

Zastosowanie kotew pomiarowych do oceny pracy obudowy wyrobisk korytarzowych

Application of instrumented bolts for the evaluation of roadway support work



Prof. dr hab. inż. Tadeusz Majcherczyk^{)}*



Dr inż. Zbigniew Niedbalski^{)}*



Mgr inż. Łukasz Bednarek^{)}*

Treść: W artykule przedstawiono problematykę monitorowania pracy kotew w wyrobisku korytarzowym zabezpieczonym obudową podporowo-kotwową. Wyniki własnych badań kopalnianych porównano z zamieszczonymi w literaturze wybranymi wynikami badań samodzielnej obudowy kotwowej. Analiza wskazuje, że siły osiowe w kotwach przy zastosowaniu ich wraz z obudową podporową, przyjmują wartości ściskające i rozciągające. W samodzielnej obudowie kotwowej siły przyjmują zwykle wartości rozciągające.

Abstract: This paper presents the problem of monitoring bolts working in stand-and-roof-bolting support excavations in a coal mine. The results of own in situ study have been compared with the literature reported selected results of the bolting support. The analysis shows that the axial forces in bolts, by using them with stand support, take on the compressive and tensile strengths. Axial forces in roof bolting take on only tensile strengths.

Słowa kluczowe:

geomechanika, obudowa wyrobisk korytarzowych, pomiar sił w kotwach

Key words:

geomechanics, support of excavations, monitoring of bolts working

1. Wprowadzenie

W polskim górnictwie podziemnym węgla kamiennego oraz górnictwie rud metali, kotwy znajdują szerokie zastosowanie. O ile w przypadku kopalń rud obudowę wyrobisk stanowi najczęściej samodzielna obudowa kotwowa, o tyle w przypadku kopalń węgla, kotwy są dodatkowym wzmocnieniem obudowy podporowej łukowej podatnej. Takie rozwiązanie w górnictwie węgla kamiennego pozwala wykorzystać zalety kotwienia w sytuacji, gdy zastosowanie samodzielnej obudowy kotwowej nie jest możliwe. W ciągu ostatnich kilkunastu lat nastąpiła znacząca zmiana w zakresie techniki kotwienia, bowiem maksymalna długość kotew została wydłużona z początkowych 2,0÷2,5 m do nawet 12 m, przy jednoczesnej zmianie typu kotew z prętowych na kotwy strunowe, iniekcyjne i wkręcane. Postępujące zmiany w tym

zakresie oparte są bardziej na praktycznej ocenie przydatności różnych rozwiązań, niż na rozpoznaniu zjawiska na podstawie badań laboratoryjnych czy kopalnianych. O ile takie podejście umożliwi poprawną ocenę w zakresie parametrów kotew i schematu rozmieszczenia, o tyle wydaje się, że proces optymalizacji jest znacznie bardziej kosztowny i czasochłonny oraz nie daje odpowiedzi, czy zastosowany schemat obudowy jest najbardziej korzystny. Rozwiązaniem dającym szersze rozpoznanie mechanizmu współpracy kotew z górotworem w określonych warunkach geologiczno-górnictwowych, jest zastosowanie odpowiedniego systemu pomiarów [2, 7, 10, 11, 13].

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki monitoringu pracy kotew w wyrobisku kopalni węgla kamiennego, w którym zastosowano obudowę podporowo-kotwową. Wyniki własnych badań porównano z prezentowanymi w literaturze wybranymi wynikami pomiarów obciążeń samodzielnej obudowy kotwowej oraz obudowy kotwowo-podporowej. Analiza ta pozwoliła na porównanie charakterystyki pracy kotew zastosowanych w różnych typach obudowy.

^{*)} AGH w Krakowie

2. Zakres monitoringu pracy kotew

Do pomiaru obciążeń kotew stosowane są od wielu lat różnorodne mierniki, które posiadają odmienną budowę oraz zakres pomiaru. Najbardziej popularne są przyrządy, na podstawie których rejestrowane jest obciążenie na końcowym odcinku kotwy bądź indykatory wskazujące na osiągnięcie przez kotwę obciążenia maksymalnego. Wśród mierników pracy kotew można wyróżnić między innymi:

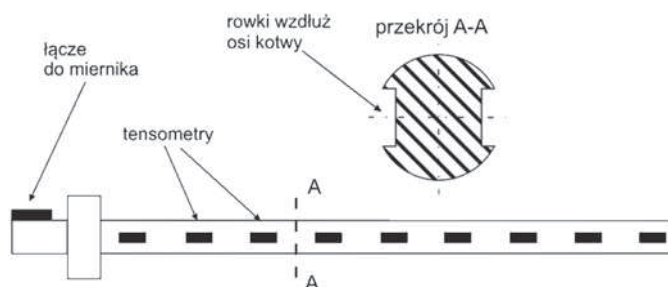
- a) przyrządy wskaźnikowe:
 - krążki dynamometryczne [6];
 - wskaźniki (sprężynowe) monitorowania pracy kotew (US Patent 5,185,595);
 - podkładki odkształcalne;
 - tuleje odkształcalne [5];
 - nakrętki pomiarowe, tuleje ścinane [13];
- b) czujniki do pomiaru siły na końcu kotwy:
 - dynamometry tensometryczne lub hydrauliczne [13];
- c) kotwy pomiarowe
 - tensometryczne kotwy pomiarowe [7];
 - kotwy typu IRAD [11];
 - kotwy typu MMA [4];
 - kotwy pomiarowe z wibrującą struną [10].

Najszerzy zakres informacji na temat pracy kotew można uzyskać przy zastosowaniu kotew pomiarowych, za pomocą których uzyskuje się wartość obciążenia na wybranych długościach kotwy. W analizowanych badaniach stosowane były

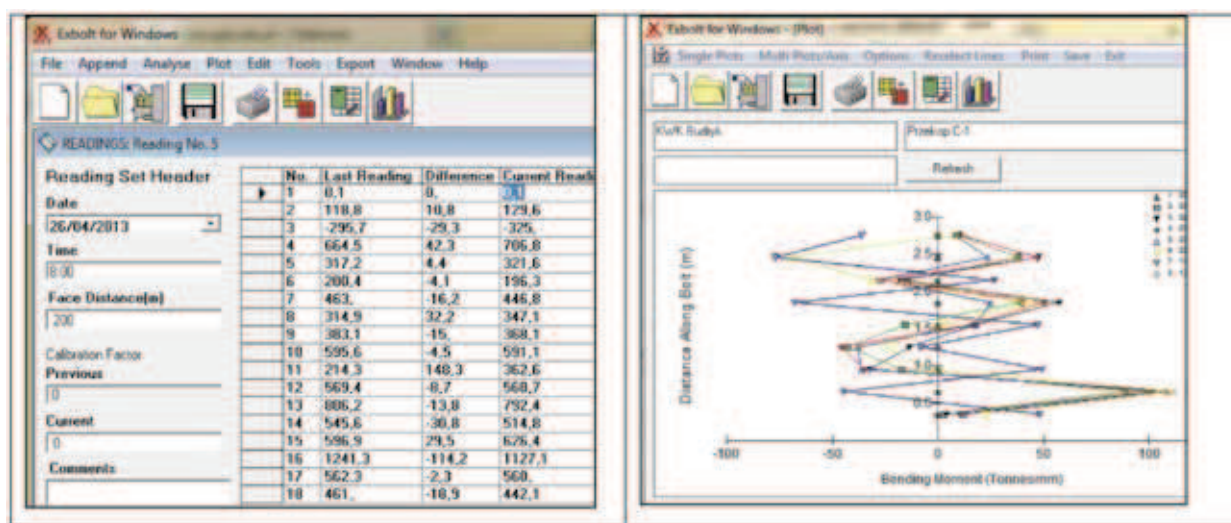
pomiarowe kotwy tensometryczne. Wykonane są one z kotew prętowych Minova Arnall o nośności minimum 270 kN i długości 2,5 m, a ich modyfikacja ma na celu przeprowadzanie pomiarów obciążenia na żądanej długości. Wzdłuż osi kotwy wykonuje się dwa równoległe rowki, w których wkleja się po obu stronach tensometry o wymiarach 8 – 12 mm i długości 3 – 6 mm (rys. 1). Tensometry połączone są ze sobą za pomocą przewodów prowadzonych wzdłuż wyciętego w kotwi rowka. Stosowano kotwy wyposażone zwykle w 9 par tensometrów wklejanych w odległościach 350 mm pomiędzy kolejnymi parami tensometrów. Kotwy za pomocą ładunków żywicznych wklejane są na całej długości do górotworu. Po zainstalowaniu kotwy za pomocą specjalnego miernika notowane są wartości liczbowe z każdego czujnika tensometrycznego.

Zarejestrowane wartości liczbowe przeliczane są przy wykorzystaniu programu komputerowego na wielkości sił osiowych, momentów zginających oraz mikroodkształceń tensometrów (rys. 2).

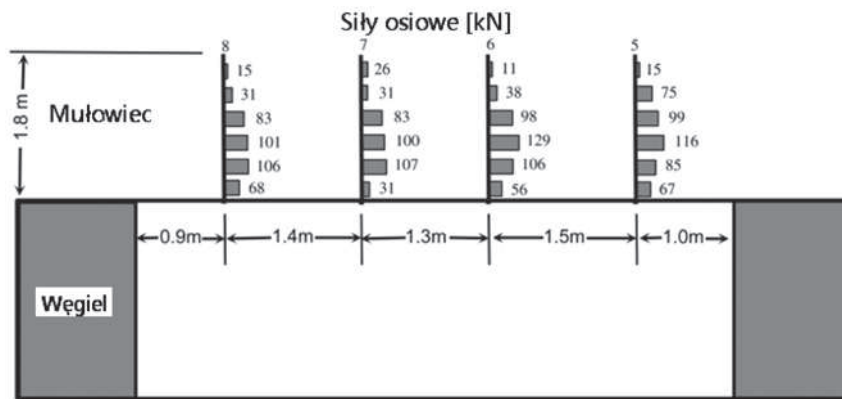
Kotwy pomiarowe stosowano w górnictwie światowym już w latach 80. [10], natomiast w górnictwie polskim wykorzystano je na szerszą skalę na przełomie XX i XXI wieku [16, 4, 3]. Prace zagraniczne [14, 15, 1, 2] dotyczyły pracy kotew zabudowanych w samodzielnej obudowie kotwowej. Autorzy tych publikacji przedstawiali swoje wyniki często w postaci wykresów słupkowych, obrazujących uśrednioną wartość sił osiowych na poszczególnych odcinkach długości kotew (rys. 3).



Rys. 1. Schemat budowy kotwy pomiarowej
Fig. 1. Scheme of instrumented bolt



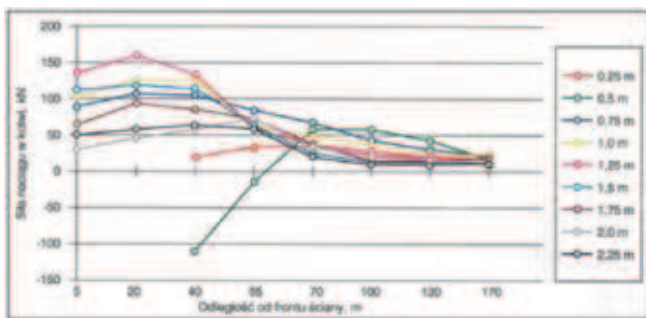
Rys. 2. Okna dialogowe programu Exbolt do określania obciążenia kotew tensometrycznych
Fig. 2. Exbolt program dialogs for determination of the tensometric bolts loading



Rys. 3. Wartości sił osiowych w kotwach (Singer i Lewis, 1998)

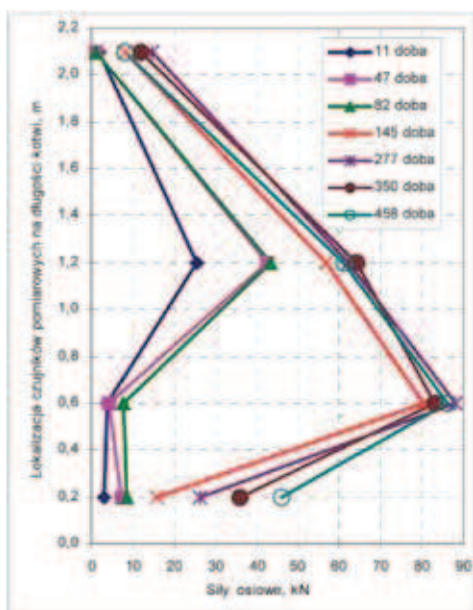
Fig. 3. Values of axial forces in bolts (Singer and Lewis, 1998)

Cechą charakterystyczną pracy kotew w takiej obudowie jest to, że rejestrowane siły na różnych poziomach są rozciągające. Podobne rezultaty wykazywane są w publikacjach polskich przy zastosowaniu samodzielnej obudowy kotwowej (rys. 4) oraz przy zastosowaniu obudowy kotwowo-podporowej przy znacznym rozstawie odrzwi wynoszącym 1,5 m (rys. 5).



Rys. 4. Wartości sił osiowych w kotwi w zależności od odległości od frontu ściany [16]

Fig. 4. Values of axial forces in bolt depending on the distance from the wall front (Stopyra et al., 1999)



Rys. 5. Wartości sił osiowych w kotwi - obudowa kotwowo-podporowa [7]

Fig. 5. Values of axial forces in bolt - stand-and-roof-bolting support (Majcherczyk et al., 2008)

3. Analiza wyników badań obciążenia kotew zastosowanych w obudowie podporowo-kotwowej

3.1. Warunki geologiczno-górniczne w miejscu badań

Przedmiotem analizy były dane otrzymane z pomiarów dwóch kotew pomiarowych, które zostały zainstalowane w kopalni węgla kamiennego w przekopie C-1 na głębokości 1290 m. W czasie instalacji przyrządów badawczych wyrobisko było w trakcie drażenia. Kotew nr 1 wklejono w strzałce wyrobiska na jego 420 mb, natomiast kotew nr 2 została zainstalowana na 700 mb. Przed instalacją dokonany został odczyt wskazań tensometrów, co stanowiło pomiary bazowe dla kolejnych pomiarów.

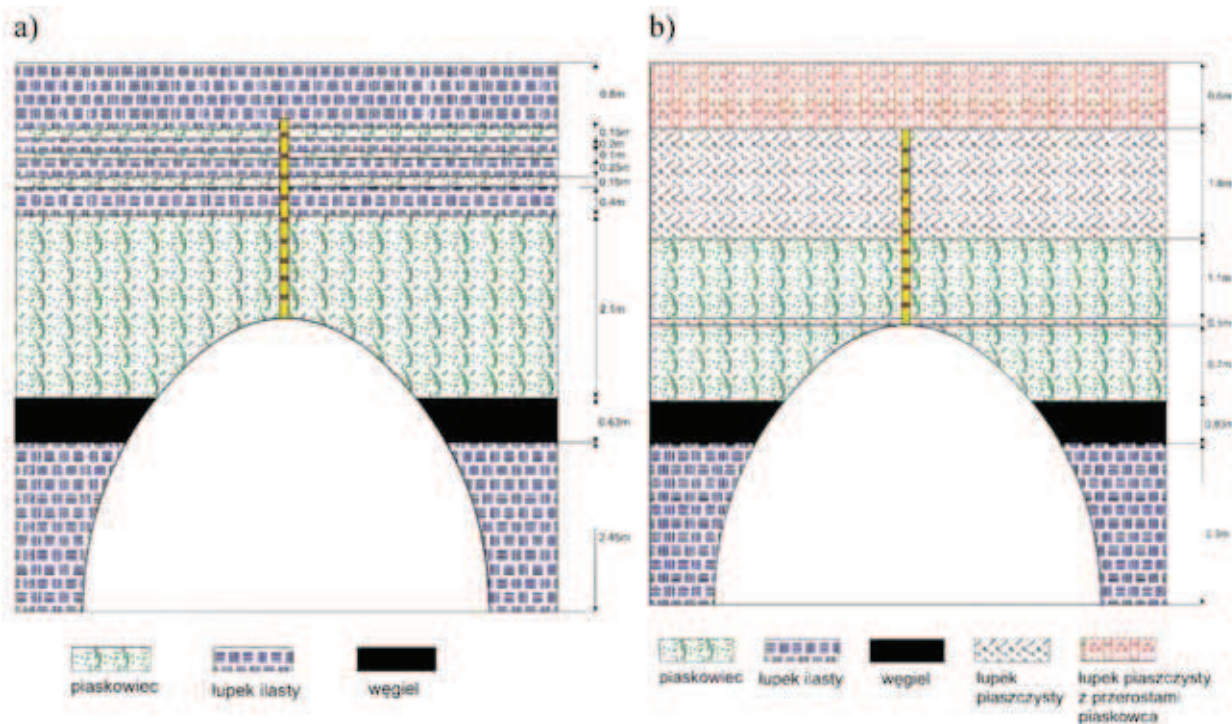
Na 420 mb przekopu C-1, gdzie zamontowano kotew nr 1, stwierdzono w stropie wyrobiska występowanie naprzemianległych warstw piaskowca oraz łupku ilastego (rys. 6a), a w miejscu zainstalowania kotwy nr 2 stwierdzono występowanie mocnej warstwy piaskowca oraz warstwy łupku piaszczystego (rys. 6b). Na podstawie badań laboratoryjnych wykonanych wg PN-G-04303:1997 na próbkach otrzymanych z rdzeni wiertniczych stwierdzono, że wytrzymałość na ściskanie piaskowca wynosiła około 80 MPa, a łupków ilastych i łupków piaszczystych 50÷70 MPa.

3.2. Wyniki badań sił w kotwi nr 1

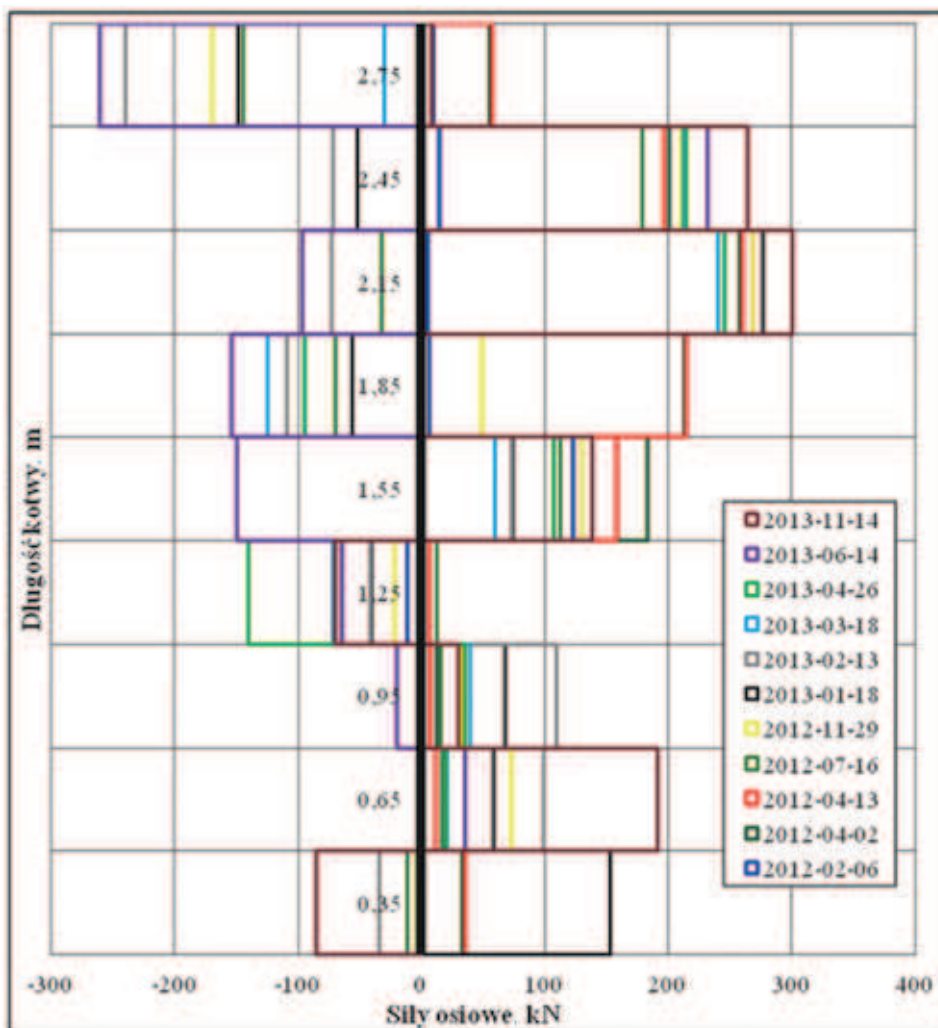
Kotew pomiarowa nr 1 została wklejona w strzałce monitorowanego wyrobiska w dniu 06.02.2012 r. Po zainstalowaniu przeprowadzono pierwszy pomiar, a kolejne odczyty wykonywano średnio raz w miesiącu. Na podstawie danych z każdego pomiaru przy pomocy specjalistycznego programu Exbolt wyliczone zostały wartości sił osiowych jako średnie dla każdej pary tensometrów w danym punkcie kotwy. Wykres sił osiowych wykonano w formie słupkowej (rys. 7), gdzie wartości dodatnie oznaczają rozciąganie, a wartości ujemne ściskanie kotew

Kotew nr 1 w dniu instalacji znajdowała się w odległości 10 m od przodka drażonego wyrobiska. Podczas każdego odczytu danych z kotwy notowana była również odległość postępującego przodka. W ten sposób wykonano również wykres zmian wartości siły osiowej w zależności od odległości przodka drażonego wyrobiska (rys. 7).

Zauważa się, że największą wartość ścisnącej siły osiowej wynoszącą 300 kN zanotowano na długości 2,15 m kotwy (rys. 7). Również wysokie wartości powyżej 200 kN uzyskano na długościach 1,85 i 2,45 m. W końcowym punkcie pomiarowym kotwy zanotowano największą wartość siły ścisnącej, która wynosiła -261 kN. Należy także stwierdzić,



Rys. 6. Litologia stropu w miejscu zainstalowania kotew pomiarowych w przekopie C-1: a) na 420 m, b) na 700 m
 Fig. 6. Lithology of roof in the area of instrumented bolts installation in C-1 excavation: a) at 420 m, b) at 700 m



Rys. 7. Wartości sił osiowych w kotwi nr 1
 Fig. 7. Values of axial forces in bolt no. 1

że w pewnych okresach czasu zmiany sił były niewielkie, tj. w zakresie 20÷40 kN. Charakterystycznym wynikiem pracy kotwy, jest działanie osiowych sił ściskających i rozciągających, które wraz z upływem czasu zmieniają zwroty. Taki wynik można tłumaczyć występowaniem w wyrobisku zamkniętej obudowy ŁPZ o dużej nośności, na której opierają się warstwy stropowe. Siły ściskające mogły także wystąpić w wyniku zalegania w stropie wyrobiska warstw o zróżnicowanych własnościach wytrzymałościowo-odkształceniowych. Taki charakter pracy kotew wyraźnie różni się od pracy kotew w samodzielnej obudowie kotwowej.

Analizując rysunek 8, można stwierdzić, że poza początkowym wzrostem sił, nie zauważa się wyraźnego wpływu zmian odległości przodka drążonego wyrobiska na wartość sił w kotwi pomiarowej. Natomiast często obserwuje się wyraźne zmiany skokowe sił, w tym zmiany zwrotu działania sił ściskających na rozciągające, lub odwrotnie. Świadczy to o ciągłych zmianach stanu naprężeniowo-deformacyjnego wokół wyrobiska.

3.3. Wyniki badań sił w kotwi nr 2

Kotew nr 2 została zainstalowana w przekopie C-1 na 700 mb w dniu 18.01.2013 i była oddalona od przodka drążonego wyrobiska o 10 m. Największe wartości sił ściskających wynoszące 200÷260 kN występowały w górnej jej części na odcinku 1,85÷2,45 m (rys. 9), podobnie jak w przypadku kotwy nr 1. Zarejestrowano także wysokie wartości sił ściskających, bowiem dochodziły one do -240 kN na głębokości 1,25 m. Zauważyć także można, że ostatni pomiar, który wykonany został w listopadzie 2013 roku znacznie odbiega od pozostałych. W kilku punktach pomiarowych siła zmieniła zwrot ze ściskającej w rozciągającą.

Zmiana położenia przodka drążonego wyrobiska nie miała wpływu na wartość sił w kotwi 2, chociaż występuje wyraźny wzrost siły w pierwszym pomiarze kontrolnym (rys. 10). Dla odległości od przodka od 10 do 180 m, wartości sił na niemal wszystkich punktach pomiarowych kotwy nie zmieniały zwrotu działania, a więc utrzymywały się siły ściskające lub rozciągające. Rejestrowane zmiany były w zakresie 80 kN, np.: tensometry na 1,85; 2,15 i 2,45 m kotwy. W pozostałych

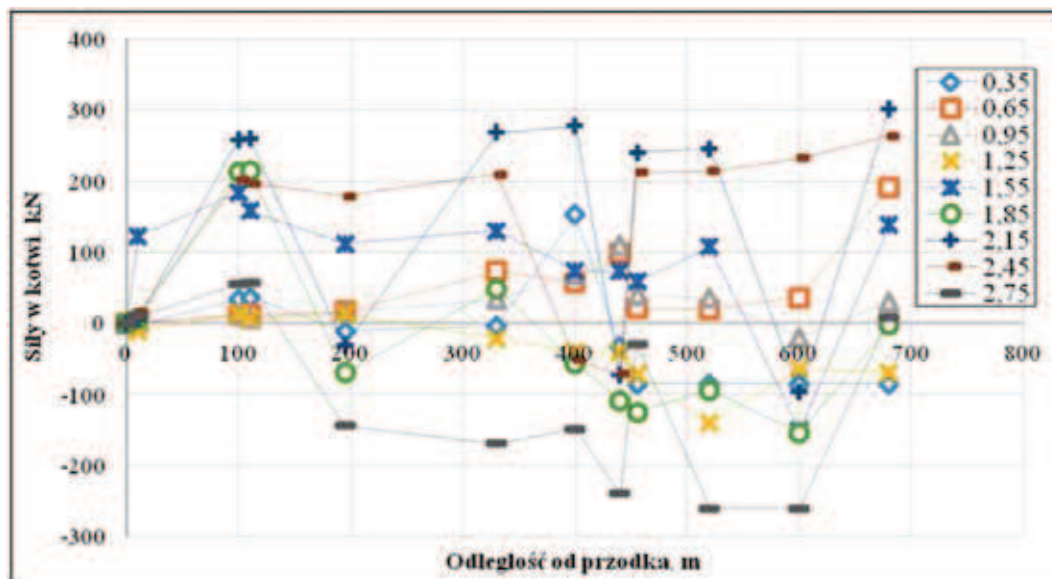
punktach siły były niewielkie i prawie nie zmieniały swojej wartości. Duże zmiany nastąpiły, gdy przodek wyrobiska oddalony był od miejsca zainstalowanej kotwy około 230 m oraz podczas ostatniego odczytu, kiedy czoło przodka znajdowało się w odległości ponad 300 m. Następowala wówczas zmiana zwrotu działania sił ze ściskających na rozciągające, lub z rozciągających na ściskające. W punkcie 1,85 m kotwy zakres zmian wynosił od -180 kN do 200 kN.

4. Wnioski

Zastosowanie kotew pomiarowych jest bardzo dobrym sposobem oceny ich pracy, bowiem umożliwia ocenę obciążeń na poszczególnych długościach kotwy oraz ocenę zmian obciążenia w zależności od lokalizacji kotwy na konturze wyrobiska. Ponadto pomiar taki daje sposobność określenia charakteru pracy kotwy w zależności od schematu zastosowanej obudowy, a więc samodzielnej obudowy kotwowej czy też obudowy podporowo-kotwowej. Zaznacza się więc wyraźna różnica w obciążeniu kotew, bowiem w przypadku samodzielnej obudowy kotwowej występują tylko siły rozciągające, natomiast przy zastosowaniu obudowy podporowo-kotwowej, w kotwach pojawiają się także siły ściskające.

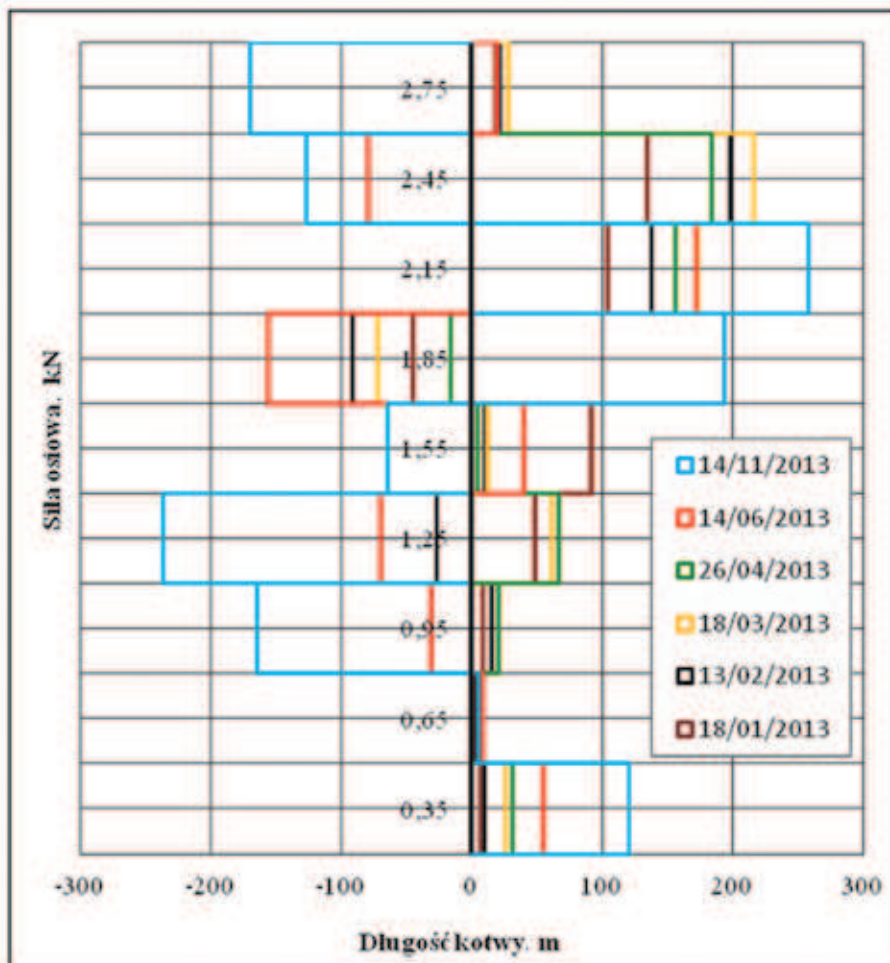
Analiza danych otrzymanych z pomiarów dwóch kotew oprzyrządowanych zainstalowanych w przekopie C-1 pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Największe wartości sił w kotwi oprzyrządowanej obserwuje się 1,5 m powyżej konturu wyrobiska. Maksymalna siła zanotowana na tej wysokości wynosiła około 300 kN i była to siła rozciągająca.
2. Obserwuje się częstsze występowanie w kotwi sił rozciągających aniżeli ściskających. Wynika z tego, że kotew w znacznym stopniu jest rozciągana i występuje wówczas spinanie warstw i występowanie „płyty stropowej” [12]. Oddalający się przodek od miejsca wklejenia kotwy wyposażonej w tensometry, poza początkowym przyrostem sił, nie ma większego wpływu na rejestrowane wartości sił.
3. Dla niektórych poziomów kotwy zauważa się niewielkie zmiany sił w kilku kolejnych pomiarach. Po dłuższym

