

Spinnaker – projekt konstrukcji budynku wysokościowego

Mgr inż. Michał Grochowicki, Fort Polska Sp. z o.o.

1. Wprowadzenie

W artykule przedstawiono podstawowe informacje na temat zaprojektowanego przez firmę Fort Polska Sp. z o.o. konstrukcji wysokiego budynku Spinnaker zlokalizowanego w Warszawie. Opisane zostały przyjęte ustroje konstrukcyjne, rozwiązania materiałowe oraz założenia do obliczeń statyczno-wytrzymałościowych ze zwróceniem szczególnej uwagi na obciążenie wiatrem budynku wysokiego.

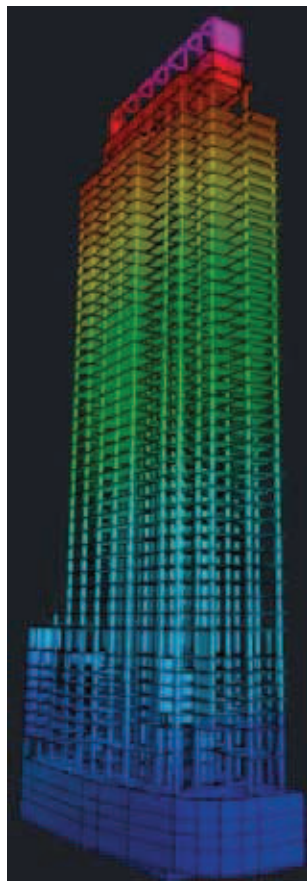
2. Opis konstrukcji obiektu

Jednym z wyzwań, jakiego mieliśmy okazję sprostać jako zespół projektowy w biurze Fort Polska, było zaprojektowanie wysokościowca Spinnaker. Inwestorem jest firma Ghelamco Poland, autorem architektury firma PBPA Projekt Sp. z o.o. Budynek położony jest w centrum Warszawy i ma 3 kondygnacje podziemne, 45 naziemnych oraz przestrzeń techniczną na samym szczycie. Wysokość obiektu do dachu wynosi 173 m. Powyżej znajduje się przestrzeń techniczna. Podział funkcjonalny poszczególnych kondygnacji budynku przedstawiono

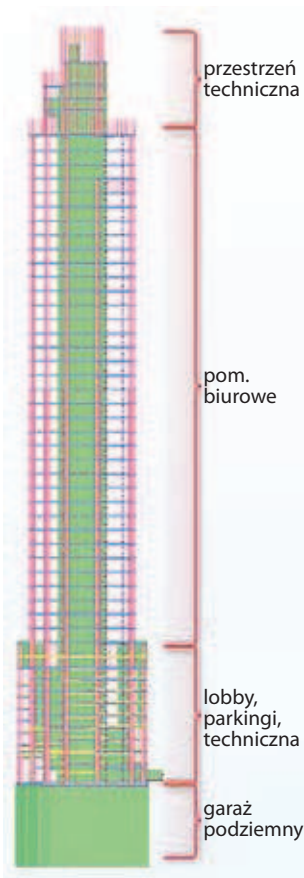
na rysunku 2. Kształt budynku w rzucie jest zbliżony do prostokąta o wymiarach w osiach podziemnych ścian szczelinowych $\sim 86 \times 35$ m. Od kondygnacji L10 wwyż wymiary te ulegają zmniejszeniu do $\sim 76 \times 29$ m. W budynku nie zaprojektowano dylatacji. Głównym ustrojem nośnym jest wewnętrzny trzon żelbetowy oraz słupy w siatce $8,75 \times 8,75$ m. Trzon o wymiarach $\sim 13 \times 33$ m składa się ze ścian żelbetowych grubości od 25 do 70 cm i gwarantuje sztywność przestrzenną budynku. Od poziomu L32 trzon zostaje częściowo zmniejszony poprzez zastąpienie jednej sekcji wind powierzchnią wykorzystaną na sanitariaty.

Zaprojektowano żelbetowe stropy płaskie wsparte na żelbetowych słupach zbrojonych systemem prętów gwintowanych ze stali SAS670 oraz A-IIIIN, gatunek B500SP. Zastosowano betony klasy C35/45 na fundament i stropy oraz C50/60 na wszystkie słupy i ściany do kondygnacji L04. Powyżej ściany z betonu klasy C35/45.

