。この試験では、純水とCaCl₂飽和溶液についてのみ観測したが、他の試験結果から類推すると、作用する溶液のイオン濃度が低いほど膨潤変形量が多い傾向がある。

7. 膨潤特性

試料を板状に整形し、葉理に平行な方向と垂直な方向に電気抵抗線ひずみゲージを貼付け、3週間程シリカゲルを入れたデシケータの中に保存した後に、純水、標準海水、CaCl₂30%溶液の中に入れて膨潤量を測定した。

その結果は表-5に示すように、葉理に平行な方向よりもそれに垂直な方向の方が2倍程度大きな膨潤量を記録した。これは膨潤による曲げ変形のときと同じ傾向を示していて、曲げ強度や引っ張り強度が小さい方向で膨潤量が多い。作用させた溶液のイオン濃度が増加すると膨潤量は減少するがCaCl₂30%溶液でも僅かではあるが膨潤が観測された。また標準海水の場合は純水の場合よりも僅かに膨潤量が少ないが両者ともに岩石の破壊ひずみに達する膨潤ひずみを観測した。

8. X線による鉱物分析

X線による鉱物分析は粉末法が最も一般的であるが、岩石の骨組み構造を知ろうとするときには、定方位試料を用いることがある。

粉末法：岩石を200メッシュ程度に微粉末にして試料台にセットしそれにX線を照射して、感光紙上に回折像を結ばせるか、回折X線の強度を計数管で読み取り、分析する方法が広く用いられている、この方法によって岩石中に含まれている鉱物の種類を識別することができる。和泉層群の泥岩には表-6に示すような鉱物が含まれている、ここで注意すべきは、膨潤性を大きく支配するモンモリロナイトは極く限られた試料にしかも微量含まれることはあっても、泥岩全体に含まれてはいない。またカオリナイトと緑泥石は全ての泥岩に少量含まれてはいるが、膨潤性をもつものではない。このためにこの泥岩をX線分析しただけで、工学的には何ら問題のない岩石であると判断されることがあるが、それは誤りで、現実にはこの泥岩は、著しくはないが、膨潤性があり、スレーキングや乾湿の繰返しによる細粒化を起こしている。

表-5：処理溶液と膨潤量の関係

溶 液	I 試料			D 試料		
	b	a	b/a	b	a	b/a
蒸留水	6733	2778	2.42	2747	1424	1.93
	4666	2028	2.30	3408	1636	2.08
	平均	5700	2403	2.37	3078	1530
塩化カルシウム 30%溶液	3457	1933	1.79	420	408	1.03
	360	230	1.57	543	762	0.71
	平均	1909	1082	1.78	282	565
人工海水	3223	1932	1.67	2263	763	2.97
	5647	2174	2.60	3057	1516	2.02
	平均	4535	2053	2.16	2660	1140

a：葉理に平行な膨潤ひずみ

b：葉理に垂直な膨潤ひずみ

表一6に示した鉱物以外に、泥岩には黄鉄鉱・白鉄鉱やその他の鉄の硫化物が含まれている。さらに、泥岩の風化面や割れ目には各種の硫酸塩が晶出しているが、泥岩の内部に含まれている証拠はない。硫酸塩の晶出は実験室で再現することもできる。

定方位法：堆積岩には堆積時の構造が保存されていることが多く、特に葉理の発達した細粒堆積岩では、それが物理的性質に反映していることが知られている。その原因の一つとして偏平な粘土鉱物が

定方位配列をすることがあげられている。そこで葉理に平行な研磨面とそれに垂直な研磨面にX線を照射して回折強度を測定すると、両者の違いから、岩石の骨組構造を表す指数を求めることができる。一般にはカオリナイトの(001)の回折強度と(060)のそれとの比をとって構造指数としているが、今回の泥岩にはかなりの量の緑泥石が含まれていたため、X線の発生強度やスリット等の測定条件を一定にして測定した二つの定方位試料の緑泥石の底面回折強度を比較すると、両者にはかなりの違いがあるところから、ここでは葉理に平行な面の回折強度を I_{cp} 、葉理に垂直な面のそれを I_{cv} として、 I_{cp}/I_{cv} を構造指数とした。

測定の結果は表一7に示してあるように構造指数は1.3~2.7であった、この結果は前述した方向による物性値の異方性の度合とよく一致する。またこのような結果を吟味すると、和泉層群の泥岩は葉理面に垂直な方向に膨潤しやすい性質をもっていることになるから、葉理面と層理面が平行な場合には、層理面に垂直な方向に膨潤しやすい性質をもつことになる。

9. まとめ

この研究に使用した和泉層群の泥岩の中には、葉理の発達が明瞭で、葉理に垂直な方向よりは平行な方向に曲げやすく、垂直な方向の引っ張り強度が低く、引っ張り強度の低い方向に膨潤しやすい。また、緑泥石のような偏平な粘土鉱物は葉理に平行に配列しやすく、岩石の異方性をより一層強調する原因となっている。膨潤性粘土鉱物が含まれていた場合には、粘土鉱物の膨潤は底面に垂直な方向に顕著であるから、同一の鉱物組成をもち、その他の条件が等しいとき、X線分析による構造指数が高いほど膨潤性が強い傾向があることが分かる。

泥岩の膨潤性を支配する要因として、1；構成粘土鉱物の膨潤によるもの、2；岩石中の間隙水と周囲の水とのイオン濃度の違いによる浸透圧によるもの、3；過圧密状態から解放されたためによるもの、4；硬石膏の加水のための体積膨張によるもの、5；黄鉄鉱や白鉄鉱が分解して石膏が晶出し、そのために体積膨張したことによるもの等が考えるが、和泉泥岩には膨潤性の強いモンモリロナイトは殆ど含まれていないことから、構成鉱物による影響は考え難い。切り取り法面や切り取られた岩塊はそれまで拘束していた応力が解放されるから、体積膨張が生ずるであろうが、それが原因で岩塊が破壊するような引っ張り応力が発生するとは考え難い。風化変質していない和泉の泥岩の中には、石膏の結晶はないことから、石膏の加水による体積膨張が膨潤破壊の原因であるとすることはできない。

黄鉄鉱や白鉄鉱の酸化により硫酸イオンができ、それが岩石中のカルシウムやカリウムと結合して石膏のような硫酸塩が晶出する、このとき岩石は膨張破壊する。これは野外でも観察でき、室内でも再現することができる。こうした過程の中で、もし、カチオンの量が十分でないと、酸性になる。実際に和泉の泥岩の分解した土壌の中には酸性のものがある。膨潤実験でみたように作用させた水のカチオンの濃度が低いほど膨潤しやすいことから、浸透圧による影響は顕著であることが考えられる。これを立証するためには、岩石中のカチオン濃度の測定が必要である。化学分析の結果から和泉の泥岩中には過飽和と思われる程のカチオンやアニオンがふくまれている。

表一6：泥岩中の構成鉱物（数字はX線回折強度の相対値）

試料	U.B	U.C	U.D	I	D
石英	10	10	10	10	10
斜長石	7	7	6	6	7
緑泥石	3	3	3	3	3
イライト	1	1	1	1	1
カオリナイト	2	2	2	2	2
モンモリロナイト				<1	

表一7：定方位試料における緑泥石の(001)面回折強度の比較

試料	I_{cp}	I_{cv}	I_{cp}/I_{cv}
U.B	12.6	5.5	1.9
U.C	8.5	6.4	1.3
U.D	8.8	6.5	1.4
I	19.5	7.3	2.7
D	12.4	6.5	1.9

I_{cp} :葉理面に平行な面の回折強度

I_{cv} :葉理面に垂直な面の回折強度