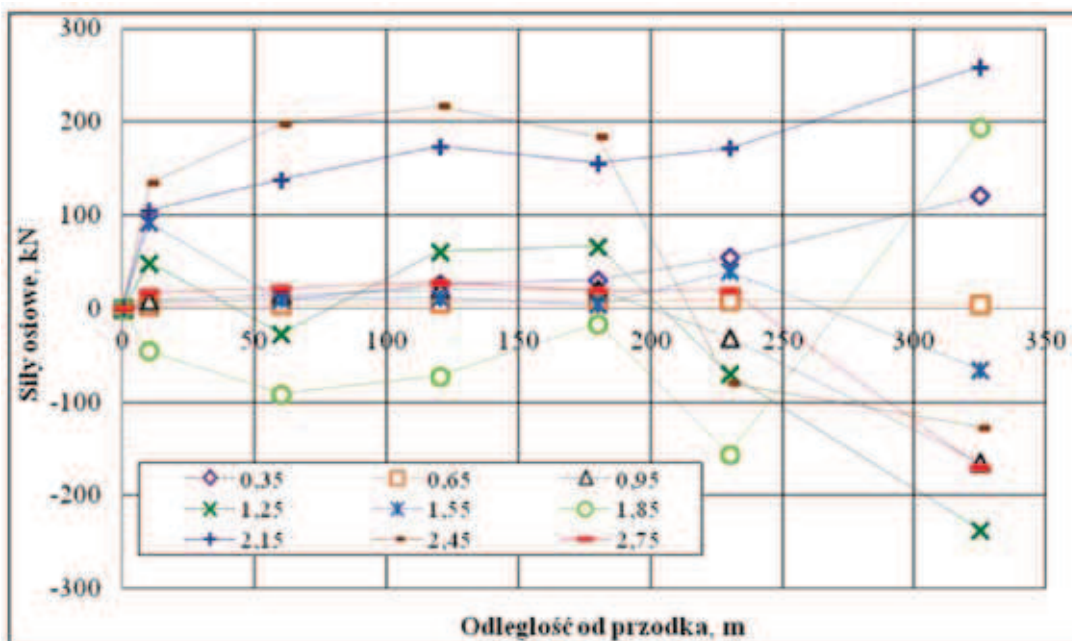


Rys. 8. Siły w kotwi nr 1 w zależności od odległości przodka

Fig. 8. Forces in bolt no. 1 depending on the distance of face



Rys. 9. Wartości sił osiowych w kotwi nr 2
 Fig. 9. Values of axial forces in bolt no. 2



Rys. 10. Siły w kotwi nr 2 w zależności od odległości przodka
 Fig. 10. Forces in bolt no. 2 depending on the distance of face

okresie czasu pojawiają się jednak skokowe zmiany, przy których dochodzi często do zmiany zwrotu sił z rozciągających na ściskające lub ze ściskających na rozciągające.

4. W analizowanych warunkach na całej długości kotwy rejestrowane były wysokie wartości sił, co wskazuje, że zmiany stanu naprężenia i odkształcenia następują na większej odległości od konturu analizowanego wyrobiska.

Artykuł powstał w ramach grantu AGH nr 15.11.100.704.

Literatura

1. *Jonson J.C., Brady T., Larson M., Langston R., Kristen H.*: Use of strain-gauged rock bolts to measure rock mass strain during drift development. 37th Symposium of Rock Mechanics, Rotterdam 1999, s. 497 – 502.
2. *Johnson J., Williams T., Sunderman C., Singer S.*: Field test with strain-gauged friction bolts at the gold hunter mine, Mullan, Idaho, USA. 22th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown 2003, s. 233-239.
3. *Korus H., Szymiczek W., Ficek J., Sobik M.*: Monitoring pracy obudowy kotwiowej w kopalni „Jankowice”. „Przegląd Górniczy” 2002, nr 2, s. 20 – 27.
4. *Korzeniowski W., Piechota S.*: Rozkład siły osiowej wzdłuż kotwi na podstawie badań in situ. „Przegląd Górniczy” 2000, nr 12, s. 22-28.
5. *Leonhardt J.C.*: Visual Recognition of the Load of Roof-Bolts by an Indicator. 20th International Conference on Ground Control in Mining, 2001, s. 362-366.
6. *Majcherczyk T., Malkowski P., Niedbalski Z.*: Stateczność chodników równoległych wykonanych w samodzielnej obudowie kotwiowej. „Przegląd Górniczy” 1999, nr 10, s. 16-25.
7. *Majcherczyk T., Malkowski P., Niedbalski Z.*: Badania nowych rozwiązań technologicznych w celu rozrzedzenia obudowy podporowej w wyrobiskach korytarzowych. Uczelniane Wydawnictwa Naukowe – Dydaktyczne. Kraków 2008, s. 211.
8. *Majcherczyk T., Malkowski P., Niedbalski Z.*: Badania obciążeń obudowy w wybranych wyrobiskach korytarzowych. „Górnictwo i Geoinżynieria” 2005, nr 3/1, s. 289 – 298.
9. *Majcherczyk T., Malkowski P., Niedbalski Z.*: Ruchy górotworu i reakcje obudowy w procesie niszczenia skał wokół wyrobisk korytarzowych na podstawie badań „in situ”. Kraków 2006, s. 130.
10. *Maleki H.M., Hardy M.P., Brest van Kempen C.J.H.*: Evolution of roof bolt tension measuring. 26th US Symposium on Rock Mechanics, Rapid City, SD, 1985, s. 425-437.
11. *Nierobisz A.*: Analiza wpływu obciążeń dynamicznych na zachowanie się kotwi. Prace Naukowe GIG, kwartalnik nr 2/2004, s. 79-105.
12. *Podgórski W., Podgórski K.*: Obudowa kotwiowa wyrobisk górniczych. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1969, s. 356.
13. *Prusek S., Turek M., Rotkegel M., Witek M.*: Wybrane rozwiązania konstrukcyjne wskaźników obciążenia kotwi. „Przegląd Górniczy” 2012, nr 5, s. 37-44.
14. *Singer S., Lewis J.*: A case study of bolt performance in a two-entry gateroad. 17th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown 1998, s. 249 – 256.
15. *Singer S., Raines R.*: Effects of bolt spacing, bolt length, and roof span on bolt loading in a Trona Mine. 20th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown 2001, s. 302 – 308.
16. *Stopyra M., Surma A., Stasica J., Rak Z.*: Elektroniczny monitoring obudowy kotwiowej w KWK „Wesoła”. Wyższy Urząd Górniczy, nr 2/1999, s. 4-9.
17. US Patent nr 5,185,595: Rockbolt monitor. 9.02.1993.