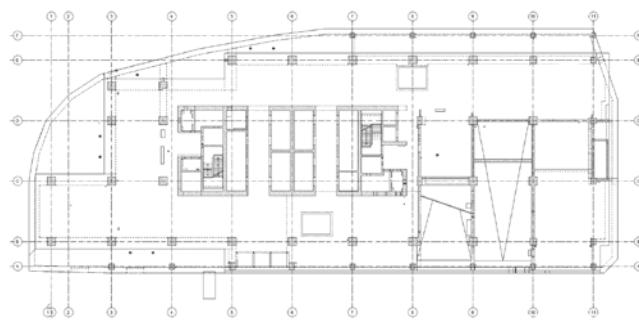
Część podziemną składającą się z 3 kondygnacji ograniczają po obwodzie ściany szczelinowe, które stanowią zabezpieczenie wykopu podczas jego głębienia. Żelbetowy trzon oraz słupy konstrukcyjne opierają się na fundamencie zespolonym z płyty fundamentowej oraz baret, czyli odcinków ściany szczelinowej o wymiarach $3,4 \times 0,8$ m. Tak zaprojektowany fundament gwarantuje małe osiadania (wg obliczeń osiadanie bez baret ~ 9 cm, z baretami ~ 4 cm) [8]. Projekt wykonawczy i wykonawstwo ścian szczelinowych oraz baret powierzono firmie Keller Polska Sp. z o.o. Zasadnicza grubość płyty fundamentowej wynosi



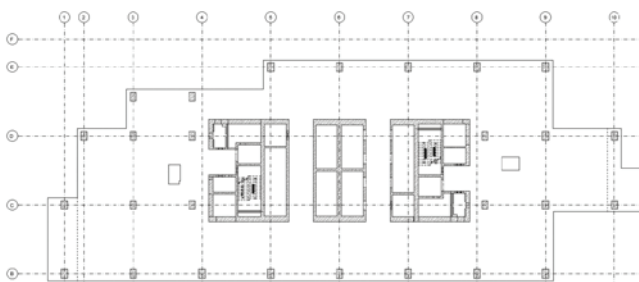
Rys. 1. Widok 3D [1]



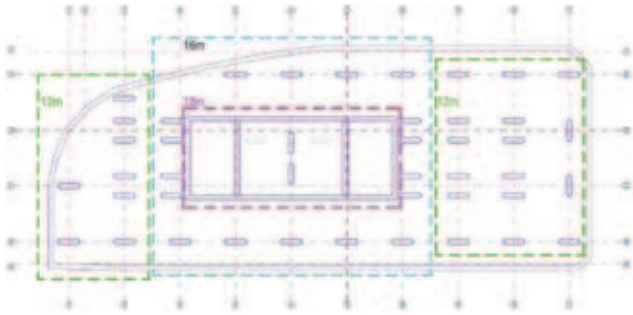
Rys. 2. Podział funkcjonalny obiektu



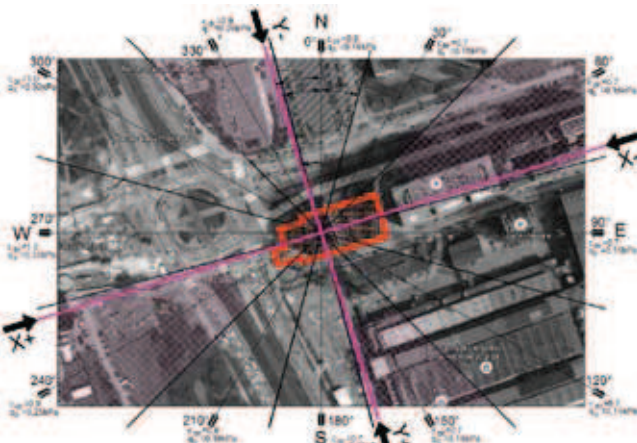
Rys. 3. Rzut kondygnacji L00 [1]



