

Problemy posadawiania zbiorników LNG

Skrót LNG (ang. Liquefied Natural Gas) oznacza skroplony gaz ziemny, czyli gaz w stanie ciekłym, oziębiony do temperatury minus 163°C przy ciśnieniu atmosferycznym. Ten gaz jest nazywany skoncentrowaną energią; z 1 m³ ciekłego LNG po odparowaniu (regazyfikacji) otrzymuje się ok. 600 m³ gazu sieciowego. Technologia LNG umożliwia transport gazu drogą morską na znaczne odległości i magazynowanie go w dużych ilościach w zbiornikach kriogenicznych. Są one znakiem rozpoznawczym wszystkich światowych instalacji związanych z przeładunkiem skroplonego gazu. Ze względów bezpieczeństwa mają one konstrukcję dwukomorową, zapobiegającą ewentualnym wyciekom gazu. Obecnie najczęściej są stosowane zbiorniki pełnokomorowe, najbardziej zaawansowane technologicznie, których dach i ściany szczelnie izolują zbiornik wewnętrzny (rozwiązanie typu full containment – zbiornik w zbiorniku). Zbiornik pełnokomorowy jest tak skonstruowany, że zarówno zbiornik wewnętrzny, jak również zewnętrzny są w stanie pomieścić rozlany LNG. Stosowane zbiorniki LNG szczegółowo przedstawiono w opracowaniu [1]. Zbiornik wewnętrzny, jak podano w [2], zwykle jest wykonany z kriogenicznej, wysoko niklowanej stali (zawartość około 9%), która cechuje się odpornością na kruche pęknięcia w niskich temperaturach (małą kurczliwość) i zdolnością hamowania propagacji pęknięć. Zbiornik zewnętrzny wraz z kopułą jest wykonywany z betonu sprężonego. Ciężna sprężająca fundament, ściany i kopułę poddane kontrolowanym naprężeniom ograniczają odkształcenia konstrukcji podczas użytkowania zbiornika. Pomiedzy zbiornikiem wewnętrznym i zewnętrznym znajduje się warstwa izolacji, którą najczęściej stanowi perlit i wata szklana lub szkło piankowe. Konstrukcja zbiornika przypomina wielki termos, posadowiony na płycie fundamentowej, odpowiednio zaizolowanej i podgrzewanej. Umożliwia on utrzymanie gazu w stanie płynnym, nie dopuszczając do wzrostu jego temperatury. Konstrukcja płyty fundamentowej zbiornika zależy od budowy geologicznej terenu, na którym jest on usytuowany. Firma Polskie LNG na swojej stronie internetowej podkreśla, że charakterystyczną cechą nowoczesnych zbiorników LNG jest zastosowanie systemu zabezpieczającego grunt pod zbiornikiem przed przemarzaniem. Ze względu na temperaturę LNG stosuje się wielowarstwowe izolacje z waty szklanej oraz elektryczne systemy grzewcze dna zbiornika.

Aspekty geotechniczne posadawiania terminali LNG

Ze względu na lokalizację terminali LNG w bliskim sąsiedztwie otwartych wód, mórz i oceanów, bardzo często występują problemy przy posadawianiu obiektów wznoszonych na terenie terminali. Szczególnie dotyczy to zbiorników, z uwagi na ich duże wymiary, wartość obciążeń przekazywanych na podłoże oraz szczególnie niekorzystne warunki gruntowo-wodne. Tereny nadmorskie cechują się głównie pokładami osadów morskich i napływowych,

charakteryzujących się niskimi parametrami geotechnicznymi i dużą ścisłością. Posadowienie w tych warunkach dodatkowo komplikuje wysoki poziom wód gruntowych. Według opracowania [3] obciążenia fundamentu zbiorników LNG wynoszą zwykle: 70÷140 kN/m² – w przypadku pustego zbiornika, 200÷400 kN/m² – w czasie użytkowania przy pełnym zbiorniku i 250÷500 kN/m² – podczas prób wodnych. Duże obciążenia działające na fundamenty zbiorników, przy ich znacznych wymiarach, powodują oddziaływanie na podłoże gruntowe (zasięg tzw. strefy aktywnej) sięgające do głębokości około 120 m (tj. 1,0 do 1,5 średnicy typowego zbiornika). W tych warunkach osiadania zbiorników mogą być duże lub bardzo duże oraz nierównomierne pod całym fundamentem, znacznie przekraczające wartości dopuszczalne w przypadku tego typu obiektów.

Specyficzna konstrukcja zbiorników powoduje, że są one bardzo wrażliwe na nierównomierne osiadania gruntu pod fundamentem. Zatem najczęściej zachodzi potrzeba wzmocnienia podłoża pod fundamentem lub posadowienia pośredniego w celu spełnienia restrykcyjnych wymagań dotyczących osiadania i różnicy osiadania płyty fundamentowej zbiorników. W przypadku zbiorników posadowionych poniżej powierzchni terenu istotny problem mogą również stanowić wody gruntowe. Gęstość skroplonego gazu ziemnego jest o ponad połowę mniejsza od gęstości wody. W przypadku podniesienia się poziomu wód gruntowych wokół zagłębionego w gruncie zbiornika, siła wyporu mogłaby podnieść go lub przemieścić. Bardzo ważnym czynnikiem brany pod uwagę przy projektowaniu terminali LNG jest również wpływ oddziaływań sejsmicznych, które w niektórych rejonach świata mogą występować dość często.

Typy fundamentów pod zbiorniki LNG

Ze względu na sposób posadowienia obiektów fundamenty dzieli się na:

1) bezpośrednie (obciążenie budowli przenosi się na podłoże bezpośrednio przez podstawę fundamentu) na podłożu naturalnym, sztucznym (wymiana gruntu) bądź na podłożu wzmocnionym (zagęszczenie, geowłókniny, zastrzyki cementowe, kolumny);

2) pośrednie (obciążenie od budowli przenosi się na podłoże za pośrednictwem dodatkowych elementów konstrukcyjnych, na których opiera się podstawa fundamentu) na palach, studniach lub na ścianach szczelinowych (dawniej na kesonach).

W odniesieniu do zbiorników LNG stosuje się ponadto inny podział fundamentów. W opracowaniu [3] wyróżniono dwa główne rodzaje fundamentów: posadowione powyżej poziomu terenu i poniżej tego poziomu, mające swoje zalety i wady. Stosuje się również kombinacje w postaci fundamentu częściowo zagłębionego w gruncie, który umożliwia odpowiednie modelowanie cech fundamentu w zależności od potrzeb oraz pozwala na wykorzystanie

zalet obydwu typów. Jak podają autorzy opracowania [3], rozwiązanie fundamentu powinno być analizowane już na wstępnym etapie projektowania. Nowatorskim rozwiązaniem problemów posadowienia zbiorników na niestabilnych gruntach jest zastosowanie zbiornika pływającego.

Do najczęściej stosowanych technologii umożliwiających ograniczenie osiadania podłoża pod fundamentem znajdującym się ponad powierzchnią terenu można zaliczyć: wstępne obciążenie słabego podłoża (prekonsolidacja) – spowodowanie osiadań słabego podłoża przed posadowieniem zbiornika, posadowienie na palach, wzmocnienie podłoża. Wadą prekonsolidacji jest długi czas potrzebny do uzyskania zamierzonego efektu w przypadku występowania w podłożu utworów ilastych o małym współczynniku filtracji. Proces osiadania może trwać nawet kilka lat, a można go przyspieszyć, stosując drenaży piaskowe (geodrenaży).

Wieloletnie doświadczenie w stosowaniu różnych rodzajów pali pokazuje, że w większości przypadków posadowienie obiektów budowlanych na palach pozwala osiągnąć akceptowalny poziom osiadań i różnic osiadań. W przypadku nowo budowanych zbiorników LNG, których średnice zawierają się w granicach 60 ÷ 90 m, obciążonych dużymi siłami, niekiedy trudno jest osiągnąć zamierzony cel. Pojawiają się tu różnice w oddziaływaniu podłoża pod środkiem i krawędziami zbiornika, jak również pomiędzy grupą pali pod zbiornikiem i palami, na których opierają się np. konstrukcje podtrzymujące rurociągi. Konieczne jest często zastosowanie dużej liczby pali, co wiąże się z dużymi nakładami finansowymi na posadowienie zbiornika.

W przypadku potencjalnego zagrożenia powodziowego projektowanych obiektów (zlokalizowanych na terenach nadmorskich), pomimo zastosowania głębokiego posadowienia na palach, często konieczne staje się wykonanie kontrolowanego nasypu powyżej słabych gruntów rodzimych. Nasyp ten podniesie projektowany poziom terenu na bezpieczną wysokość (ponad poziom potencjalnego zagrożenia powodziowego). Jest to przykład posadowienia pośredniego połączonego z dodatkową warstwą nasypu.

Jednym ze sposobów posadowienia dużych zbiorników powyżej poziomu terenu jest zastosowanie wzmocnienia słabego podłoża. Obecnie istnieje na rynku wiele skutecznych metod ulepszenia podłoża oraz kilka kryteriów ich podziału. Według jednego z nich można wyróżnić wzmocnienia:

1) bez użycia dodatkowych materiałów: ubijanie lub wibrowanie (w przypadku gruntów sypkich, np. piasków, pospółek), wstępne obciążenie nasypem, drenaży pionowe, metoda próżniowa *Menarda* (w przypadku gruntów spójnych, np. glin, ilów, namulów);

2) przy użyciu dodatkowych materiałów: wymiana gruntu, wymiana dynamiczna, kolumny kamienne, kolumny CMC, CSM, kolumny jet grouting.

Głównym celem projektowania fundamentów posadowionych w gruncie z geotechnicznego punktu widzenia jest zwiększenie nośności fundamentu. Raport Capco-CLP [4] wskazuje, że o wyborze tego rodzaju posadowienia decydują ponadto czynniki:

– środowiskowe – im bardziej zagłębiony w gruncie jest zbiornik, tym mniejszy jest jego wpływ na otaczający krajobraz; niestety pojawiają się też aspekty negatywne, jak: duża ilość materiału z wykopu, większe zużycie betonu i materiału izolacyjnego ścian i dna zbiornika, większe zużycie energii do podgrzewania dna i ścian zbiornika, obniżenie występowania poziomu wód gruntowych;

– ekonomiczne – koszt budowy zbiornika zagłębionego w gruncie może wynieść nawet dwukrotność kosztu budowy zbiornika naziemnego; również koszty eksploatacji są znacznie wyższe ze względu na większe zużycie energii związane z podgrzewaniem zbiornika i wypompowywaniem wód gruntowych;

– projektowe i bezpieczeństwa – zbiorniki przy wysokościach sięgających 70 m mogą stanowić potencjalne niebezpieczeństwo dla transportu powietrznego – im niższe, tym lepiej; zagłębione w gruncie zbiorniki lepiej reagują na trzęsienia ziemi, ale tylko przy niewysokich amplitudach trzęsień, wysoki poziom wód gruntowych niesie ze sobą ryzyko przenikania wody do zbiornika, a nawet podniesienia zbiornika siłą wyporu, gdyż gęstość i ciężar wody są większe niż skroplonego gazu ziemnego;

– wykonawcze – tu pojawia się szereg dodatkowych problemów związanych generalnie z wydłużonym okresem budowy (średnio 36 miesięcy w przypadku zbiorników naziemnych i około 60 miesięcy – zbiorników posadowionych w gruncie), z brakiem odpowiedniej liczby wykonawców – na około 400 istniejących zbiorników LNG tylko 50 jest posadowionych poniżej poziomu gruntu, z czego większość w Japonii i w zasadzie tylko japońskie firmy dysponują technologią oraz doświadczeniem w ich budowaniu; dodatkowo zbiorniki LNG posadowione głęboko w gruncie ze względu na inny rozkład sił wewnętrznych działających na ściany zbiornika mają zwykle zbiorniki wewnętrzne o cienkich ścianach, najczęściej membranowe (grubości 1,5 mm w porównaniu z 25 mm w przypadku zbiorników naziemnych) i są one bardziej narażone na uszkodzenie w trakcie transportu i późniejszego montażu;

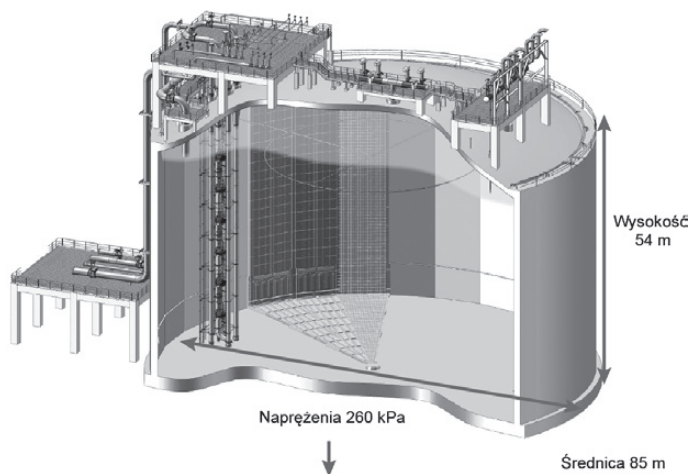
– eksploatacyjne – generalnie ze względu na umiejscowienie wszelkich instalacji związanych z podgrzewaniem dna zbiornika oraz usuwaniem nadmiaru wód gruntowych poniżej powierzchni terenu jakakolwiek konserwacja czy ewentualne naprawy wydają się niewykonalne, jeżeli w ogóle usterki zostaną zauważone; zaletą może być natomiast to, że większość pozostałego wyposażenia i instalacji samego zbiornika znajduje się na jego dachu, w związku z czym dostęp do nich jest ułatwiony.

W przypadku zbiorników posadowionych poniżej poziomu terenu kluczowe znaczenie ma technologia wykonania, co podkreślono w opracowaniu [3]. Przy wysokim poziomie wód gruntowych niezbędnym działaniem, które należy wykonać na początku budowy, jest obniżenie tego poziomu i utrzymanie go przez cały czas wykonywania robót budowlanych w wykopie. Alternatywnie, gdy obniżenie poziomu lustra wody gruntowej jest utrudnione, może pojawić się konieczność wykonywania betonowania pod wodą lub nawet budowy fundamentu opartego na kesonach. Wraz ze zwiększeniem głębokości posadowienia fundamentu zwiększa się stopień trudności odprowadzenia wód gruntowych, a w niektórych warunkach hydrogeologicznych mogą się one okazać nie do pokonania.

Przykłady posadowienia zbiorników LNG

W literaturze krajowej jest bardzo mało dostępnych materiałów dotyczących sposobów posadowienia nowoczesnych obiektów, jakimi są zbiorniki LNG, jedne z ważniejszych elementów terminali gazowych. W artykule zamieszczono udokumentowane przykłady posadowienia tego rodzaju zbiorników w Australii, Indiach i Japonii oraz opisano dwa tego rodzaju zbiorniki zrealizowane po raz pierwszy w Polsce, na terenie terminalu w Świnoujściu.

• **Posadowienie zbiornika na podłożu wzmocnionym kolumnami CSM (Australia).** Przykładem jest zbiornik na północno-wschodnim wybrzeżu Australii. Realizacja ta jest opisana w pracy [5]. Zbiornik membranowy średnicy 85 m i wysokości 54 m (pojemności 180 000 m³) przekazywał obciążenia na podłoże w trakcie próby wodnej wynoszące 260 kN/m² (rys. 1). W podłożu występowały pokłady „słabych” osadów sedimentacyjnych w postaci iłłów do głębokości około 2 m poniżej poziomu terenu, luźnych piasków i żwirów o miąższości od 2,0 do około 5,6 m i znów osadów sedimentacyjnych (iłłów i piasków pylastych), sięgających większych głębokości. Zaprojektowano fundament zbiornika w postaci płyty posadowionej na podłożu wzmocnionym kolumnami CSM o wymiarach przekroju poprzecznego: długość 2,4 m, szerokość 0,55 m. Rozmieszczenie kolumn pod płytą zbiornika przedstawiono na rys. 2. Podłoże pod pozostałą infrastrukturą terminala postanowiono wzmocnić za pomocą wstępnego obciążenia (prekonsolidacji) oraz drenów odsączających. Wykorzystując odpowiednie oprogramowanie 3D, wyznaczono maksymalne osiadania. Przy przyjętych założeniach wyniosły one 107 mm, uwzględniając czynniki sejsmiczne, dość powszechne w tej części świata.



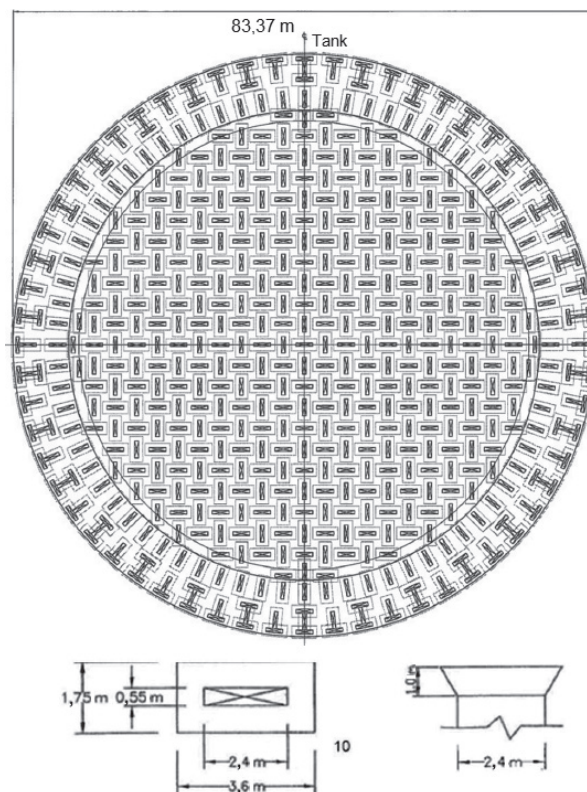
Rys. 1. Zbiornik membranowy LNG, Australia [5]

Bardzo ważnym elementem na etapie projektowania był wybór optymalnej technologii wykonania kolumn, w tym receptury zaczynu cementowego. Wykonano 10 kolumn, stosując różne proporcje składników:

- 3 kolumny w systemie dwufazowym: najpierw zawieszina bentonitowa (50 kg/m³) odpowiednio 150, 225 i 400 l/m³ i następnie zaczyn cementowy;

- 7 kolumn w systemie jednofazowym, bez zawiesziny bentonitowej, zaczyn cementowy o w/c = 0,6÷0,85, z zawartością cementu od 650 do 1400 kg/m³.

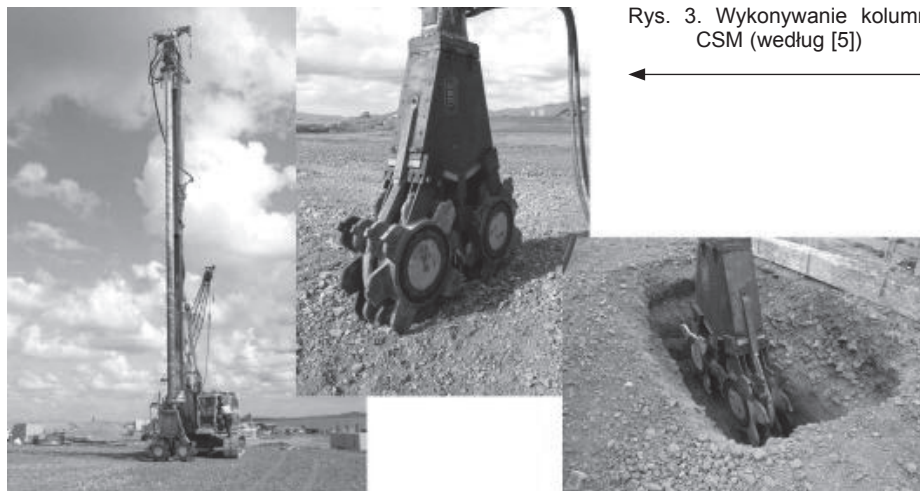
Najlepsze wyniki uzyskano w przypadku kolumny wykonanej w systemie jednofazowym, przy zawartości cementu 800 kg/m³ i stosunku w/c = 0,85, z dodatkiem popiołów lotnych. Wyniki badań wykazały, że wytrzymałość na ściskanie po 56 dniach wynosiła 3,6 MPa w przypadku próbki pobranej z odwiertu po stwardnieniu i 7,2 MPa w przypadku



Rys. 2. Schemat rozmieszczenia kolumn CSM pod zbiornikiem LNG, Gladstone, Australia [5]

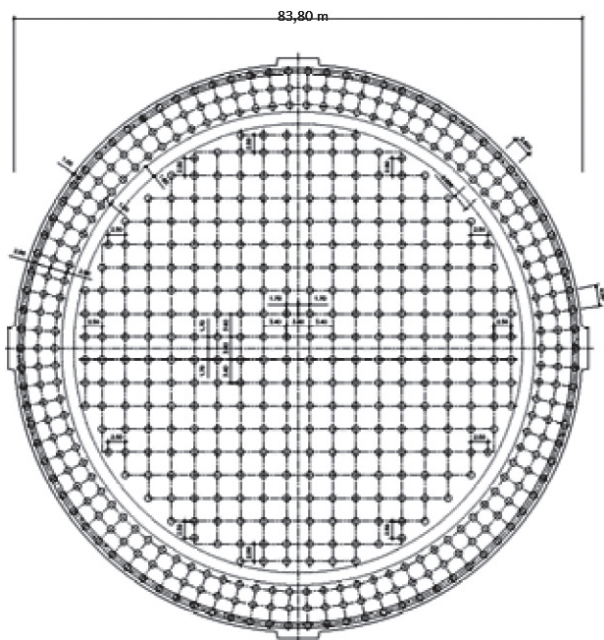
próbki pobranej na mokro. Dodatkowe badanie, polegające na obciążeniu statycznym kolumn wynoszącym 2500 kN, potwierdziło odpowiednie parametry wytrzymałościowe kolumn CSM. Mieszanie wgłębne na mokro tą metodą pozwala znacznie poprawić parametry wytrzymałościowe plastycznych iłłów i luźnych piasków. Ich nośność może się zwiększyć od 10 kPa do 2 MPa. Wykonywanie kolumn CSM zilustrowano na rys. 3.

• **Posadowienie pośrednie zbiornika na palach (Indie).** W Indiach pierwszy terminal LNG wybudowano w 2004 r. w Dahej. Na terenie terminalu zaprojektowano i wykonano dwa zbiorniki pełnokomorowe do przechowywania gazu o pojemności 160 000 m³ każdy [6]. Zbiorniki mają średnicę zewnętrzną 83,8 m i wysokość 63,5 m. Płytę fundamentową grubości 1,0 m (wyniesioną 2,0 m nad poziom terenu) i ściany zewnętrzne zbiornika



Rys. 3. Wykonywanie kolumn CSM (według [5])

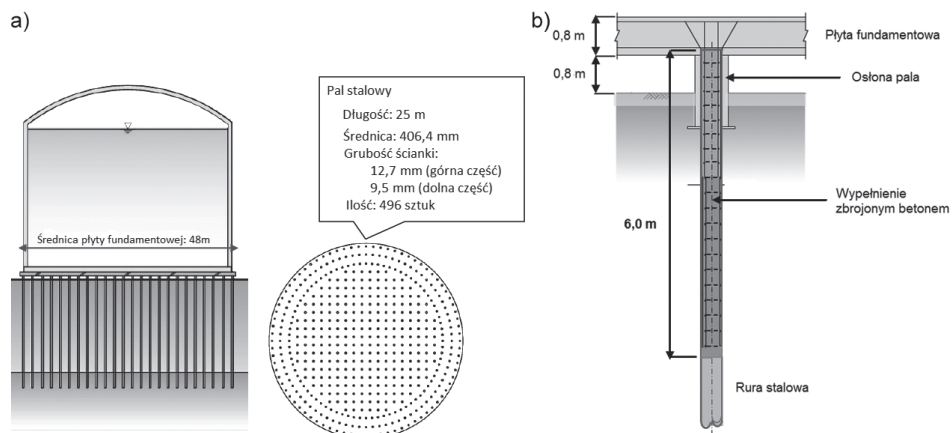
wykonano z betonu sprężonego. Dach zbiornika stanowi sferyczna kopuła żelbetowa. Zbiornik wewnętrzny wykonano ze stali niklowej (9%). Pomiedzy zbiornikami zastosowano izolację termiczną. W pracy [6] podano, że w podłożu, do głębokości około 31,0 m p.p.t. występują stosunkowo „słabe” warstwy gruntów: luźne piaski oraz plastyczne pyły i ropy. Niżej zalegają dobrze zagęszczone piaski. Zbrojenie górne płyty fundamentowej wykonano ze specjalnej stali kriogenicznej, odpornej na niskie temperatury. Płytę oparto na 578 palach wierconych średnicy 1,0 m i długości około 36,0 m (łącznie z fragmentem pala ponad powierzchnią terenu). Rozmieszczenie pali pod płytą fundamentową przedstawiono na rys. 4. Zbiornik nie ma dennej instalacji grzewczej, ponieważ powietrze atmosferyczne może swobodnie cyrkulować pomiędzy płytą i gruntem i nie ma ryzyka przemarzania płyty fundamentowej. Wartości sił przekazywanych na pale obliczono, uwzględniając różne kombinacje obciążeń (w tym oddziaływań sejsmicznych); ustalono maksymalne wartości dla stanu granicznego nośności (ULS) i stanu granicznego użytkowalności (SLS). Przeprowadzone obliczenia i analizy wykazały, że fundament palowy spełnia wymagania stanu granicznego nośności i użytkowalności, pod działaniem zarówno obciążeń pionowych, jak i poziomych.



Rys. 4. Plan rozmieszczenia pali pod płytą fundamentową, Dahej LNG Terminal (według [6])

