

## 8 回収されたセグメントの破損状況調査及びセグメント及び継手の強度試験

災害発生直後である 2012 年 2 月 15 日から立坑内から破損したセグメントが引き揚げられた。その後 2012 年 3 月 2 日まで断続的にセグメントが引き揚げられた。その後、2013 年 7 月 10 日からシールドマシンの引き揚げに伴い、残存していたセグメントも引き揚げ、回収された。本章では、8.1 節にて回収されたセグメントにおける破損状況調査結果について述べ、その後 8.2 節～8.5 節では当現場で使用予定だった未使用のセグメントを用いたセグメント及び継手の各種強度試験結果について述べる。

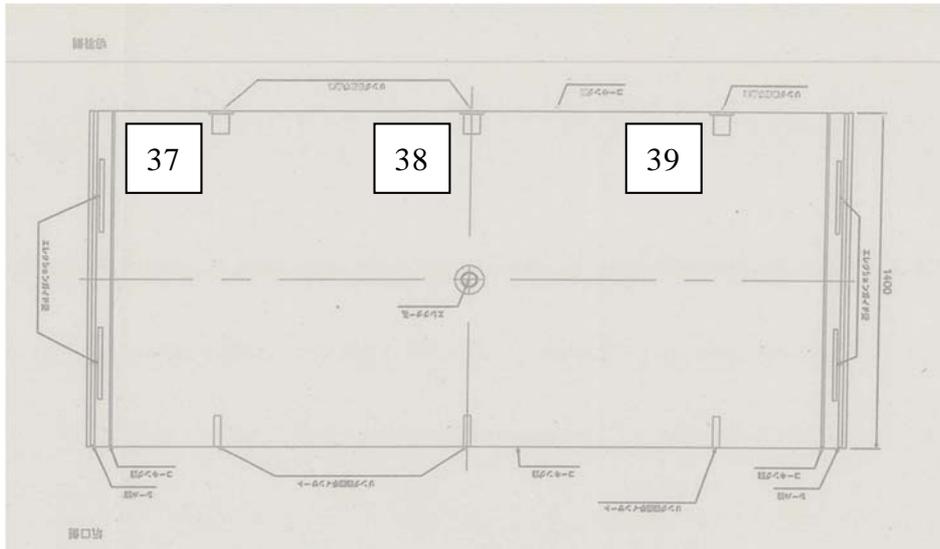
### 8. 1 立坑及び海底地盤から回収されたセグメント

109R～112R の各セグメント (A1, A2, B1, B2, K) の破損状況を図 8.1.1～図 8.1.16 に示す。また、地山側から見たセグメントの全景を図 8.1.17、坑内側から見たセグメントの全景を図 8.1.18 に示す。

これらの図から、111R よりも 110R の損傷が激しいことがわかる。110R では、K セグメントを除く A1, A2, B1, B2 セグメントがすべてほぼ中央部で破壊していた。

なお、A1, A2, B1 セグメントについては、コンクリート部とともに鉄筋も全て中央部で破断していたが、B2 セグメントについては、コンクリート部は破断していたが鉄筋は破断せずに繋がったままであった。これは B2 セグメントの変形が先に進み、その後、一気に A1, A2, B1 セグメントが破壊した可能性があることを示唆している。

全体としては、111R (110R と 111R 間) ではボルトインサート部においてコーン破壊が多く見られているが、110R (109R と 110R 間) ではボルトインサート内でボルトが破断している箇所が多く見られた。



(a) 設計図面



(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 37 番のボルトボックス

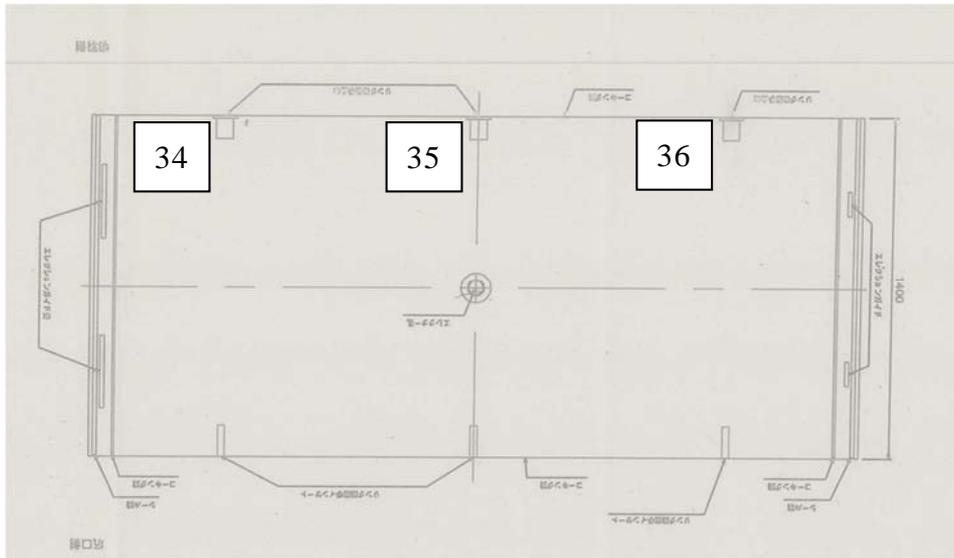


(e) 38 番のボルトボックス



(f) 39 番のボルトボックス

図 8.1.1 109R の A1 セグメントの破損状況



(a) 設計図面



(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 34 番のボルトボックス

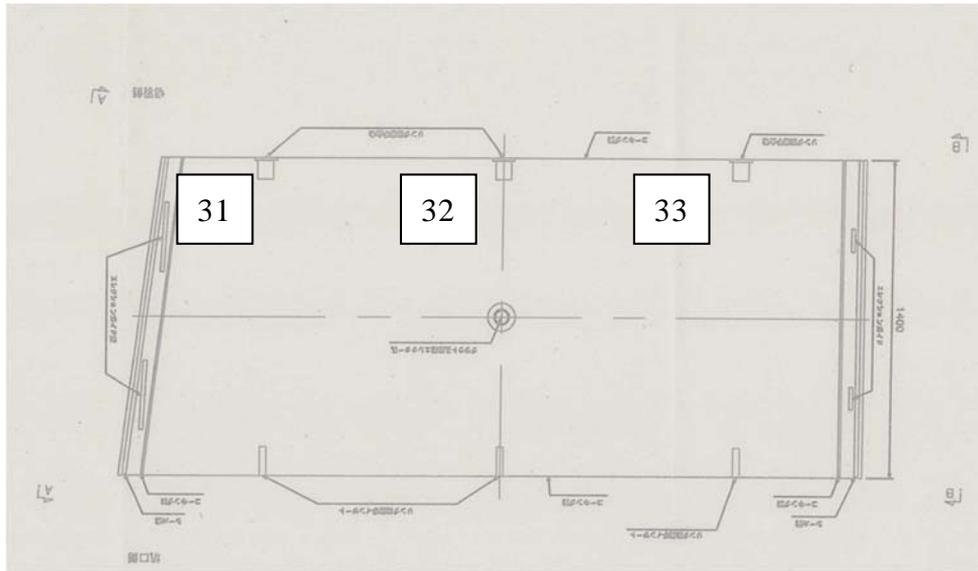


(e) 35 番のボルトボックス

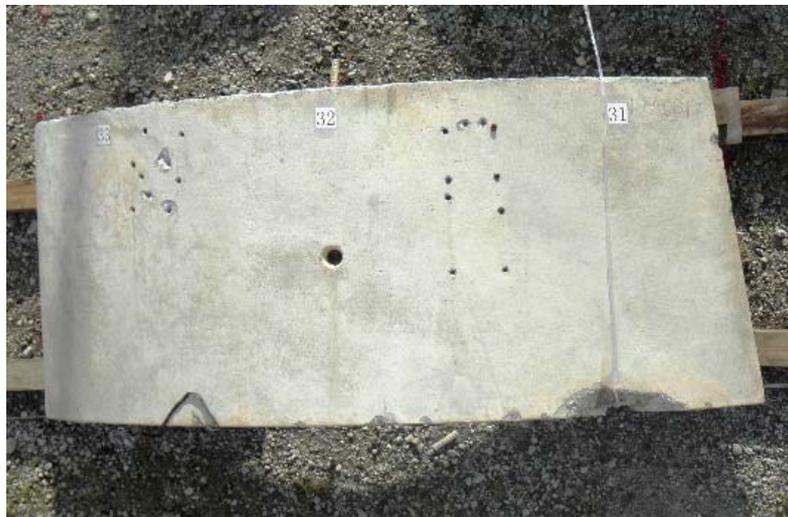


(f) 36 番のボルトボックス

図 8.1.2 109R の A2 セグメントの破損状況



(a) 設計図面



(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 31 番のボルトボックス

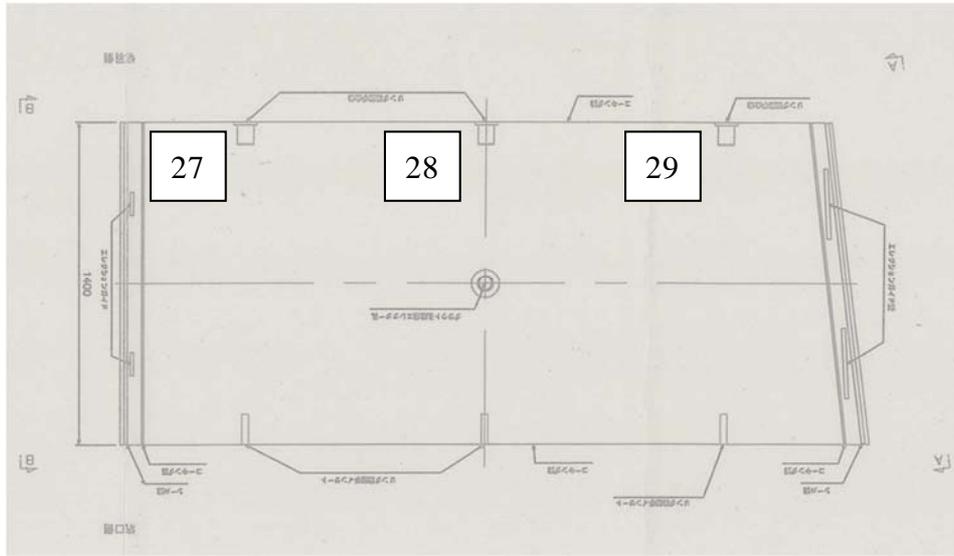


(e) 32 番のボルトボックス



(f) 33 番のボルトボックス

図 8.1.3 109R の B1 セグメントの破損状況



(a) 設計図面



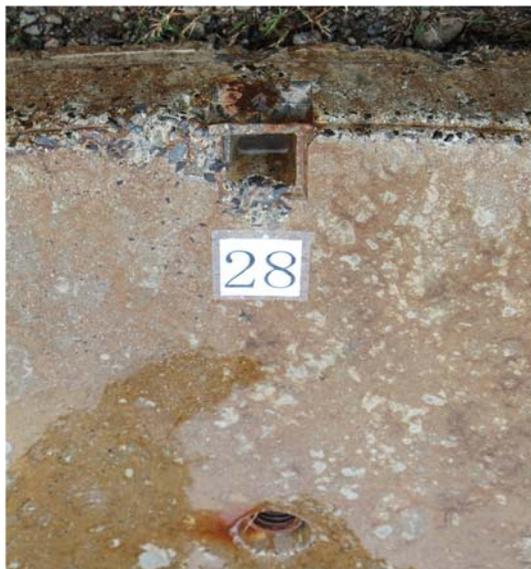
(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 27 番のボルトボックス

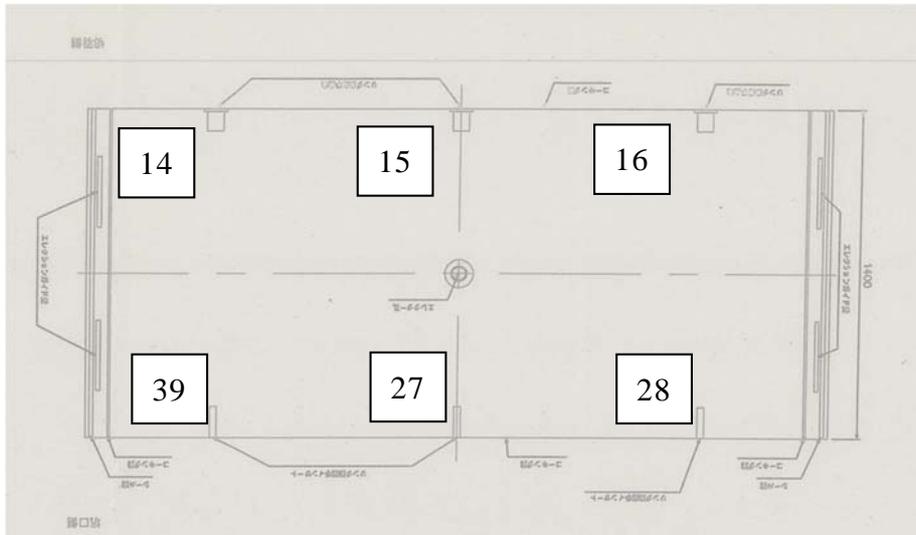


(e) 28 番のボルトボックス



(f) 29 番のボルトボックス

図 8.1.4 109R の B2 セグメントの破損状況



(a) 設計図面



(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 14 番のボルトボックス



(g) 39 番のボルトインサート



(e) 15 番のボルトボックス



(h) 27 番のボルトインサート

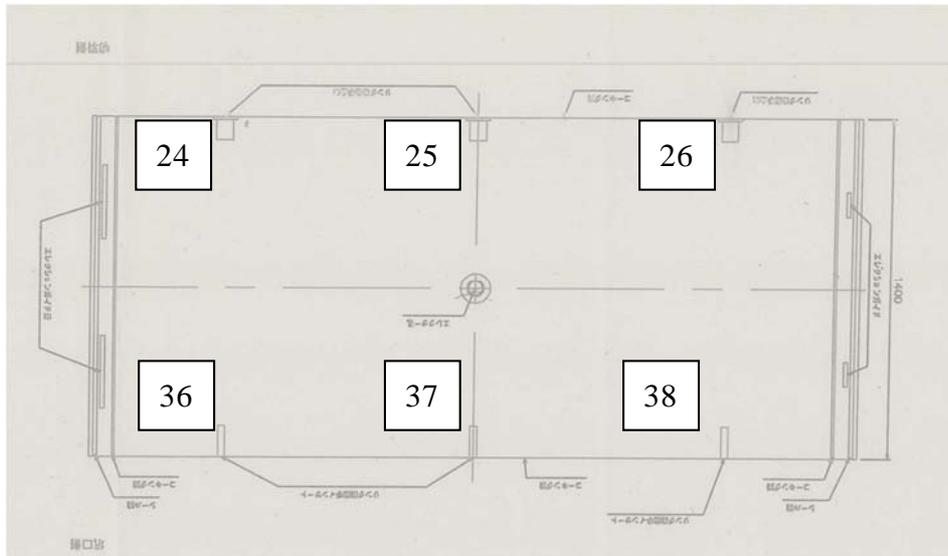


(f) 16 番のボルトボックス



(i) 28 番のボルトインサート

図 8.1.5 110R の A1 セグメントの破損状況



(a) 設計図面



(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 24 番のボルトボックス



(g) 36 番のボルトインサート



(e) 25 番のボルトボックス



(h) 37 番のボルトインサート

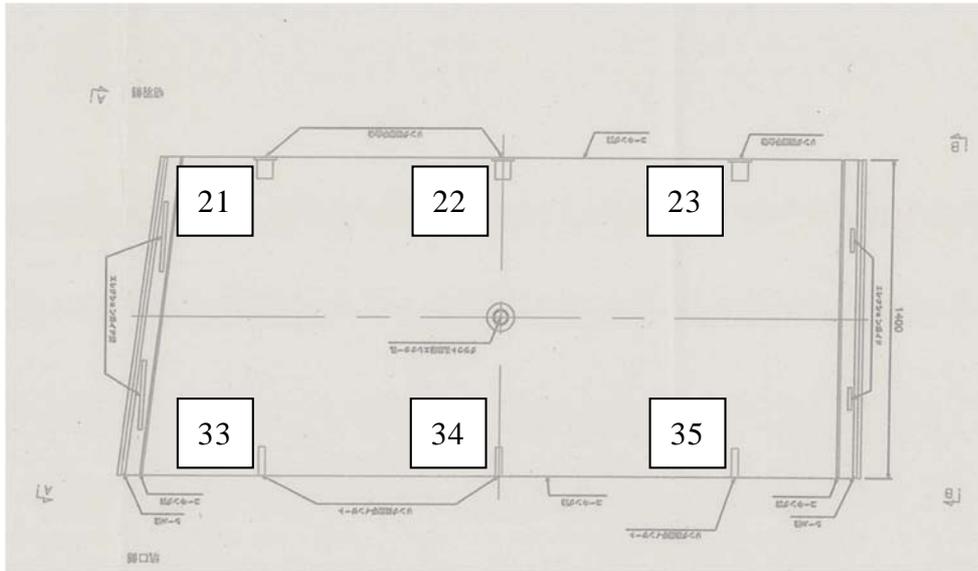


(f) 26 番のボルトボックス



(i) 38 番のボルトインサート

図 8.1.6 110R の A2 セグメントの破損状況



(a) 設計図面



(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 21 番のボルトボックス



(g) 33 番のボルトインサート



(e) 22 番のボルトボックス



(h) 34 番のボルトインサート

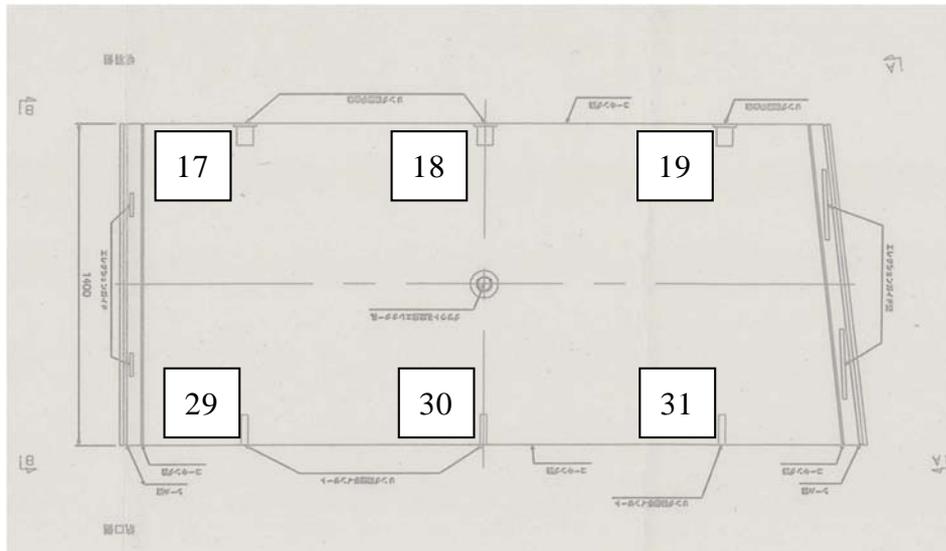


(f) 23 番のボルトボックス



(i) 35 番のボルトインサート

図 8.1.7 110R の B1 セグメントの破損状況



(a) 設計図面



(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 17 番のボルトボックス



(g) 29 番のボルトインサート



(e) 18 番のボルトボックス



(h) 30 番のボルトインサート

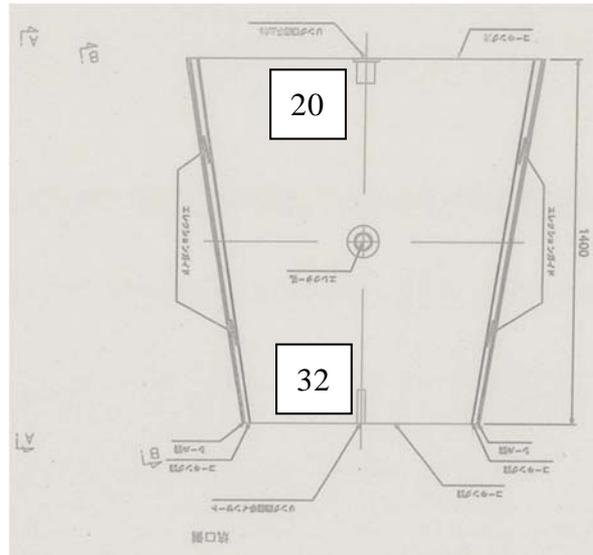


(f) 19 番のボルトボックス



(i) 31 番のボルトインサート

図 8.1.8 110R の B2 セグメントの破損状況



(a) 設計図面



(b) 地山側



(c) 坑内側

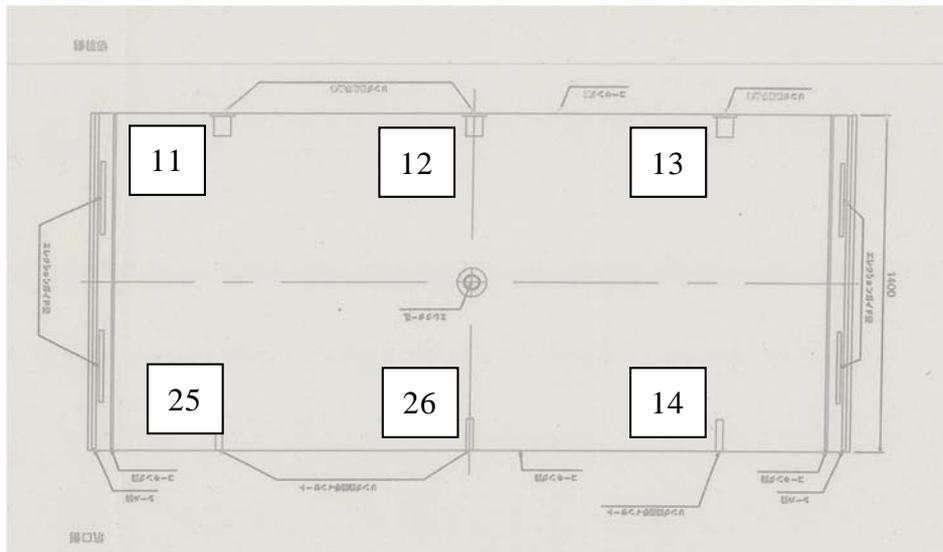


(d) 20 番のボルトボックス



(e) 32 番のボルトボックス

図 8.1.9 110R の K セグメントの破損状況



(a) 設計図面



(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 11 番のボルトボックス



(g) 25 番のボルトインサート



(e) 12 番のボルトボックス



(h) 26 番のボルトインサート

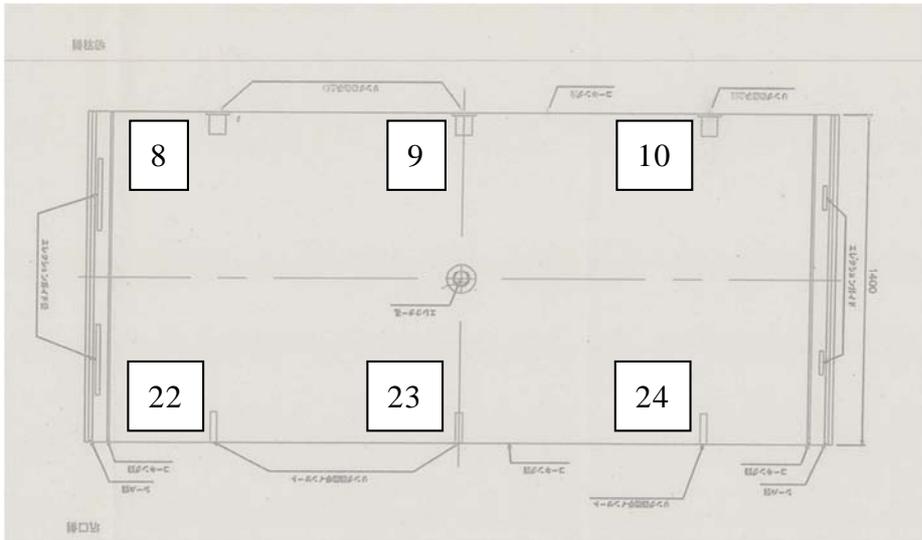


(f) 13 番のボルトボックス



(i) 14 番のボルトインサート

図 8.1.10 111R の A1 セグメントの破損状況



(a) 設計図面



(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 8 番のボルトボックス



(g) 22 番のボルトインサート



(e) 9 番のボルトボックス



(h) 23 番のボルトインサート

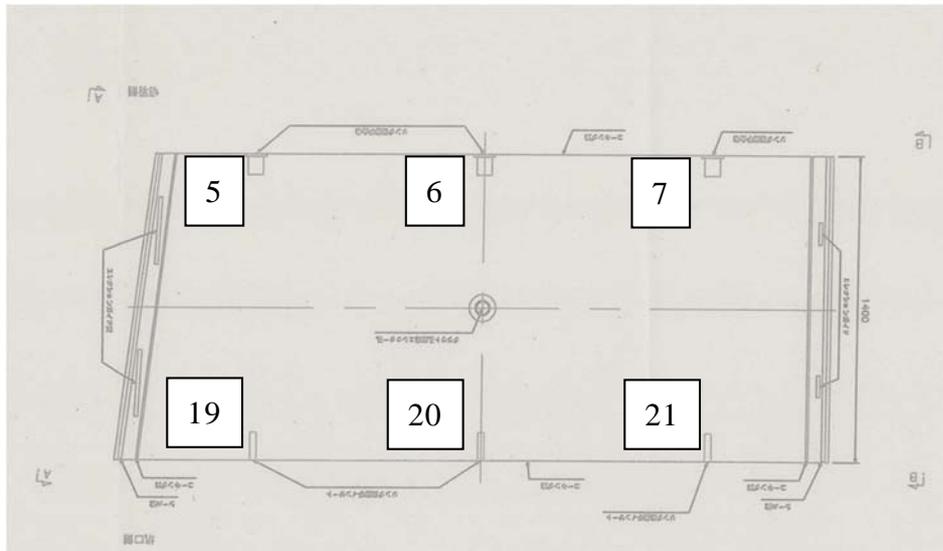


(f) 10 番のボルトボックス



(i) 24 番のボルトインサート

図 8.1.11 111R の A2 セグメントの破損状況



(a) 設計図面



(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 5番のボルトボックス



(g) 19番のボルトインサート



(e) 6番のボルトボックス



(h) 20番のボルトインサート

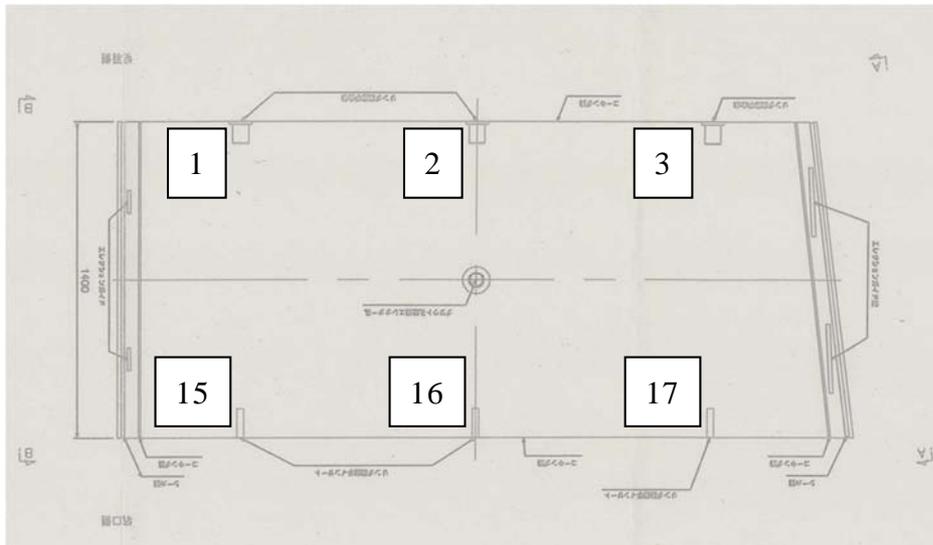


(f) 7番のボルトボックス



(i) 21番のボルトインサート

図 8.1.12 111R の B1 セグメントの破損状況



(a) 設計図面



(b) 地山側



(c) 坑内側



(d) 1 番のボルトボックス



(g) 15 番のボルトインサート



(e) 2 番のボルトボックス



(h) 16 番のボルトインサート

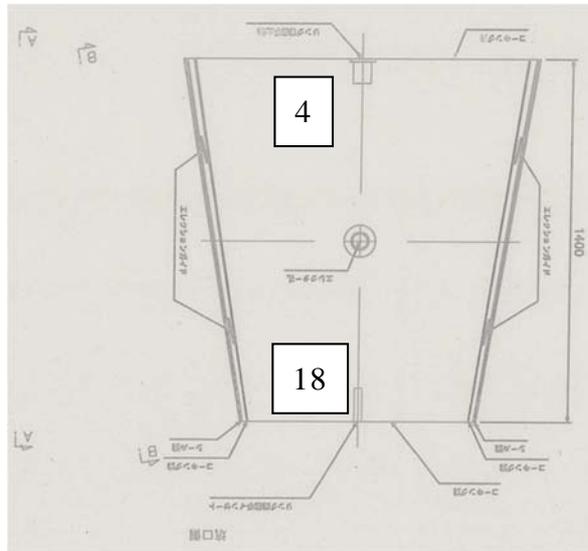


(f) 3 番のボルトボックス



(i) 17 番のボルトインサート

図 8.1.13 111R の B2 セグメントの破損状況



(a) 設計図面



(b) 地山側



(c) 坑内側

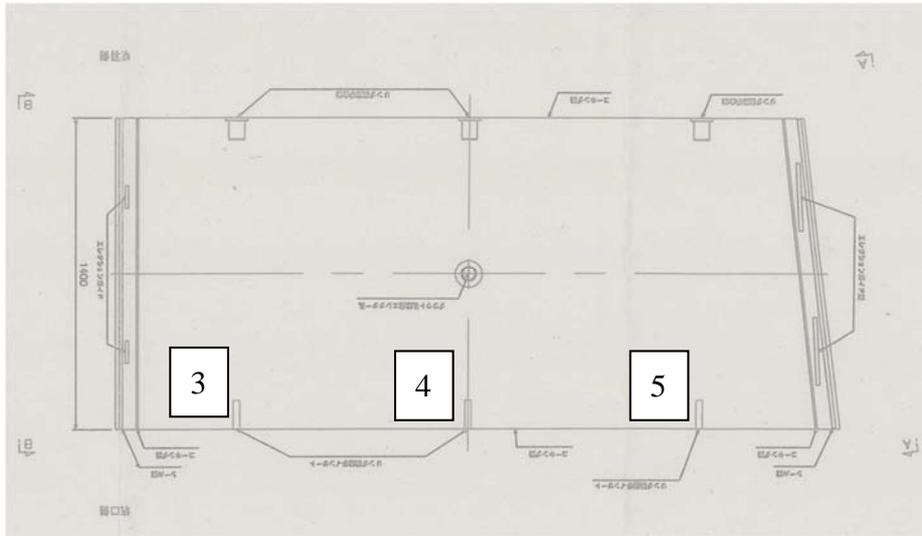


(d) 4番のボルトボックス



(e) 18番のボルトインサート

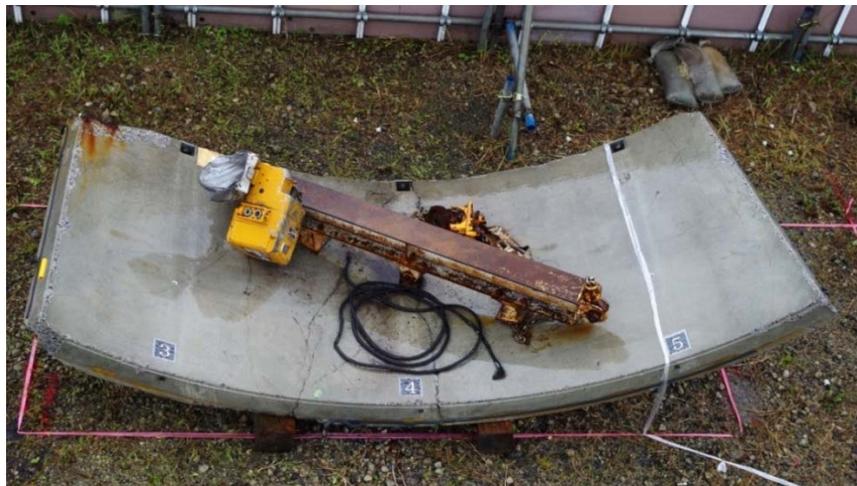
図 8.1.14 111R の K セグメントの破損状況



(a) 設計図面

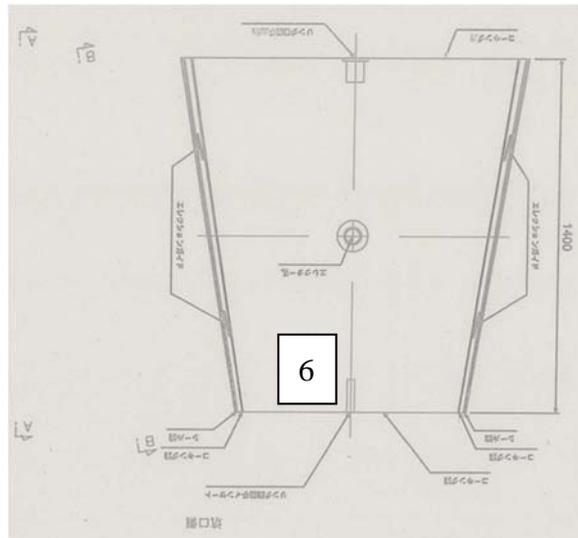


(b) 地山側



(c) 坑内側

図 8.1.15 112R の B2 セグメントの破損状況



(a) 設計図面



(b) 地山側



(c) 坑内側

図 8.1.16 112R の K セグメントの破損状況



図 8.1.17 112R~109R のセグメントの破損状況（地山側）

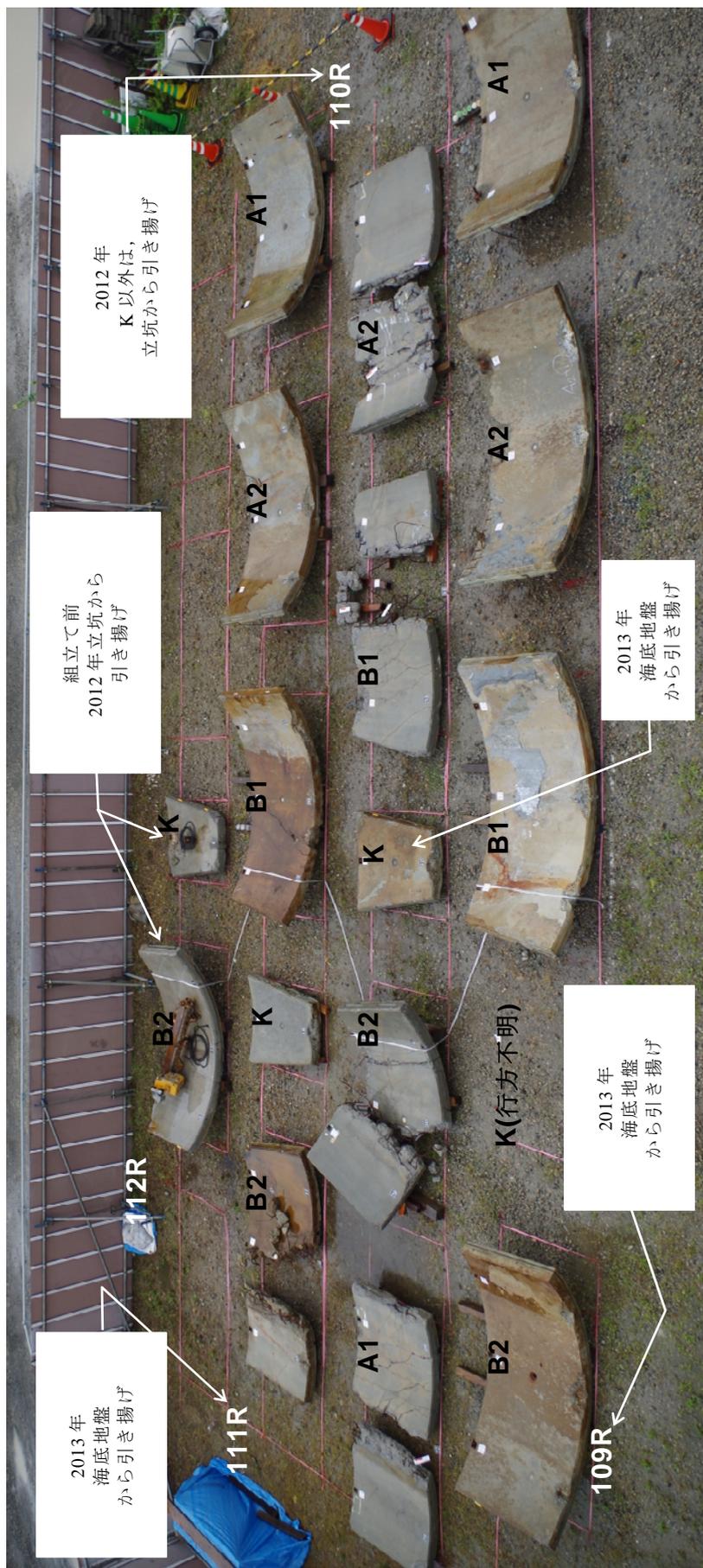


図 8.1.18 112R~109R のセグメントの破損状況 (坑内側)

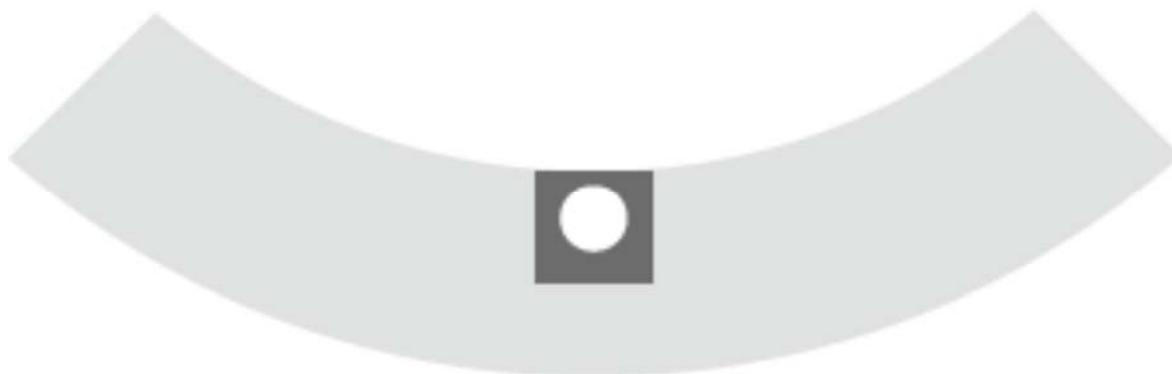
回収された各セグメントのリング継手の破壊状況を見ると、ボルトが破断している箇所、ボルトインサートが引抜けている箇所、ボルトボックスがコンクリートから剥離している箇所等が見られる。1つのセグメントにおいても、各リング継手の破壊状況が異なっている場合もある。そこで、災害発生時又は直後に各セグメントがどのように挙動したのかを把握するため、ボルトボックスのボルト穴の内径をキャリパー形内側マイクロメータにより計測した。

ボルト (M16) が破断又は変形する際、ボルトボックスのボルト穴 ( $\phi 23\text{mm}$ ) に変形を及ぼすと考えられる。また、その方向にボルトのネジ山の痕跡がついている箇所も見受けられた。そこで、ボルト穴の内径を数箇所計測し、ボルトのネジ山の痕跡の箇所も合わせて計測すると、ボルトが動いた方向 (セグメントが動いた方向) を推定できる。

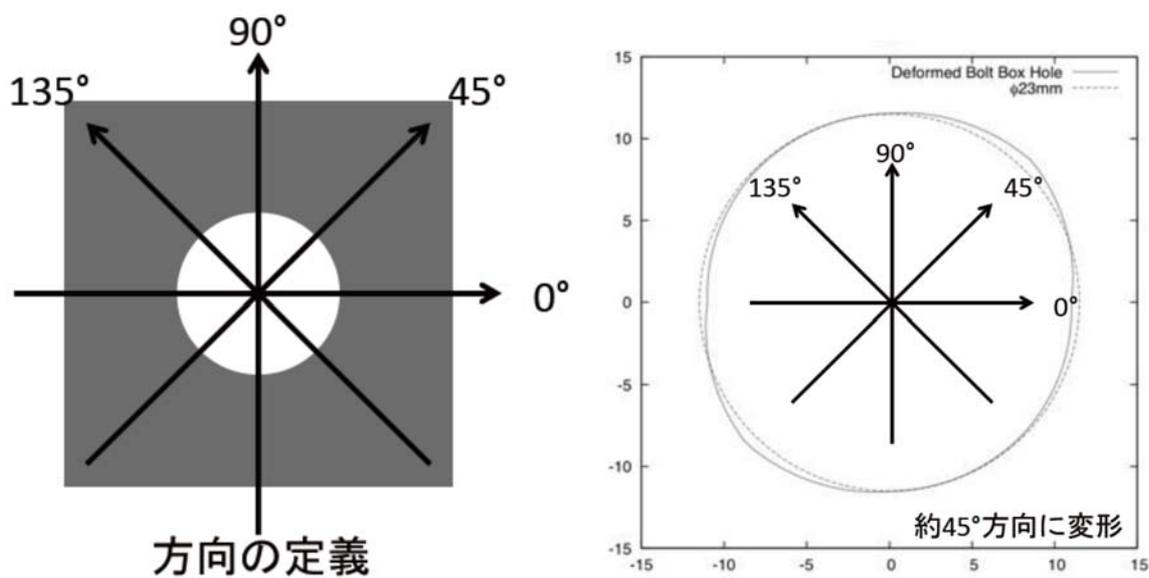
図 8.1.19 は、ボルト穴の内径及びネジ山の痕跡を計測する方法を示している。セグメントを坑内側が天を向くように接地し、セグメント円周の接線と平行な面を  $0^\circ$  とし、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$  の箇所の内径を各ボルトボックスについて計測した。また併せて、ネジ山の痕跡のある箇所もセグメント円周の接線と平行な面からの角度を計測した。

さらに、ボルトが破断する際、ボルトインサートにボルトが残存する場合もあることから、ボルトインサートの内径と破断したボルトの隙間に着目し、ボルトが動いた方向 (セグメントが動いた方向) を推定した。

表 8.1.1 にボルト穴の内径を計測した結果、表 8.1.2 にネジ山の痕跡のある箇所及びボルトインサートの内径と破断したボルトの隙間の方向を計測した結果を示す。



(a) セグメントのボルトボックスの概略図



(b) ボルトボックスの内径を計測した箇所と方向の定義

図 8.1.19 ボルトボックスの内径を計測した箇所と方向の定義  
(坑内側を天，地山側を地とする。)

表 8.1.1 ボルトボックスのボルト穴の内径計測結果

角度 °	111R								
	A2			B1			B2		K
	No.10	No.9	No.8	No.7	No.6	No.5	No.2	No.1	No.4
0	23.261	23.057	22.928	22.667	22.808	22.818	22.806	22.811	22.990
45	23.055	22.951	23.211	22.902	22.928	22.946	22.686	22.890	22.994
90	23.125	22.899	22.923	22.900	22.825	22.884	22.561	22.927	22.992
135	23.235	23.047	22.953	22.987	22.933	22.930	22.953	22.836	22.992

角度 °	110R					
	A1		A2	B2		K
	No.16	No.14	No.26	No.19	No.17	No.20
0	22.930	22.457	22.463	22.902	22.862	23.019
45	22.943	22.581	22.865	23.140	22.949	23.543
90	22.842	23.111	23.204	23.008	22.944	23.098
135	23.288	22.718	23.004	22.981	23.310	23.020

角度 °	109R						
	A1		B1		B2		
	No.39	No.38	No.33	No.31	No.29	No.28	No.27
0	22.771	22.811	22.877	22.694	23.047	23.025	22.845
45	22.955	22.933	22.931	22.752	23.062	22.834	22.892
90	21.993	23.081	22.954	22.745	22.908	22.736	22.862
135	22.415	22.877	22.775	23.075	23.248	22.924	23.665

表 8.1.2 ボルトボックスのボルト穴にあるボルト痕の方向とボルトインサート内のボルト破断の隙間の方向

リング No.	セグメント No.	ボルトボックス or ボルトインサート No.	ボルト痕 or ボルト破断の すき間	ボルト痕 or ボルト破断の 逃げ部
			$\theta_1$ deg	$\theta_2$ deg
111	A2	10	225	-
		9	225	-
		8	錆のため不明	-
	B1	19	120	-
		20	145	-
		7	225	-
		6	90?	-
		5	錆のため不明	-
	B2	17	45	315
		3	無し	-
		2	270	-
		1	245	135?
	K	4	無し	-
110	A1	39	45	300
		27	55	320
		28	125	-
		14	110	290
	A2	38	60	315
		26	295	-
	B1	33	160	-
	B2	29	-	350
		31	-	320
		19	45	215
		17	135	?
K	20	45	-	
109	A1	39	錆のため不明	-
		38	錆のため不明	-
	B1	33	90?	-
		31	充填材と錆のため不明	-
	B2	29	135	-
		28	90~135?	-
		27	45?	-

同表をまとめ、図 8.1.19 のように、災害発生直前のセグメントの動きを矢印で示した。

同図から、111R の B1 及び B2 セグメントに着目する（図 8.1.20 参照）と、111R の K セグメントに向かうように矢印が伸びている。110R の B2 及び K セグメントに着目すると、111R の B1 及び B2 セグメントが坑内側に変位することにより、相対的に上方に移動するような矢印が得られ、両者の関係がよく一致していることがわかる。つまり、111R の K セグメントが抜け出そうとし、111R の B1 及び B2 セグメントが K セグメントの方に垂れ下がってきたものと推察される。

110R と 111R の間のリング継手部のボルトボックス（110R）とボルトインサート部（111R）の破壊状況は、K セグメントを除いて大別すると①ボルトの破断、ボルトボックス残存、②ボルトボックスの変形、ボルトはボルトボックスに残存、コーン破壊、③ボルトボックスは健全、ボルトは消失、コーン破壊、の 3 パターンがあった。以下に、それぞれについて図等を用いて述べる。

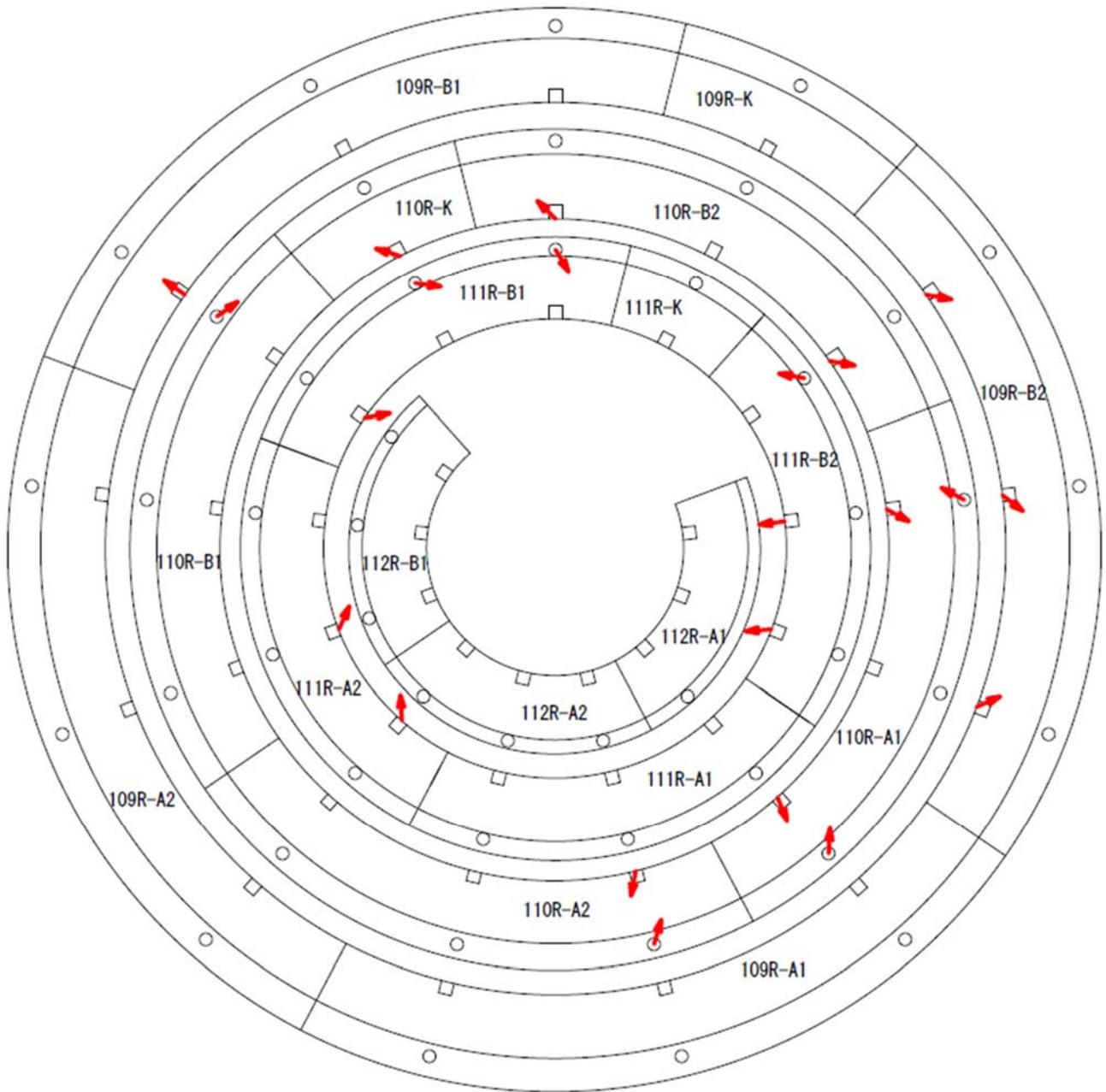


図 8.1.19 ボルトボックスのボルト穴とボルトインサートに残存したボルトの変形  
 の方向（矢印の方向は，矢印が位置しているセグメントの動きとして記載。）

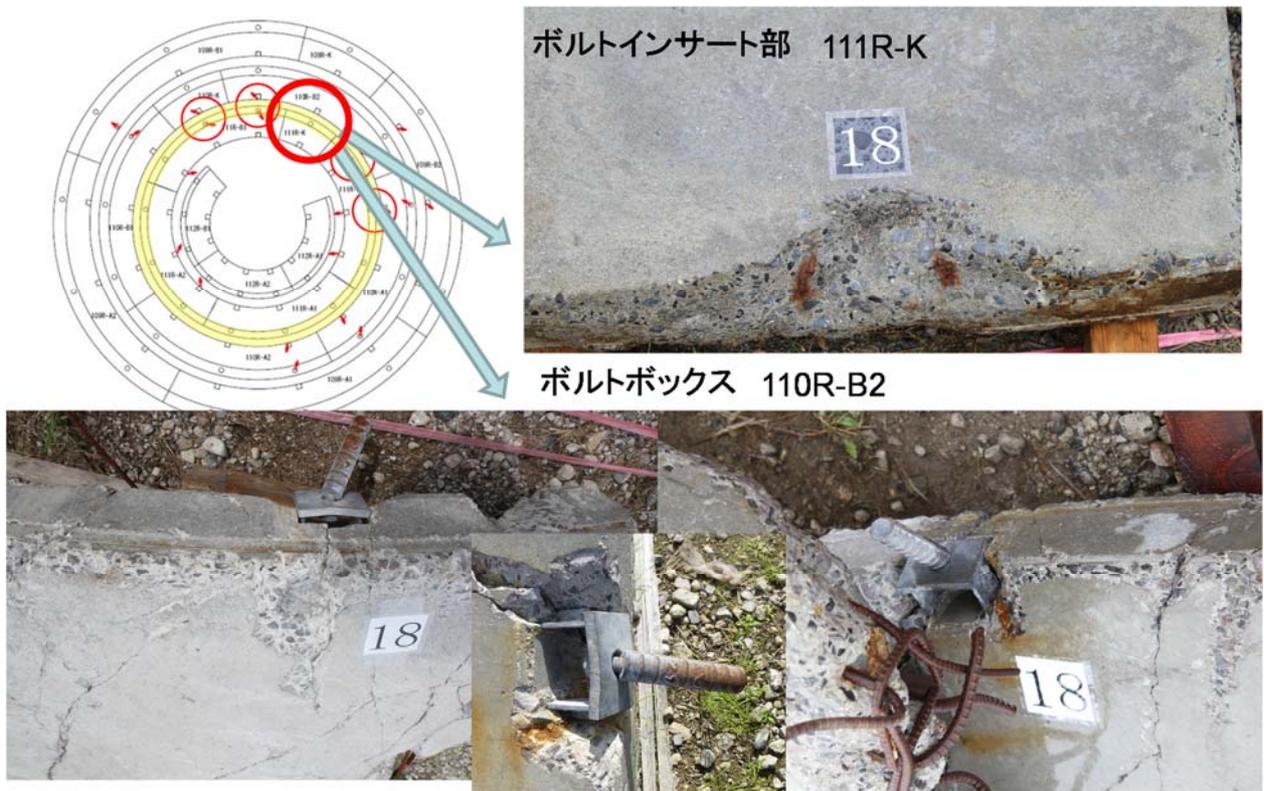


図 8.1.20 111R の B1 及び B2 のボルトインサートに残存したボルトの変形と 110R の A1, B2 及び K のボルトボックスのボルト痕の跡

①ボルトの破断、ボルトボックス残存箇所等について

111R の B1 及び B2 セグメントの継ぎ手部に着目すると、図 8.1.20 内に示す赤丸印の継ぎ手部において 111R の K セグメントに向かう方向にボルトのねじ山痕が明瞭に確認できた。また、それぞれに対応する破断したボルトインサート部は、ねじ山痕がある方向と反対側に若干のすき間が見られた。つまり、111R の K セグメントが抜け始めるにともない、111R の B1 及び B2 セグメントが坑内側に変位していると認められる。この時点で、上記赤丸箇所のボルトが破断したと考えられる。

111R の K セグメントが抜け出そうとし、111R の B1 及び B2 セグメントが K セグメントの方に垂れ下がってきたものと推察される。



**ボルトボックスに引張りとはく離の方向に力がかかっている。**

図 8.1.21 111R の K のボルトインサート部の剥離状況と 110R の B2 のボルトボックスの変形状況

111R の K セグメントと 110R の B2 セグメント (No.18) を図 8.1.21 に示す。

111R の K セグメントのボルトインサート部は、コーン破壊の様相を呈している。また、ボルトインサートは、110R の B2 セグメントのボルトボックスにボルトとともに引抜けた状態で発見されている。

110R の B2 セグメントのボルトボックスは、坑内側のコンクリート面から剥離し、浮き上がっている。ボルトボックスに引張りとはく離の方向に力がかかっていると認められる。

以上から、111R の K セグメントには、引張りとはく離の方向に力がかかり、111R の K セグメントの抜け出しとともに坑内に垂れ下がるように変位したと推察される。

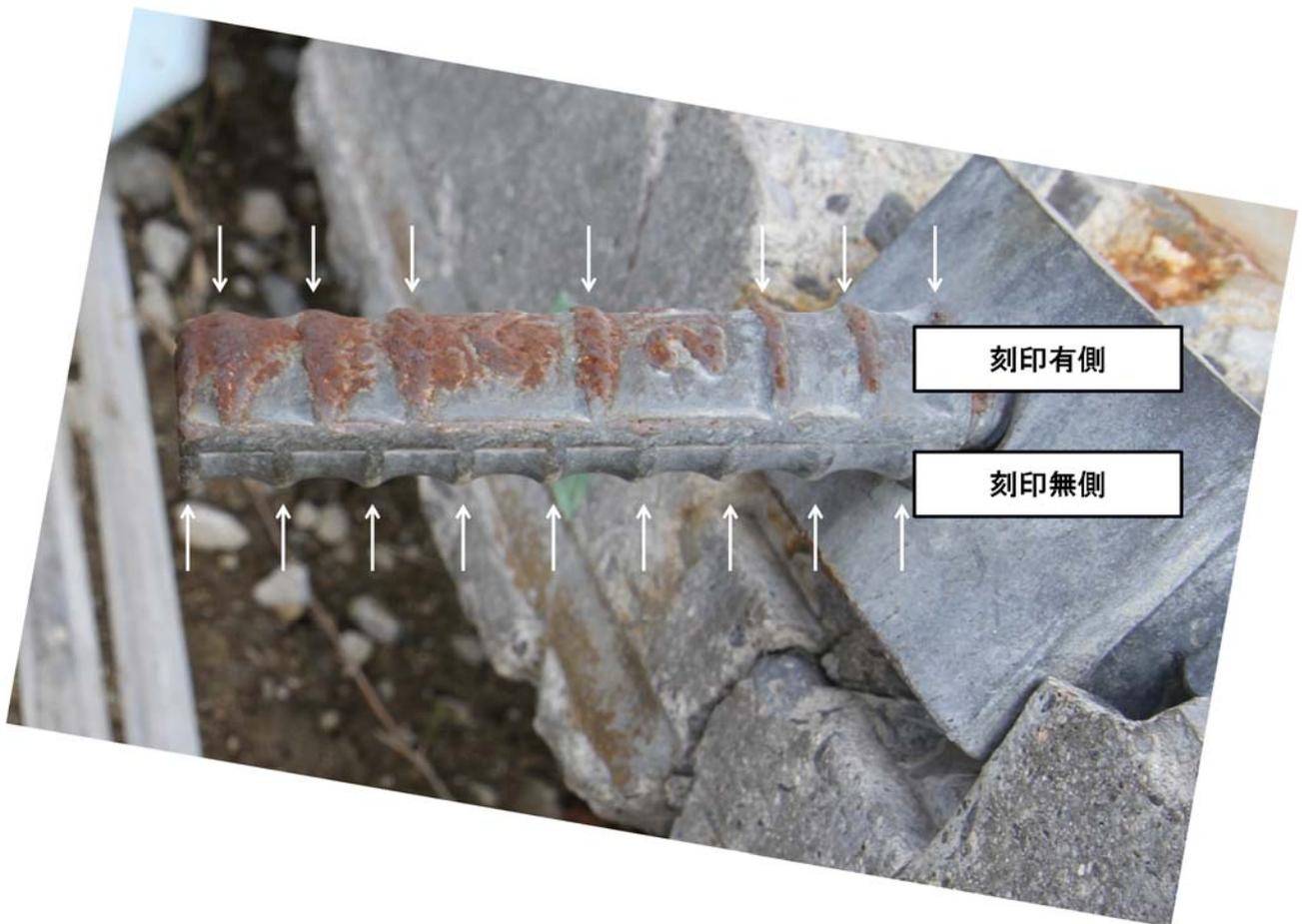


図 8.1.22 110R の B2 セグメントの中央のボルトボックス（ボルト及びボルトインサートが引抜けているが、ボルトインサートは 111R の K セグメントのものである。）

また、当該 111R の K セグメントのボルトインサートは曲がるように変形していたため、ボルトのネジを緩めボルトインサートを取り外すことが困難であった。

110R の B2 セグメントのボルトボックスに残存した 111R の K セグメントのボルトインサートを観察すると（図 8.1.22 参照），刻印が有る側面と刻印が無い側面で節目の位置が異なることが分かった。そこで，図 8.1.23 に示すように，111R の K セグメントのコーン破壊の面とボルトインサートのレプリカを採取し，刻印と節目の位置を一致させれば，破壊前のボルトインサートの位置が分かり，合わせてボルトがどの方向に曲げられたかを推定できる。

図 8.1.24 にその結果を示しているが，111R の K セグメントのボルトインサートは，刻印が無い側面が地山側を向いていたことが明らかとなった。ボルトインサートをその方向に向けると，ボルトは地山側に曲げられていることが推察される。ボルトが曲げられた方向が地山側だとすると，111R の K セグメントが抜け出す方向とは逆であり，K セグメントが一気に坑内側に崩落したのではなく 2 段階に渡って崩壊したと推測される。つまり，111R の K セグメントは完全には抜け出さず，ある程度の時間，111 リングは坑内側に縮む方向に変形しているもののリングの状態を保っていたものと考えられる。

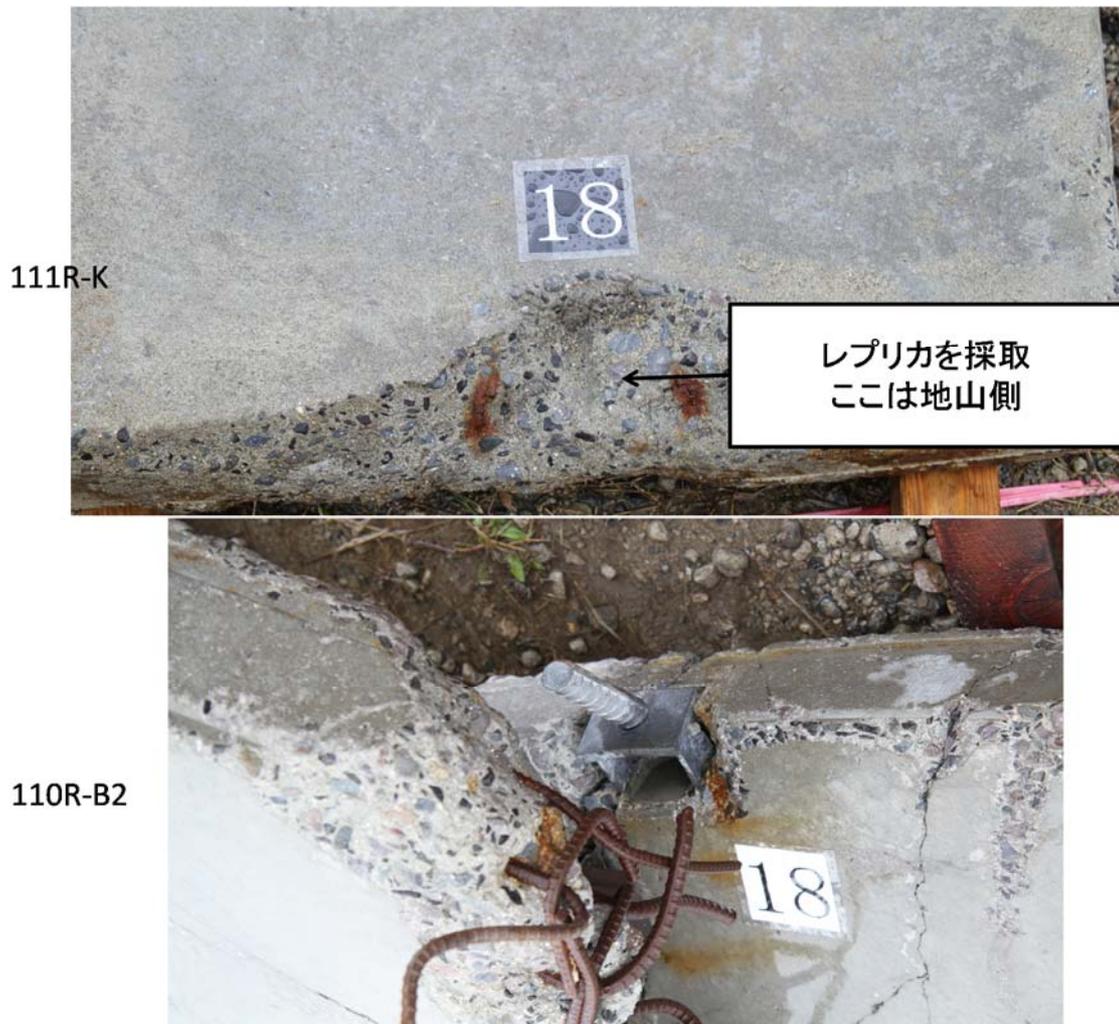


図 8.1.23 レプリカの採取箇所（111R の K セグメントのボルトインサート部）  
（110R の B2 のボルトボックスに，111R の K セグメントのボルトインサートが引抜けた形で残存していた）



図 8.1.24 111R の K セグメントのボルトインサート部のレプリカと 110R の B2 のボルトボックスに引抜けた形で残存していた 111R の K セグメントのボルトインサートのレプリカ



図 8.1.25 110R の B2 のボルトボックスに引抜けた形で残存していた 111R の K セグメントのボルトインサートの推定される災害発生直後の向き（ボルトは地山側に変形している。）



図 8.1.26 111R の B1 のボルトインサート部と 110R の B1 のボルトボックスの状況

②ボルトボックスの変形、ボルトはボルトボックスに残存、コーン破壊箇所について

次に、111R の B1 と 110R の B1 のリング継手に着目すると、図 8.1.26 に示すようにボルトインサートは引抜けコーン破壊の様相を呈し、ボルトボックスは坑内側のコンクリート面から大きく浮き上がっていることがわかる。

これについても先ほどと同様、コーン破壊面とボルトインサートのレプリカを採取し、破壊前のボルトインサートの位置を推定した。図 8.1.28、図 8.1.29 にその結果を示しているが、刻印が無い側面と有る側面の境界も見受けられる。したがって、図 8.1.30 に示すように、破壊前のボルトインサートの位置が推定され、ボルトは坑内側に変形していると推察される。同箇所は、ボルトボックスも坑内側に大きく変形し、ボルトも同方向に変形していることから、変位速度が遅い状態で荷重を受けていたものと推察される。つまり、111R の K セグメントが抜け出そうとし、111R の B1 と B2 が坑内側に垂れ下がるが、この箇所において、110R と 111R が崩壊するまでの間、荷重を受け持っていたものと考えられる。

111R-B1



110R-B1



図 8.1.27 レプリカの採取箇所（111R の B1 セグメントのボルトインサート部）  
（110R の B1 のボルトボックスに，111R の B1 セグメントのボルトインサートが引抜けた形で残存していた）



図 8.1.28 111R の B1 セグメントのボルトインサート部のレプリカと 110R の B1 のボルトボックスに引抜けた形で残存していた 111R の B1 セグメントのボルトインサートのレプリカ

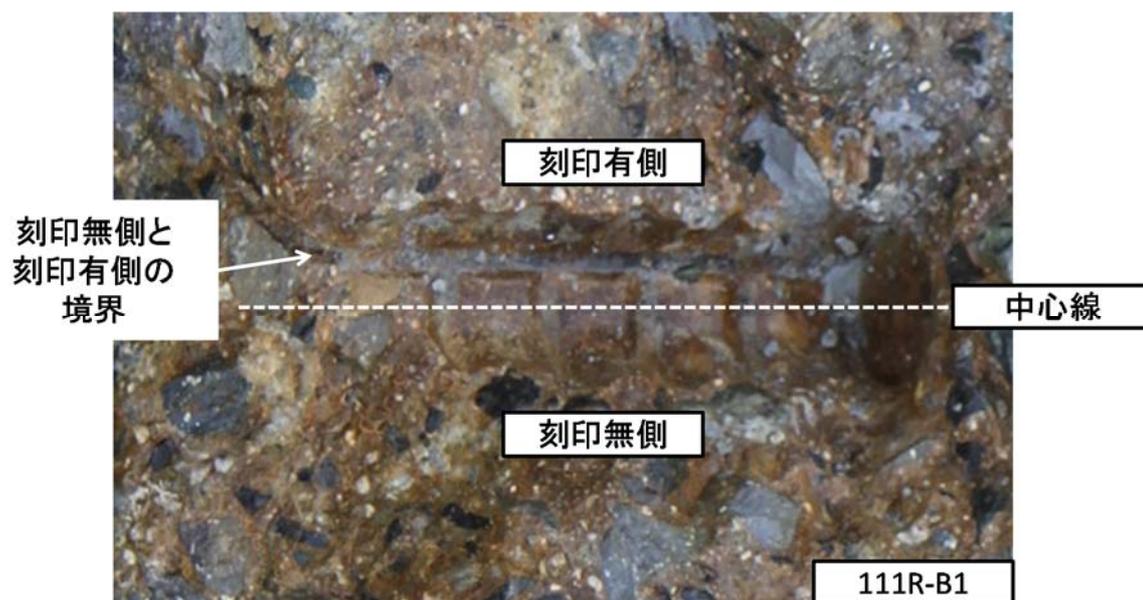


図 8.1.29 111R の B1 セグメントのボルトインサート部の拡大写真 (刻印有側と刻印無側の境界が見える)



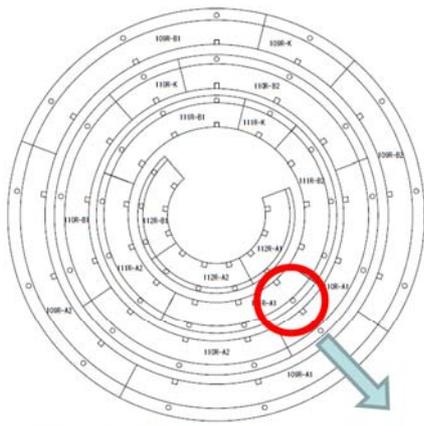
図 8.1.30 110R の B1 のボルトボックスに引抜けた形で残存していた 111R の B1 セグメントのボルトインサートの推定される災害発生直後の向き（ボルトは坑内側に変形している。）



図 8.1.31 111R の B1 のボルトインサート部と 110R の A2 のボルトボックスの状況

111R の B1 セグメントと 110R の A2 セグメントのリング継手を図 8.1.31 に示す。ボルトインサートが引抜けコーン破壊を呈し、ボルトボックスは坑内側のコンクリート面から剥離し浮き上がっている。ボルトインサートは溶断されているため（回収時に溶断）、ボルトの曲げの方向は定かでない。

上述の箇所と同様、111R の K セグメントが抜け出そうとし、111R の B1 と B2 が坑内側に垂れ下がるが、これらの箇所において、110R と 111R が崩壊するまでの間、荷重を受け持っていたものと考えられる。



111R-A1



ボルトボックス110R-A1



**ボルトインサート部のコーン破壊とボルトの破断の両方が発生する方向に力が加わったと考えられる。**

図 8.1.32 111R の A1 のボルトインサート部と 110R の A1 のボルトボックスの状況

③ボルトボックスは健全、ボルトは消失、コーン破壊箇所について

図 8.1.32 は、111R の A1 と 110R の A1 のリング継手を示している。特徴的である点として、ボルトインサート部はコーン破壊の様相を呈し、ボルトが消失しているにもかかわらず、ボルトボックスはほぼ健全である点である。

また、ボルト穴を見ると、ボルトのネジ山の痕跡が 2 箇所見受けられ、ボルトインサートが引き抜かれる方向とボルトが破断する方向と 2 段階の変形を呈したものと推察される。

ボルトが消失していることから、ボルトが破断したものと考えられるが、ボルトボックスが健全であることから、破断時点の変形速度が大きかったものと考えられる。

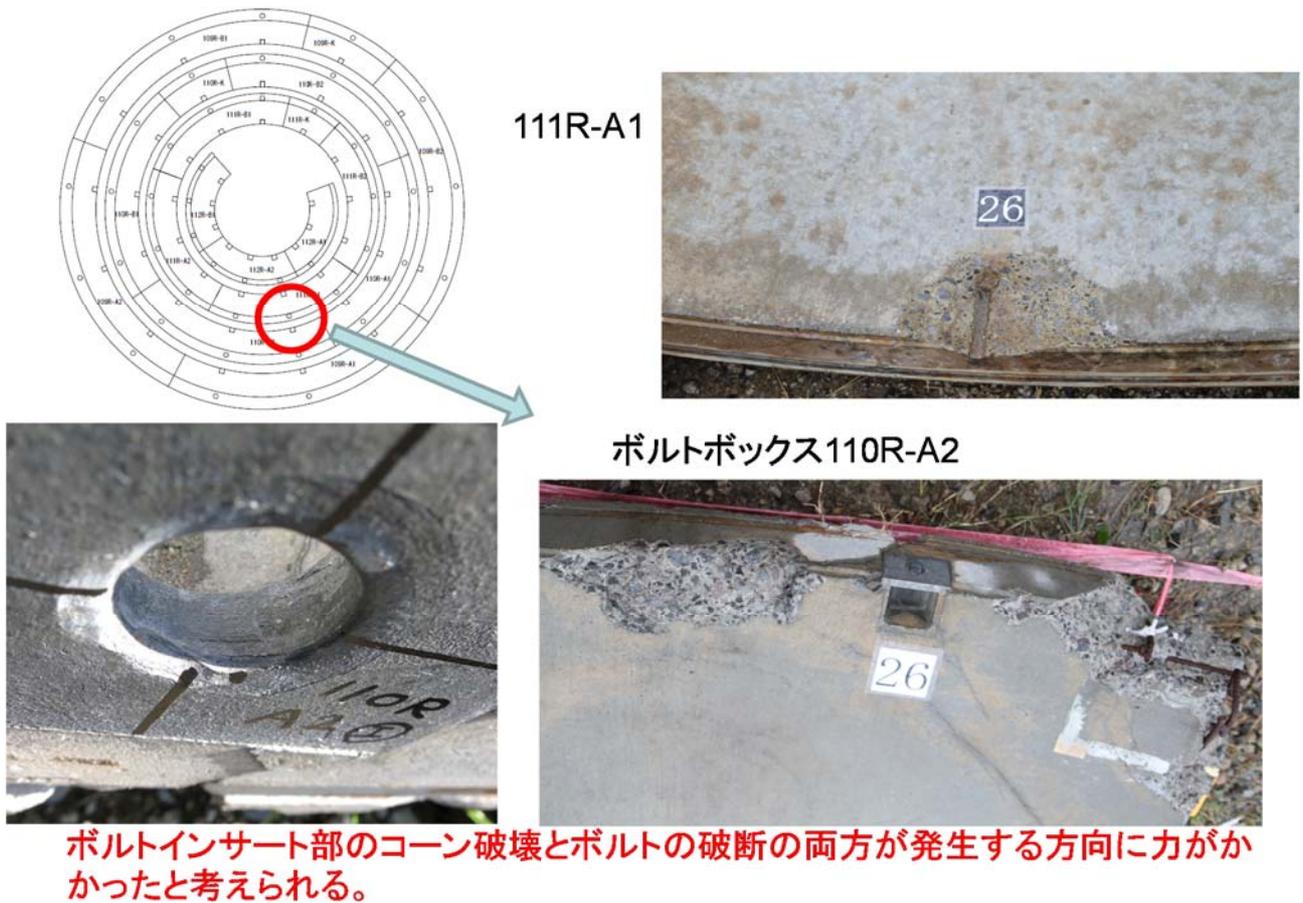


図 8.1.33 111R の A1 のボルトインサート部と 110R の A2 のボルトボックスの状況

図 8.1.33 は、111R の A1 と 110R の A2 のリング継手を示している。先ほどと同様、破断時点の変形速度が大きかったものと考えられる。

次に 110R と 109R のリング継手に着目する。

110R と 109R のリング継手部は、ボルト破断している箇所が多いことがわかる（図 8.1.34 参照）。ボルトの破断面を電子顕微鏡により観察すると、破断した方向（セグメントの移動した方向）が推定できる。

図 8.1.35 に示すように、ボルトの破断面に等軸ディンプルが観察されれば、その面には引張りが作用していたことがわかり、ディンプルがある方向を有していればせん断によりボルトが破断したことがわかる。ディンプルとは、延性破壊した破断面上に観察される円形状の模様である。介在物等を中心として微小空洞が形成され、その合体により破面が形成される。ディンプルの形状と上下破面のマッチングにより、荷重の荷重方向が推定できる。

当該災害では、セグメントのボルトインサートからボルトを抜き出すことが困難であるため、図 8.1.36 に示すように、レプリカ採取用の道具を用いて破断面の型をシリコンゴムで採取した。

破断面を観察した結果、等軸ディンプルが観察され、110R と 109R のリング継手に引張りが作用していたことが推定される（図 8.1.37 参照）。つまり、図 8.1.38 に示すように、110R が 109R に対して、曲がるように坑内側に変位しボルト破断に至ったと推察される。曲げは局所的にみれば引張りで破壊することになるためである。

また、ボルトボックスにボルトボックスがはく離する方向に力が働いているにもかかわらず、破断した箇所のすべてのボルトボックスが健全なのは破壊が一瞬（変位速度が大きい）にして起こったためと考えられる。

一方、後述するように、リング継手の载荷試験では、セグメントの円周と接する方向にボルトに力を加えると、ボルトが破断した。その時のボルトの破断面を観察した結果が図 8.1.39 である。同図からディンプルは横方向に伸長していることがわかり、ボルトにせん断力が作用したことがわかる。

なお、シールドマシンと同時期に海底から引き揚げられたセグメントのボルトの破断部についてもレプリカによる破断面の採取を行ったが錆が進んでいたため、判別が出来なかった。

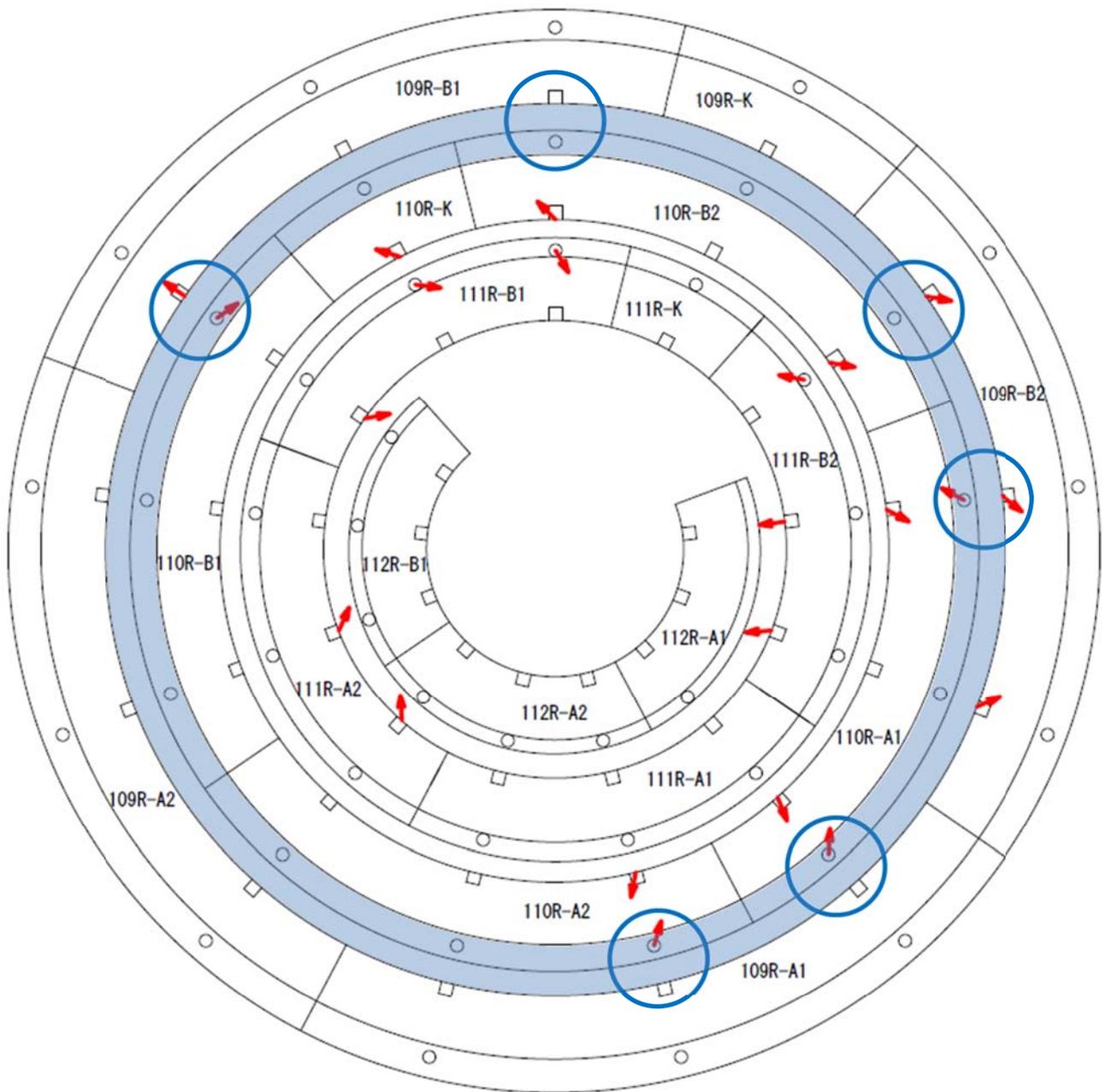
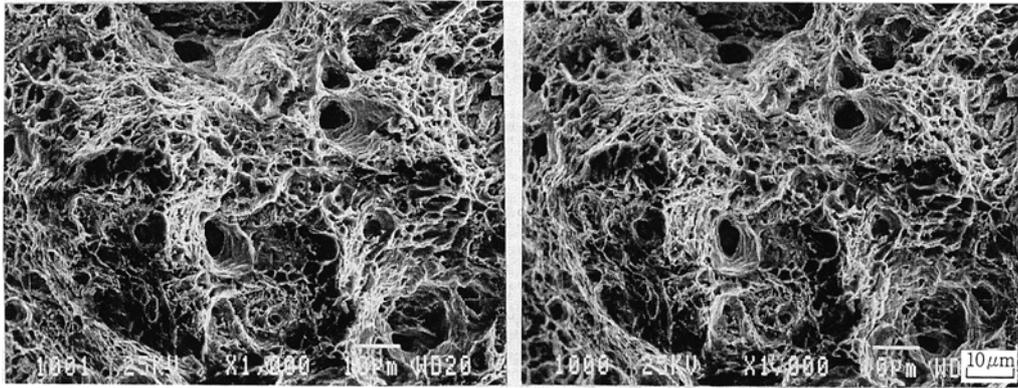
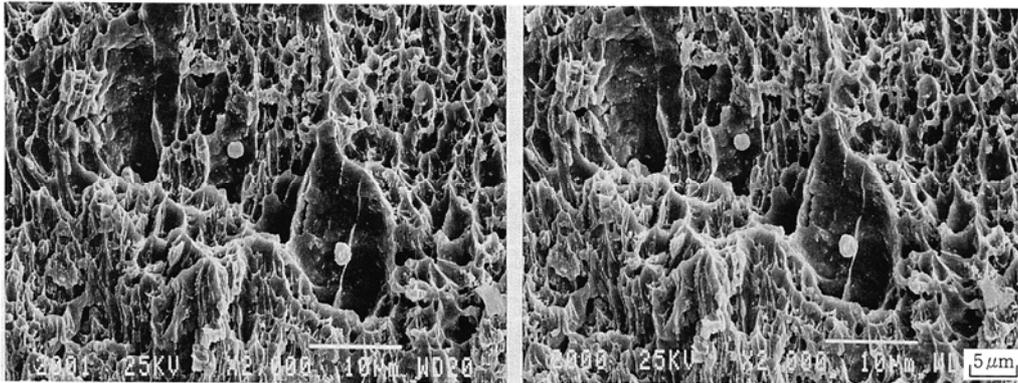


図 8.1.34 ボルトのせん断面を観察した箇所



(b) A部 (繊維状破面部), 等軸ディンプル, (ステレオ写真)



(c) B部 (シヤアリップ部), 伸長ディンプル, (ステレオ写真)

図 4.3 静引張破面のカップアンドコーンとディンプル  
(低合金鋼, SMn 443 相当材)

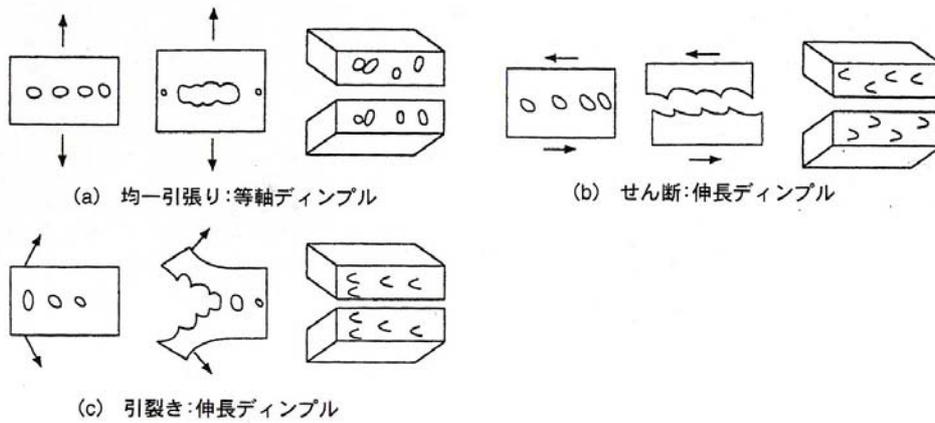


図 4.4 ディンプルパターンと応力状態<sup>11)</sup>

図 8.1.35 ディンプルと応力状態 (出典: フラクトグラフィ, 丸善)

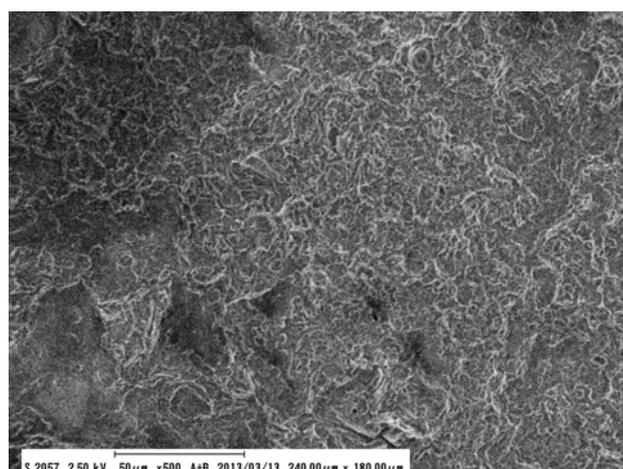
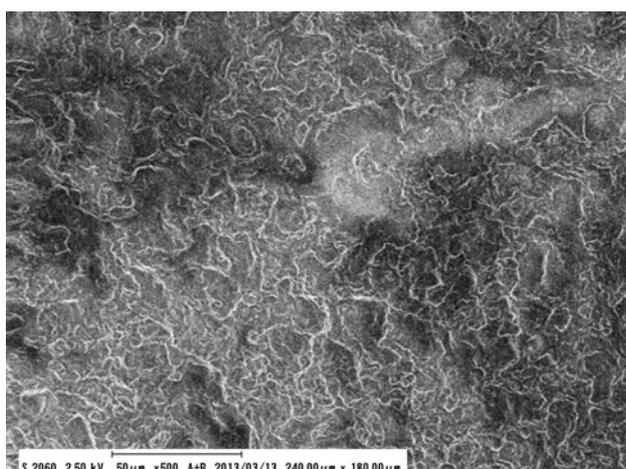


(a) レプリカ採取用の道具



(b) レプリカ採取中

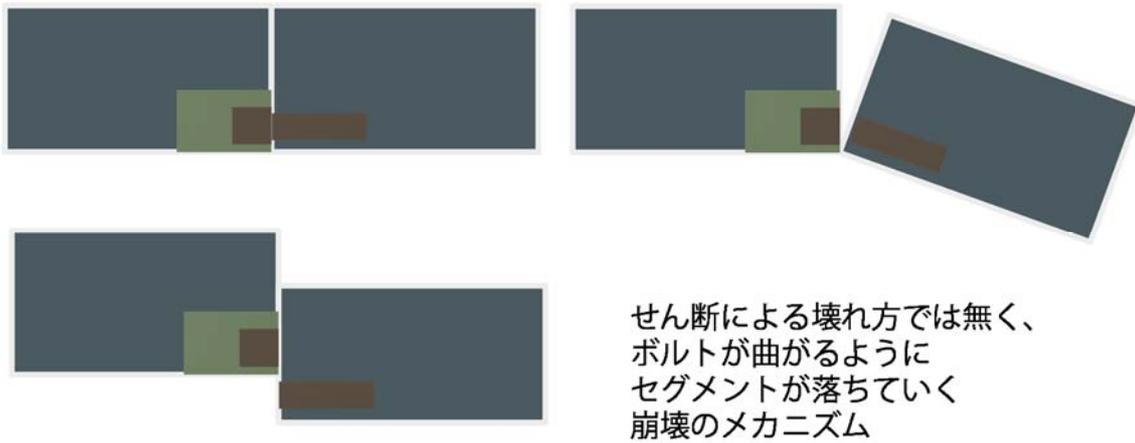
図 8.1.36 ボルト破断面のレプリカ採取用の道具



(a) 110R の B2 のボルト破断面 (No.31) (b) 110R の A1 のボルト破断面 (No.28)

図 8.1.37 電子顕微鏡による当該セグメントのボルト破断面 (レプリカ) の観察結果

(方向をもたない等軸ディンプルであることが見て取れる。)



せん断による壊れ方ではなく、  
ボルトが曲がるように  
セグメントが落ちていく  
崩壊のメカニズム

図 8.1.38 109R に対する 110R の崩壊メカニズム

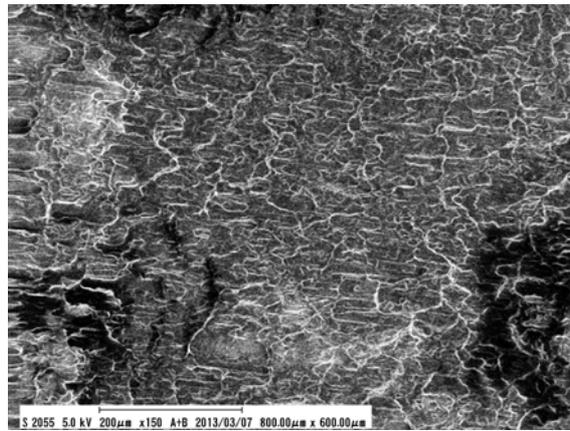


図 8.1.39 後述するリング継手の载荷試験（接線方向）により破断されたボルトの破断面（レプリカ）の観察結果（一方向に伸長したディンプルであることが見て取れる。）

以上、回収されたセグメントの破壊状況、ボルト等の破断の状況、シールドマシンと一緒に回収されたセグメントの位置関係（図 10.2.24）等からセグメントの破壊の機序を推定すると次のようである。

- 1) 111 リングの K セグがある程度抜け、この K セグを中心として 111 リングの B2 と B1 セグが垂れ下がる。（この時点で K セグのすき間、垂れた 111 リングとシールドマシンのすき間から土砂水が吹き出したものと考えられる。）
- 2) セグメント天井付近の 111 リングと 110 リング間のボルト（4 本）が破断する。  
（さらに垂れた 111 リングとシールドマシンのすき間から土砂水が吹き出したと考えられる。）
- 3) 111 リングの B1・A2 と 110 リングとに除々に相対的にずれが生じ、この 2 リング間の縁が切れる。
- 4) 111 リングの K セグが抜け、B2 が折れて上半分が倒れ込むとともに B1 が落下。
- 5) 同時に 110 リング（B1、B2、A1、A2 セグ）が破壊し、坑口側に流れる。K セグも同時に落下（切羽側に流れる）。

## 8.2 単体曲げ試験

セグメント単体の基本的な強度性能を確認するため、セグメント単体曲げ試験を実施した。試験体のセグメントは A1 セグメントであり、計 3 体の A1 セグメントについて、それぞれ単体曲げ試験を実施した。試験体の名称は、A1-1, A1-2, A1-3 とした。

試験方法は、図 8.2.1 に示すように、試験体を治具の上に設置し、200kN の静的ジャッキを用いて載荷 (P) した。試験状況の写真を写真 8.2.1 に示す。

変位計の取り付け位置を図 8.2.2 に示す。①はジャッキストローク変位量であり、②～④は載荷ジャッキ直下のセグメント坑内側の変位量、⑤～⑧はセグメント両端部の変位量である。

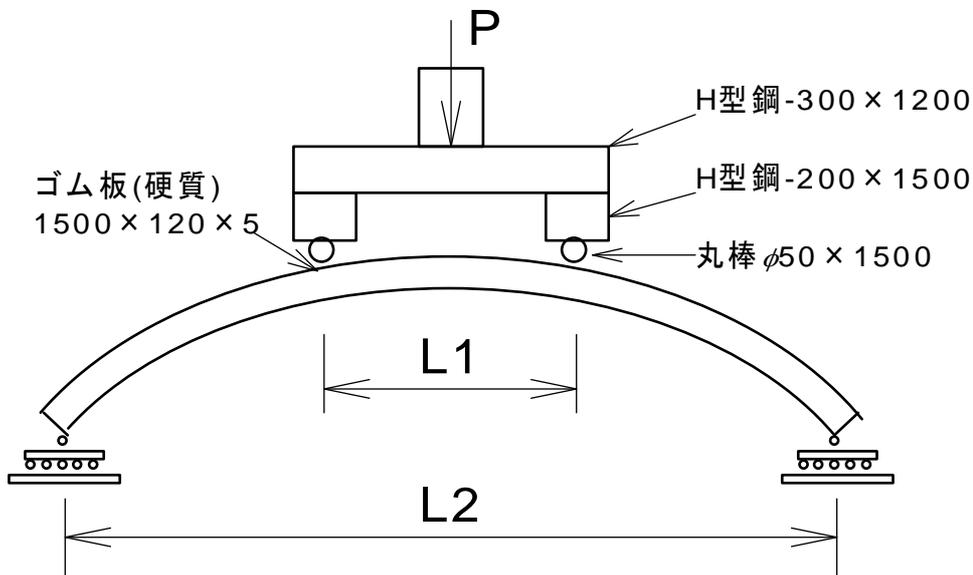


図 8.2.1 セグメント単体曲げ試験の試験方法



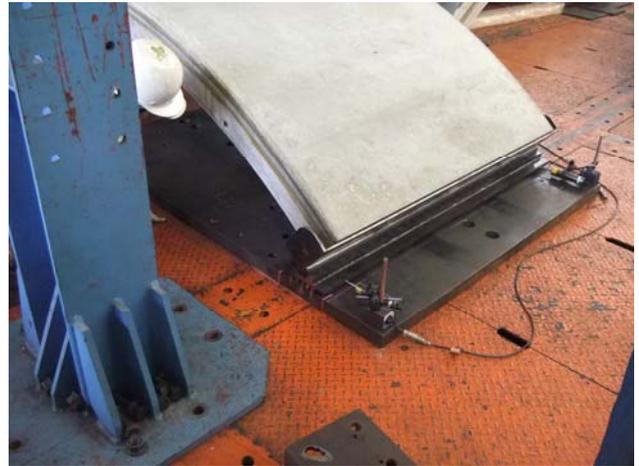
(a) 試験状況全影



(b) 载荷盤直下のセグメントの変位計測

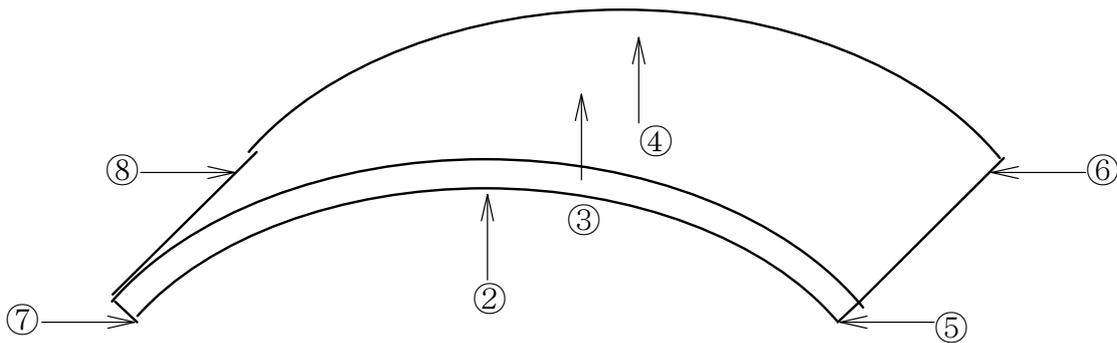


(c) セグメント端部の支持方法



(d) セグメント端部の変位計測

写真 8.2.1 セグメント単体曲げ試験の試験状況



①はジャッキストローク変位置量

図 8.2.2 変位計取り付け位置

ジャッキの荷重と各変位量との関係を図 8.2.3 に示す。載荷ジャッキ直下のセグメント坑内側の変位量 (②～④) については、初期の立ち上がりも弾性的であり、荷重変位関係は線形である。ジャッキストローク (①) については、初期の立ち上がりが緩やかになっており、これは試験装置自体のいわゆる「なじみ」によるものであるが、その後は変位量 (②～④) と同様な傾向を示しており、良好な計測結果が得られている。セグメント両端部の変位量 (⑤～⑧) は、セグメントがある程度変位するまではほとんどなく、ひび割れ発生荷重に到達して以降、大きな変位量が計測される。ひび割れの確認は目視により行い、ひび割れを油性ペンでなぞるとともに、その時の荷重をセグメントに直接記載した。

各 A1 セグメントのひび割れ発生荷重は、40.0kN (A1-1) , 39.5kN (A1-2) , 40.0kN (A1-3) と各試験でほぼ同等の値であった。

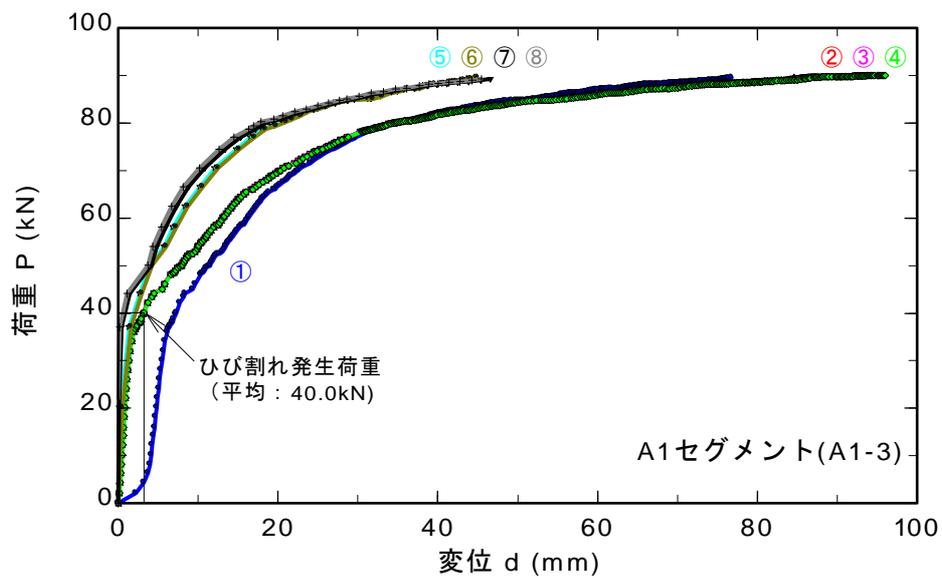
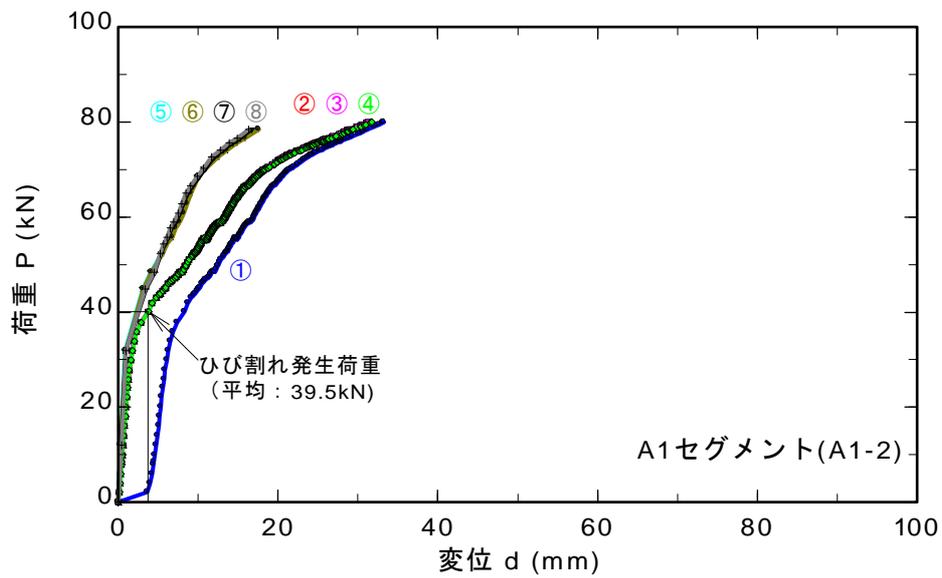
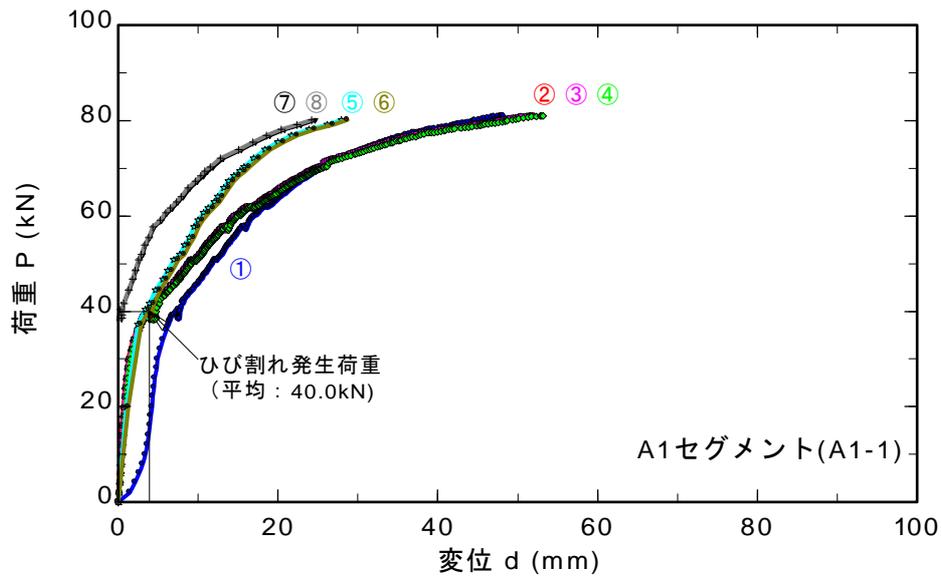


図 8.2.3 A1 セグメントの単体曲げ試験時の荷重と変位の関係

図 8.2.4 に A1-1, A1-2, A1-3 の荷重と変位の関係を示す。A1-1 と A1-2 については、荷重が約 80.0kN に到達した段階で載荷を終了したが、A1-3 については、変位計の計測限界まで載荷し、試験終了荷重は 90.0kN であった。ひび割れ発生荷重の平均値は 39.8kN であった。したがって、試験終了荷重と試験終了荷重時の中央直下の変位量は試験上の制約による値である。試験結果を表 8.2.1 に示す。

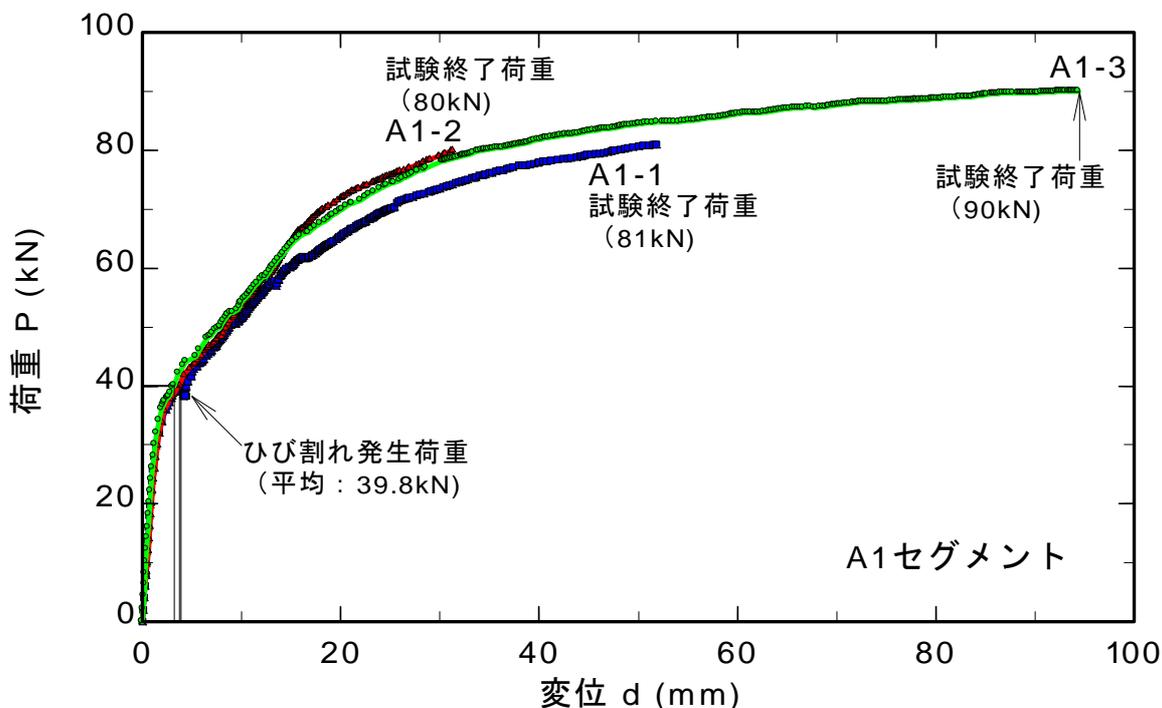


図 8.2.4 A1-1, A1-2, A1-3 の荷重と変位の関係を同じ図面内にて比較 (変位計③)

表 8.2.1 セグメント単体曲げ試験結果

試験体 No.	ひび割れ発生荷重 (kN)	ひび割れ発生時の中央直下の変位量 (mm)	試験終了荷重 (kN)	試験終了荷重時の中央直下の変位量 (mm)
A1-1	40.0	3.86	81.0	51.8
A1-2	39.5	3.76	80.0	31.2
A1-3	40.0	3.18	90.0	94.4
平均	39.8	3.60	-	-

写真 8.2.2 に A1 セグメント (A1-3) の単体曲げ試験後のひび割れ発生状況を示す。同写真はセグメントの切羽側つまりボルトボックスが設けてある箇所を左から右にかけて撮影したものである。また、セグメントに記載された線は、ひび割れをなぞったものであり、数値はそのひび割れが発生したときの荷重を示している。セグメント中央のボルトボックスの左右端 ((j)~(m)) からひび割れが発生しており、その後、左右のボルトボックスと中央のボルトボックスの間に位置する載荷丸棒直下 ((h) 及び(o)) からひび割れが発生している。



写真 8.2.2 A1 セグメント(A1-3)の単体曲げ試験後のひび割れ発生状況（切羽側，左→右）

写真 8.2.3 から写真 8.2.5 に A1-1 から A1-3 までの単体曲げ試験後のセグメントのひび割れ発生状況の写真を示す。坑口側つまりボルトインサートが設けてある箇所も同様に、まずセグメント中央のボルトインサートの左右端からひび割れが発生し、続いて载荷丸棒直下からひび割れが発生する傾向にあった。

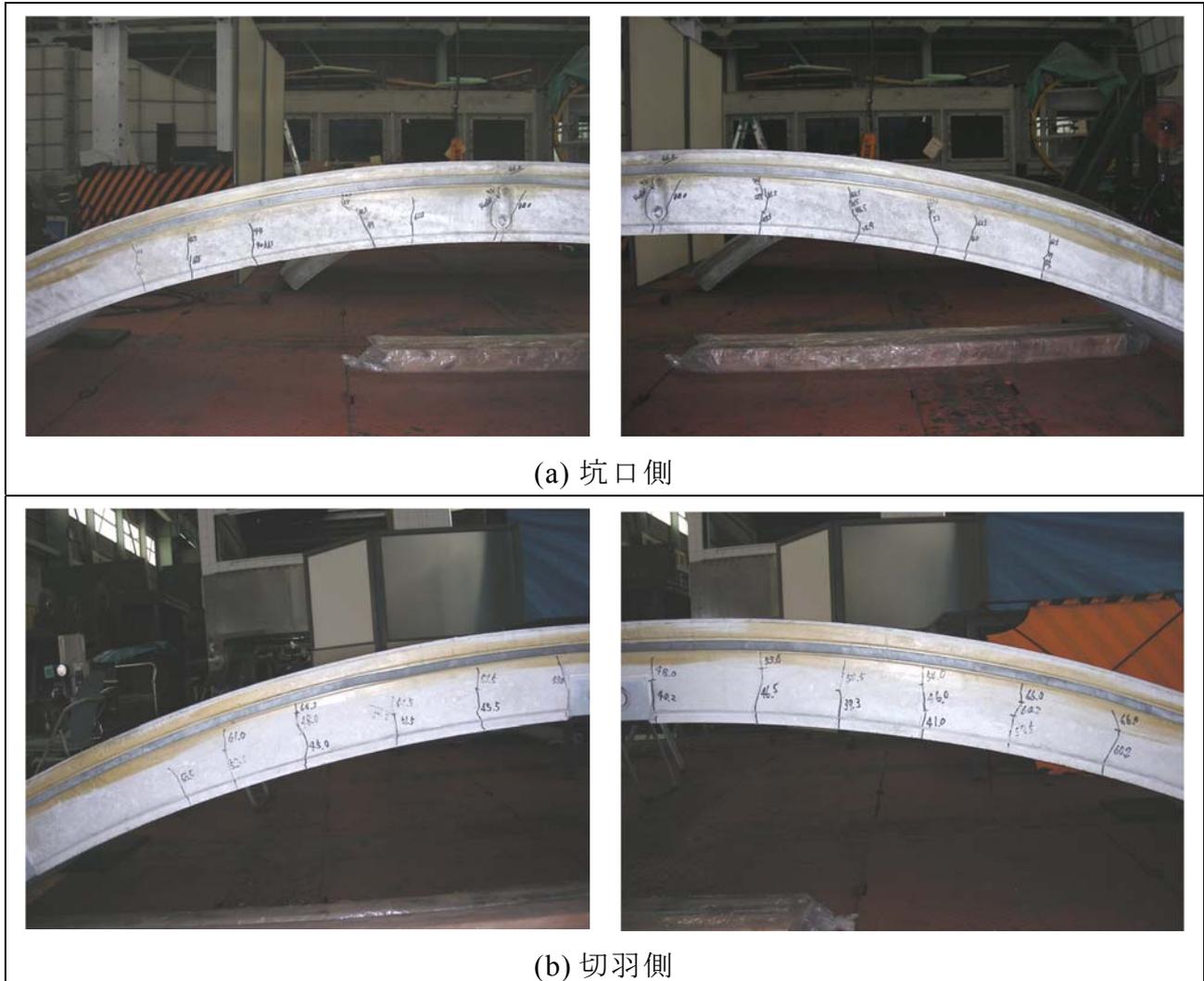
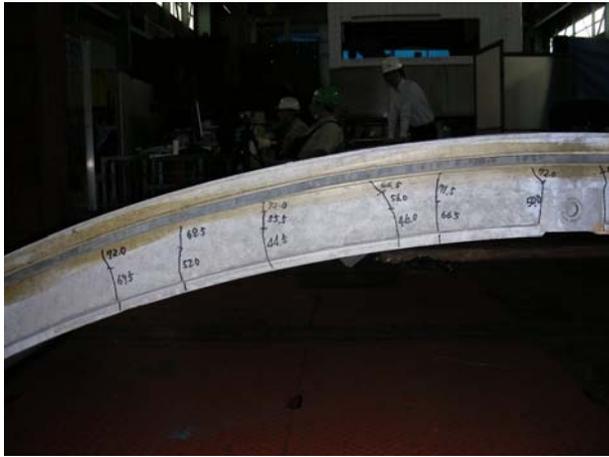


写真 8.2.3 A1 セグメント(A1-1)の単体曲げ試験後のひび割れ発生状況



(a) 坑口側



(b) 切羽側

写真 8.2.4 A1 セグメント(A1-2)の単体曲げ試験後のひび割れ発生状況



(a) 坑口側



(b) 切羽側

写真 8.2.5 A1 セグメント(A1-3)の単体曲げ試験後のひび割れ発生状況

写真 8.2.6 は, A1-3 の単体曲げ試験後のひび割れ発生状況 (セグメント中央の坑内側) を示している。同写真から, 切羽側のボルトボックス, エレクター孔, 坑口側のボルトインサートを結ぶような亀裂も生じていることがわかる。



写真 8.2.6 A1-3 の単体曲げ試験後のひび割れ発生状況 (セグメント中央坑内側)

図 8.2.5 にセグメント単体曲げ試験時の曲げモーメントの算出方法を示す。曲げモーメントの算出にあたっては, 社団法人日本下水道協会発行の『シールド工事用標準セグメント—下水道シールド工事用セグメント— (JSWAS A-3,4-2001) 』<sup>2)</sup>を参考にした。

作用する最大の曲げモーメントは, 以下の式により表される。

$$M = \frac{P}{2} \cdot \frac{(L_2 - L_1)}{2} + \frac{W_D \cdot L_2}{8} \quad (8.2.1)$$

ここで,  $P$ : 試験時の荷重,  $W_D$ : セグメントの自重,  $L_1=900\text{mm}$ ,  $L_2=2984$  である。また, セグメントの自重は, 以下の式により求まる。

$$W_D = (b \cdot h \cdot S) \cdot \gamma_c \quad (8.2.2)$$

ここで,  $b$ : セグメントの幅(= 1.4m),  $h$ : セグメントの厚さ(= 0.16m),  $S$ : セグメントの弧長(=(3494.5+3262.5)/2=3378.5),  $\gamma_c$ : セグメントの単位体積重量(= 26.0kN/m<sup>3</sup>)で

ある。

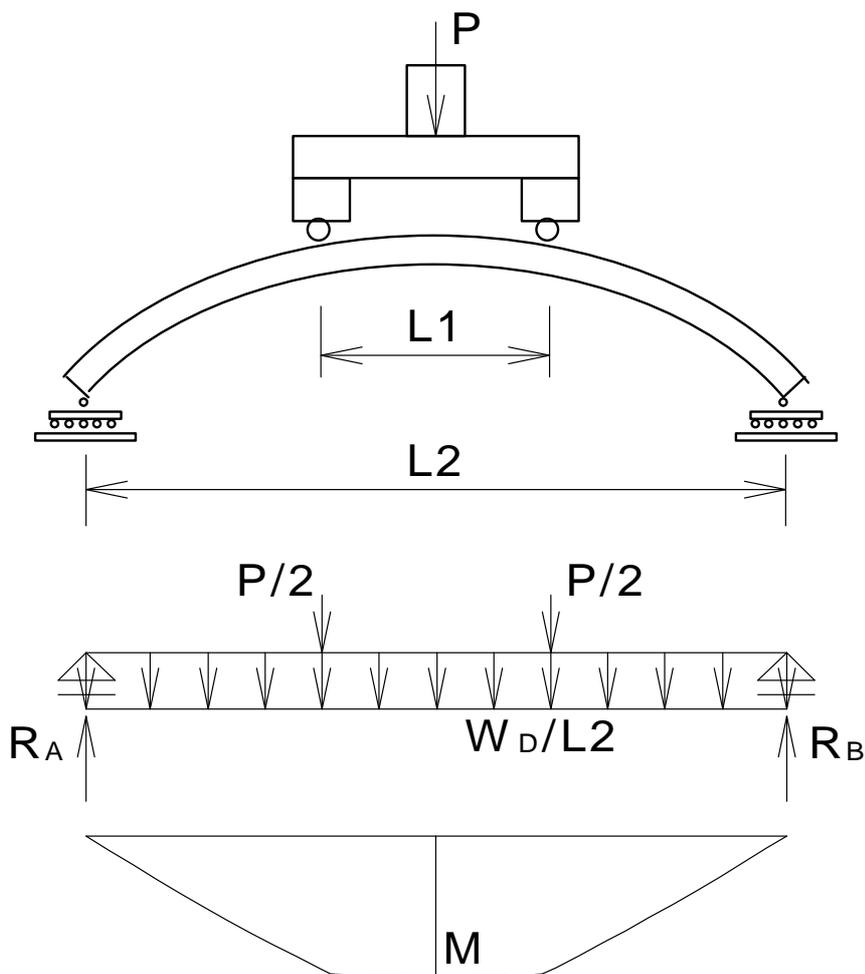


図 8.2.5 セグメント単体曲げ試験時の曲げモーメントの算出方法

表 8.2.2 セグメント単体曲げ試験時の曲げモーメントと荷重

	試験値 (事業者)		試験値 ( (独) 労働安全衛生総合研究 所)	
	曲げモーメント (kN・m)	荷重 (kN)	曲げモーメント (kN・m)	荷重 (kN)
ひび割れ発生	27.2	38.0	28.1	39.8
試験終了	37.7	58.3	54.2	90.0

式(8.2.1)及び式(8.2.2)から、ひび割れ発生荷重から、ひび割れ発生モーメントを求め、同様に、試験終了荷重から試験終了曲げモーメントを求めた。

表 8.2.2 にセグメント単体曲げ試験時の曲げモーメントと荷重を示す。本試験結果は 39.8kN となっているため、事業者のひび割れ発生荷重である 38.0kN よりも大きくなっている。また、事業者の行った試験における試験終了の定義が不明なため厳密な比較はできないが、試験終了荷重についても、本試験結果は 90.0kN 以上となっているため、こちらについても事業者の試験終了荷重を超えている。

## 8.3 リング継手に関する試験

### 8.3.1 ボルトインサートの引抜き試験

セグメントのボルトインサート部分の引抜きに対する強度を確認するため本試験を実施した。

図 8.3.1 に示すように、試験体のセグメントは A2 セグメント 1 体であり、計 3 箇所ボルトインサート部にボルトを挿入し、各ボルトを 1 つずつ 200kN の静的載荷ジャッキにより図中の上方向に引っ張ることにより試験を実施した。試験体の名称は、A2-No.1, A2-No.2, A2-No.3 とした。図中には、ボルトインサートの根入れ底から 45°の線を描いている。この線をコーン破壊の破壊線と仮定した。反力盤の間隔は 450mm とした。インサートの長さ(=埋込深さ)は 130mm、外径は 29mm である。ASTM E488 / E488M - 10 Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete Elements<sup>3)</sup>、(社)日本建築あと施工アンカー協会発行の「あと施工アンカー標準試験法・同解説」<sup>4)</sup>によると、反力盤の間隔は埋込深さの 3.5 倍程度あれば反力盤の影響が引抜き強度に影響を及ぼさないとされている。本実験の場合は、埋込深さの約 3.46 倍が反力盤の間隔である。同資料には反力盤の間隔と引抜き強度の関係も記述されている。それによると大きく見積もっても本実験の結果は高い方に 5%程度の範囲に入っている。

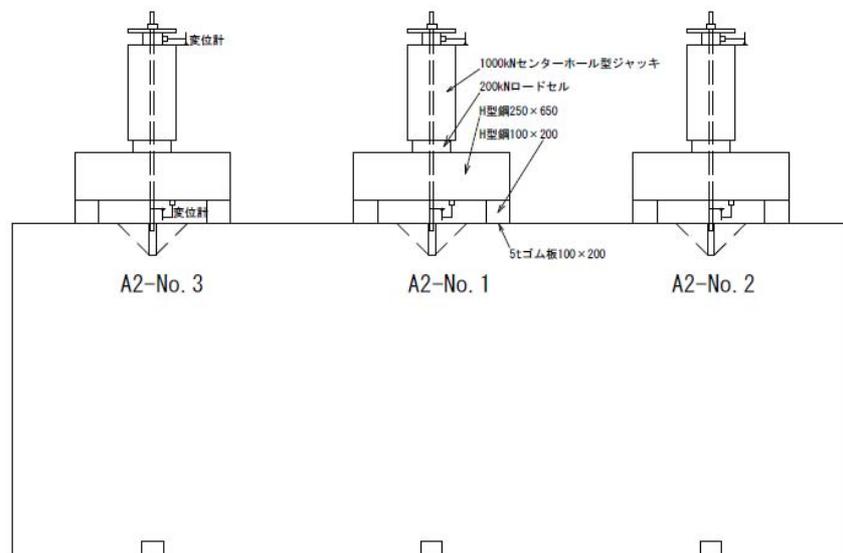


図 8.3.1 A2 セグメントに対するボルトインサートの引抜き試験

写真 8.3.1 にボルトインサートの引抜き試験の実施状況を示す。引抜き試験時の変位量は、ジャッキストロークにて計測している。また、A2-No.2, A2-No.3 については、同写真(b), (c)に示すように、ボルトに変位量測定用の治具を取り付け、変位量を計測している。



(a) 遠影



(b) 近影



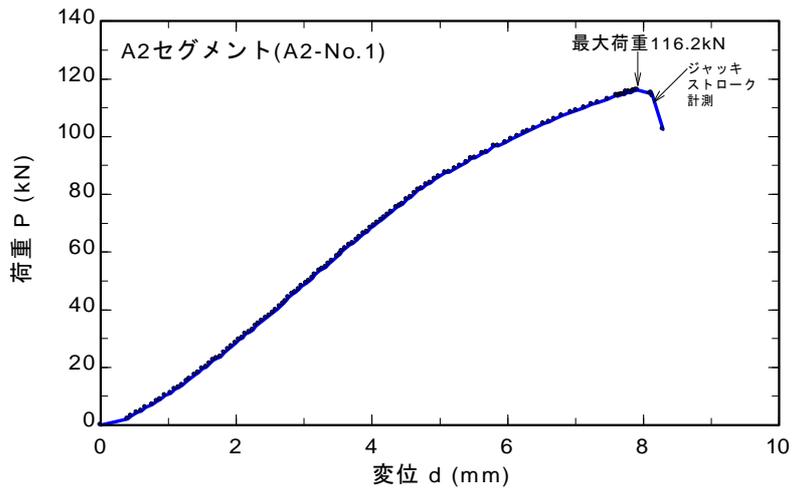
(c) 変位計の設置状況

写真 8.3.1 A2 セグメントに対するボルトインサートの引抜き試験

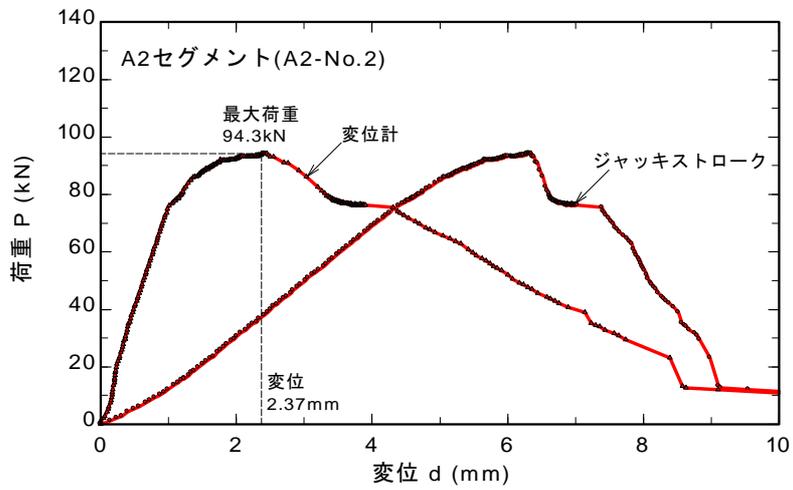
図 8.3.2 にボルトインサートの引抜き試験時の荷重と変位の関係を示す。同図(a)の A2-No.1 に対して、ジャッキストロークのみでしか変位量を計測していないため、曲線は 1 本である。最大荷重は 116.2kN であった。次に、同図(b), (c)の A2-No.2, A2-No.3 を見ると、ジャッキストロークによる変位量計測に比べ、ボルトに取り付けた変位計による変位量の計測結果の方がより小さい変位量で破壊している。ジャッキストロークでの変位の値は、治具等の「なじみ」分も含まれているため、ボルトインサートに近い位置での変位量の計測の方がインサート部からのボルトの抜け量等がより直接的に測定できている。また、最大荷重はそれぞれ 94.3kN, 105.4kN であり、最大荷重を示すときのボルトインサート直近の変位量はそれぞれ 2.37mm, 0.99mm であった。

全ての結果を図 8.3.3, 表 8.3.1 にまとめる。図 8.3.3 からジャッキストロークで計測された変位量から描かれた荷重変位曲線は、どの試験結果もほぼ同等であることがわかる。表 8.3.1 から、最大荷重についても平均値として 105.3kN となり、ばらつきもそれほど大きくない。

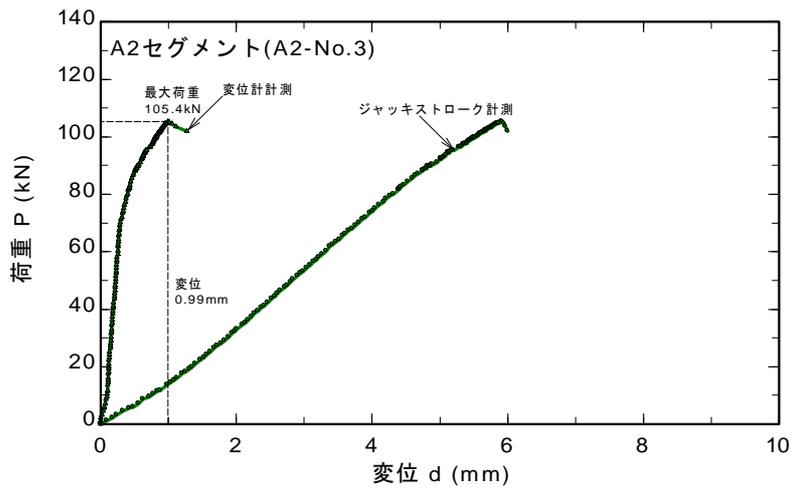
写真 8.3.2 から写真 8.3.4 に A2-No.1 から A2-No.3 の試験後の写真を示す。A2-No.1 のみボルトインサート部が完全にセグメントから剥離していた（写真 8.3.2(b), (f)参照）が、A2-No.2, A2-No.3 についてはボルトインサート部とセグメントのコンクリート部分が完全に剥離していなかった（写真 8.3.3(f), 写真 8.3.4(f)参照）。破壊面は、ボルトインサート部の底部から約 45° に走っている（写真 8.3.2(e), 写真 8.3.3(e), 写真 8.3.4(e)参照）が、鉄筋とコンクリートの境界面まで破壊面が到達すると約 30° まで破壊面が緩やかになり（写真 8.3.2(f)参照）、鉄筋とコンクリートの境界に沿って破壊面が広がる（写真 8.3.3(d), (f), 写真 8.3.4(d)参照）。このため、厳密に 45° で破壊面が表面に出現せず、表面に見える破壊面の角度は水平面から 30°（ボルトインサートの長軸から 60°）又はそれよりも小さい角度で破壊しているように見える（写真 8.3.2(a), (c), (d), 写真 8.3.3(a), (b), (c), 写真 8.3.4(a), (b), (c)参照）。



(a) A2-No.1



(b) A2-No.2



(c) A2-No.3

図 8.3.2 ボルトインサートの引抜き試験時の荷重と変位の関係

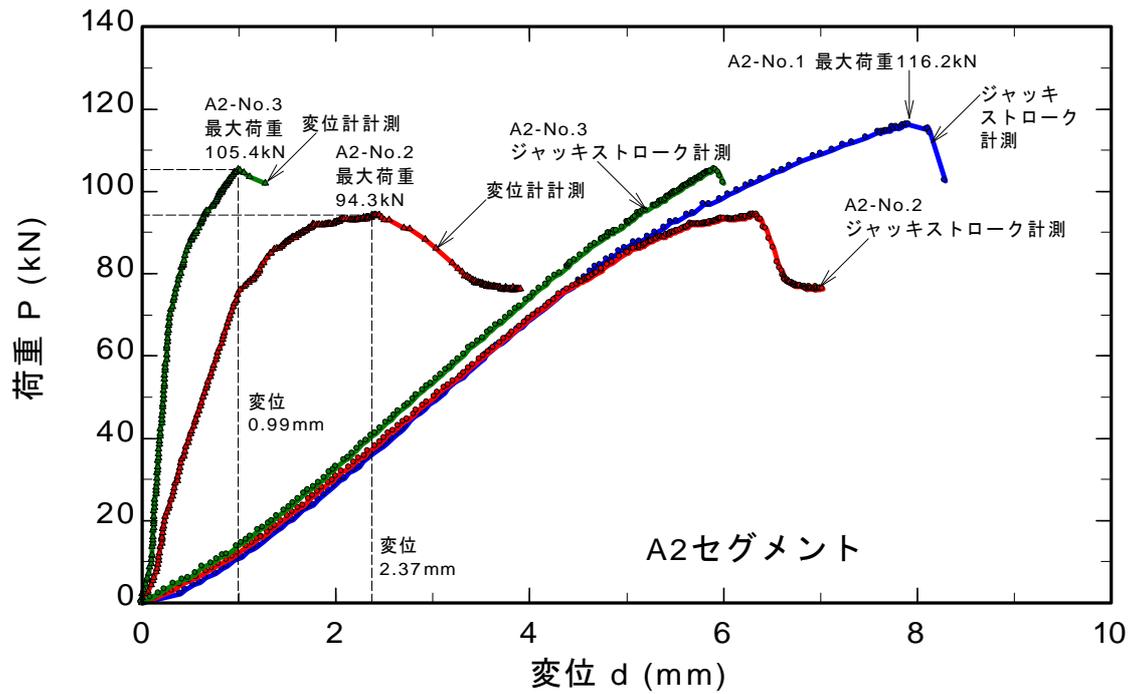


図 8.3.3 ボルトインサートの引抜き試験時の荷重と変位の関係(各試験結果の比較)

表 8.3.1 ボルトインサートの引抜き試験結果

試験体 No.	最大荷重 (kN)	最大荷重時の変位量 (mm)	ひび割れ発生状況
A2-No.1	116.2	未計測	最大荷重時に瞬時に発生
A2-No.2	94.3	2.37	最大荷重から徐々に進展
A2-No.3	105.4	0.99	最大荷重時に瞬時に発生
平均	105.3	1.68	—



(a) 坑内側



(b) 坑内側からボルトインサート部近影



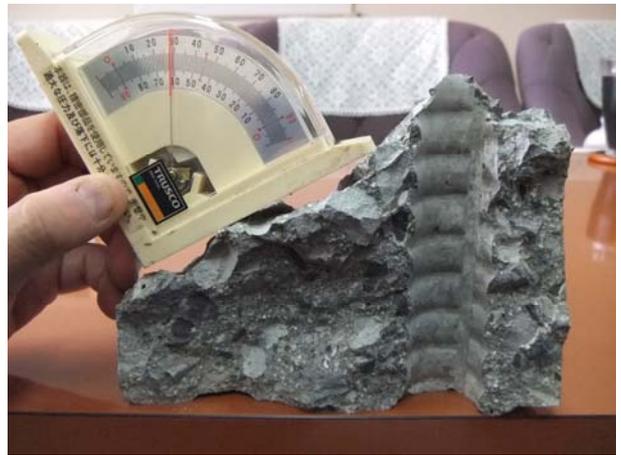
(c) 坑内側 破壊面



(d) 地山側 破壊面



(e) 坑内側 破壊面の角度 (約  $43^{\circ}$ )



(f) ボルトインサート部を撤去後 (約  $30^{\circ}$ )

写真 8.3.2 ボルトインサートの引抜き試験後の写真 (A2-No.1)



(a) 坑内側



(b) 坑内側 近影



(c) 地山側



(d) 鉄筋とコンクリートの境界面で剥離



(e) 坑内側 破壊面の角度 (約 48°)



(f) ボルトインサート部を撤去後

写真 8.3.3 ボルトインサートの引抜き試験後の写真 (A2-No.2)



(a) 坑内側



(b) 坑内側 近影



(c) 地山側



(d) 坑内側 破壊面



(e) 坑内側 破壊面の角度 (約 50°)



(f) ボルトインサート部を撤去後

写真 8.3.4 ボルトインサートの引抜き試験後の写真 (A2-No.3)

### 8. 3. 2 リング継手のせん断試験

リング継手は、ボルトインサート、ボルトボックス、ボルトで構成される。ボルトインサート又はボルトボックスと載荷板をボルトで連結した状態において、載荷板を坑内側へ載荷、地山側へ載荷、セグメントの円周（接線）方向へ載荷、坑口側と地山側との間の 45 度又は切羽側と坑内側の間の 45 度の方向に載荷、と種々の方向の強度を調査するためリング継手に関して以下の載荷試験を実施した。載荷方向は図 8.3.4、図 8.3.5、図 8.3.6 に示すとおりである。

- ボルトインサートの載荷試験
  - a) 坑内側へ載荷
  - b) 地山側へ載荷
  - c) 円周（接線）方向へ載荷
  - d) 坑口側と地山側の間の 45 度の方向に載荷
- ボルトボックスの載荷試験
  - a) 坑内側へ載荷
  - b) 地山側へ載荷
  - c) 円周（接線）方向へ載荷
  - d) 切羽側と坑内側の間の 45 度の方向に載荷

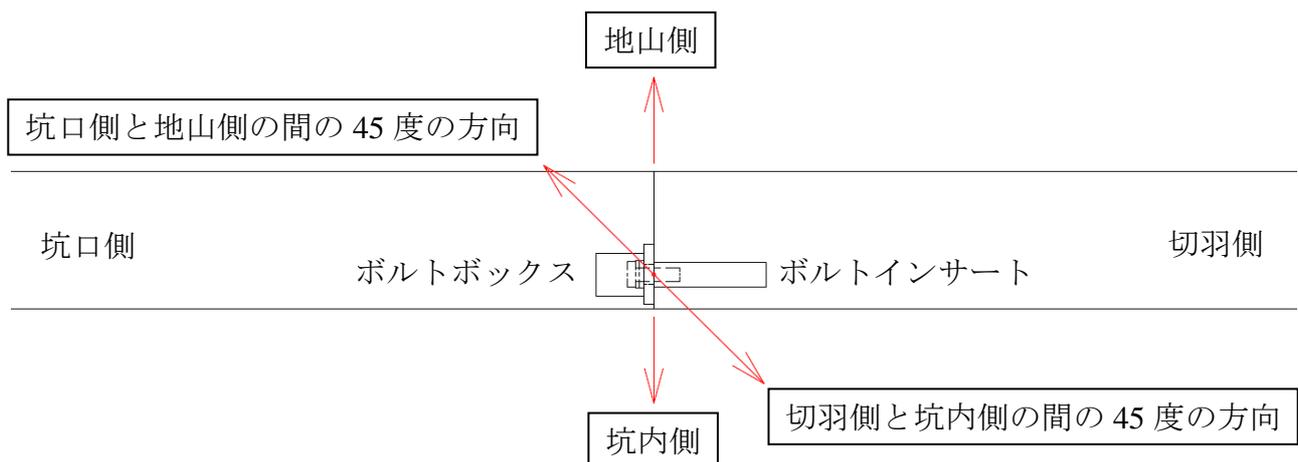


図 8.3.4 ボルトインサート及びボルトボックスに関する載荷試験の方向

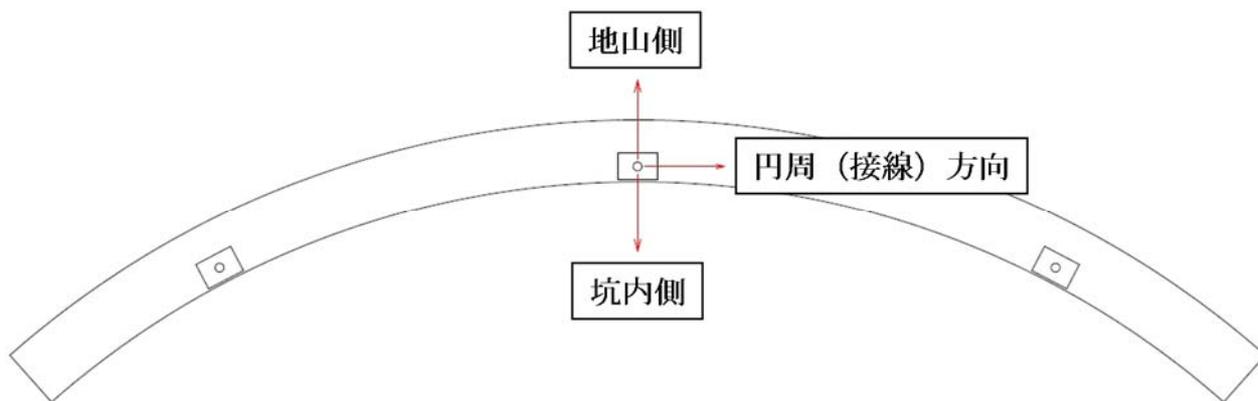


図 8.3.5 ボルトボックスに関する載荷試験の方向

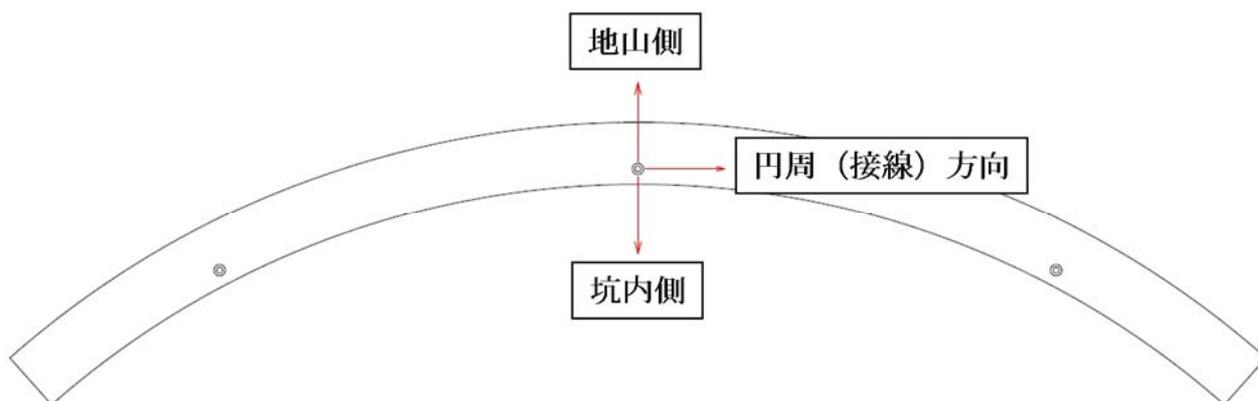


図 8.3.6 ボルトインサートに関する載荷試験の方向

### 8.3.2.1 載荷試験方法

試験は、テストベッド上に試験体を固定し、載荷フレームの柱に取り付けた油圧ジャッキで載荷した。載荷中、載荷荷重と治具の変位量等を計測した。

使用した機器の一覧を表 8.3.2 に示す。

表 8.3.2 使用した試験機器の一覧

名称	容量
テストベッド	500kN・m
油圧ジャッキ	荷重 500kN ストローク 300mm
ロードセル	±200kN
変位計	ストローク 50mm 感度 1/200mm
データロガー	1000ch

#### (1) 坑内側へ載荷又は地山側へ載荷

図 8.3.7, 図 8.3.8 に試験方法の概略図及び詳細図を示す。また、写真 8.3.5 に試験前の載荷ジャッキ、セグメント、変位計等の設置状況を示す。使用したセグメントは、A2セグメントである。

セグメント中央を除く 2 箇所 bolts インサート又は bolts ボックス付近を H 型鋼で固定し、セグメント中央の bolts インサート又は bolts ボックスを 500kN ジャッキにより水平方向に荷重を載荷した。

セグメントの固定に用いた H 型鋼の間隔  $d$  は、反力が載荷荷重に影響を与えない間隔及びセグメントが曲げによってひび割れない間隔である必要があり、 $d=1012\text{mm}$  とした。

セグメント中央の bolts インサート又は bolts ボックスの載荷部分は、ジャッキ先端の載荷板と bolts インサート又は bolts ボックスを M16 bolts とナットにより締結させることにより構成されている。載荷板の板厚は、 bolts ボックスの厚さに合わせ 12mm とした。載荷時の摩擦の影響を低減させるため、 bolts インサート又は bolts ボックス、載荷板の間に厚さ 2mm, 幅 100mm, 長さ 200mm のテフロンシートを設置し、 M16 bolts により締結した。なお、 bolts の締付けは、レンチを用いて手締めとした。

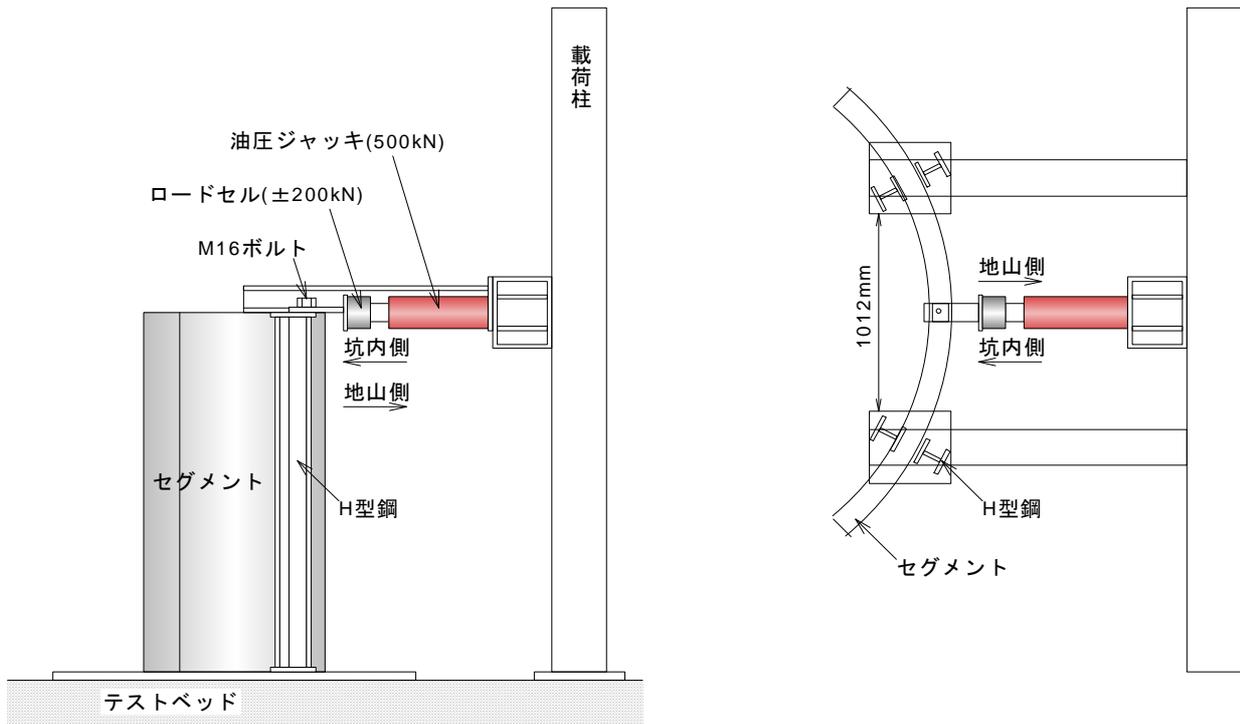


図 8.3.7 ボルトインサート及びボルトボックスの坑内側及び地山側への载荷方法の概略図





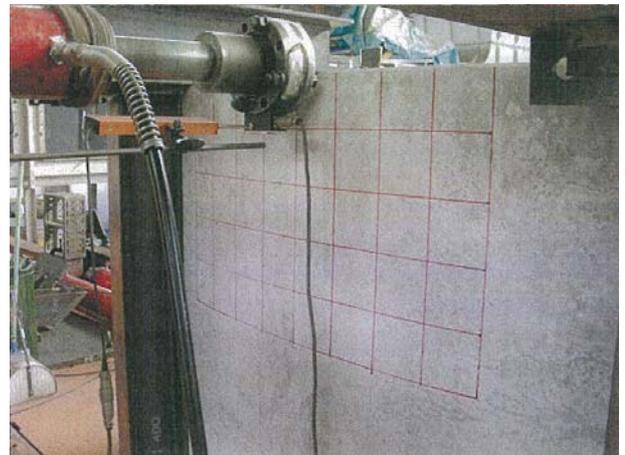
① 全体像（坑内側）



② 全体像（地山側）



③ 変位計の設置状況（坑内側）



④ 変位計の設置状況（地山側）



⑤ 変位計の設置状況（載荷板付近）



⑥ 変位計の設置状況（載荷板）

写真 8.3.5 ボルトインサート及びボルトボックスの坑内側及び地山側への載荷試験状況

## (2) 円周（接線）方向へ载荷

図 8.3.9 に試験方法の概略図を示す。また、写真 8.3.6 に試験前の载荷ジャッキ、セグメント等の設置状況を示す。使用したセグメントは、A1 セグメントである。

セグメント中央のボルトインサート又はボルトボックスの载荷部分は、ジャッキ先端の载荷板とボルトインサート又はボルトボックスを M16 ボルトとナットにより締結させることにより構成されている。载荷板の板厚は、ボルトボックスの厚さに合わせ 12mm とした。载荷時の摩擦の影響を低減させるため、ボルトインサート又はボルトボックス、载荷板の間に厚さ 2mm、幅 100mm、長さ 200mm のテフロンシートを設置し、M16 ボルトにより締結した。なお、ボルトの締付けは、レンチを用いて手締めとした。

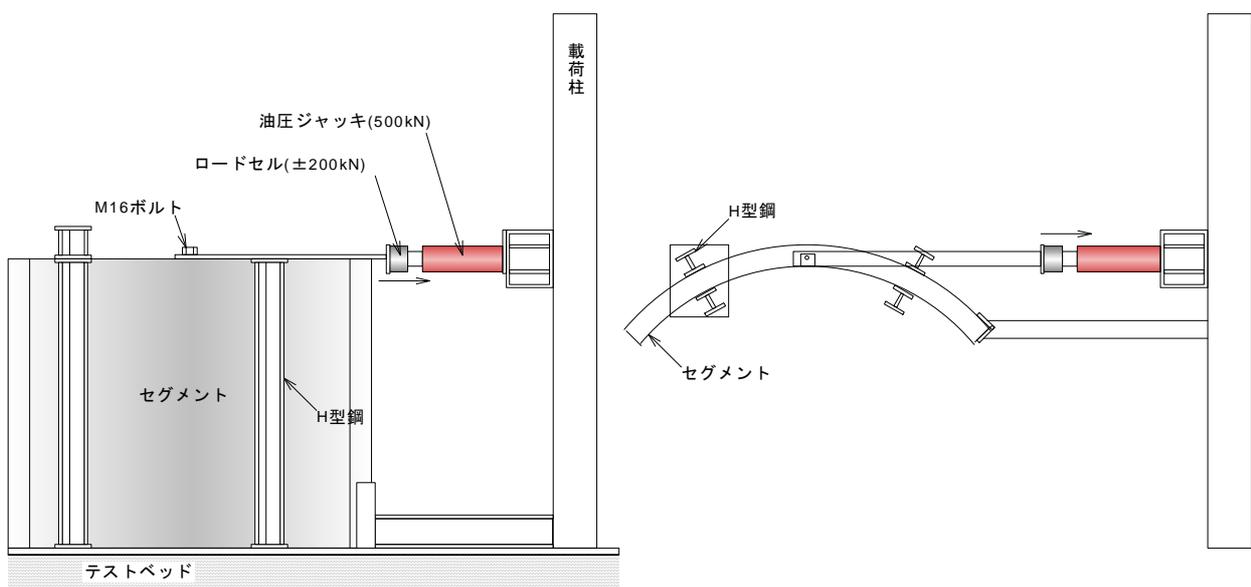


図 8.3.9 円周（接線）方向への载荷方法の概略図



(a) 全体像（地山側）



(b) 全体像（坑内側）



(c) 反力の取り方



(d) 接線方向への載荷方法



(e) ボルト付近の変位計取り付け状況



(d) ジャッキ付近の変位計取り付け状況

写真 8.3.6 ボルトインサート及びボルトボックスの坑内側及び地山側への載荷試験状況

**(3) 坑口側と地山側の間の 45 度の方向又は切羽側と坑内側の間の 45 度の方向に  
載荷**

図 8.3.10, 図 8.3.11 にそれぞれボルトインサート及びボルトボックスに対しての試験方法の概略図を示す。また, 写真 8.3.7, 写真 8.3.8 に試験前の載荷ジャッキ, セグメント等の設置状況を示す。使用したセグメントは, A2 セグメントである。

セグメント中央のボルトインサート又はボルトボックスの載荷部分は, ジャッキ先端の載荷板とボルトインサート又はボルトボックスを M16 ボルトとナットにより締結させることにより構成されている。載荷板の板厚は, ボルトボックスの厚さに合わせ 12mm とした。載荷時の摩擦の影響を低減させるため, ボルトインサート又はボルトボックス, 載荷板の間に厚さ 2mm, 幅 100mm, 長さ 200mm のテフロンシートを設置し, M16 ボルトにより締結した。なお, ボルトの締付けは, レンチを用いて手締めとした。

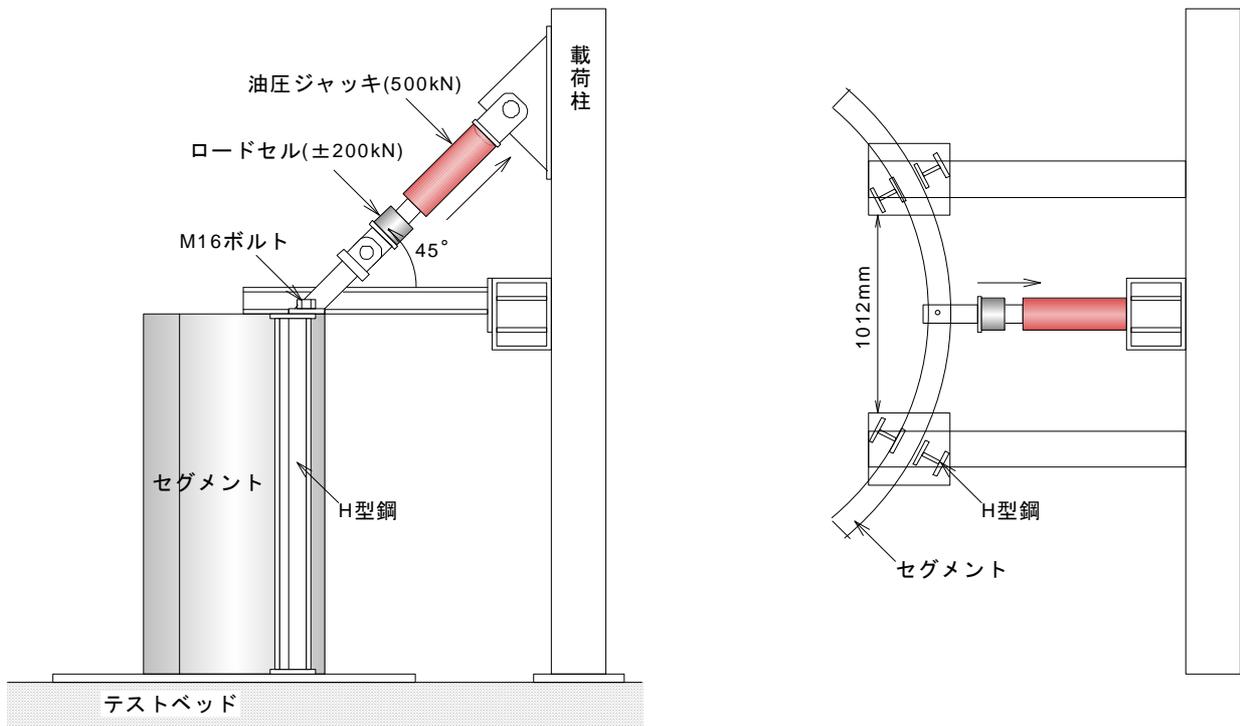


図 8.3.10 坑口側と地山側との間の 45 度の方向に載荷 (ボルトインサート)

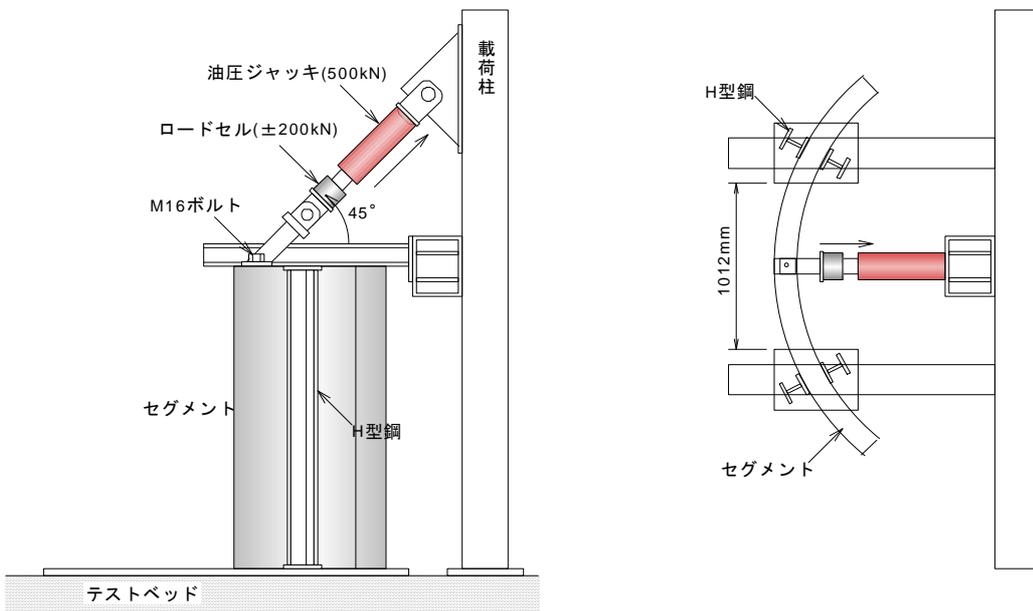


図 8.3.11 切羽側と坑内側との間の 45 度の方向に載荷 (ボルトボックス)



(a) 全体像 (坑内側)



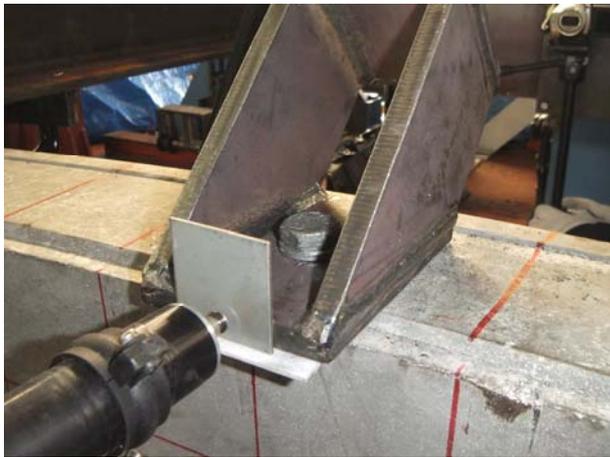
(b) 全体像 (地山側)



(c) 全体像 (側面図)



(d) 載荷板, 載荷ジャッキ, 変位計等



(e) ボルト付近の変位計の設置状況



(f) 45° の載荷方向の確認

写真 8.3.7 坑口側と地山側との間の 45 度の方向に載荷 (ボルトインサート)



(a) 全体像 (地山側)



(b) 载荷板, 反力の取り方等



(c) 全体像 (坑内側)



(d) 全体像 (側面図)



(e) 45° の载荷方向の確認



(f) テフロンシートの設置状況

写真 8.3.8 切羽側と坑内側の間の45度の方向に载荷 (ボルトボックス)

### 8. 3. 2. 2 載荷試験結果

ボルトインサート及びボルトボックスと載荷板を M16 ボルトで締結した状態において、様々な方向から載荷試験を実施した。結果は以下に示すとおりである。

#### (1) 坑内側へ載荷又は地山側へ載荷

試験結果の一覧表を表 8.3.3 に示す。

図 8.3.12, 図 8.3.13, 写真 8.3.9, 写真 8.3.10 にボルトインサートの載荷試験結果, 図 8.3.14, 図 8.3.15, 写真 8.3.11, 写真 8.3.12 にボルトボックスの載荷試験結果を示す。ボルトの締付けは、レンチを用いて手締めを基本としているが、図 8.3.16 のみトルク 135N・m にてボルトを締付けており、トルクの影響を調査しているが、結果として、トルクの影響は 2.7kN 程度である。

図 8.3.17 にボルトインサート及びボルトボックスの坑内側及び地山側への載荷試験における荷重変位関係をまとめて示している。

ボルトインサートの坑内側への載荷試験における最大荷重が最も小さく、28.1kN しかない。これは、第 4 章で述べたように、設計ではボルトのせん断力を用いているが、ボルトのせん断力を発揮する前に、ボルトインサートに坑内側への荷重が加わると、ボルトのせん断力以下の荷重でリング継手が破壊してしまうことを示している。

表 8.3.3 ボルトインサート及びボルトボックスの坑内側及び地山側への載荷試験結果一覧

載荷方向	ひび割れ発生荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	破壊状況
ボルトインサート 坑内側へ載荷	6.0	28.1	坑内側コンクリート 破壊
ボルトインサート 地山側へ載荷	78.0	81.6	地山側コンクリート 破壊
ボルトボックス 坑内側へ載荷	50.0	59.9	坑内側コンクリート 破壊
ボルトボックス 地山側へ載荷	—	82.0	M16 ボルト 破断
ボルトボックス 地山側へ載荷 M16 ボルトの 締付軸力:135N・m	—	84.7	M16 ボルト 破断

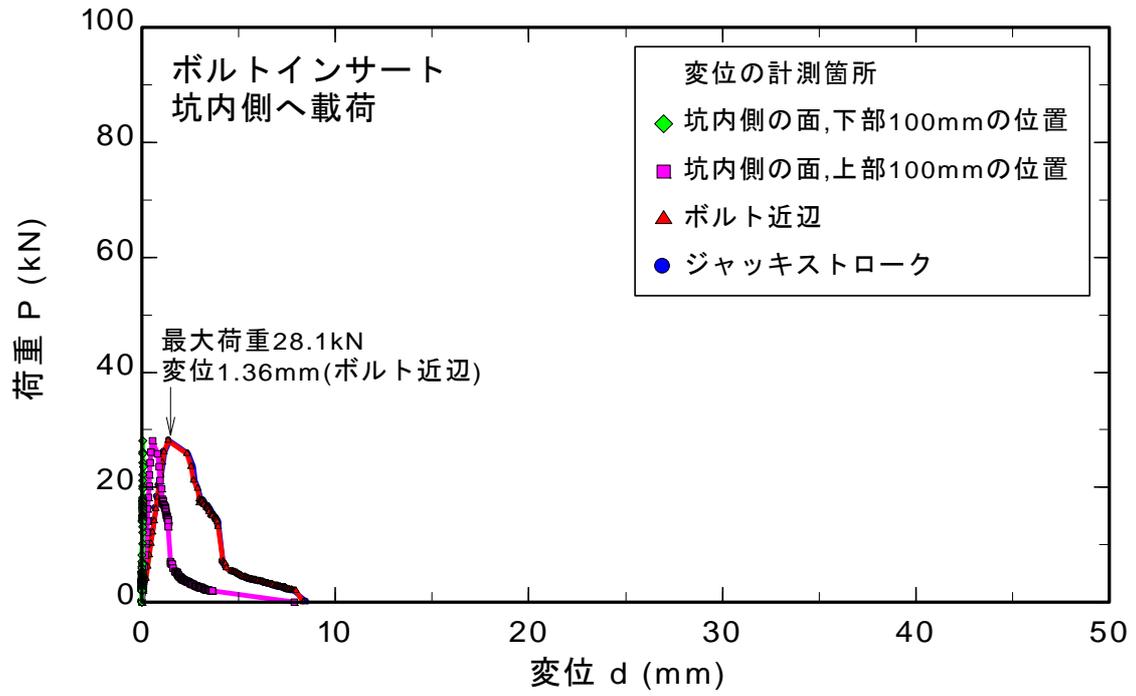


図 8.3.12 ボルトインサートの坑内側への载荷試験結果

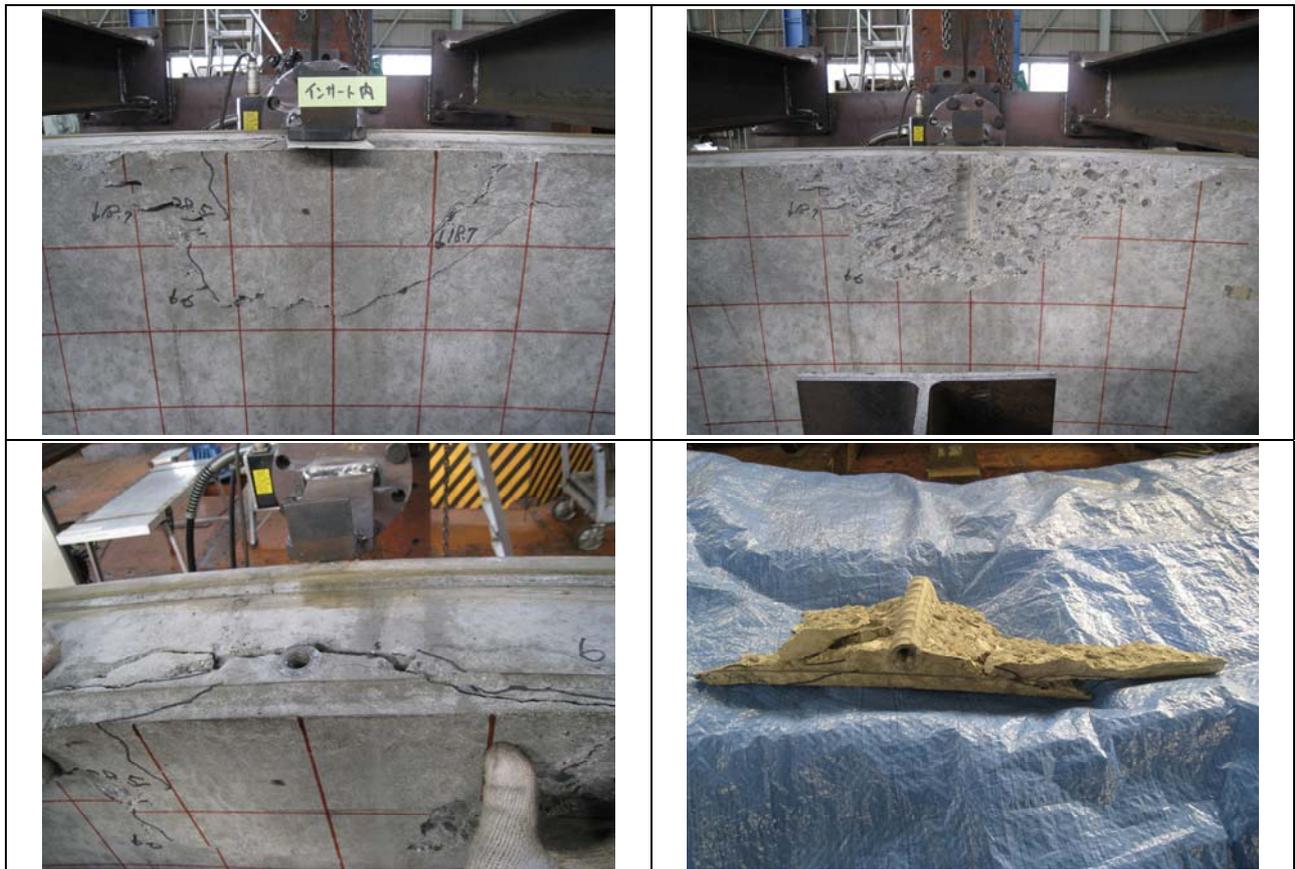


写真 8.3.9 ボルトインサートの坑内側への载荷試験後の破壊状況

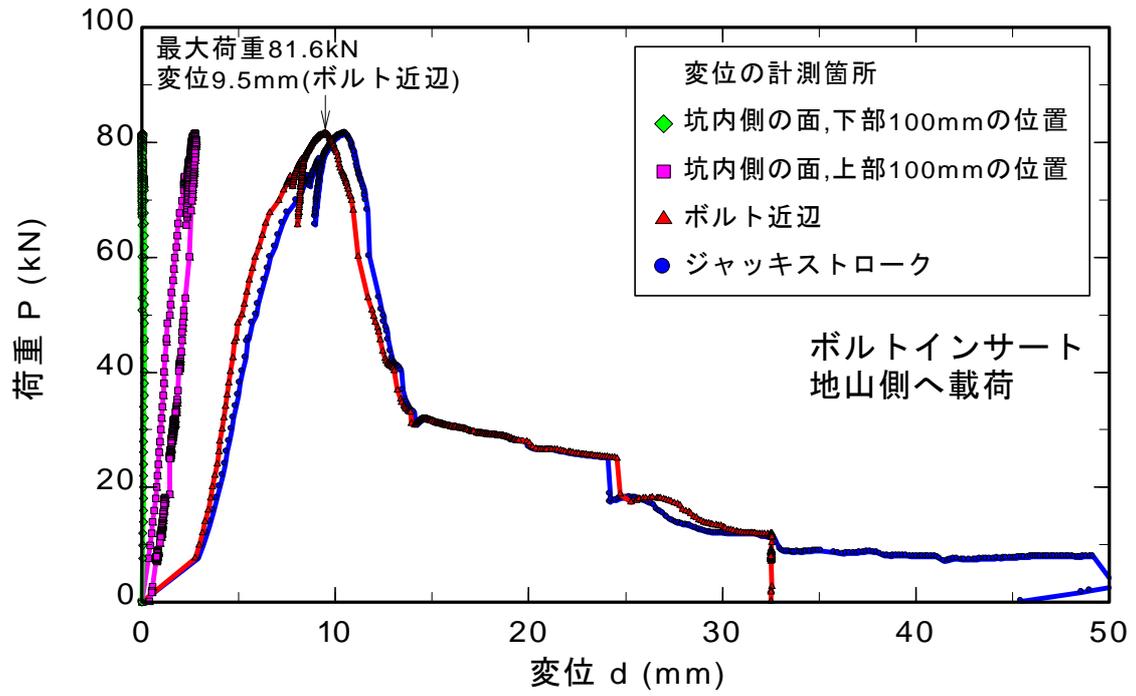


図 8.3.13 ボルトインサートの地山側への载荷試験結果



写真 8.3.10 ボルトインサートの地山側への载荷試験後の破壊状況

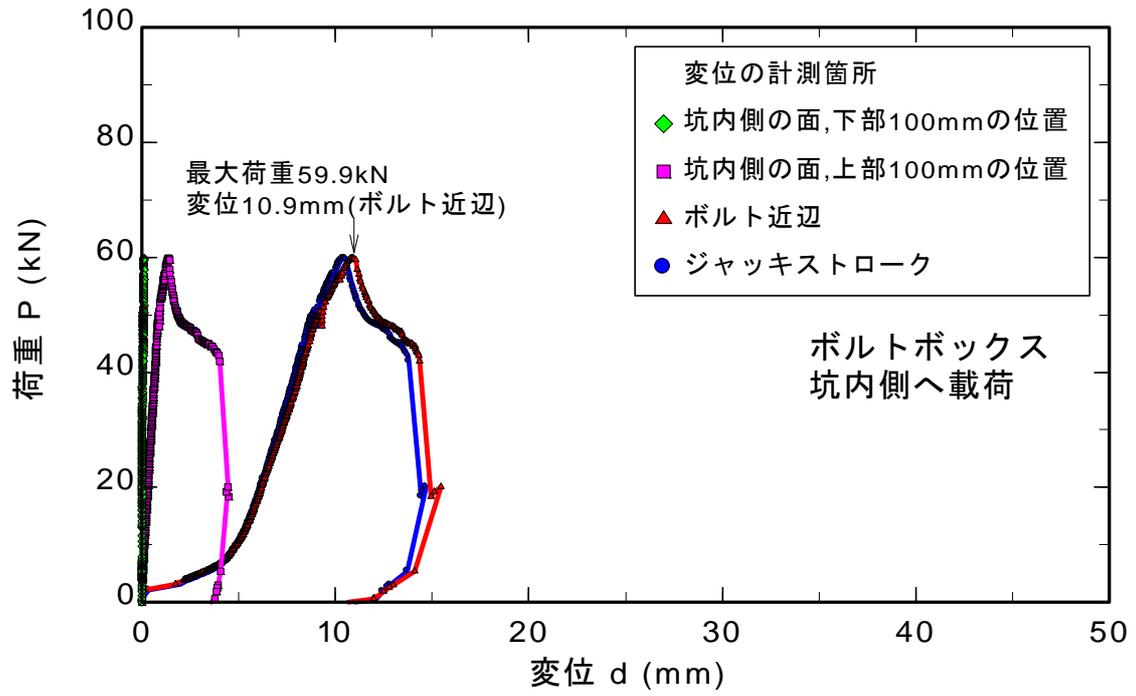


図 8.3.14 ボルトボックスの坑内側への載荷試験結果



写真 8.3.11 ボルトボックスの坑内側への載荷試験後の破壊状況

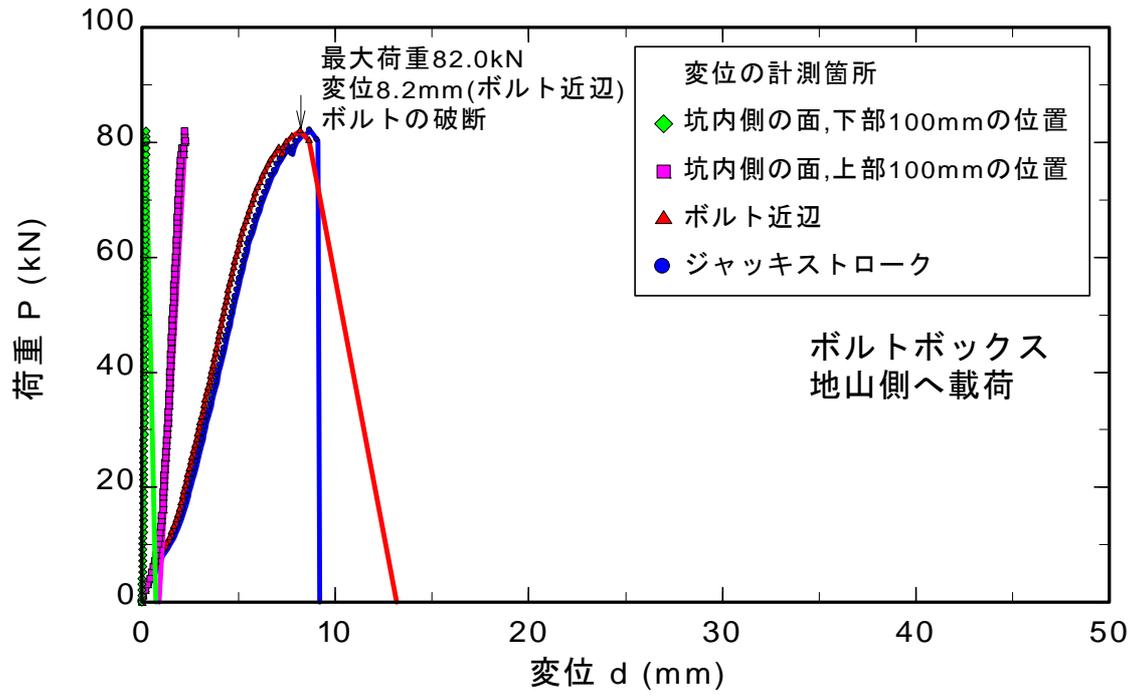


図 8.3.15 ボルトボックスの地山側への荷重試験結果

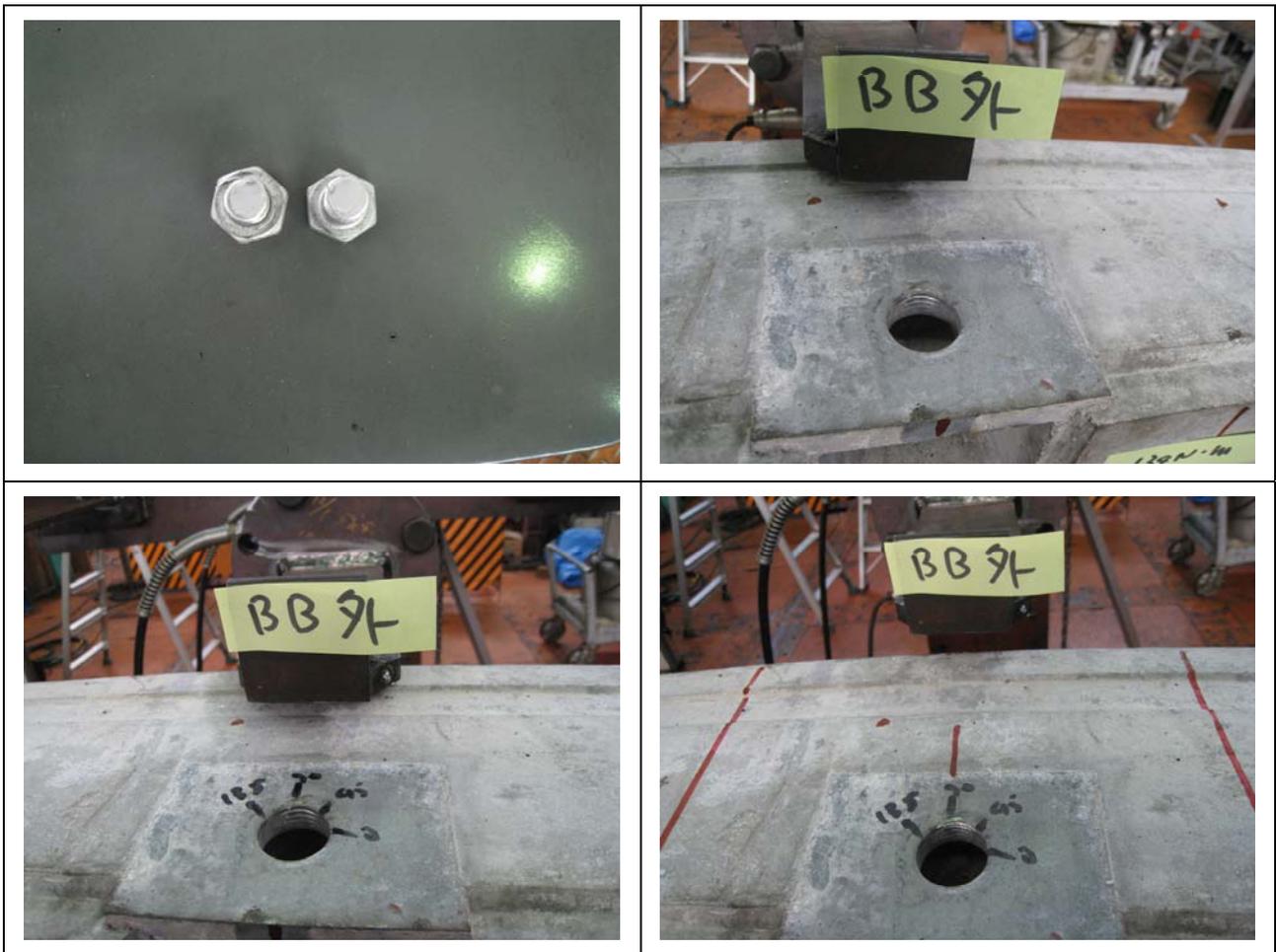


写真 8.3.12 ボルトボックスの地山側への荷重試験後の破壊状況

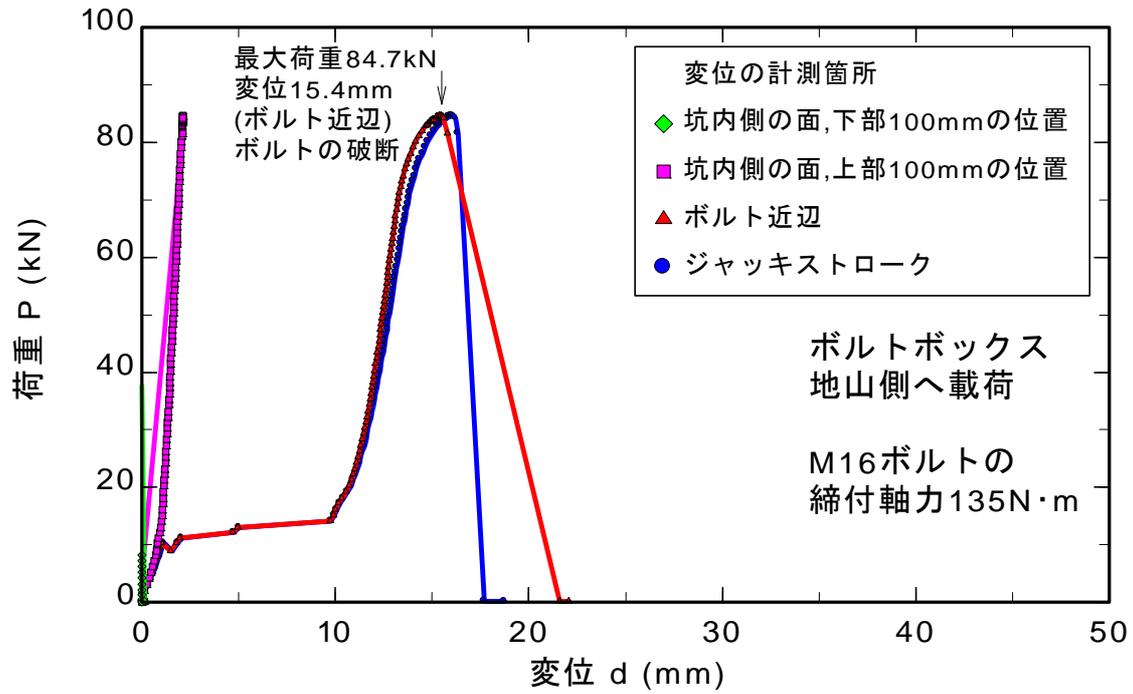


図 8.3.16 ボルトボックスの地山側への載荷試験結果 (M16 ボルトの締付軸力 135N・m)

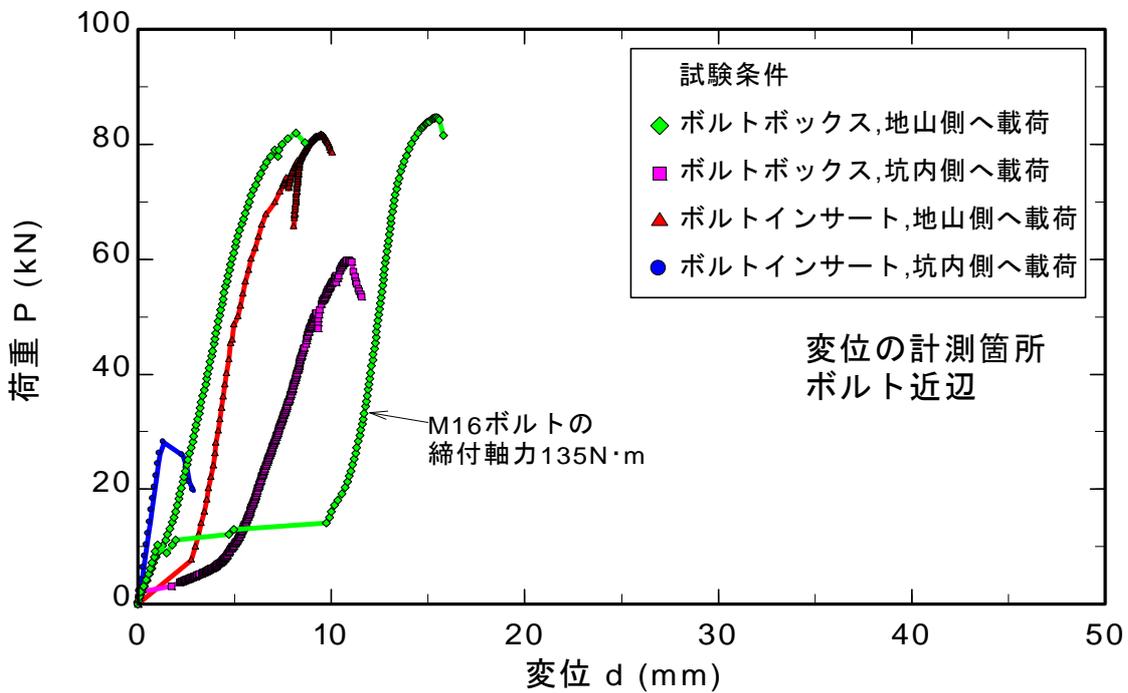


図 8.3.17 ボルトインサート及びボルトボックスの坑内側及び地山側への載荷試験結果

## (2) 円周（接線）方向へ載荷

試験結果の一覧表を表 8.3.4 に示す。図 8.3.18, 写真 8.3.13 にボルトインサートの載荷試験結果, 図 8.3.19, 写真 8.3.14 にボルトボックスの載荷試験結果, 図 8.3.20 に両者の比較を示す。

表 8.3.4 ボルトインサート及びボルトボックスの円周（接線）方向への載荷試験結果

試験条件	最大荷重 (kN)	最終破壊状況
ボルトインサート 円周（接線）方向	84.3	ボルト破断
ボルトボックス 円周（接線）方向	87.5	ボルト破断

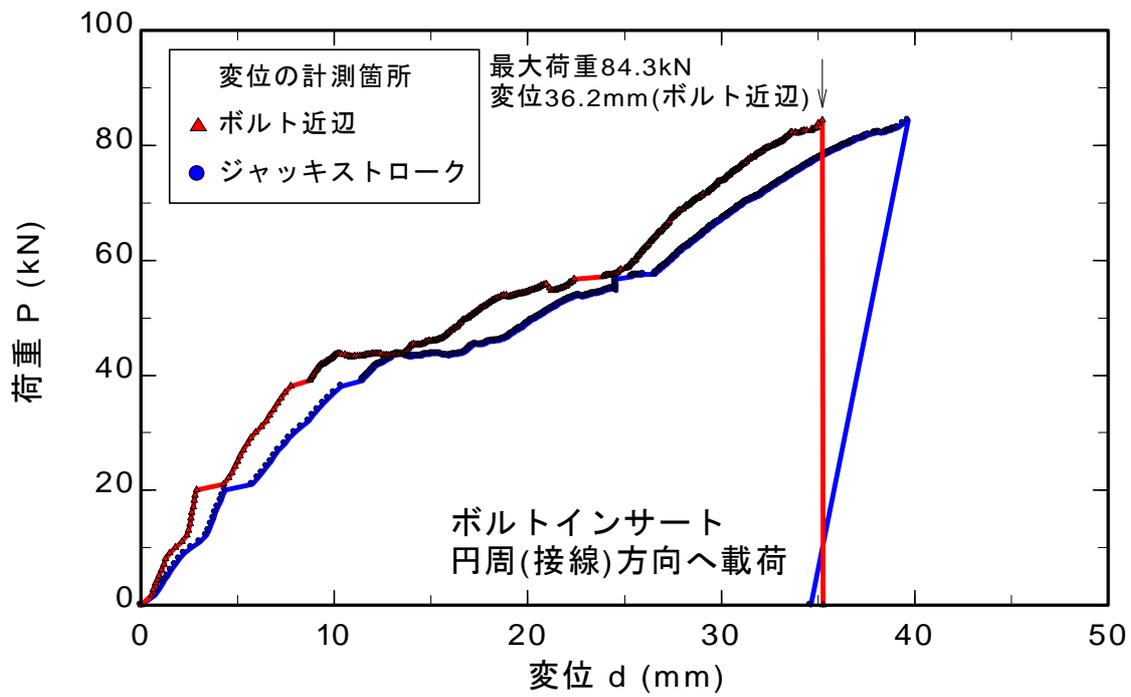


図 8.3.18 ボルトインサートの円周（接線）方向への载荷試験結果



写真 8.3.13 ボルトインサートの円周（接線）方向への载荷試験後の破壊状況

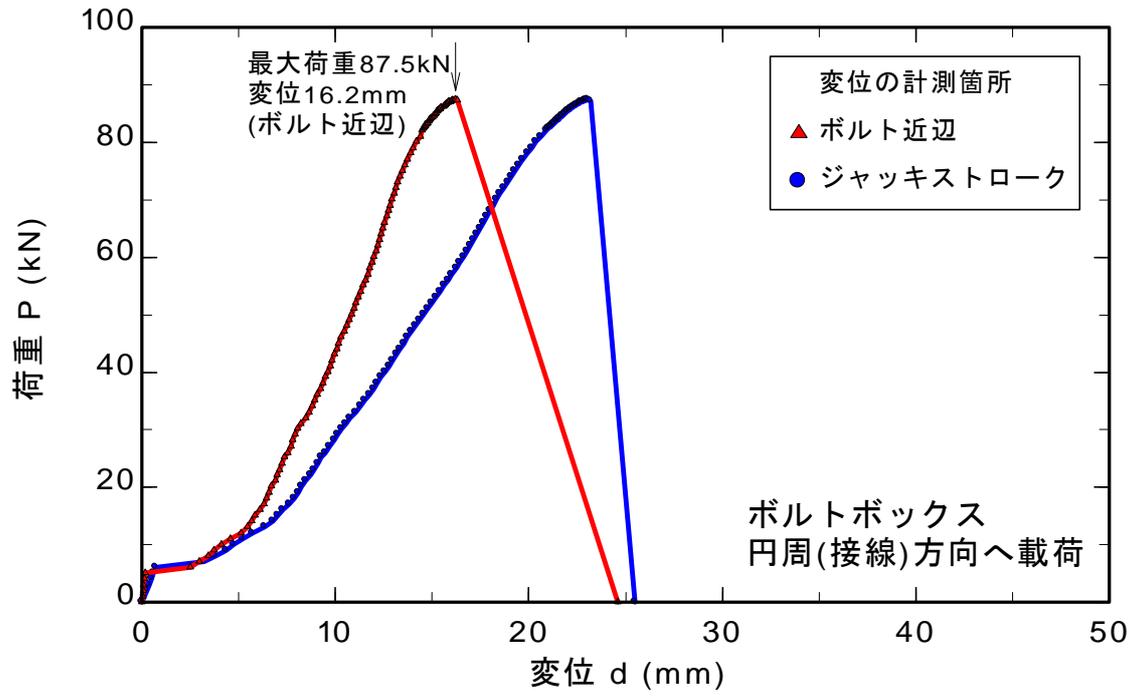


図 8.3.19 ボルトボックスの円周（接線）方向への载荷試験結果



写真 8.3.14 ボルトボックスの円周（接線）方向への载荷試験後の破壊状況

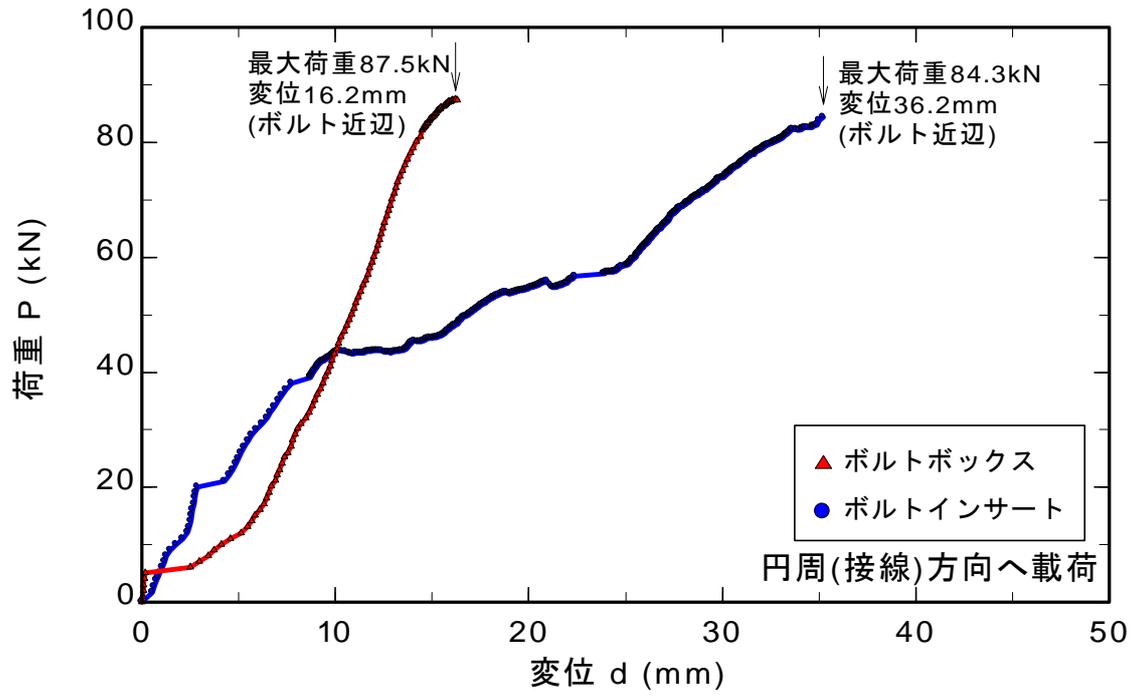


図 8.3.20 ボルトインサート及びボルトボックスの円周（接線）方向への載荷試験結果

(3) 坑口側と地山側の間 45 度の方向又は切羽側と坑内側の間 45 度の方向に  
載荷

試験結果の一覧表を表 8.3.5 に示す。図 8.3.21, 写真 8.3.15 にボルトインサートの  
載荷試験結果, 図 8.3.22, 写真 8.3.16 にボルトボックスの載荷試験結果, 図 8.3.23  
に両者の比較を示す。

表 8.3.5 ボルトインサートを坑口側と地山側の間 45 度の方向へ載荷した試験及  
びボルトボックスを切羽側と坑内側の間 45 度の方向へ載荷した試験結果

試験条件	荷重 (kN)	破壊状況
ボルトインサート 坑口側と地山側の間 45 度の方向	55.1	コンクリート破壊 ボルトインサート抜け出 し
ボルトボックス 切羽側と坑内側の間 45 度の方向	41.1 51.7, 51.1 60.9	ボルトボックスの剥離 コンクリートの剥離 ボルト破断

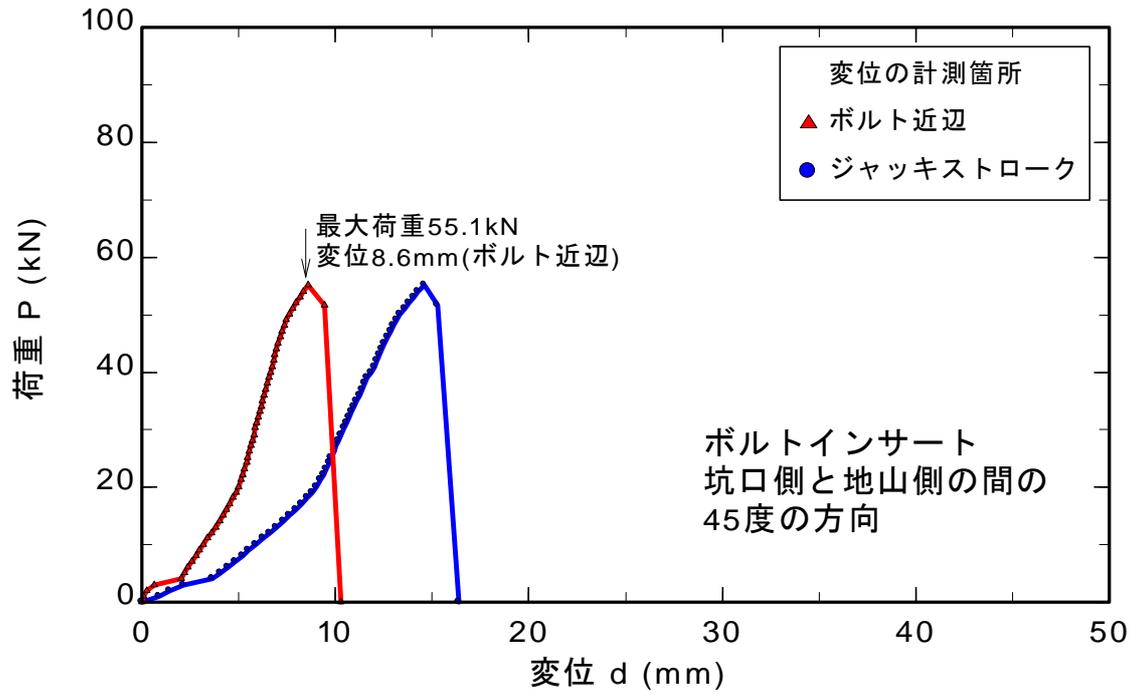


図 8.3.21 ボルトインサートを坑口側と地山側との間の 45 度の方向へ載荷した試験結果



写真 8.3.15 ボルトインサートを坑口側と地山側との間の 45 度の方向へ載荷した試験後の破壊状況

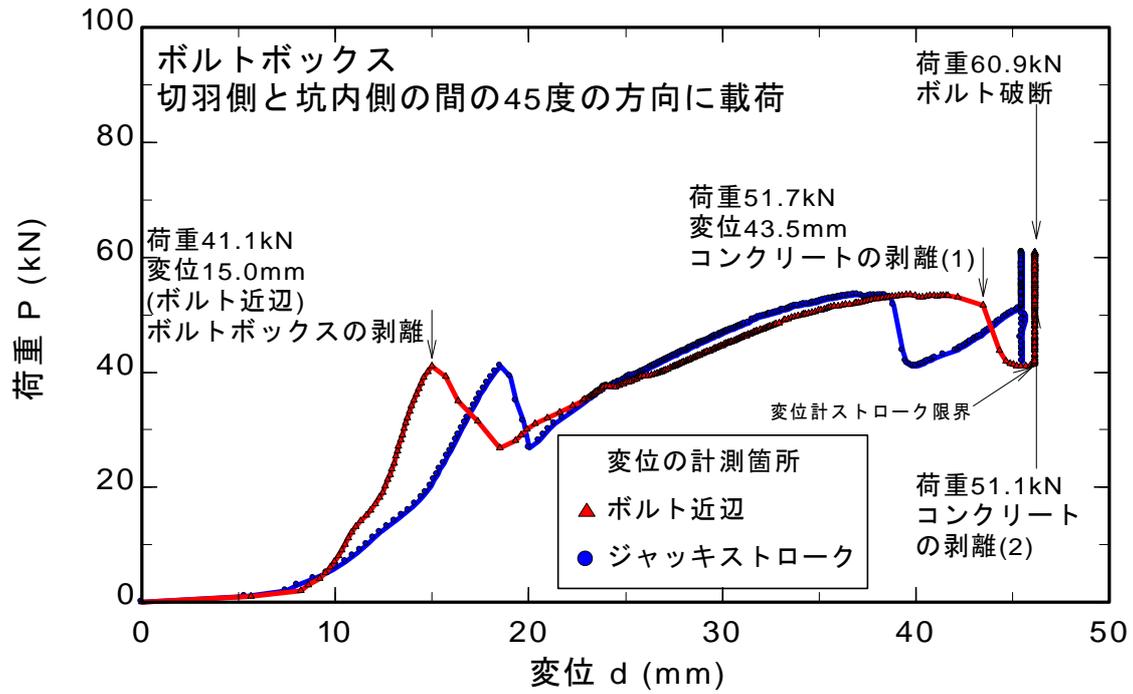


図 8.3.22 ボルトボックスを切羽側と坑内側の間の 45 度の方向へ载荷した試験結果



写真 8.3.16 ボルトボックスを切羽側と坑内側の間の 45 度の方向へ载荷した試験後の破壊状況

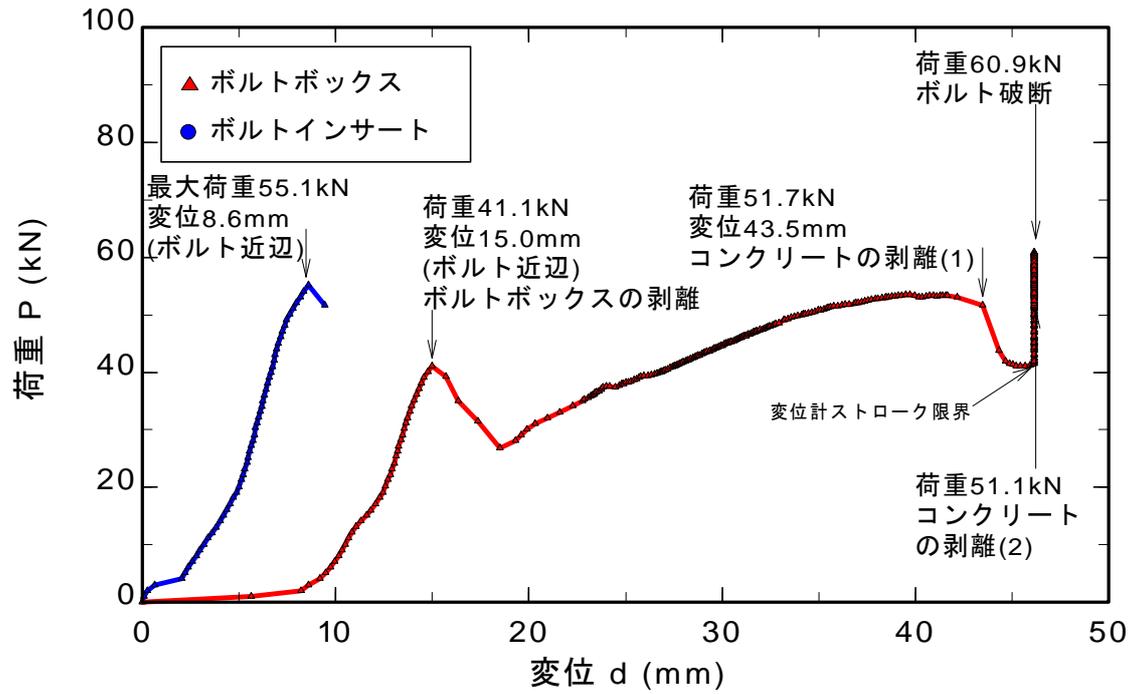


図 8.3.23 ボルトインサートを坑口側と地山側の間の 45 度の方向へ載荷した試験及びボルトボックスを切羽側と坑内側の間の 45 度の方向へ載荷した試験結果

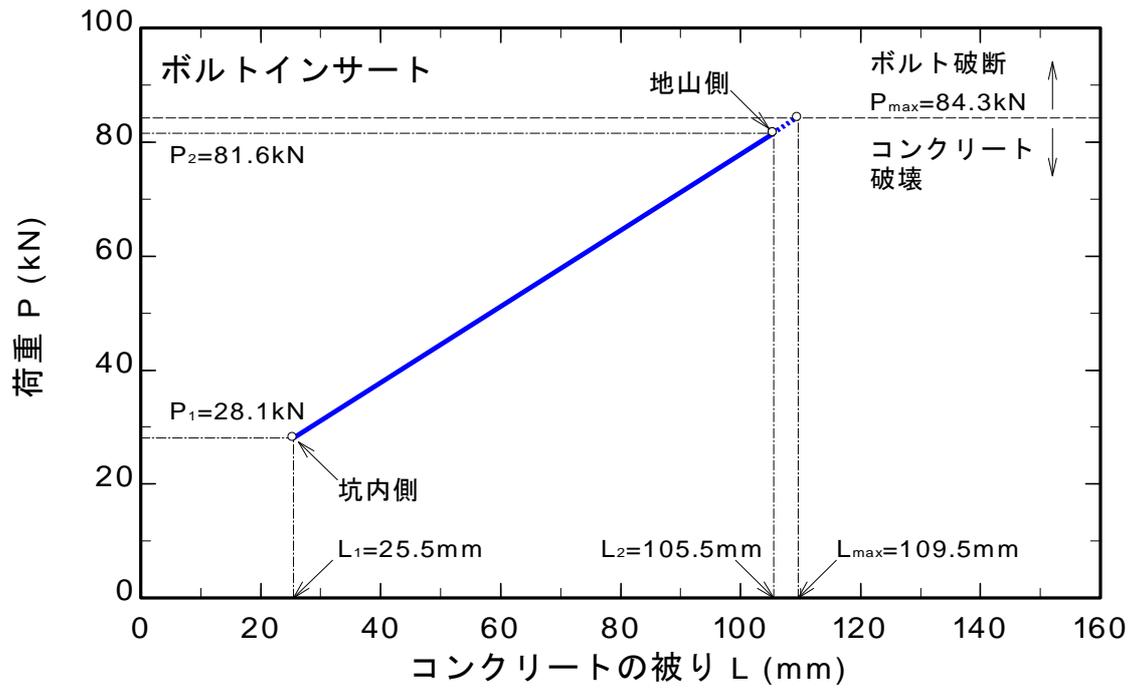
### 8. 3. 2. 3 載荷試験結果まとめ

試験結果の一覧表を表 8.3.6 に示す。また、図 8.3.24 にボルトインサートに対する載荷方向とボルトが破断する領域との関係、図 8.3.25 にボルトボックスに対する載荷方向とボルトが破断する領域との関係、図 8.3.26, 図 8.3.27 にボルトインサート及びボルトボックスに対する載荷方向と破壊荷重の関係、図 8.3.28 にボルトボックスのボルト穴の内径計測結果、表 8.3.7 にボルトボックスのボルト穴の内径計測結果一覧表をそれぞれ示す。

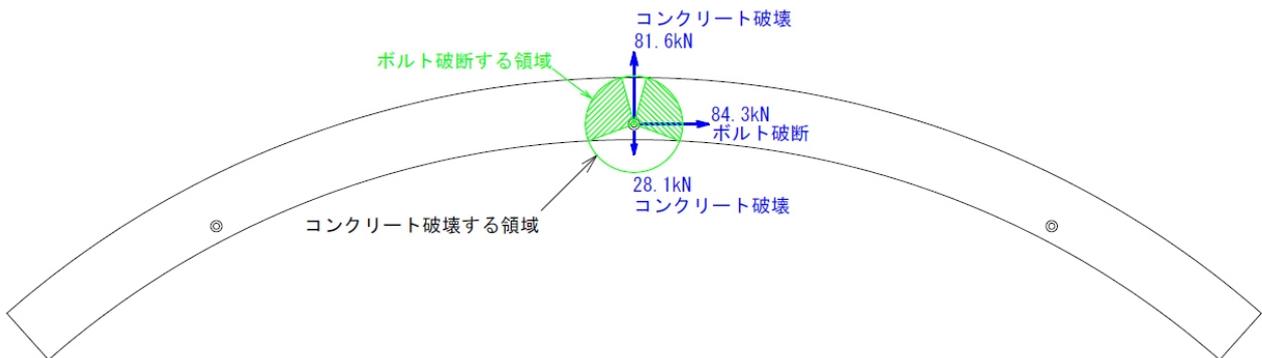
設計ではボルトのせん断力を用いているが、ボルトのせん断力を発揮する前に、ボルトインサートに坑内側への荷重が加わると、ボルトのせん断力以下の荷重でリング継手が破壊してしまうことを示している。設計計算での最大リング間せん断力は 11.3kN であるため、設計荷重では破壊にはいたらず、ひび割れが発生するのみであるが、設計では想定されていない破壊形態となり、当該設計は望ましいものではないと言える。

表 8.3.6 試験結果一覧表

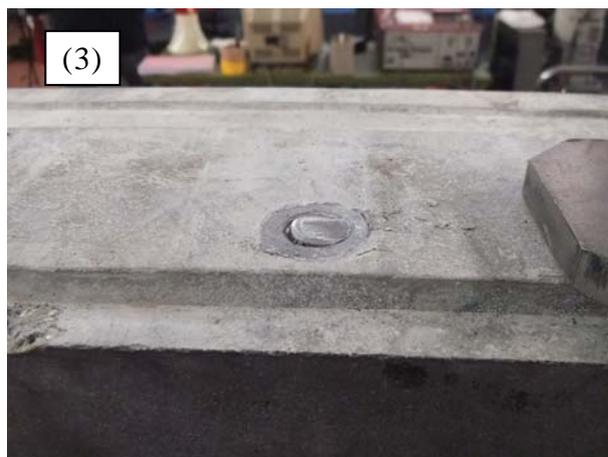
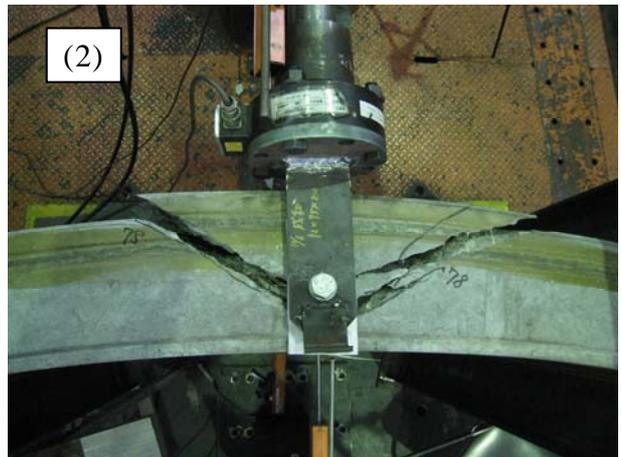
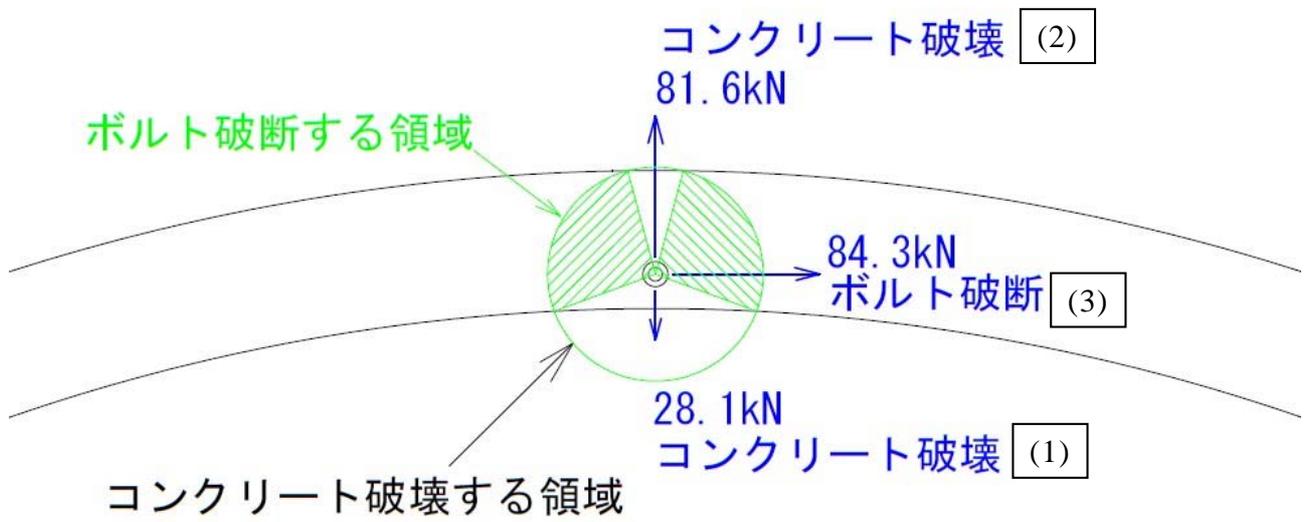
	載荷方向	荷重 (kN)	破壊状況
ボルト インサート	坑内側	6.0	ひび割れ
		28.1	坑内側コンクリート破壊
	地山側	78.0	ひび割れ
		81.6	地山側コンクリート破壊
円周（接線）	84.3	ボルト破断	
	坑口側と地山側の間 の 45度の方向	55.1	コンクリート破壊及び ボルトインサート抜け出し
ボルト ボックス	坑内側	50.0	ひび割れ
		59.9	坑内側コンクリート破壊
	地山側	82.0	ボルト破断
	円周（接線）	87.5	ボルト破断
	切羽側と坑内側の間 の 45度の方向	41.1 51.7, 51.1 60.9	ボルトボックスの剥離 コンクリートの剥離 ボルト破断



(a) 最大荷重とコンクリートの被りとの関係

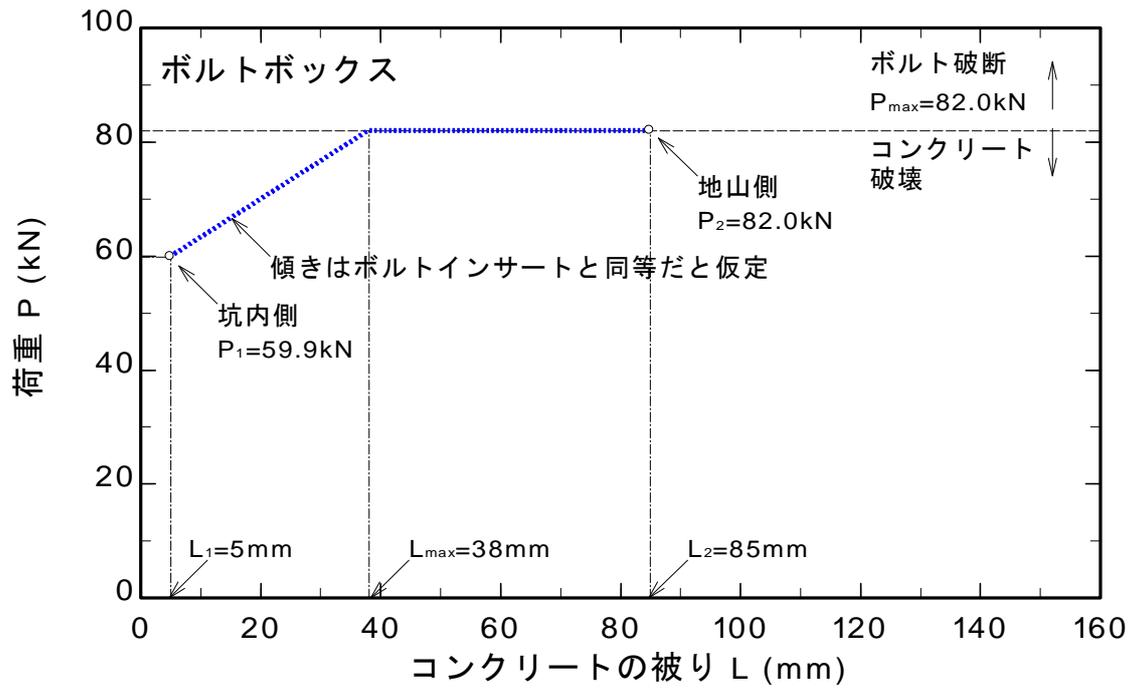


(b) ボルトが破断する領域とコンクリート破壊する領域

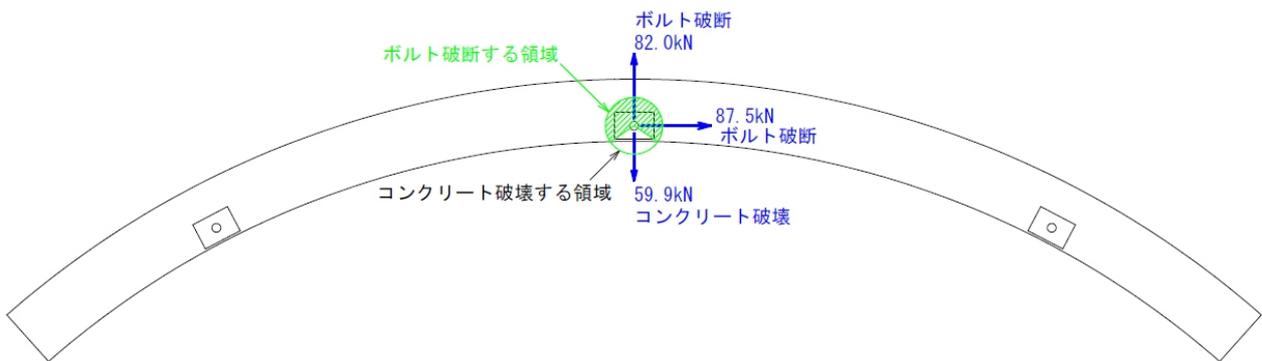


(c) 拡大図

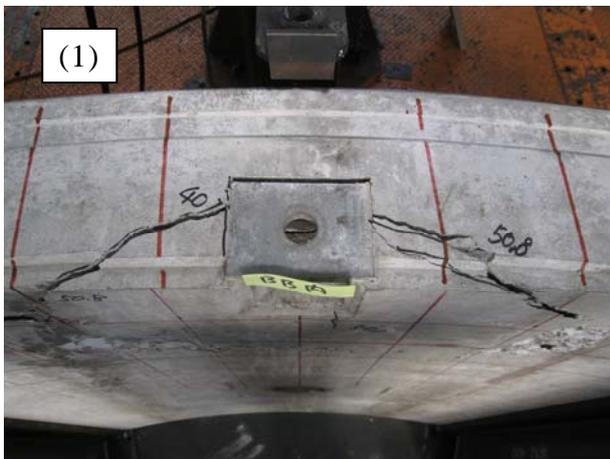
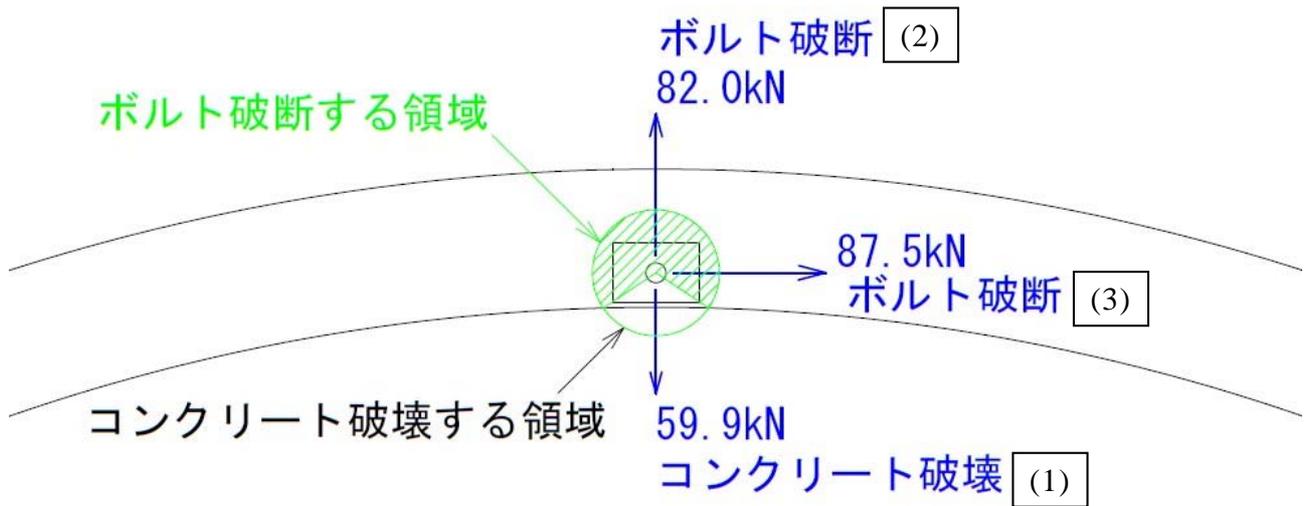
図 8.3.24 ボルトインサートに対する荷重方向とボルトが破断する領域との関係



(a) 最大荷重とコンクリートの被りとの関係

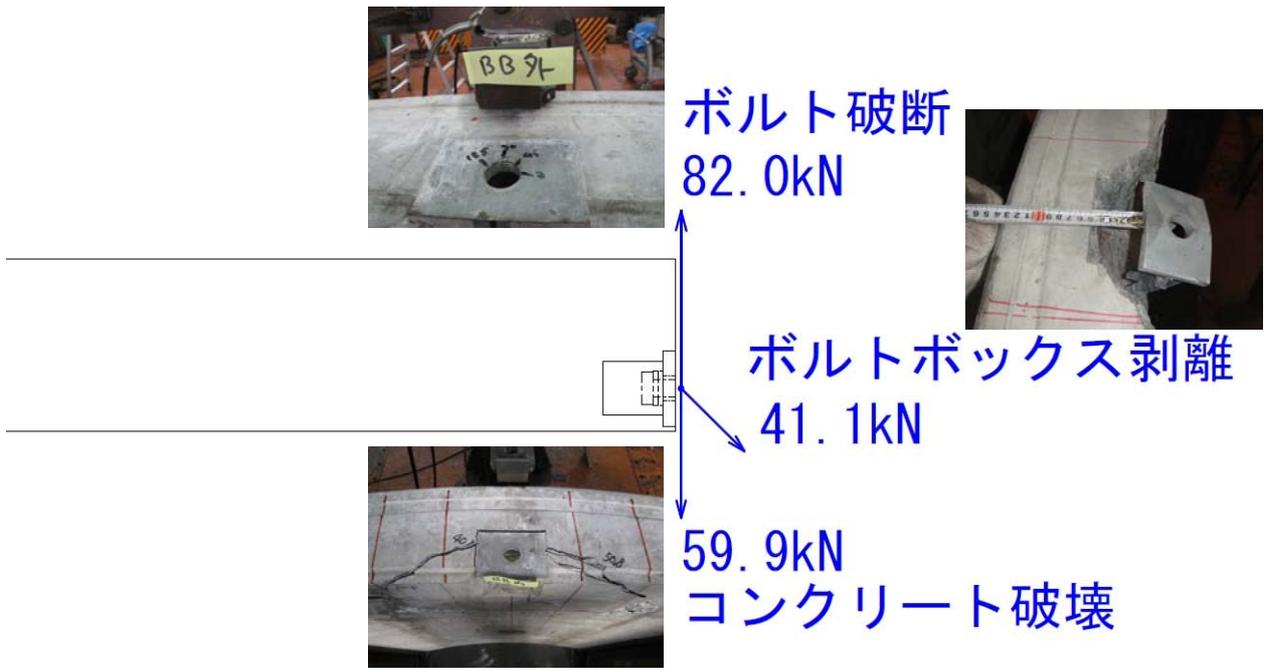


(b) ボルトが破断する領域とコンクリート破壊する領域

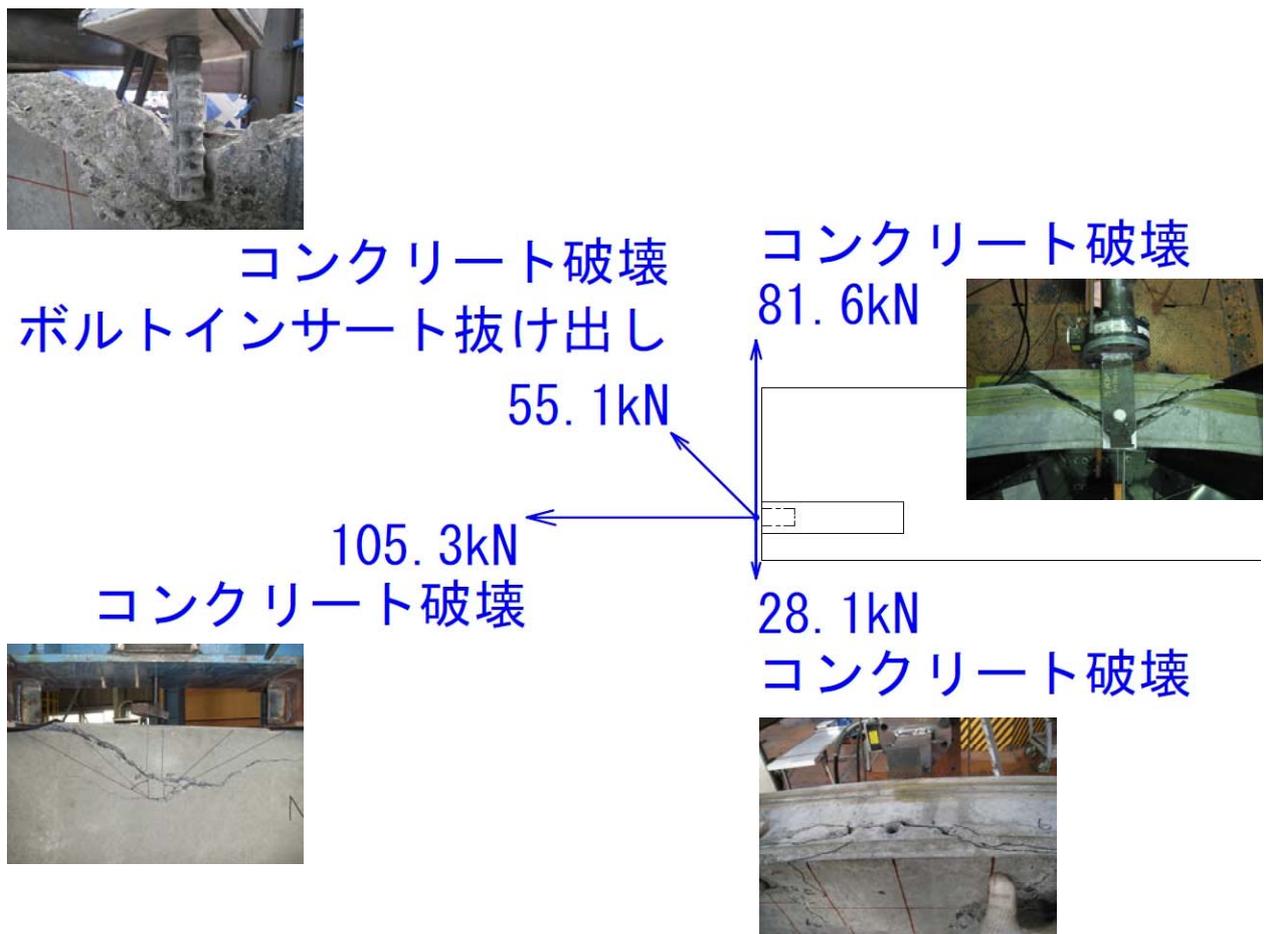


(c) 拡大図

図 8.3.25 ボルトボックスに対する荷重方向とボルトが破断する領域との関係

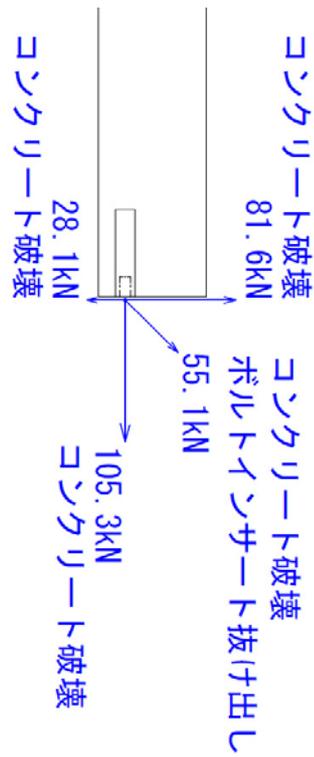


(a) ボルトインサート側

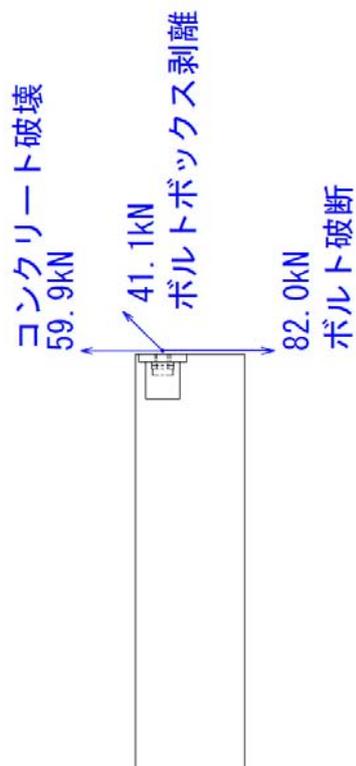


ボルトボックス側

図 8.3.26 ボルトインサート及びボルトボックスに対する荷重方向と破壊荷重の関係



(a) ボルトインサート側



(b) ボルトボックス側

図 8.3.27 ボルトインサート及びボルトボックスに対する載荷方向と破壊荷重の関係

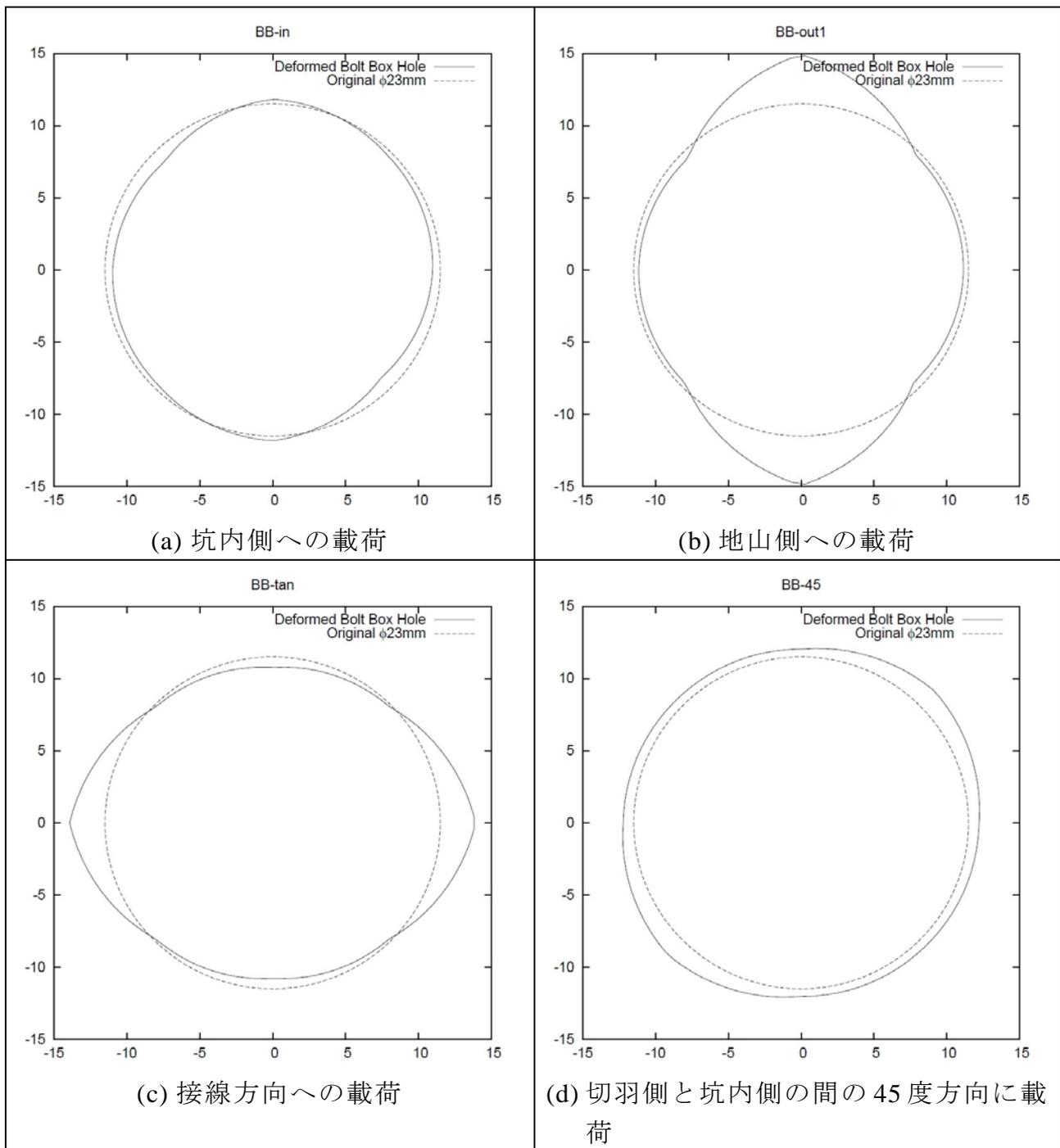


図 8.3.28 ボルトボックスのボルト穴の内径計測結果（変位を 10 倍にして記載）

表 8.3.7 ボルトボックスのボルト穴の内径計測結果一覧表

角度	試験名又はリング名									
	B2-カ(新品)		BB(坑内側)		BB(地山側)		BB(接線方向)		BB(45度の方向)	
	平均	新品の平均直径からの差	平均	新品の平均直径からの差	平均	新品の平均直径からの差	平均	新品の平均直径からの差	平均	新品の平均直径からの差
0	22.940	0.003	22.894	-0.043	22.931	-0.006	23.484	0.547	23.143	0.206
45	22.942	0.005	22.937	0.000	22.937	0.000	22.971	0.034	23.287	0.350
90	22.946	0.009	23.067	0.130	23.687	0.750	22.852	-0.085	23.106	0.169
135	22.920	-0.017	22.808	-0.129	22.893	-0.044	22.968	0.031	23.115	0.178
新品の平均直径	22.937									

#### 8. 4 コンクリート部分の物理試験

セグメント単体曲げ試験に供した A1 セグメントのコンクリート部分から円柱供試体を採取し、超音波速度試験及び一軸圧縮試験を実施した。超音波速度試験及び一軸圧縮試験は、セグメントのコンクリート強度の把握に加えて、数値解析パラメータを得るために実施した。

JIS A 1107:2002「コンクリートからのコア及びはりの切り取り方法並びに強度試験方法」<sup>5)</sup>によると、『コア供試体の直径は、一般に粗骨材の最大寸法の3倍以下としてはならない』と明記されている。当該災害のセグメント作製に使用されたコンクリートの粗骨材の最大寸法は 20mm であるため、円柱供試体の直径は 60mm 以下としてはならない。しかしながら、セグメント内の配筋にかかってしまうため、直径 30mm、高さ 60mm の円柱供試体が採取できる最大の寸法であった。そのため、直径 30mm、高さ 60mm の円柱供試体を用いて試験を実施した。

コンクリート採取状況の写真を写真 8.4.1 に、採取箇所の概略図を図 8.4.1 に示す。A1 セグメント 3 体から合計 12 個の供試体を採取できた。各 A1 セグメントにつき、各 4 個の供試体を採取したことになる。採取した合計 12 個の供試体のうち、各 A1 セグメントにつき、各 2 個の供試体、合計 6 個の供試体を超音波速度試験及び一軸圧縮試験に供した。



写真 8.4.1 A1 セグメントのコンクリート部分から円柱供試体を採取

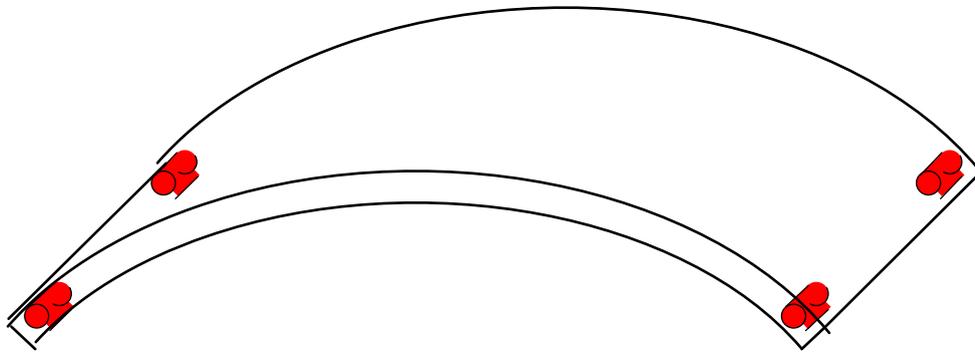
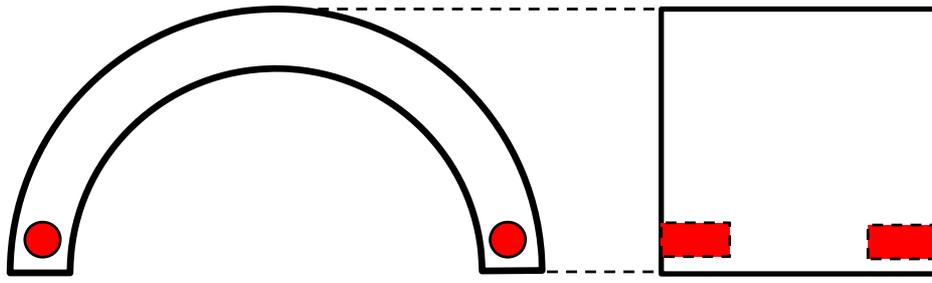


図 8.4.1 A1 セグメントのコンクリート部分から円柱供試体を採取。

#### 8. 4. 1 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験は、材料の最も基本的な力学特性を求める試験であるとともに、比較的簡便な試験で実施頻度が高く、その試験結果は多方面に利用されている。

一軸圧縮試験は、JIS A 1108:2006「コンクリートの圧縮強度試験方法」<sup>6)</sup>に従い実施した。JIS A 1132:2006「コンクリート強度試験用供試体の作り方」<sup>7)</sup>によると、『供試体は、直径の2倍の高さをもつ円柱形とする。その直径は、粗骨材の最大寸法の3倍以上、かつ、100mm以上とする』とある。今回採取した円柱供試体は、直径30mm、高さ60mmのため、供試体の高さは直径の2倍であるが、直径の寸法は同規格を満たしていない。これは前述したように、セグメントの配筋のためである。

写真 8.4.2 に一軸圧縮試験の様子を示す。

また、JIS A 1149:2010「コンクリートの静弾性係数試験方法」<sup>8)</sup>に従い、一軸圧縮試験中の静弾性係数を計測した。静弾性係数は、供試体にはり付けたひずみゲージにより  $10 \times 10^{-6}$  以下の精度で供試体のひずみを計測し、以下の式により求められる。

$$E_c = \frac{S_1 - S_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \times 10^{-3} \quad (8.4.1)$$

- ここで、
- $E_c$ : 各供試体の静弾性係数(kN/mm<sup>2</sup>)
  - $S_1$ : 最大荷重の 1/3 に相当する応力(N/mm<sup>2</sup>)
  - $S_2$ : 供試体の縦ひずみ  $50 \times 10^{-6}$  のときの応力(N/mm<sup>2</sup>)
  - $\varepsilon_1$ : 応力によって生じる供試体の縦ひずみ
  - $\varepsilon_2$ :  $50 \times 10^{-6}$



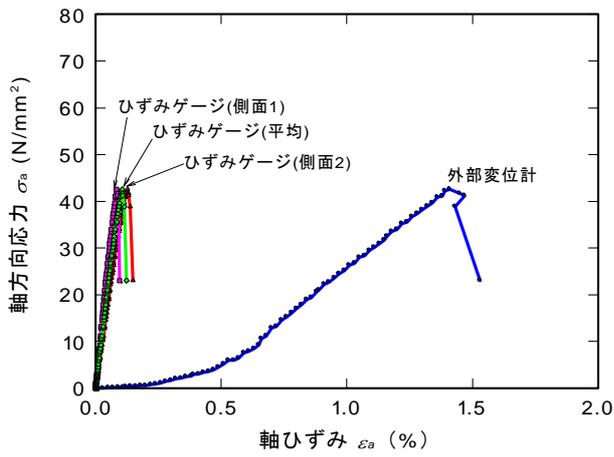
写真 8.4.2 一軸圧縮試験の様子

図 8.4.2 に各供試体の軸方向応力と軸ひずみの関係を示す。

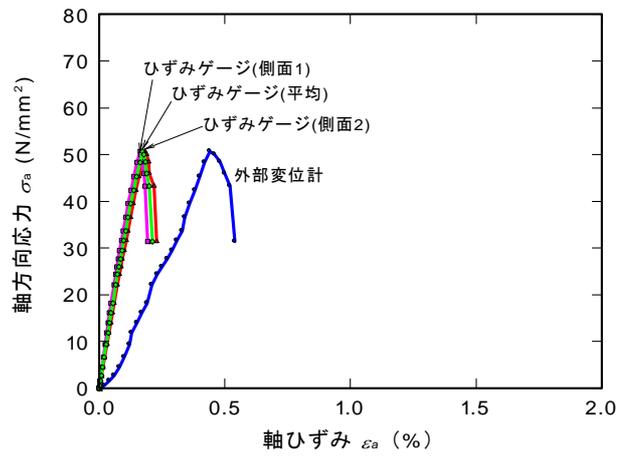
軸方向の応力は、軸方向に加えた力を供試体の断面積で除した値である。

軸方向の変位は、供試体の外部から変位計により軸方向の変位を計測した場合（外部変位計）、供試体の左右側面からそれぞれひずみゲージにより供試体の軸方向の変位を計測した場合（ひずみゲージ）がある。外部変位計の場合、供試体の端面が完全な平坦でない影響、試験機の载荷盤自体の変形の影響等を含み、実際の供試体の変位よりも大きな変位を計測してしまう。このため、全ての供試体において、外部変位計から計測される応力ひずみ関係は図の右側へシフトした曲線を呈している。

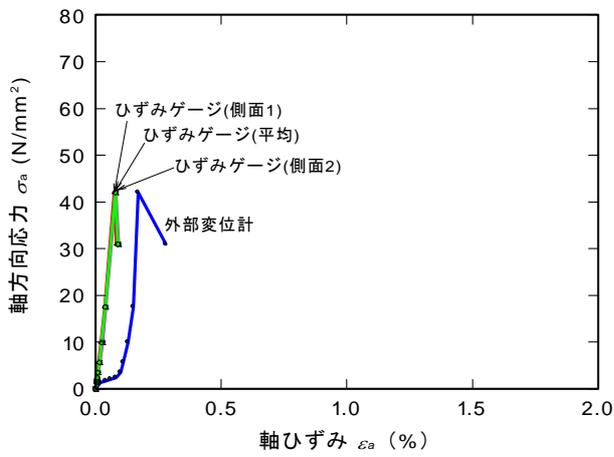
一方、ひずみゲージから計測される応力ひずみ関係は、初期の立ち上がりも直線的であり、良好な応力ひずみ関係が得られている。ただし、ひずみゲージから計測される軸ひずみは、ひずみゲージの検長に対するひずみゲージの変位量から求められるものであるため、局所的なひずみ値になっていることに留意する必要がある。



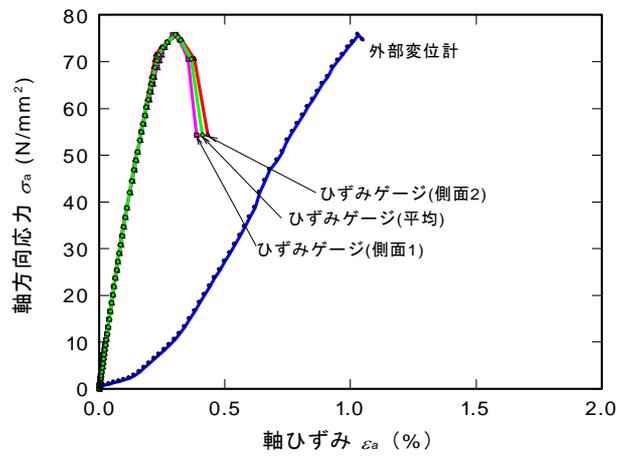
(e) A1-1a



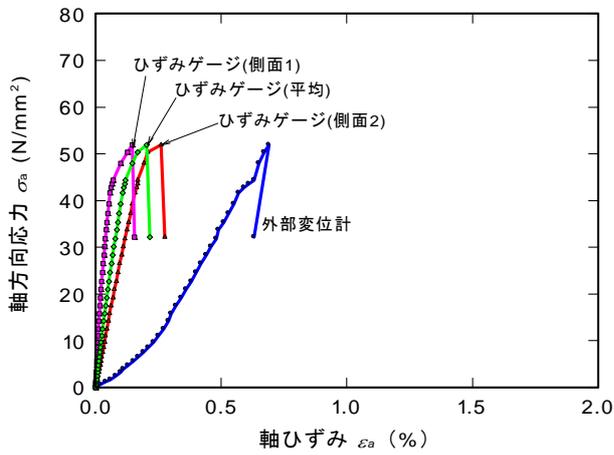
(f) A1-1b



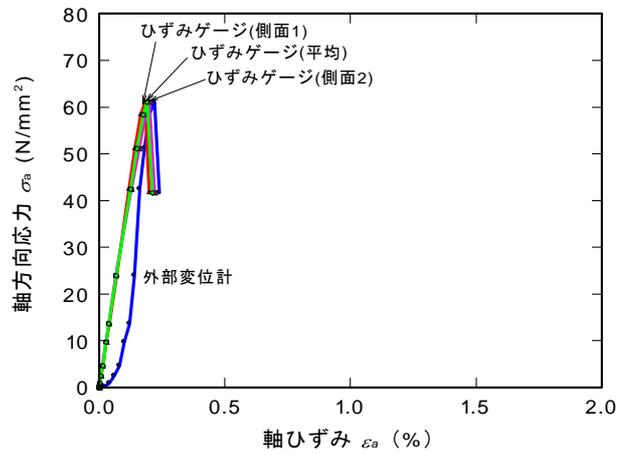
(g) A1-2a



(h) A1-2b



(i) A1-3a



(j) A1-3b

図 8.4.2 一軸圧縮試験時の応力ひずみ関係

一軸圧縮強さ  $q_u$  および静弾性係数  $E_c$  の概要について、図 8.4.3 に示す。一軸圧縮強さ  $q_u$  は最大圧縮応力であり、静弾性係数  $E_c$  は同図及び式 (8.4.1) に示すように、最大圧縮応力の 1/3 の点と軸ひずみ 0.005% の点を結んだ直線の傾きである。また、破壊ひずみ  $\epsilon_f$  は、一軸圧縮強さが計測された時の軸ひずみの値である。

一軸圧縮試験は、比較的簡便な試験で実施頻度が高いため、蓄積されたデータも多く、一軸圧縮強度から材料の相対的な強さを知ることができる。静弾性係数は、ある応力に対して、その材料がどの程度変形するかを示すものであり、その値が小さいと材料は変形しやすいと言える。

一軸圧縮試験結果を表 8.4.1 に示す。一軸圧縮強さ及び破壊形状写真を見ると、強度の低い A1-1a 及び A1-2a については、供試体が縦割れに破壊しており、局部的な引張力が作用したため割裂破壊の様相を呈していると推察される。また、供試体の大きさが標準的な大きさ（直径 100mm，高さ 200mm）よりも小さく、相対的に供試体に占める粗骨材の大きさが大きくなるため、粗骨材とコンクリートモルタルの境界面で破壊しているということも考えられる（例えば、「表 8.4.1 A1-2a 破壊形状写真」参照）。したがって、縦割れによる破壊、粗骨材とコンクリートモルタルの境界面での破壊等を呈している A1-1a 及び A1-2a については、その結果を無視し、平均値からは除外した。

一軸圧縮強さの平均値は、 $59.9 \text{ N/mm}^2$  となり、当該災害のセグメントのコンクリートの設計基準強度は  $45 \text{ N/mm}^2$  であるため、設計基準強度を満たす。

静弾性係数  $E_c$  の平均値は  $42.5 \text{ kN/mm}^2$  となり、超音波速度試験から算出された動弾性係数  $E_d = 37.7 \text{ kN/mm}^2$  と近い値を示している。

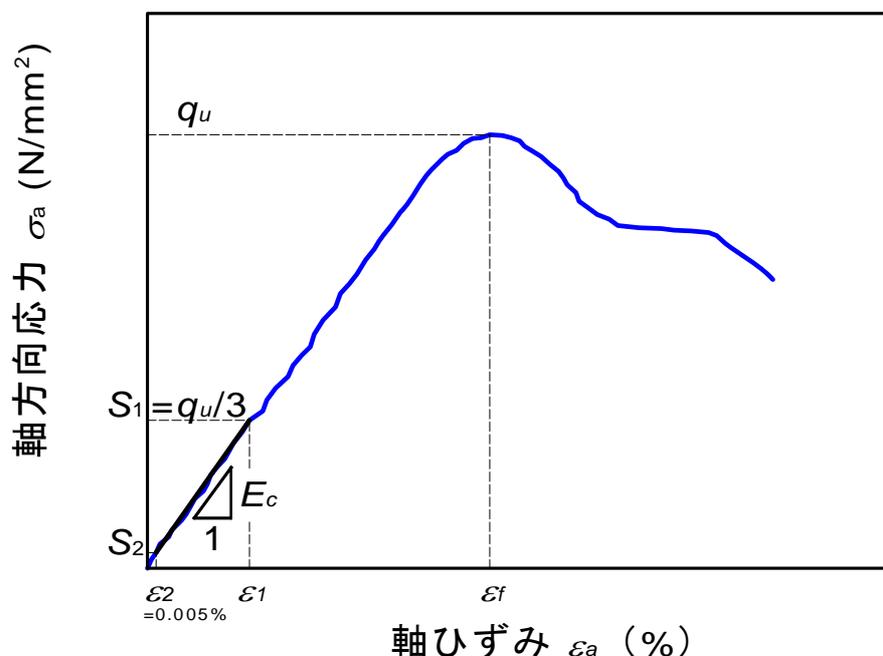


図 8.4.3 静弾性係数  $E_c$  および一軸圧縮強さ  $q_u$  の求め方

表 8.4.1 一軸圧縮試験結果

試料 番号 物性 値	A1-1		A1-2		A1-3		平均 値
	a ※	b	a ※	b	a	b	
一軸 圧縮 強さ $q_u$ N/mm <sup>2</sup>	42.5	50.7	42.1	75.8	52.0	61.1	59. 9
破壊 ひずみ $\epsilon_f$ (%)	0.11	0.17	0.08	0.30	0.20	0.19	0.2 2
静 弾性 係数 $E_c$ kN/mm <sup>2</sup>	47.8	34.3	42.2	36.5	63.9	35.2	42. 5
破壊 形状 写真							

※ A1-1a 及び A1-2a については、一軸圧縮強さ及び破壊形状写真を見ると、供試体が縦割れに破壊しており、割裂破壊の様相を呈していると推察され、円柱供試体（直径 30mm、高さ 60mm）を採取する際に、クラックが発生した可能性があるため、平均値を算出する際には除外した。

### 8. 4. 2 超音波速度試験

超音波速度は、材料の硬さを示す指標として利用される<sup>9)</sup>。例えば、山岳トンネルでは地山等級を決定するために、P波速度、S波速度といった弾性波速度を用いている<sup>10)</sup>。また、超音波速度、超音波速度から得られる動弾性係数等は数値解析に有用である。

JIS A 1127:2010「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」<sup>11)</sup>によると、共鳴振動によっても動弾性係数等を算出することができるが、超音波速度を数値解析に使用するという目的上、地盤工学会基準であるJGS1220-2009「パルス透過法による岩石の超音波速度測定法」<sup>9)</sup>に従い、試験を実施した。

図8.4.4に超音波速度測定装置の構成例を、写真8.4.3に実験状況をそれぞれ示す。超音波測定装置は、基本的にパルス発生装置、発受振子、測定装置から構成されており、本実験でもこれに準じた。ここから得られる超音波速度  $V_P$  及び  $V_S$  から、動ポアソン比  $\nu_d$ 、動せん断弾性係数  $G_d$  及び動弾性係数  $E_d$  を以下の式にて求めることが出来る。

$$\nu_d = \frac{(V_P / V_S)^2 - 2}{2\{(V_P / V_S)^2 - 1\}} \quad (8.4.2)$$

$$G_d = \rho_t \cdot V_s^2 \quad (8.4.3)$$

$$E_d = 2(1 + \nu_d) \cdot G_d \quad (8.4.4)$$

ここで、 $\rho_t$ ：測定状態における供試体の密度

表8.4.2に超音波速度試験結果の一覧を示す。合計6個の供試体の平均値をとると、P波速度で4.76km/sec、S波速度で2.47km/secとなる。また、動ポアソン比、動せん断弾性係数、動弾性係数の平均値はそれぞれ0.315、14.3 kN/mm<sup>2</sup>、37.7 kN/mm<sup>2</sup>となる。

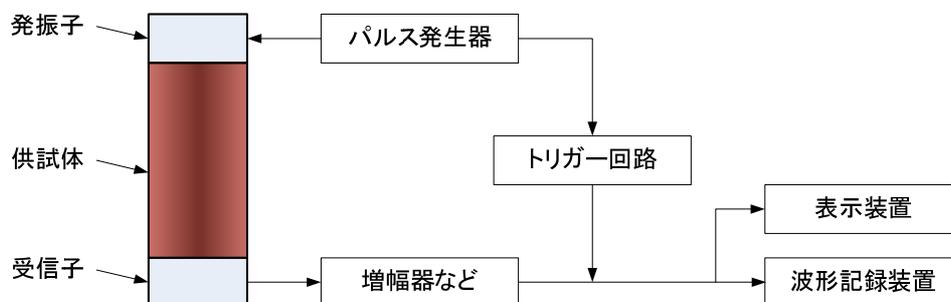


図 8.4.4 超音波速度測定装置の構成例

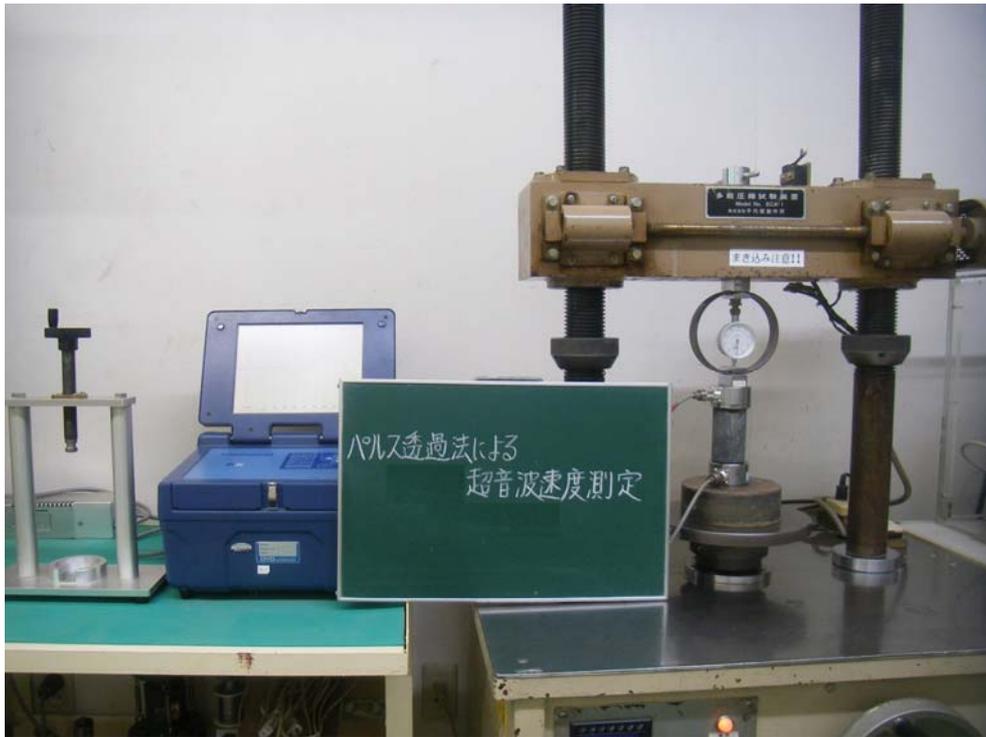


写真 8.4.3 超音波速度測定状況例

表 8.4.2 超音波速度試験結果一覧

試料番号 物性値	A1-1		A1-2		A1-3		平均値
	a ※	b	a ※	b	a	b	
P波速度 $V_p$ (km/sec)	4.55	4.68	4.89	4.72	4.75	4.88	4.76
S波速度 $V_s$ (km/sec)	2.47	2.42	2.65	2.42	2.58	2.46	2.47
動ポアソン比 $\nu_d$	0.291	0.318	0.292	0.322	0.291	0.330	0.315
動せん断弾性係数 $G_d$ (kN/mm <sup>2</sup> )	14.4	13.9	16.5	13.7	15.6	14.1	14.3
動弾性係数 $E_d$ (kN/mm <sup>2</sup> )	37.3	36.7	42.5	36.3	40.3	37.6	37.7

※ A1-1a 及び A1-2a については、一軸圧縮強さ及び破壊形状写真（表-3. 1. 1）を見ると、供試体が縦割れに破壊しており、割裂破壊の様相を呈していると推察され、円柱供試体（直径 30mm，高さ 60mm）を採取する際に、クラックが発生した可能性があるため、平均値を算出する際には除外した。

## 8. 5 セグメント継手に関する摩擦係数確認試験

### 8. 5. 1 摩擦係数確認試験の概要

セグメント継手面の摩擦係数が K セグメントの抜け出し力に影響すると考えられるため、セグメント継手に関する摩擦係数確認試験を実施した。同試験は（独）土木研究所と（独）労働安全衛生総合研究所との合同で実施した。また、同試験は（独）土木研究所の構造力学実験施設内にある二次載荷試験装置（図 8.5.1、図 8.5.2 参照）を使用し、K セグメントと B1 セグメントのセグメント継手面の一部を切り出した部分供試体を用いた摩擦係数確認試験である。

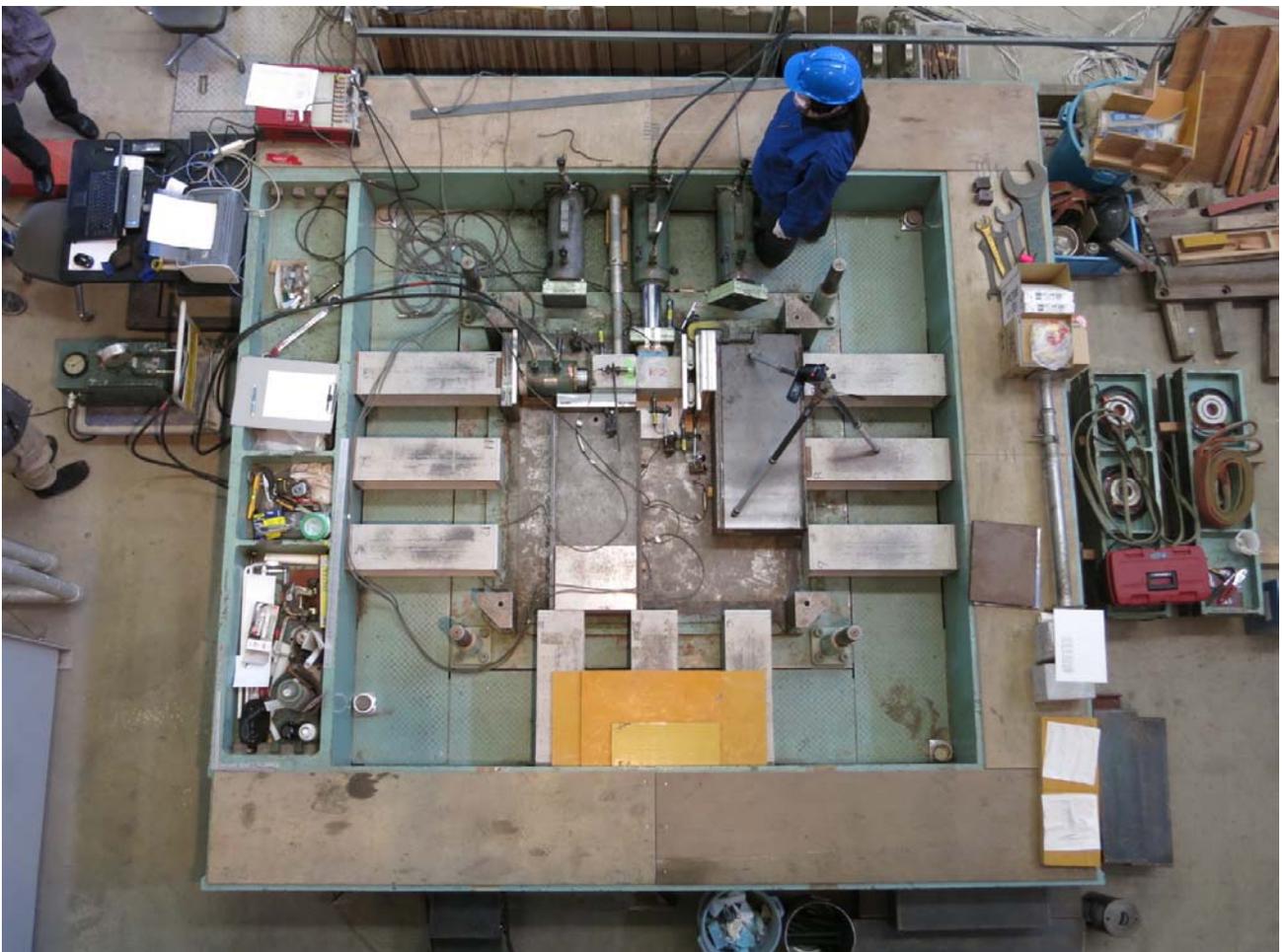


図 8.5.1 二次載荷試験装置（（独）土木研究所 構造力学実験施設内）

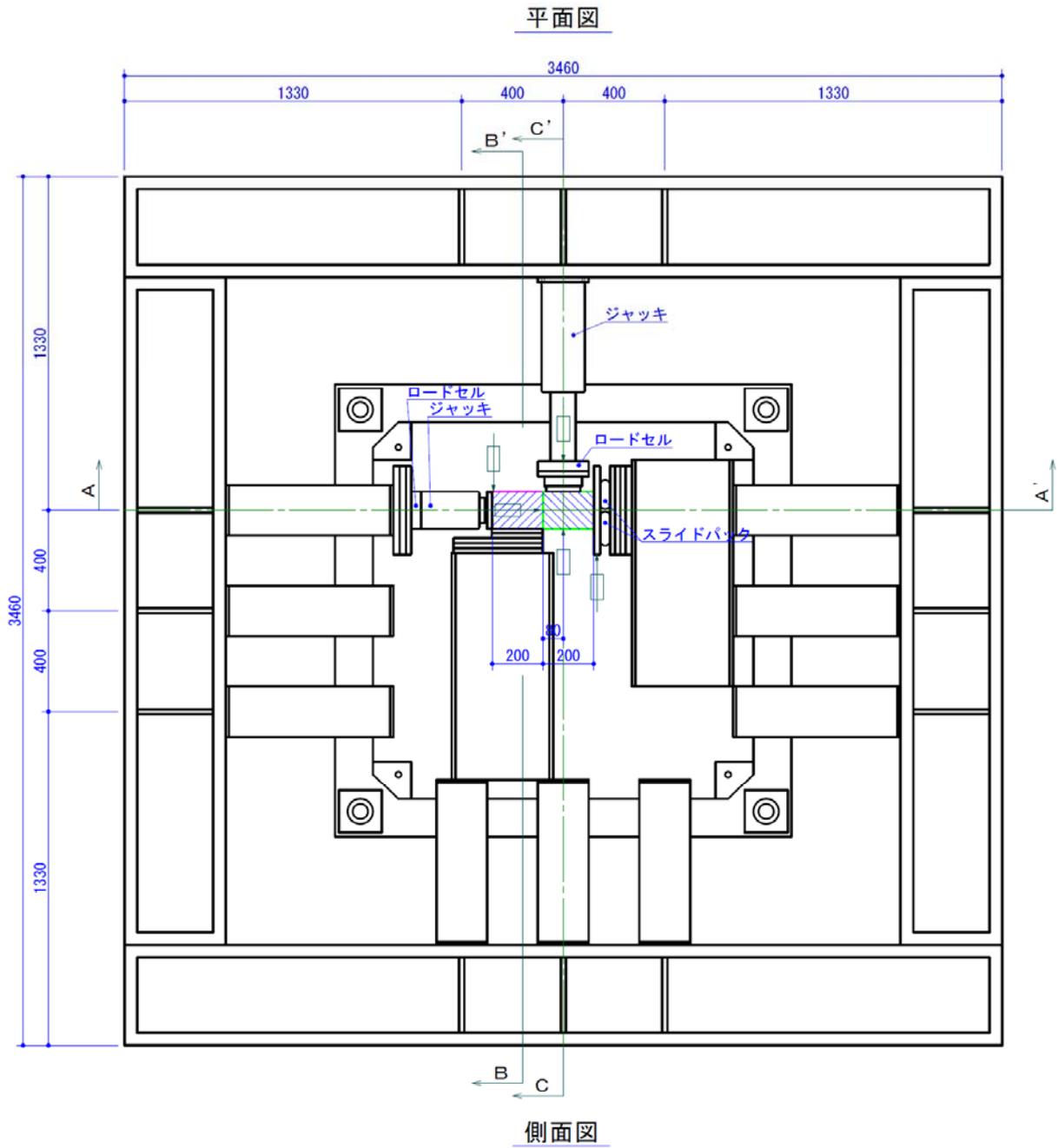


図 8.5.2 セグメント継手に関する摩擦係数確認試験概略図

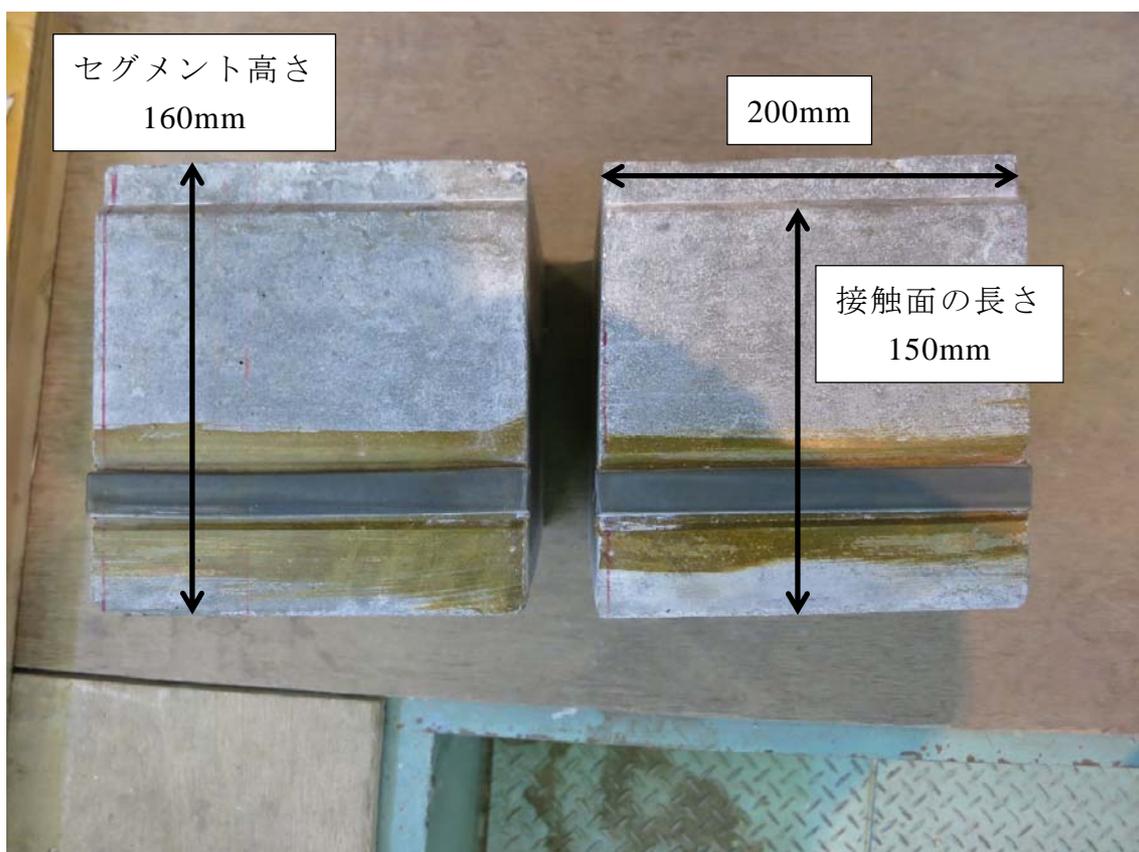


図 8.5.3 Kセグメントと B1セグメントのセグメント継手面の一部を切り出した部分供試体（接触面の長さ 150mm×200mm）

当該工事に用いられる予定であった新品のセグメント（Kセグメントと B1セグメント）を使用し、各セグメントのセグメント継手面周辺の一部をカットして摩擦試験が実施可能な大きさの供試体を作成した（図 8.5.3 参照）。供試体は 4 組作成した。部分供試体寸法は、150mm（接触面の長さ）×200mm とした。

部分供試体を二次载荷試験装置に設置し、油圧ジャッキを用いて予め定めた軸力状態になるまで载荷し、その状態を保持したまま軸力と直行する方向から载荷を行った。試験中、軸力、軸力と直行する方向の荷重（ここでは「摩擦力」という。）、変位を計測した。载荷は変位制御で実施した。

Kセグメントと Bセグメントのセグメント継手面の状態について表 8.5.1 に示す 4 つの状態を想定し、各状態に対して 4 つの軸力について摩擦係数確認試験を実施した。試験 No.①ではシール材が有る場合でセグメントの浸水無しという条件である。試験 No.②ではシール材が有る場合でセグメントの浸水有りという条件である（図 8.5.4 参照）。試験 No.③では②の条件に加えて、シール材のみに滑材を塗布している（図 8.5.5 参照）。試験 No.4 では②の条件に加えて、接触面全面に滑材を塗布している。

表 8.5.1 試験ケース一覧

試験 No.	条件	軸力 (kN)	供試体
①	シール材がある場合 (浸水無し)	30	No.1
②	シール材がある場合 (浸水有り)	60	No.2
③	②+シール材のみに滑材を塗布した場合 (浸水有り)	90	No.3
④	②+接触面前面に滑材を塗布した場合 (浸水有り)	120	No.4

※軸力は、第4章の表4.2.4を参考に正負の曲げモーメントと軸力を受ける場合の最大軸力値を参考に、現場条件下に近い軸力状態を最大値として4段階を設定。

※(浸水有り)は、事故時の現場状況からKセグメントがシールドテールから地山側へ出てから約1時間後に事故が発生したことを考慮し、試験前に約1時間浸水。

※シール材は、セグメントに貼付されているものをそのまま使用。

※滑材は、当該工事において使用された材料を使用。

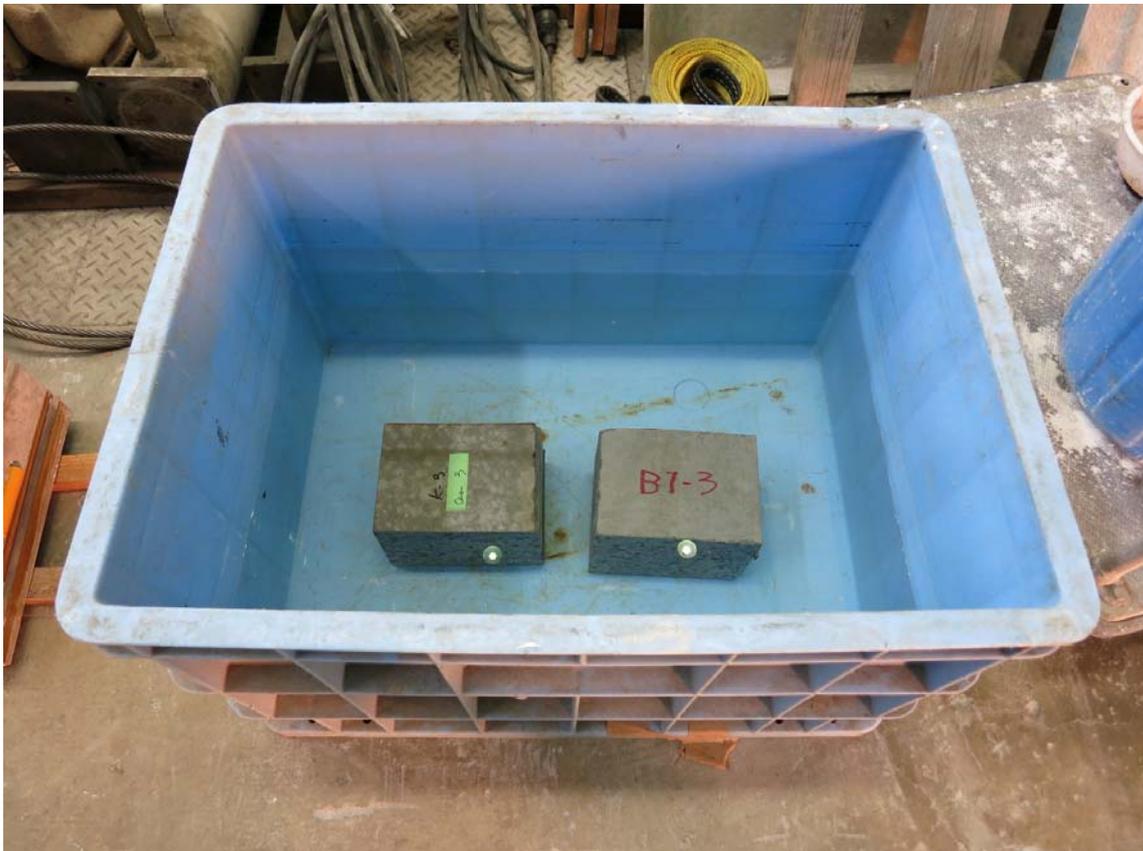


図 8.5.4 部分供試体を水浸させている状態 (試験 No.②, ③, ④)



図 8.5.5 シール材のみに滑材を塗布している様子（試験 No.③）

### 8. 5. 2 試験結果

試験で得られた摩擦力を軸力で除すことにより摩擦係数を算出した。また、固定側と移動側の部分供試体の変位差（摩擦力と平行な方向）を相対変位とし、摩擦係数と相対変位との関係を図 8.5.6～図 8.5.9 に示した。さらに、試験結果の一覧を表 8.5.2, 図 8.5.10, 図 8.5.11 に示す。

これより、滑材を塗布しない条件でも試験 No.①シール材がある場合（浸水無し）0.17～0.19, ②シール材がある場合（浸水有り）0.17～0.18 と比較的低い値であった。

滑材を塗布することで、試験 No.③②+シール材に滑材塗布（浸水有り）0.05～0.09（平均値 0.075）、④②+接触面前面に滑材塗布（浸水有り）0.04～0.05（平均値 0.044）と、さらに摩擦係数が低下することが確認された。なお、供試体を浸水することによる顕著な差は見られなかった。

また、滑材を塗布しない試験 No.①と②で用いた部分供試体に対して、浸水無しの条件で約 5mm～10mm の相対変位まで再試験を実施したところ、摩擦係数は若干増加する傾向にあったが、最大でも摩擦係数は 0.26 であった。

当該工事では、セグメントを水で濡らし、シール材に滑材を塗布した状態で K セグメントを挿入したとの証言が得られていることから、試験 No.③と同様の条件となる。したがって、当該工事におけるセグメント継手面の平均摩擦係数は 0.075 となる。

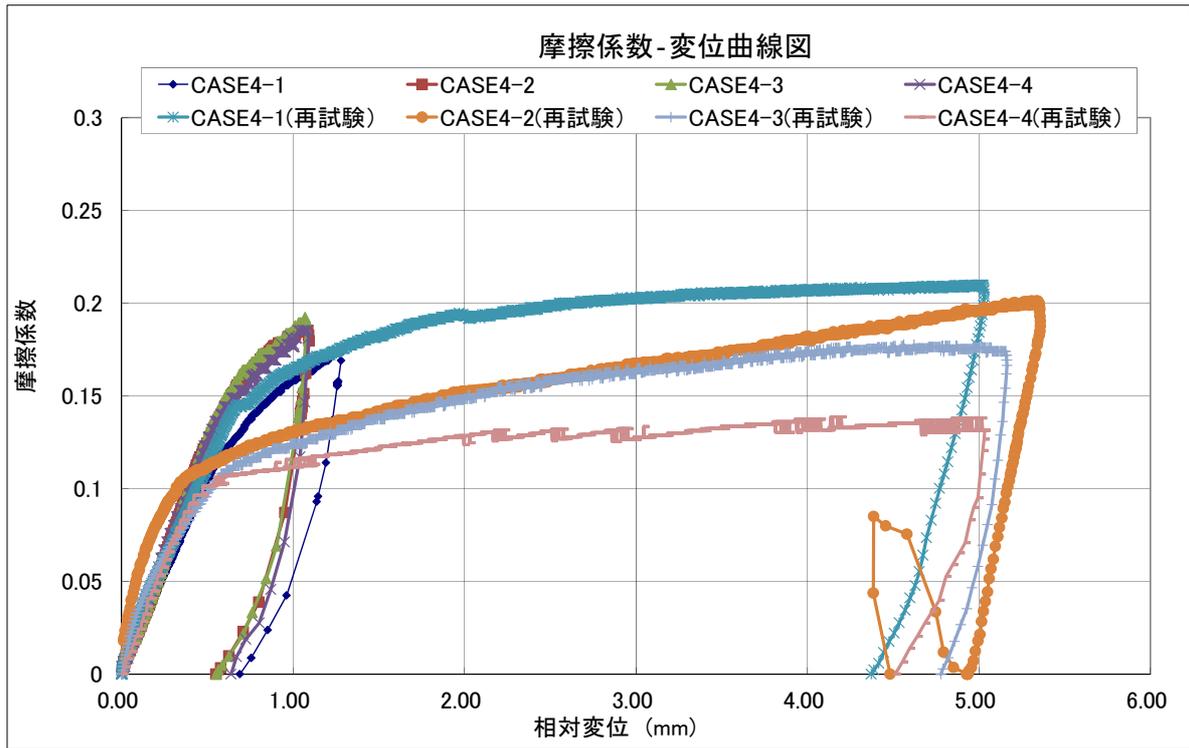


図 8.5.6 摩擦係数と相対変位の関係 (試験 No.①)

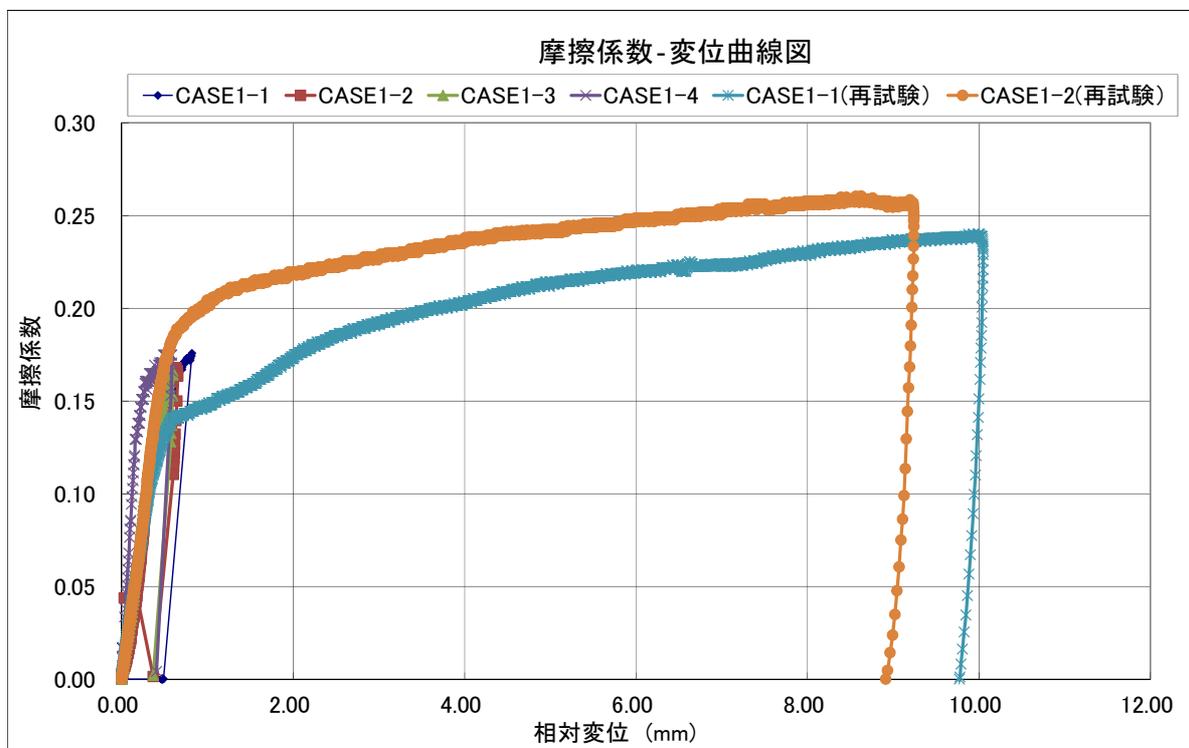


図 8.5.7 摩擦係数と相対変位の関係 (試験 No.②)

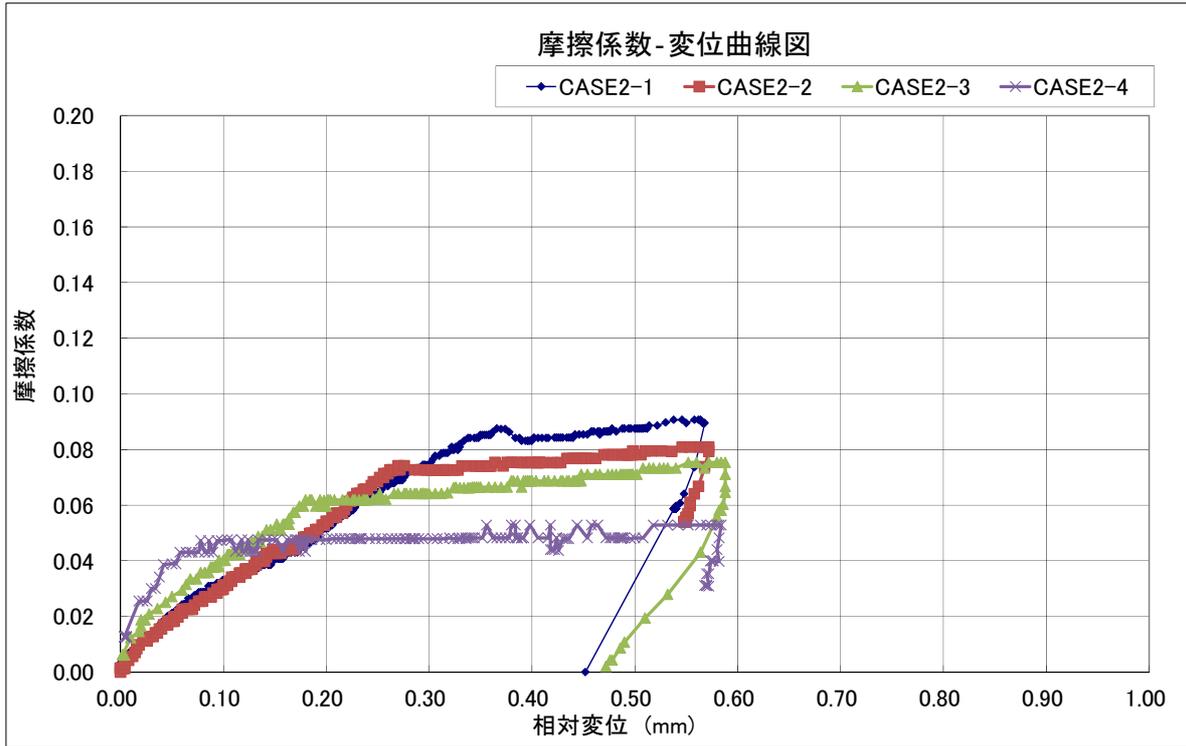


図 8.5.8 摩擦係数と相対変位の関係 (試験 No.③)

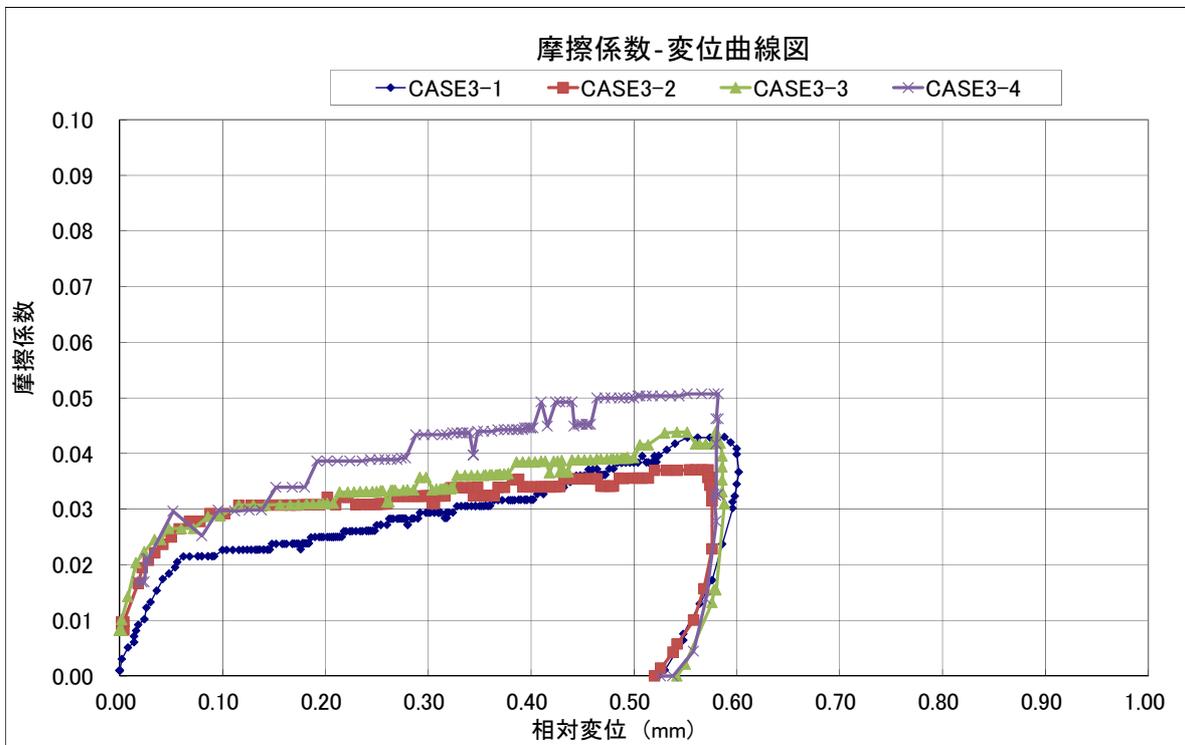


図 8.5.9 摩擦係数と相対変位の関係 (試験 No.④)

表 8.5.2 試験結果一覧表

		軸力 kN	最大摩擦力 kN	相対変位 mm	摩擦係数	摩擦係数 平均値	備考	
①シール材がある場合(浸水無し)	CASE4-1	131.77	22.94	1.28	0.174	0.183		
	CASE4-2	84.39	15.62	1.09	0.185			
	CASE4-3	56.78	10.91	1.07	0.192			
	CASE4-4	28.78	5.33	1.09	0.185			
①再試験	CASE4-5	127.66	26.78	5.02	0.210			(CASE4-1再試験)
	CASE4-6	78.32	15.75	5.34	0.201			(CASE4-2再試験)
	CASE4-7	46.80	8.31	4.62	0.178			(CASE4-3再試験)
	CASE4-8	20.56	2.85	4.20	0.139			(CASE4-4再試験)
②シール材がある場合(浸水あり)	CASE1-1	107.30	18.85	0.82	0.176	0.197		
	CASE1-2	84.98	14.26	0.63	0.168			
	CASE1-3	56.00	9.30	0.59	0.166			
	CASE1-4	28.39	4.96	0.58	0.175			
②再試験(浸水なし)	CASE1-5	108.08	25.92	10.01	0.240			(CASE1-1再試験)
	CASE1-6	78.12	20.34	8.63	0.260			(CASE1-2再試験)
③②+シール材のみに滑材を塗布した場合(浸水あり)	CASE2-1	114.93	10.42	0.56	0.091		0.075	
	CASE2-2	87.52	7.07	0.57	0.081			
	CASE2-3	57.57	4.34	0.59	0.075			
	CASE2-4	28.20	1.49	0.58	0.053			
④②+接触面全面に滑材を塗布した場合(浸水あり)	CASE3-1	115.52	4.96	0.59	0.043	0.044		
	CASE3-2	86.94	3.22	0.57	0.037			
	CASE3-3	56.39	2.48	0.58	0.044			
	CASE3-4	26.82	1.36	0.58	0.051			

軸力と最大摩擦力の関係

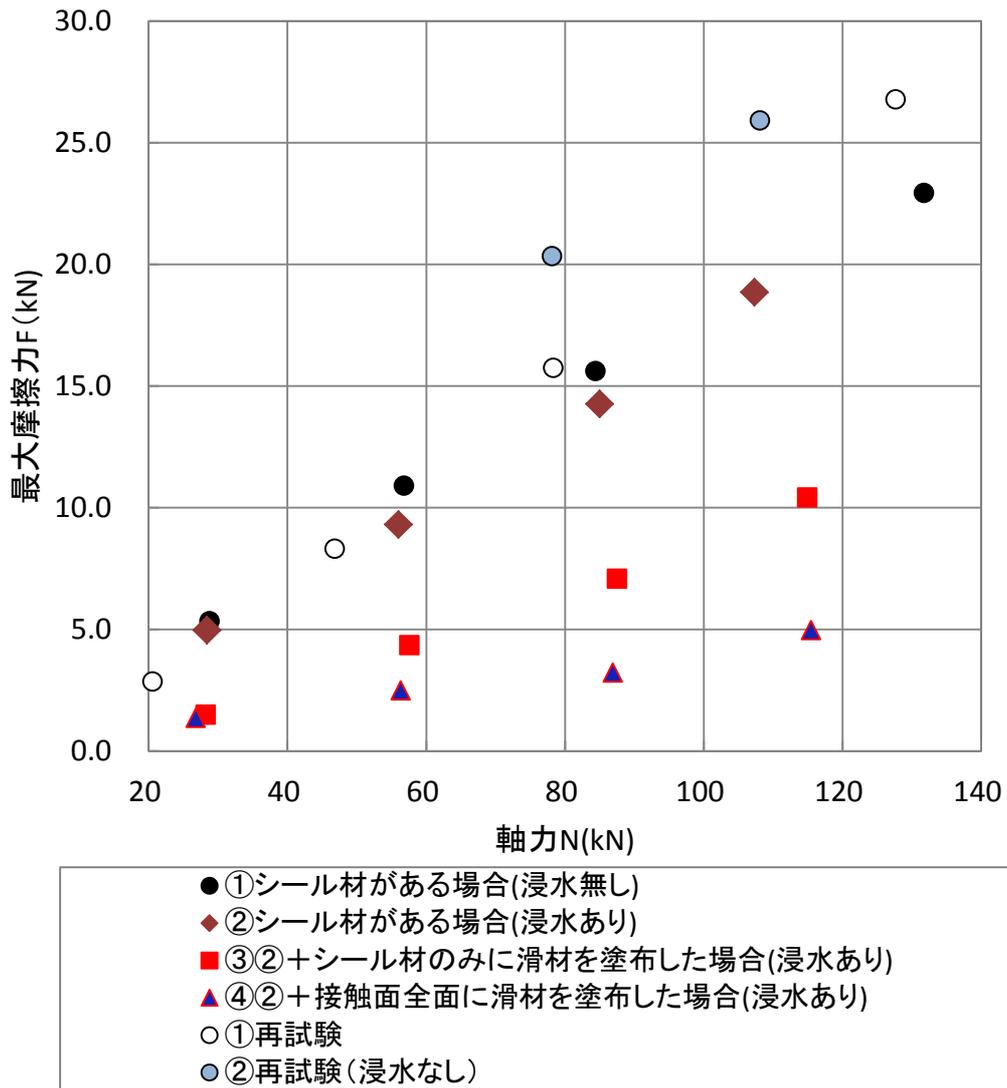


図 8.5.10 最大摩擦力と軸力の関係

### 軸力と摩擦係数の関係

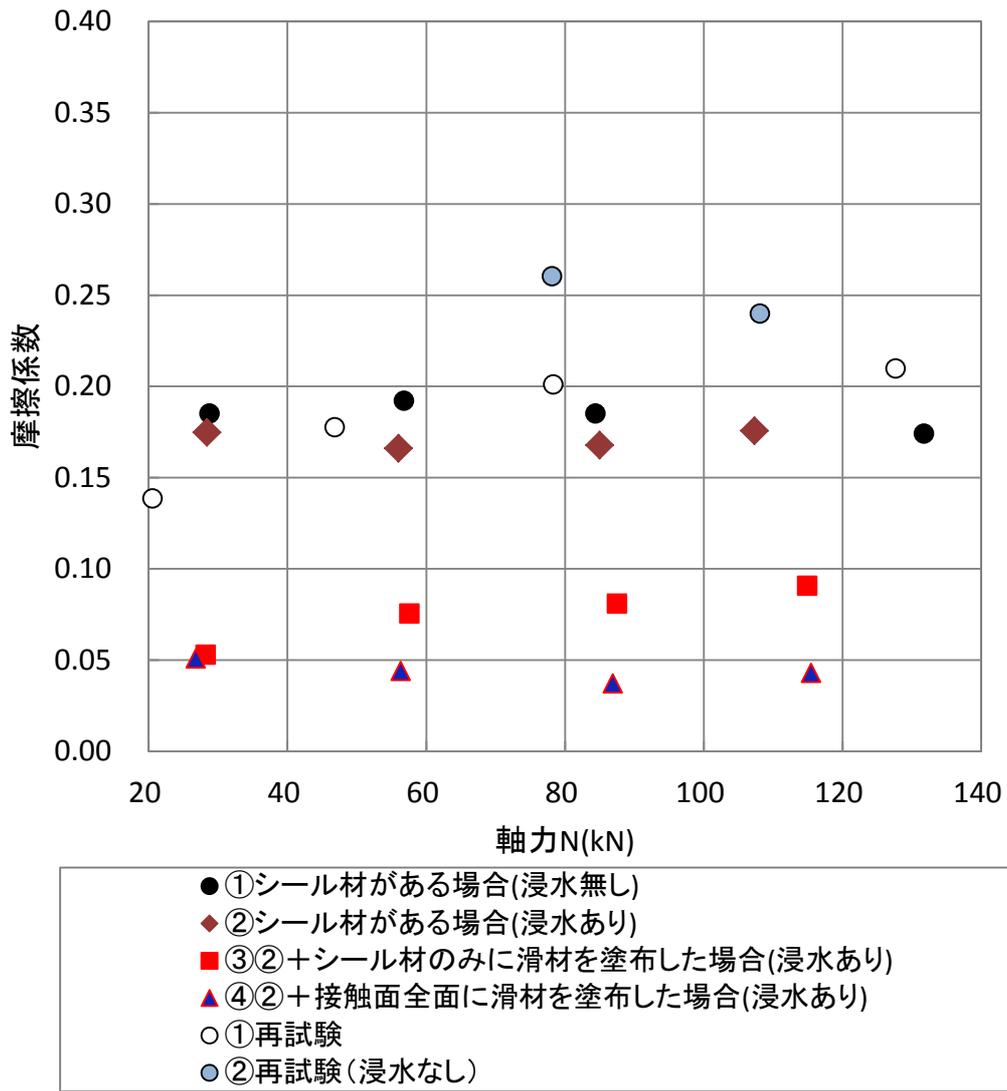


図 8.5.11 摩擦係数と軸力の関係

## 8. 6 Kセグメントの抜け出しに関する検討

前節から Kセグメントと Bセグメントの摩擦係数を計測したところ、摩擦係数が比較的小さな値であったため、Kセグメントの抜け出しが懸念される。そこで本節では、Kセグメントの抜け出しに関する検討を行う。

図 8.6.1 は Kセグメントに加わる軸力を示している。主な軸力として、作用水圧による軸力とテールブラシ圧による軸力が挙げられる。Kセグメントには、水圧とテールブラシにより軸力  $N$  が加わる。

図 8.6.2 に、Kセグメントに着目し、Kセグメントに加わる力とモーメントを示す。なお、Kセグメントはシールドジャッキにより支持されていない場合を考える。したがって、Kセグメントの切羽側の面に作用する力とモーメントはゼロ (0) となる。

同図から、軸力  $N$  により Kセグメントと Bセグメントの間には、すべりを発生させる力 ( $N\sin\beta$ ) とすべりに抵抗しようとする力 ( $\mu N\cos\beta$ ) が働く。ここで、 $\beta$  は Kセグメントの挿入角度 ( $=\tan^{-1}(240/1400)=9.73^\circ$ )、 $\mu$  は Kセグメントと Bセグメントの摩擦係数である。

Kセグメントの左右に働くすべりを発生させる力 ( $N\sin\beta$ ) の合力 ( $2N\sin\beta\cos\beta$ ) は、同図の鉛直方向に Kセグメントを抜け出させる力になる。また、リング間の目開きがゼロ (0) の場合、シール材の反発力 ( $P_s$ ) も Kセグメントを抜け出させる力となる。

一方、Kセグメントの左右に働くすべりに抵抗しようとする力 ( $\mu N\cos\beta$ ) の合力 ( $2\mu N\cos\beta\cos\beta$ ) は、同図の鉛直方向の Kセグメントの抜け出しに抵抗しようとする力となる。また、8.3節で計測したボルトインサートの引抜き抵抗  $R_b$  ( $=105.3$  kN) も Kセグメントの抜け出しに抵抗しようとする力となる。

これらの鉛直方向の力の釣合いを考えると次式が導かれる。

$$2\mu N \cos\beta \cos\beta + R_b - 2N \sin\beta \cos\beta - P_s = 0 \quad (8.6.1)$$

同式を摩擦係数についてまとめると、次式のようになる。

$$\mu = \frac{\sin\beta}{\cos\beta} - \frac{R_b - P_s}{2N \cos\beta \cos\beta} \quad (8.6.2)$$

なお、同図の水平方向の力は、同図からもわかるように左右対称であるから、釣合いが保たれている。また、ボルトインサートの引抜き抵抗の作用点周りのモーメントを考えると、こちらも左右対称であることから、モーメントの釣合いも保たれている。

式 (8.6.2) から Kセグメントが滑り出そうとする時の摩擦係数を求める。軸力  $N$  には、作用水圧とテールブラシ圧に起因するものがある。

まず、作用水圧について、Kセグメントの中央に加わる作用水圧を求める。第 4 章の表 4.2.3 からトンネル頂部水圧 ( $271.25$  kN/m<sup>2</sup>) に、トンネル頂部から Kセグメ

ント中央までの鉛直距離（0.276 m）に海水の単位体積重量（10.3 kN/m<sup>3</sup>）を乗じたものを加えると、274.09 kN/m<sup>2</sup>と求まる。したがって、作用水圧に起因する軸力は以下のようなになる。

$$N_w = P_w \cdot \frac{R_{out}}{(R_{out} - R_{in})} \cdot \Delta \cdot (R_{out} - R_{in}) = 584.60kN \quad (8.6.3)$$

ここで、 $P_w$ : 作用水圧（= 274.09 kN/m<sup>2</sup>）， $R_{out}$ : セグメント外半径（= 2.41 m）， $R_{in}$ : セグメント内半径（= 2.25 m）， $\Delta$ : セグメントのテールエンドからの出代（= 0.885 m）

一方、テールブラシ圧  $P_t$  及びテールブラシ圧に起因する軸力  $N_t$  は、事業者が倉敷労働基準監督署に提出した資料『【補足資料】水島第二パイプライン防護設備 K セグメントの抜け出し検討 2012.10.31』<sup>12)</sup>によると、以下のようなである。ここでテールブラシ圧に起因する軸力  $N_t$  は、シールドマシンとセグメントの競りのない状態を考える。競った場合には  $N_t$  はより大きくなる可能性がある。

$$P_t = \frac{(40.80kg + 50.95kg)}{2} \cdot 9.81m/s^2 \cdot 2段 / 1400 = 0.643kN/m \quad (8.6.4)$$

$$N_t = P_t \cdot \frac{R_{out}}{(R_{out} - R_{in})} \cdot (R_{out} - R_{in}) = 1.549kN \quad (8.6.5)$$

軸力  $N$  は以下のようなになる。

$$N = N_w + N_t = 586.15kN \quad (8.6.6)$$

シール材の反発力は、『【補足資料】水島第二パイプライン防護設備 K セグメントの抜け出し検討 2012.10.31』<sup>12)</sup>によると、目開き 0mm の場合、以下のようなになる。

$$P_s = 27.3N/mm^2 \cdot 924.8mm/1000 = 25.25kN \quad (8.6.7)$$

したがって、式 (8.6.2) に式 (8.6.6)，式 (8.6.7)， $\beta = 9.73^\circ$ ， $R_b = 105.3 kN$  を代入すると、摩擦係数  $\mu$  は以下のとおりである。

$$\mu = 0.101 \quad (8.6.8)$$

摩擦係数が 0.101 以上であれば, K セグメントは抜け出さないが, 摩擦係数が 0.101 より小さくなると K セグメントは抜け出す。したがって, 8.5 節から, セグメントを水で濡らし, シール材に滑材を塗布した状態において, K セグメントと B セグメントの摩擦係数は 0.101 を下回るため, 計算上 K セグメントは抜け出すこととなる。

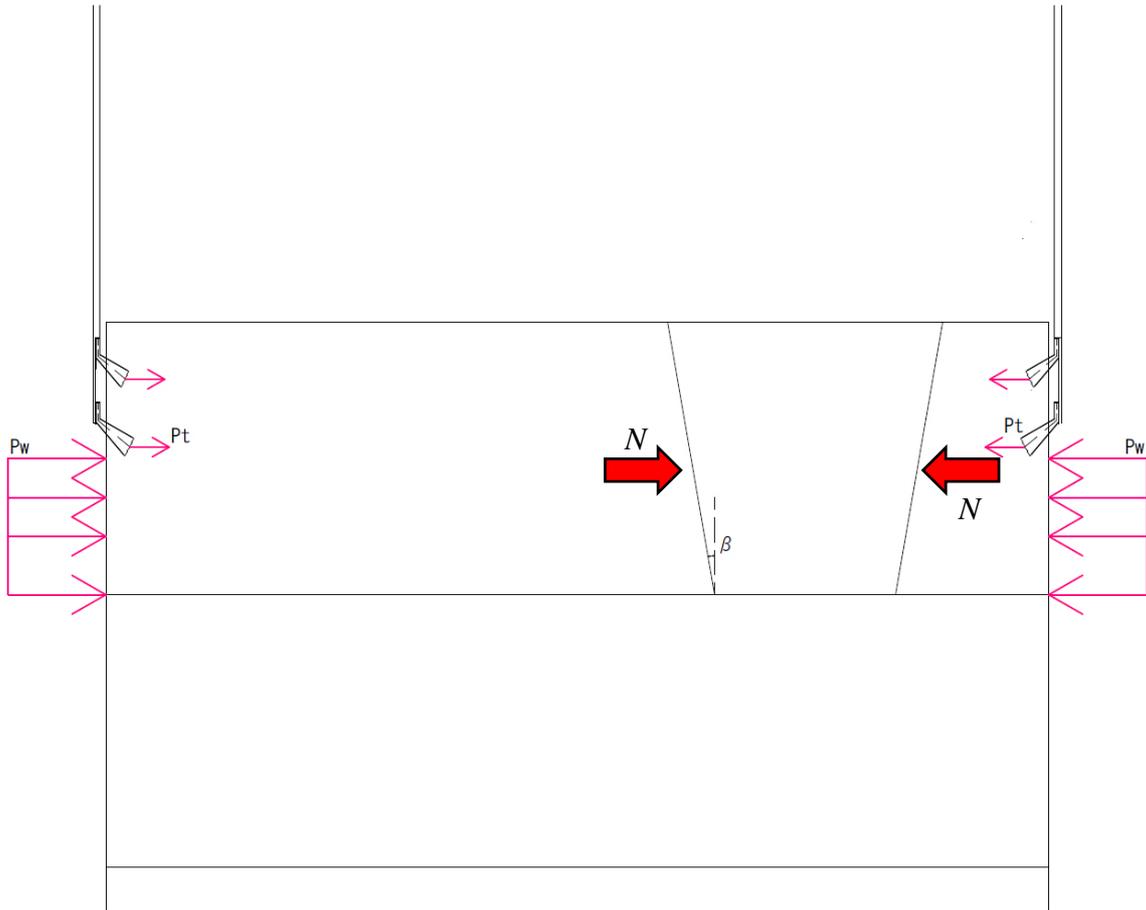


図 8.6.1 K セグメントに加わる軸力 (作用水圧  $P_w$ , テールブラシ圧  $P_t$ , 合力 (軸力)  $N$ )

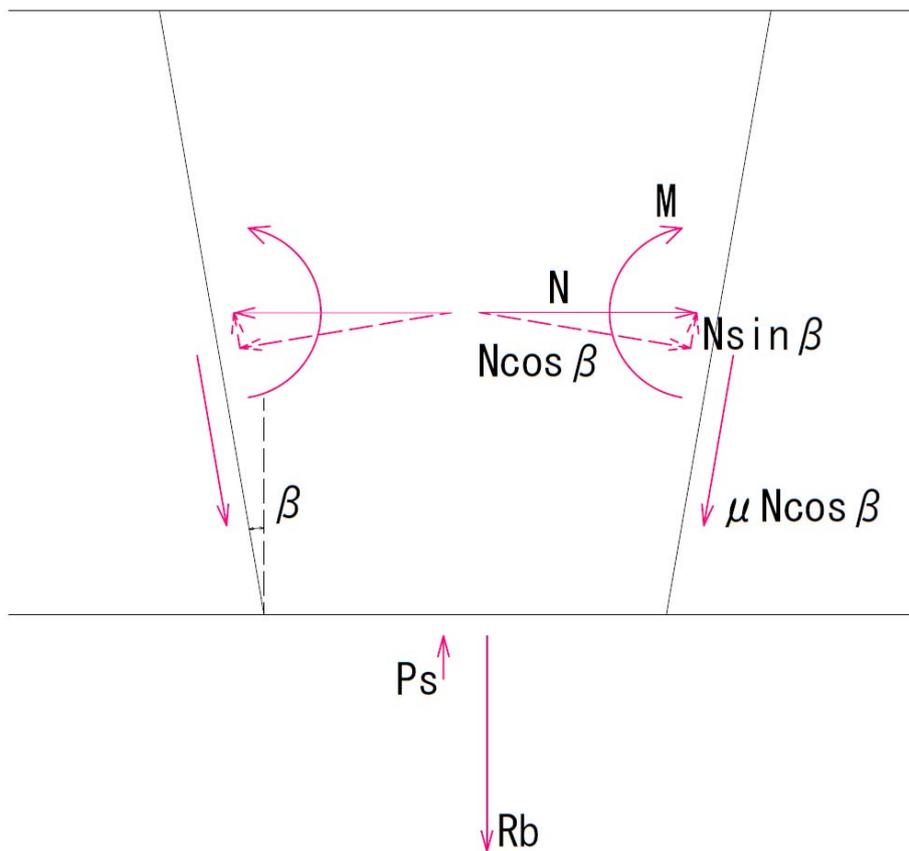


図 8.6.2 K セグメントに加わる力とモーメント

## 8. 6 本章のまとめ

- (1) 回収されたセグメントの破壊状況，ボルト等の破断の状況，シールドマシンと一緒に回収されたセグメントの位置関係等からセグメントの破壊の機序を推定すると次のようである。
- ① 111リングのKセグメントがある程度抜け，このKセグメントを中心として111リングのB2とB1セグメントとが垂れ下がる。（この時点でKセグメントのすき間，垂れた111リングとシールドマシンのすき間から土砂水が吹き出したものと考えられる。）
  - ② セグメント天井付近の111リングと110リング間のボルト（4本）が破断する。（さらに垂れた111リングとシールドマシンのすき間から土砂水が吹き出したと考えられる。）
  - ③ 111リングのB1・A2と110リングとに徐々に相対的なずれが生じ，この2リング間の縁が切れる。
  - ④ 111リングのKセグメントが抜け，B2が折れて上半分が倒れ込むとともにB1が落下。
  - ⑤ 同時に110リング（B1，B2，A1，A2セグメント）が破壊し，坑口側に流れる。Kセグメントも同時に落下（切羽側に流れる）。
- (2) セグメント単体曲げ試験を実施した結果，セグメントの鉄筋コンクリート部分について，設計値以上の曲げ耐力を有していた。
- (3) リング継手について，ボルトインサートに被りの薄い方向から力が加わると，28.1kNでボルトインサートと周囲のコンクリートが剥離した。第4章で示したように，セグメント構造計算では，最大リング間せん断力は11.3kNであることから，十分な耐力を有している。しかしながら，同構造計算では，ボルトのせん断力（34.1kN）と比較しており，ボルトインサートに被りの薄い方向に力が加わると，ボルトのせん断力（34.1kN）よりも小さな荷重でボルトインサートと周囲のコンクリートが剥離する（28.1kN）。これは想定していた箇所（ボルト）と異なる箇所（コンクリート）が期待していた耐力以下で破壊することを意味する。
- (4) セグメントから抜き出したコンクリート供試体に対して，一軸圧縮試験を実施したところ，コンクリートの設計基準強度以上の一軸圧縮強度を有していた。また，同供試体に対して超音波速度試験を実施したところ，P波及びS波速度の平均値はそれぞれ4.76km/sec，2.47km/secと計測された。一軸圧縮強度，P波及びS波速度の値は，第10章で示す個別要素法解析において，セグメントを表現するパラメータに用いる。

(5) Kセグメントの抜け出しについて検討したところ、セグメント継手面の摩擦係数が 0.101 より小さい場合、設計時の水圧と通常のパールシール圧により計算上では Kセグメントが抜け出すことを確認した。

当該工事では、セグメントを水で濡らし、シール材に滑材を塗布した状態で Kセグメントを挿入したとの証言が得られていることから、セグメント継手面の平均摩擦係数は 0.101 を下回る結果となった。したがって、設計時の水圧と通常のパールシール圧でも計算上 Kセグメントは抜け出すという結果となる。

## 参考文献

- 1) 日本材料学会フラクトグラフィ部門委員会編：フラクトグラフィ 破面と破壊情報解析，丸善出版，2000.
- 2) 社団法人土木学会，社団法人日本下水道協会共著：シールド工用標準セグメント—下水道シールド工用セグメント— JSWAS A-3, 4-2001，社団法人日本下水道協会，p.299，2001.
- 3) ASTM E488 / E488M - 10 Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete Elements.
- 4) 社団法人日本建築あと施工アンカー協会：「あと施工アンカー標準試験法・同解説」.
- 5) 日本規格協会：JIS ハンドブック⑨建築Ⅱ（試験），JIS A 1107:2002「コンクリートからのコア及びはりの切取り方法並びに強度試験方法」，pp. 232-236, 2011.
- 6) 日本規格協会：JIS ハンドブック⑨建築Ⅱ（試験），JIS A 1108:2006「コンクリートの圧縮強度試験方法」，pp. 237-245, 2011.
- 7) 日本規格協会：JIS ハンドブック⑨建築Ⅱ（試験），JIS A 1132:2006「コンクリート強度試験用供試体の作り方」，pp. 339-351, 2011.
- 8) 日本規格協会：JIS ハンドブック⑨建築Ⅱ（試験），JIS A 1149:2010「コンクリートの静弾性係数試験方法」，pp. 389-392, 2011.
- 9) 社団法人地盤工学会 地盤調査法改訂編集委員会：パルス透過法による岩石の超音波速度測定方法，地盤材料試験の方法と解説—二分冊の 1—，社団法人地盤工学会，pp. 259-270，2009.
- 10) 土木学会 トンネル工学委員会：2006 年制定トンネル標準示方書 [山岳工法]・同解説，社団法人土木学会，pp.38-44，2006.
- 11) 日本規格協会：JIS ハンドブック⑨建築Ⅱ（試験），JIS A 1127:2010「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数，動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」，pp. 306-310, 2011.
- 12) 事業者：【補足資料】水島第二パイプライン防護設備 Kセグメントの抜け出し検討 2012.10.31，2012.