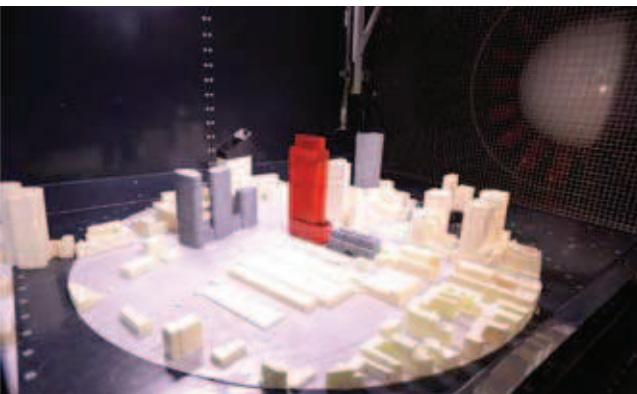
Rys. 4. Rzut kondygnacji powtarzalnej, biurowej [1]



Rys. 5. Rzut fundamentu, układ baret wraz z długościami [2]

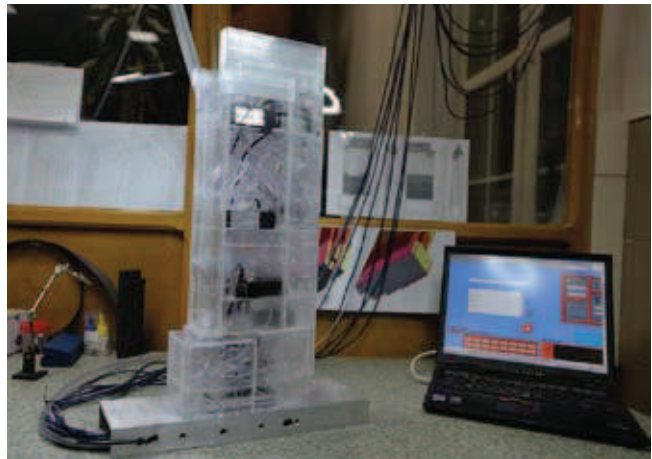


Rys. 6. Usytuowanie obiektu względem kierunków geograficznych [1]

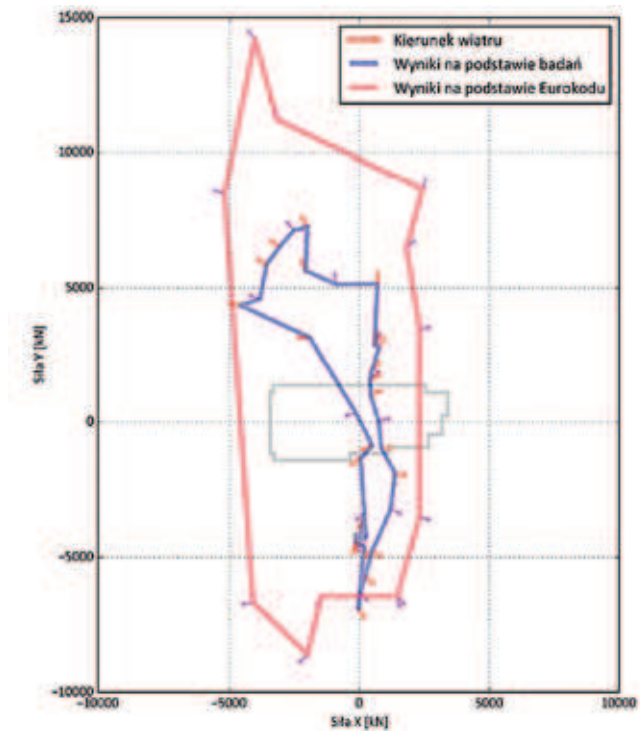


Rys. 7. Model badanego budynku (Spinnaker na czerwono) wraz z otaczającą zabudową zainstalowany w przestrzeni badawczej tunelu aerodynamicznego – widok z kierunku południowo-zachodniego [3]

280 cm. Pod trzonem znajdują się liczne przegłębienia dostosowane do funkcji pomieszczeń, w związku z czym grubość płyty jest tutaj bardzo zróżnicowana: od ~200 do ~600 cm. W zależności od lokalizacji i strefy płyta została odpowiednio dobrojona z uwagi na przebieg oraz siły ścinające. Ze względu na masywność fundamentu zalecono dobór takiej receptury i technologii betonowania, aby podczas wiązania cementu temperatura wewnątrz płyty nie przekroczyła 65°C, a gradient temperatury pomiędzy warstwą środkową a zewnętrzną nie był większy niż 20° [9].



Rys. 8. Model budynku wraz z zainstalowanymi skanerami [3]



Rys. 9. