

mgr inż. Urszula Tomczak^{1*)}
mgr inż. Michał Zarzycki²⁾

Ściany szczelinowe w budownictwie infrastrukturalnym

Diaphragm wall in infrastructure engineering

DOI: 10.15199/33.2022.10.23

Streszczenie. Ściany szczelinowe stanowią świetne rozwiązanie nie tylko jako obudowy głębokich wykopów garaży podziemnych, ale także obiektów inżynierskich, gdzie z powodzeniem przenoszą duże siły pionowe oraz ograniczają osiadanie obiektów. W artykule przedstawiono przykłady zastosowania ścian szczelinowych i baret w przypadku tuneli oraz podpór obiektów mostowych. Omówiono typowe rozwiązania zarówno geometryczne, jak i konstrukcyjne.

Słowa kluczowe: ściana szczelinowa; głęboki wykop; baret; kotwy gruntowe; rozpory stalowe.

Abstract. Diaphragm walls are a great solution not only for the retaining system of deep excavations in underground garages, but also for engineering objects, where they also successfully transfer high vertical forces and limit the settlement of objects. The article presents examples of the use of diaphragm walls and barretts for tunnels and supports of bridge structures. Typical geometric and construction solutions are also discussed.

Keywords: diaphragm walls; barretts; ground anchors; steel struts.

Z względu na liczbę realizacji wydawać się może, że ściany szczelinowe są stosowane głównie w przypadku budownictwa mieszkaniowego i biurowego. Mniej znane jest ich wykorzystanie jako obudowy, fundamenty głębokie czy przesłony wodoszczelne powszechnie stosowane w budownictwie przemysłowym, hydrotechnicznym, drogowym i mostowym. W artykule omówiono zastosowanie ścian szczelinowych podczas budowy mostów i tuneli. Są one wykorzystywane jako obudowy głębokich wykopów. Jednocześnie coraz częściej projektanci stosują je jako posadowienie przyczółków wiaduktów oraz podpory pośrednie wiaduktów i estakad z tą różnicą, że w postaci baret, czyli żelbetonowych elementów wykonywanych w technologii ścian szczelinowych. Baretę mogą stanowić element posadowienia pośredniego podpory obiektu mostowego, ale również być gotową podporą pośrednią [6]. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość wykonania konstrukcji obiektu przed zrealizowaniem wykopu docelowego. Przyczółki mostowe można wykonywać tradycyjnie jako ściany proste, ale również jako ściany teowe (z żebrami zarówno na zewnątrz, jak i do wewnątrz wykopu), dzięki czemu

przenoszą znaczne siły pionowe i poziome, a także pozwalają na ograniczenie przemieszczeń poziomych i osiadań. Ma to znaczenie szczególnie w przypadku przyczółków, gdzie przemieszczenia poziome limitowane są przez przyjęcie odpowiednich łożysk, a pionowe – wymagane na dylatacjach przy płytach przejściowych.

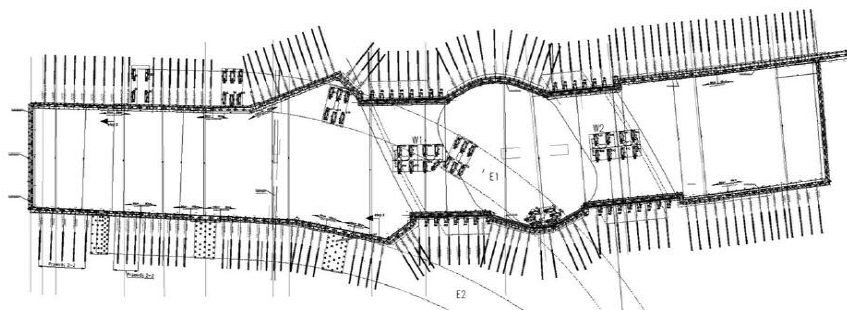
Przykłady realizacji

W projekcie Węzeł Łopuszańska w Warszawie (rysunek 1) zastosowano ściany szczelinowe o zmiennej grubości 60, 80 i 100 cm, a także ściany szczelinowe teowe o grubości 80 cm w przypadku przyczółków. Grubość ścian szczelinowych dobrano na podstawie głębokości wykopów, schematów statycznych oraz obciążeń przekazywanych z obiektów mostowych.

W przypadku projektu Węzeł Łopuszańska baretę posłużyły jako posadowienie

pośrednie fundamentów podpór wiaduktów i estakady ze względu na ich duże gabaryty. W podobnych przypadkach można rozważyć wykonanie ścian szczelinowych na planie wieloboku i zamodelowanie go jako docelowej podpory wiaduktu, która jest w stanie prznieść bardzo duże obciążenia, a jednocześnie pozwala na poprowadzenie organizacji budowy w taki sposób, żeby uruchamiać poszczególne przejazdy, zanim powstanie wykop w tunelu. Zastosowanie fragmentów ścian szczelinowych, dzięki ich dużej nośności, zmniejsza liczbę potrzebnych elementów. Na rysunku 2 pokazano 8 baret, którymi zastąpiono 36 pali przemieszczeniowych, zaprojektowanych w rozwiązaniu bazowym. W efekcie zmniejszono koszty oraz przyspieszono prace.

Omawiany obiekt to tunel otwarty, którego obudową tymczasową i docelową jest ściana szczelinowa. Stateczność



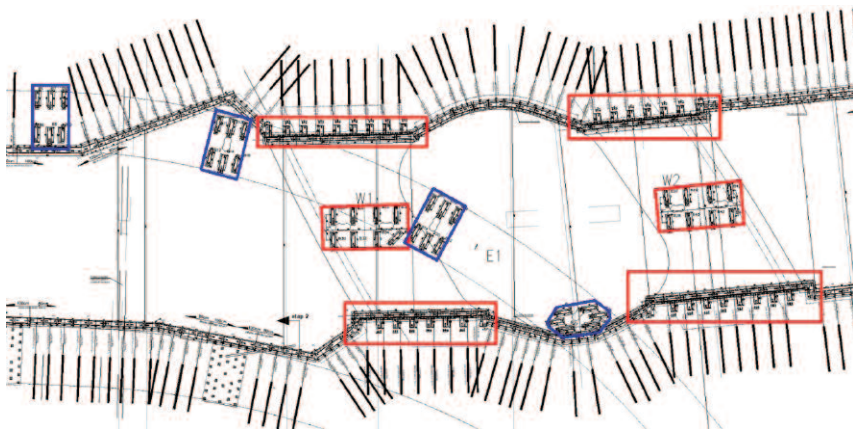
Rys. 1. Rzut obudowy wykopu oraz podpór pośrednich estakad w technologii ścian szczelinowych – Węzeł Łopuszańska w Warszawie

Fig. 1. Layout of retaining wall with intermediate supports of flyovers in diaphragm wall technology – Łopuszanska Junction in Warszawa City

¹⁾ Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej

²⁾ Soletanche Polska Sp. z o.o.

^{*)} Adres do korespondencji: urszula.tomczak@pw.edu.pl

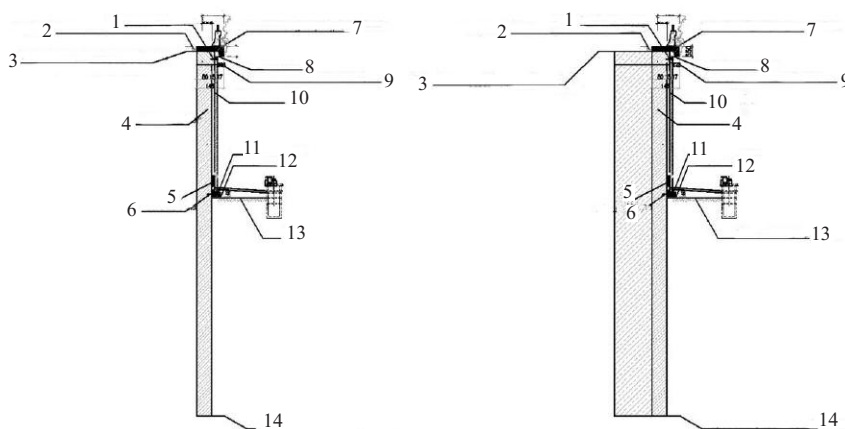


Rys. 2. Lokalizacja przyczółków mostowych oraz podpór wiaduktów – Węzeł Łopuszańska w Warszawie

Fig. 2. Location of bridgeheads and viaduct's supports – Łopuszanska Junction in Warszawa City

obudowy zapewniona została przez tymczasowe oraz stałe kotwy gruntowe o wielosplotowych ciągnach linowych, co wywołało dociśnięcie ściany do gruntu przez ich wstępne sprężenie, a to z kolei ograniczyło przemieszczenie ściany obudowy wykopu. W Polsce w tunelach otwartych stosuje się powszechnie okładziny kamienne lub betonowe montowane na stelażach, co pozwala, po zdemontowaniu poszczególnych elementów, na przeprowadzenie przeglądu kotew, kontroli szczelności ściany lub jej doszczelnienia przez wykonanie iniekcji. Obudowy tuneli otwartych w technologii ścian szczelinowych mogą być również samonośne i pracować w schemacie wspornikowym (rysunek 3). W zależności od warunków gruntowych i grubości ściany szczelinowej wysokość odsłonięcia wspornika sięga kilku metrów.

Obecnie w Polsce wykonuje się ściany szczelinowe o grubości $40 \div 150$ cm. W celu zwiększenia wysokości odsłonięcia wspornika, przy zastosowaniu tej samej grubości ściany, można przyjąć przekrój teowy. Należy jednak pamiętać, że wymaga on więcej miejsca w terenie. Ściany o przekroju teowym projektuje się również w przypadku dużej rozpiętości przęsła pomiędzy punktami podparcia ściany szczelinowej [5]. **Ściany szczelinowe wspornikowe** korzystnie wpływają na organizację placu budowy, przyspieszając prace w wyniku pominięcia etapów montowania odpowiedniego podparcia ścian. Schemat ten wymaga jednak znacznie dłuższego zakotwienia w gruncie, co



Oznaczenia: 1 – kotwa chemiczna wklejana; 2 – korytko odwodniowe wg odrębnego opracowania; 3 – wierzch ocpetu ściany szczelinowej – ocpet żelbetowy $0,85 \times 0,70$; 4 – ściana szczelinowa; 5 – żwir; 6 – kotwa wklejana; 7 – nadbudowa wg odrębnego opracowania; 8 – blacha ostonowa; 9 – wierzch ściany szczelinowej; 10 – panel elewacyjny; 11 – ława fundamentowa; 12 – chudy beton; 13 – max. poziom wykopy; 14 – spód ściany szczelinowej zmienny

Rys. 3. Obudowa tunelu wspornikowa prosta i żebrowana – Węzeł Dąbrowica, obwodnica Lublina

Fig. 3. Cantilever and t-shape cantilvever walls of tunnel – Dąbrowica Junction, Lublin ring road

zwiększa głębokość i koszt ścian. Tego typu obudowa ulega też większym przemieszczeniom, na co nie zawsze można sobie pozwolić. Bliskie sąsiedztwo istniejących budynków lub wrażliwej infrastruktury podziemnej wymaga zachowania jak najmniejszych odkształceń obudowy.

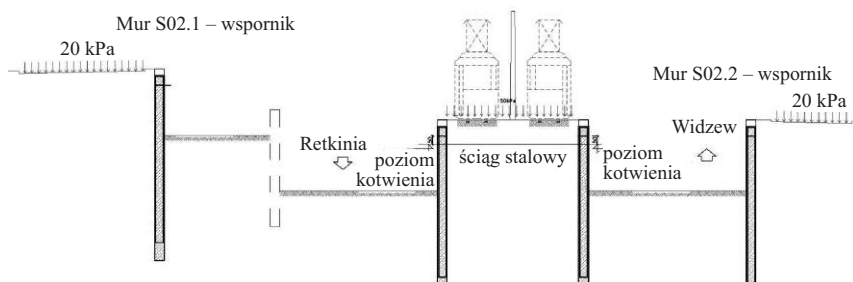
W celu ograniczenia przemieszczeń bądź wykonania głębszego wykopu, przy zachowaniu mniejszej grubości ściany, stosuje się podpory zapewniające stateczność obudowy. W tunelach otwartych najpowszechniej stosowane są kotwy gruntowe stałe lub tymczasowe. **Kotwy tymczasowe** będą przydatne w przypadku przekrojów, gdzie w fazie tymczasowej głębokość wykopu uniemożliwia zastosowanie schema-

tu wspornikowego. Natomiast w fazie docelowej, po wykonaniu płyty dennej bądź zasypek drenażowych, odsłonięcie obudowy na tyle maleje, że można dopuścić pracę wspornikową. Popularność kotew gruntowych wynika z braku kolizji podpory ze skrajnią drogową. Na podobnej zasadzie jak kotwy gruntowe można zastosować ściągi stalowe, ale wymagają one elementu kotwiącego z dwóch stron. W przypadku kotew gruntowych elementem kotwiącym jest buława znajdująca się w gruncie, w przypadku ściągow może to być ściana szczelinowa, ocep żelbetowy lub dodatkowy element kotwiący, np. baretta lub inny element, który prze-

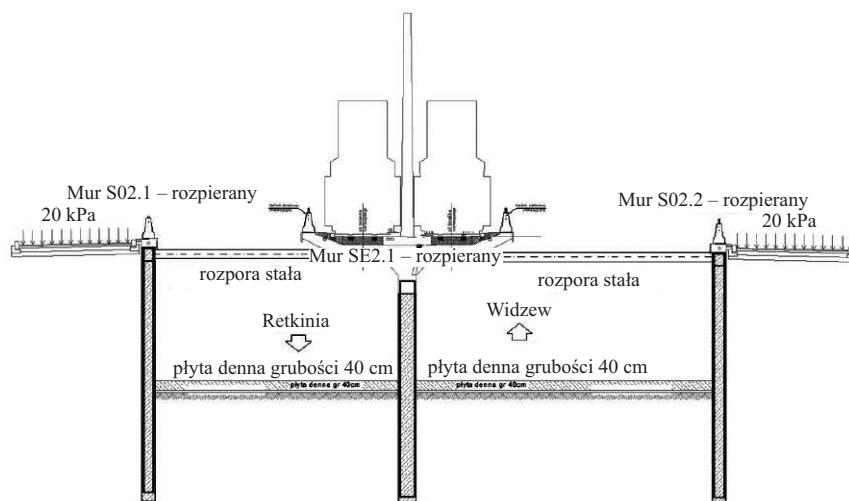
mie reakcje. Przykład ich zastosowania z projektu Trasy W-Z w Łodzi [7] przedstawiono na rysunku 4.

W przypadkach, gdy wysokość skrajni na to pozwala, można zastosować docelowe rozpory stalowe (rysunek 5) bądź żelbetowe. W sytuacjach analogicznych jak kotwy tymczasowe niejednokrotnie stosuje się również tymczasowe rozpory stalowe, z tą różnicą, że należy je przeanalizować również pod kątem wpływu na pracę i transport w trakcie prowadzenia robót w wykopie.

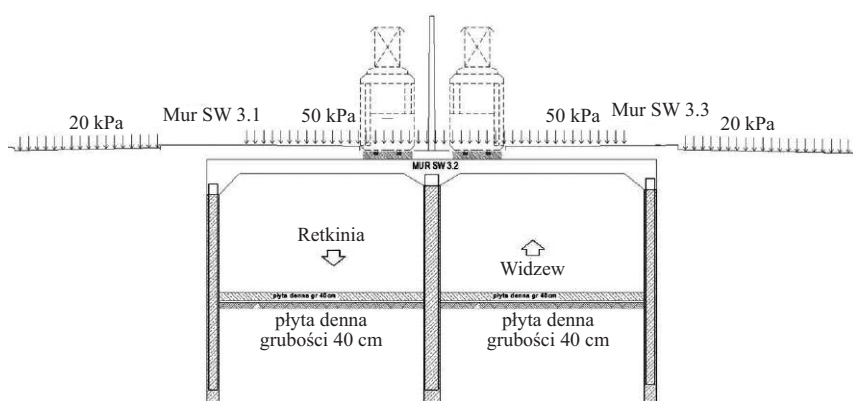
Projekt Trasy W-Z w Łodzi obejmuje również tunel zamknięty (rysunek 6). Dzięki zastosowaniu takiego rozwiązania możliwe jest udostępnienie miejsca nad podziemnym ciągiem drogowym dla



Rys. 4. Ściany szczelinowe wspornikowe oraz podparte ściągiem – Trasa W-Z w Łodzi
 Fig. 4. Cantilever and supported by steel bar diaphragm wall – W-Z Route in Łódź City



Rys. 5. Ściany szczelinowe podparte rozporami stalowymi – Trasa W-Z w Łodzi
 Fig. 5. Diaphragm walls supported by steel struts – W-Z Route in Łódź City



Rys. 6. Obudowa tunelu i podpora stropu z wykorzystaniem ścian szczelinowych – Trasa W-Z w Łodzi
 Fig. 6. Retaining wall for tunnel with top slab's support executed in diaphragm wall technology – W-Z Route in Łódź City

ruchu naziemnego, na parki, trasy rowe-
 rowe lub pod budownictwo kubaturowe.
 Z punktu widzenia inżyniera jest to zna-
 komita okazja do wykorzystania stropu
 tunelu jako rozparcia obudowy wykopu.
 Realizowanie robót metodą podstropo-
 wą umożliwia szybkie oddanie terenu
 nad tunelem do użytkowania, co jest
 szczególnie istotne na obszarze zurbani-
 zowanym.

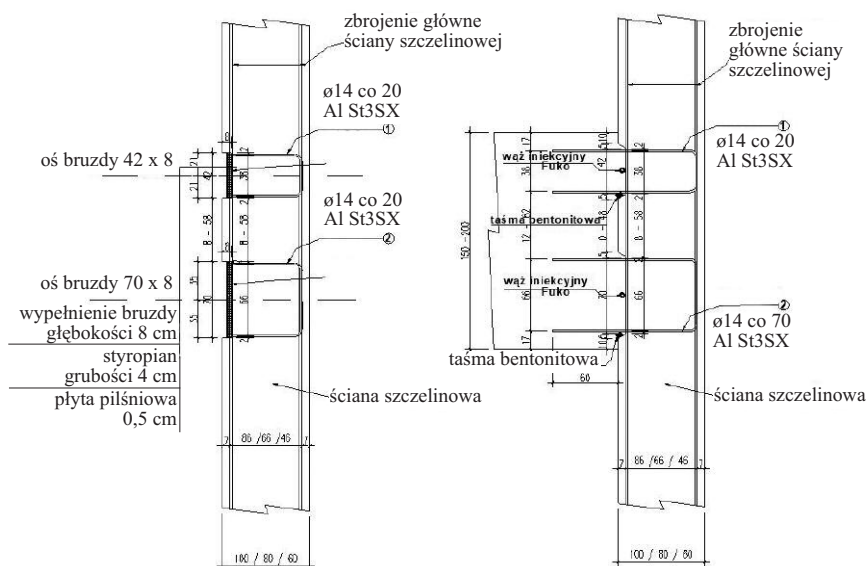
Ważnym elementem wykorzystania
 ścian szczelinowych w konstrukcjach
 mostowych jest ich połączenie z płytą
 fundamentową oraz stropem tunelu czy
 przęsłem wiaduktu. Projektując sposób
 połączenia, należy pamiętać o etapach
 wykonywania ścian szczelinowych, któ-
 re narzucają określone ograniczenia, np.
 betonowanie odbywa się po osadzeniu
 zbrojenia w szczelinie, bez możliwości

kontroli rozprowadzania mieszanki be-
 tonowej. Wymusza to specjalne wy-
 magania dotyczące parametrów mie-
 szanki betonowej oraz zbrojenia. Norma
 PN-EN 1538 zaleca, aby odległość
 w świetle pomiędzy prętami była nie
 mniejsza niż 10 cm, natomiast IBDiM
 w Warunkach Technicznych Wykona-
 nia Ścian Szczelinowych – minimum
 15 cm. Zwykle stosuje się rozstaw prę-
 tów głównych co ok. 20 cm. Dodatko-
 wo pręty łączące ściany szczelinowe
 z resztą konstrukcji muszą mieścić się
 w zakresie grubości ściany szczelinowej
 z uwzględnieniem minimalnej zaleca-
 nej otuliny 75 mm.

Połączenie ściany szczelinowej z płytą
 denną odbywa się najczęściej przez
 zastosowanie prętów odginanych, które
 są montowane w zbrojeniu ścian szcze-
 linowych w specjalnie przygotowanej
 rezerwacji, a ich łatwiejsze odkucie za-
 pewnia się przez zamocowanie styropia-
 nu na wysokości ich montażu (rysunek 7).

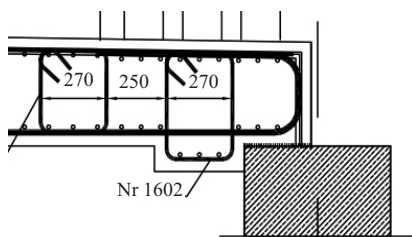
Nie zaleca się montowania prętów
 o średnicy większej niż 14 mm ze wzglę-
 du na duży odsetek pękniętych prętów
 przy odginaniu. Pręty powinny być ze
 stali wysokiej ciągliwości, a w przypad-
 ku, gdy średnica 14 mm nie jest wystar-
 czająca, można łączyć pręty. Stosuje się
 również pręty wklejane albo z mufami
 montowane do prętów wkręcanych. Ze
 względu na znaczny koszt to rozwiąza-
 nie jest stosowane w przypadku dużej
 średnicy prętów jako elementów łączą-
 cych dwie konstrukcje.

Kolejnym istotnym zagadnieniem
 jest połączenie ściany szczelinowej
 z konstrukcją obiektu, np. ze stropem
 tunelu. W tym przypadku wiele zależy
 od schematu statycznego konstrukcji
 przyjętego do obliczeń przez projek-
 tanta. W przypadku, gdy przeszło płyty
 oparte jest swobodnie na ścianie (rysunek 8),
 to nie ma konieczności łączenia
 tych elementów prętami zbrojeniowymi.
 Ściana szczelinowa obciążona jest
 siłami pionowymi od ciężaru własnego
 i obciążeń użytkowych, nie są przekazywane
 dodatkowe momenty od konstrukcji,
 a przemieszczenia góry ściany
 szczelinowej są zablokowane. Wiąże
 się to natomiast ze zwiększonym zbro-
 jeniem przeszła płyty wywołanym zgi-
 naniem.



Rys. 7. Detail wykotwień do połączenia płyty dennej ze ścianą szczelinową – Węzeł Łopuszańska w Warszawie

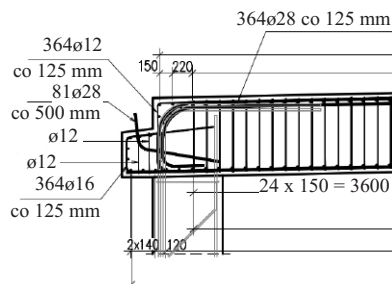
Fig. 7. Detail of re-bars connecting foundation slab with d-wall – Łopuszańska Junction in Warszawa City



Rys. 8. Przykład podparcia płyty górnej z możliwością obrotu na podporze

Fig. 8. Example of rotative slab support

Drugim sposobem jest zazbrojenie połączenia w taki sposób, żeby wygenerować sztywne połączenie elementów w narożu (rysunek 9). Metoda ta wykorzystuje maksymalnie sztywność ściany szczelinowej i przekazanie momentów na podporze płyty na nią. Schemat ten zmniejsza liczbę zbrojenia w przęśle płyty, ale komplikuje zbrojenie połączenia. Liczba prętów,



Rys. 9. Przykład połączenia zbrojenia ściany szczelinowej z płytą górną tunelu [3]