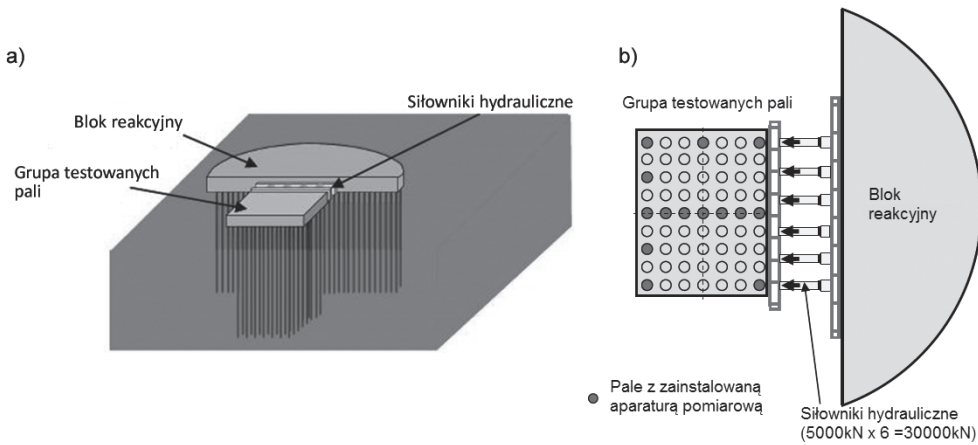
• **Analiza posadowienia zbiornika na palach (Japonia).** Jednym z pierwszych w Japonii był terminal Senboku 1 w Osace, oddany do użytku w 1972 r. [7]. Składał się on z czterech zbiorników, każdy pojemności 45 000 m³. Zbiorniki wykonano, stosując podwójny stalowy płaszcz, co w tamtym okresie było

Rys. 5. Osaka Gas LNG Terminal: a) przekrój zbiornika i schemat rozmieszczenia pali, b) szczegóły konstrukcyjne głowicy pala stalowego (na podstawie opracowania [7])



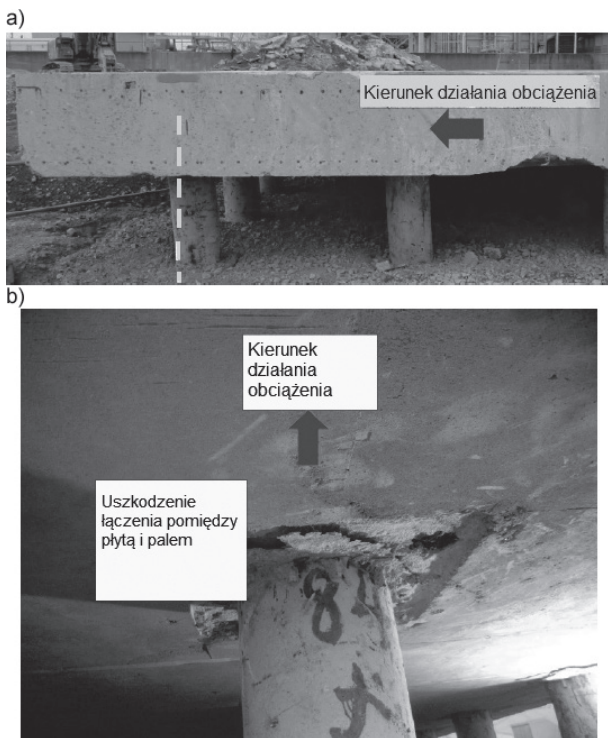
rozwiązaniem standardowym. Po 40 latach użytkowania zdecydowano zdemontować stare zbiorniki i w ich miejsce wybudować nowe, odpowiadające obecnym standardom zbiorników LNG. Po demontażu zbiorników przeprowadzono badania obciążeniowe fundamentów. Miały one na celu analizę rzeczywistej nośności ze względu na oddziaływanie sił poziomych, stanu uszkodzeń fundamentu oraz zachowania fundamentu posadowionego na palach. Fundament każdego zbiornika stanowiła żelbetowa płyta fundamentowa średnicy 48 m i wysokości 0,8 m, posadowiona na 496 palach długości 25 m i średnicy 406,4 mm (rys. 5a). Były to pale z rur stalowych o ściance grubości 12,7 mm w górnej części i 9,5 mm w części dolnej, wewnątrz zbrojone i wypełnione betonem do głębokości 6,0 m, licząc od głowicy pala (rys. 5b). Płyta fundamentowa została wyniesiona 0,8 m nad powierzchnię terenu. Fundamenty zbiorników zaprojektowano tak, aby przenosiły obciążenia pionowe od ciężaru własnego zbiornika i jego wypełnienia oraz obciążenia poziome wynikające z działania sił bezwładności występujących w trakcie trzęsień ziemi.

Do badań obciążeniowych przygotowano dwa wycięte fragmenty istniejącej płyty fundamentowej. Większy z nich, stanowiący około połowy płyty fundamentowej, stanowił blok reakcyjny – oparcie siłowników hydraulicznych, wywierających nacisk na badany element. Mniejszy, prostokątny o wymiarach 7 × 9 rzędów pali (łącznie 63 pale), wykorzystano do badania nośności grupy pali (rys. 6a). Schemat obciążenia badanej grupy pali przedstawiono na rys. 6b. Do badanego fragmentu płyty posadowionej na grupie 63 pali przyłożono siłę poziomą 30 MN, stanowiącą prawie dwukrotność projektowanej nośności fundamentu, równej 15,5 MN. Obciążenie zrealizowano za pomocą sześciu siłowników hydraulicznych o sile 5000 kN każdy, ustawionych w rzędzie pomiędzy badanym elementem a blokiem reakcyjnym. Obciążenie zwiększano stopniowo, przykładając kolejno siły 4, 8, 12, 16, 20 i 30 MN. W trakcie badania wyraźne zwiększenie przemieszczenia nastąpiło przy sile równej 25,4 MN. Przy tej sile zakończono badanie, przyjmując, że jest to maksymalne obciążenie, jakie fundament mógł przenieść. Obciążenie to było 1,64 razy większe od obciążenia projektowego. Maksymalne przemieszczenie płyty fundamentowej wyniosło 265 mm przy przyłożonym maksymalnym obciążeniu. Po zdjęciu obciążenia przemieszczenie zmniejszyło się do 200 mm, pozostając na stałym poziomie. Skutki przyłożonego obciążenia poziomego można było zaobserwować naocznie. Deformacji uległy szczególnie najwyższe fragmenty pali, w pobliżu przyłożonego obciążenia (rys. 7a).



Rys. 6. Badanie płyty fundamentowej: a) grupa testowanych pali i blok reakcyjny, b) schemat obciążenia badanej grupy pali (według [7])

Uszkodzenia fundamentu pojawiły się w miejscu połączenia pala z płytą fundamentową. Po zdjęciu obciążenia otulina betonowa uległa częściowemu wykruszeniu (rys. 7b). Nie zaobserwowano poważniejszych uszkodzeń fundamentu palowego. Przeprowadzone badanie wykazało, że fundamenty analizowanego zbiornika zaprojektowano z dużym zapasem nośności.

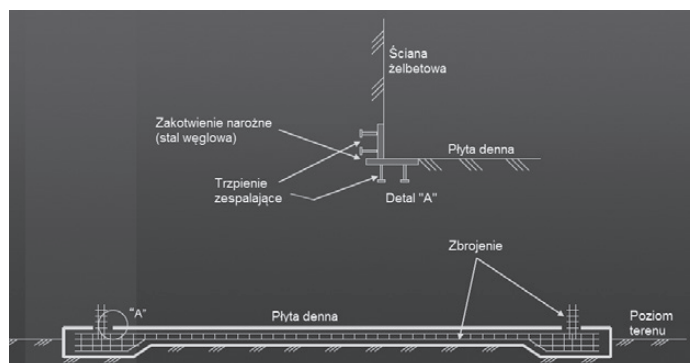


Rys. 7. Płyta fundamentowa na palach: a) deformacja górnej części pala, b) uszkodzenie łączenia płyty i pala (według [7])

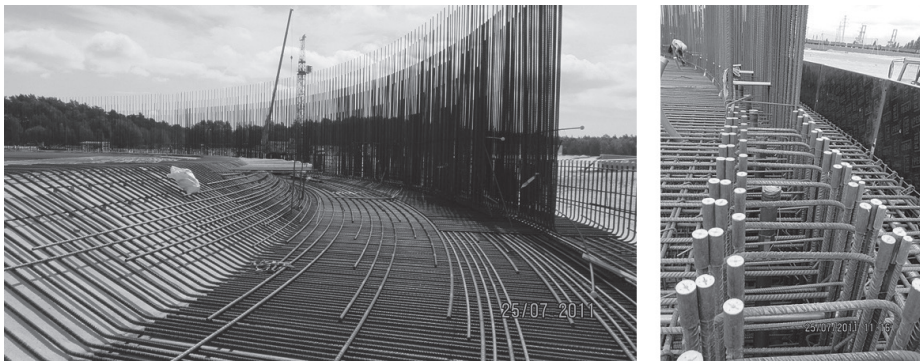
• **Posadowienie zbiorników LNG terminalu w Świnoujściu.** W roku 2008 podjęto decyzję o budowie pierwszego terminalu LNG w Polsce, służącego do odbioru i regazyfikacji skroplonego gazu ziemnego. Kluczowymi elementami tej inwestycji są dwa zbiorniki o pojemności 160 000 m³ każdy. Są to nowoczesne zbiorniki zbudowane według technologii full containment („zbiornik w zbiorniku”). Część wewnętrzna zbiornika jest wykonana ze stali niklowej, odpornej na pęknięcie w niskich temperaturach, część zewnętrzna – z betonu sprężonego. Warstwa izolacyjna składa się z perlitu i włókna szklanego. W celu

redukcji ryzyka spadku temperatury podłoża pod fundamentem jako izolację zastosowano włókno szklane oraz elektrycznie podgrzewaną płytę denną. Terminal w Świnoujściu jest pierwszym tego rodzaju obiektem w Europie Środkowo-Wschodniej i w rejonie Morza Bałtyckiego. Początkowo terminal ma dostarczać 5 mld m³ gazu ziemnego rocznie. Według informacji w opracowaniu [8] w przyszłości jest planowana jego rozbudowa (dodatkowy zbiornik) i osiągnięcie zdolności do odbioru 7,5 mld m³ rocznie, co stanowi obecnie 50% rocznego zapotrzebowania

Polski na gaz ziemny. Każdy z dwóch istniejących zbiorników ma średnicę zewnętrzną 79,1 m, wysokość ścian 42,9 m, wysokość razem z kopułą żelbetową – 54,0 m. Ściany zbiornika żelbetowego mają grubość 0,80 m. Na obwodzie znajdują się cztery pilastry usytuowane na osiach 45°, 135°, 225° i 315°. Konstrukcja jest sprężana zarówno w kierunku poziomym, jak i pionowym. Na budowę całego zbiornika zużyto 15 700 m³ betonu i 2650 t stali zbrojeniowej. Fundamenty obu zbiorników LNG zaprojektowano w postaci żelbetowych płyt z betonu sprężonego, z dodatkowymi pierścieniami zewnętrznymi. Zostały one oparte na podbudowie betonowej, na której wykonanie zużyto 19 000 m³ betonu na powierzchni 11 000 m². Daje to warstwę betonu grubości około 1,7 m. Płyta fundamentowa jest konstrukcją częściowo wyniesioną powyżej powierzchni terenu i częściowo zagłębioną w gruncie (rys. 8). Na wykonanie płyty dennej i pierścienia zewnętrznego jednego zbiornika zużyto 4500 m³ betonu i 910 t stali zbrojeniowej. Zgodnie z informacjami zamieszczonymi na stronie internetowej firmy Polskie LNG, proces betonowania elementów fundamentów poprzedziło wiele prób wykonawczych, przeprowadzonych na specjalnie wybudowanej na terenie inwestycji makiecie fragmentu pierścienia zewnętrznego, zaprojektowanej w skali 1:1. Makieta posłużyła wykonawcom do przygotowania ostatecznej techniki wykonania prac związanych ze zbrojeniem i betonowaniem fundamentu zbiornika, aby uniknąć ewentualnych nieprawidłowości. Zbrojenie płyty fundamentowej zilustrowano na rys. 9. Badaniom poddano również beton w komorze chłodniczej, gdzie w niskiej temperaturze sprawdzano jego wytrzymałość. Z powodu wysokiego poziomu wody gruntowej niezbędne było



Rys. 8. Schemat płyty dennej zbiornika LNG (według [10])



Rys. 9. Zbrojenie płyty dennej zbiornika (ze strony internetowej Polskie LNG)

wykonanie odwodnienia całej budowy na powierzchni około 450 000 m² do głębokości 7 m poniżej poziomu terenu. Zastosowano tu metodę drenaży próżniowych. Wykonano około 10 000 m drenażu, wraz z instalacją odprowadzającą wodę rurociągiem zrzutowym do morza. Budowę terminalu ukończono w 2015 r., a pierwsze dostawy LNG z Kataru przyjęto pod koniec 2015 r.

Podsumowanie

Zbiorniki LNG jako kluczowe obiekty terminali są specyficznymi konstrukcjami, wymagającymi spełnienia restrykcyjnych warunków dotyczących osiadań, różnicy osiadań i przechylenia konstrukcji. Lokalizacja terminali na terenach nadmorskich o wyjątkowo niekorzystnych warunkach hydrogeologicznych (zaleganie w podłożu do znacznych głębokości nienośnych, ściśliwych gruntów, wysoki poziom wody gruntowej) uniemożliwia posadowienie zbiorników w sposób bezpośredni bez specjalnych zabiegów. Sytuację komplikuje dodatkowo ewentualne czasowe zalewanie terenu przeznaczonego pod zabudowę wodami napływowymi. W rejonach czynnych sejsmicznie w projektowaniu tego rodzaju obiektów należy dodatkowo przeprowadzić analizę oddziaływań sejsmicznych. Wieloletnie doświadczenia wielu wyspecjalizowanych firm, zebrane przy projektowaniu i realizacji zbiorników, wiele dostępnych technologii wzmocnienia podłoża oraz posadowienia

pośredniego umożliwiają budowanie skomplikowanych obiektów terminali LNG praktycznie w dowolnych lokalizacjach. Bariera mogą być tylko koszty inwestycji. Jak podano w opracowaniu [9], obecnie realizowane terminale, w tym nasz krajowy terminal w Świnoujściu, są wykonywane według najwyższych standardów jakościowych, w harmonii z otoczeniem oraz zgodnie z wszystkimi wymaganiami prawa w zakresie ochrony środowiska.

PIŚMIENICTWO

- [1] *Trzop S.*: Technologie budowy i eksploatacja terminali LNG. ST-Energy Consulting, 2011.
- [2] *Łacjak M.*: Techniczne i technologiczne problemy eksploatacji terminali rozładunkowych LNG. „Wiertnictwo Nafta Gaz”, zeszyt 3/2011.
- [3] *Borsboom M., Hoefsloot F.J.M., Vanden Berghe F.*: Foundation Options for LNG Tanks. Geotechniek ECSMGE, Madrid 2007.
- [4] Capco-CLP Power. Tank Technology Selection Study For the Hong Kong LNG Terminal. Hong Kong, 2006. <http://www.epd.gov.hk/eia/register/report/eiareport>.
- [5] *Chapman G.A., Denny R.J., Knowles M., Uren J.G.*: Cutter soil mixed columns for an LNG Export Tank Foundation. Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing. New Orleans, Louisiana, United States, 2012.
- [6] *Mart J., Martinez F., Kanekura T., Takuwa D.*: Design and verification of the foundations of the Dahej LNG tanks. Singh Petronet LNG, Delhi, India (2008). <http://oa.upm.es/4050/1/INVE.MEM.2008.58057.pdf>.
- [7] *Ohnishi S., Nishizaki T., Akutsu T., Kubota S.* (2006): Study on behavior of an LNG tank foundation under the ultimate limit state using a demolished tank”. 23rd World Gas Conference (2006). http://www.gastechnology.org/Training/Documents/LNG17-proceedings/Storage-7-Shunsuke_Ohnishi.pdf.
- [8] *Sumara A.*: Pierwszy polski terminal LNG. „Paliwa i Energetyka”, nr 1/2006. http://wydawnictwo.inzynieria.com/cat/93/mag_id/9/art/32166/w/151/a/archiwum/module_id/143/pierwszy-po.
- [9] *Zajdler R.*: Polski gazoport liderem na Bałtyku. LNG SNAPSHOT. 24 lipca 2015. <http://lngsnapshot.com/?p=17>.
- [10] Sofregaz. Large Cryogenic above ground LNG Tank Full Containment. Typical Construction Sequence. <http://indico.cern.ch/event/124959/session/4/contribution/30/material/slides/3.pdf>; www.polskielng.pl.