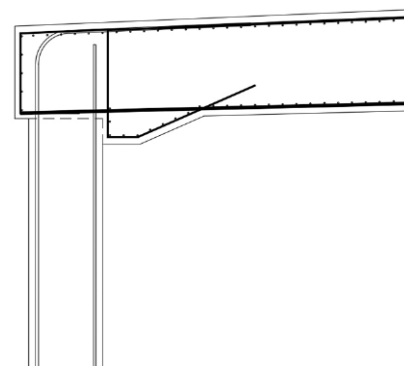
Fig. 9. Example of reinforcement connection between d-wall and top slab of a tunnel [3]

ich średnica i sposób wygięcia stwarzają często bardzo duże problemy realizacyjne. Zagęszczony rozstaw prętów może osłabić jakość betonu w ich okolicy. Ponadto pręty instalowane w szkielecie zbrojeniowym muszą być proste, a wyginanie ich może być prowadzone dopiero po wykonaniu ścian szczelinowych. W przypadku prętów powyżej $\phi 16$ konieczne jest zastosowanie giętarek mechanicznych. Późniejsze wklejenie dodatkowego zbrojenia jest nieekonomiczne ze względu na głębokość przewiertów, które byłyby konieczne do odpowiedniego zakotwienia prętów.

Pewnym kompromisem względem pełnego utwierdzenia jest przyjęcie schematu statycznego z częściowym utwierdzeniem, co umożliwi redukcję zbrojenia w węzle, a odpowiednio zwiększa zbrojenie przęsłowe płyty. Jest to jednak większe wyzwanie obliczeniowe polegające na określeniu prawidłowej podatności podpory i wymaga doświadczenia od projektanta konstrukcji.

W wielu przypadkach połączenie sztywne ściany szczelinowej z płytą stropową powoduje trudności w zamontowaniu odpowiedniej liczby prętów w szkielecie zbrojeniowym ściany szczelinowej, potrzebnej do przeniesienia momentu zginającego ze stropu. W takim przypadku przez wprowadzenie modyfikacji w geometrii rygła

zwiększamy ramię sił wewnętrznych, co skutkuje zmniejszeniem liczby zbrojenia potrzebnego do przeniesienia tego momentu (rysunek 10).



Rys. 10. Przykład połączenia ściany szczelinowej z płytą stropową tunelu

Fig. 10. Example of connection between d-wall and top slab of a tunnel

Wnioski

Ściany szczelinowe z powrotem są stosowane w przypadku realizacji obiektów mostowych. Ze względu na możliwość zastosowania ścian o zmiennej grubości i kształcie oraz różnych systemach zabezpieczenia stateczności zarówno tymczasowej, jak i docelowej łatwo dopasowują się do potrzeb inwestora. Warto zaznaczyć, że głównym kluczem do sukcesu jest prawidłowe przyjęcie założeń już na etapie projektu konstrukcji. Należy uwzględnić kształt obiektu oraz schemat połączenia z poziomymi elementami obiektu.

Literatura

- [1] PN-EN 1538:2015 Wykonawstwo specjalnych robót geotechnicznych – Ściany szczelinowe.
- [2] Grzegorzewicz K, Kłosiński B, Rychlewski P, Górecki Ł. Ściany szczelinowe i baretty – konstrukcje i zastosowania – IBDiM, Warszawa 2020.
- [3] Projekt Wykonawczy – Budowa tunelu pod DK-1 w Tychach – Grontmij Polska Sp. z o.o., 2012.
- [4] Projekty Wykonawcze ścian szczelinowych – Soletanche Polska.
- [5] Siemińska-Lewandowska A. Głębokie wykoppy. Projektowanie i wykonywanie. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. 2010.
- [6] Siemińska-Lewandowska A, Mitew-Czajewska M, Tomczak U. Various use of diaphragm walls for construction of multilevel road junction – Design and monitoring of displacements. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics. ICSMGE 2013.
- [7] Tomczak U, Mielczarek Ł. Two-level Structure for Tram and Road Traffic in the Centre of City – Lodz in Poland. Procedia Engineering 2016. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.075.

Przyjęto do druku: 16.09.2022 r.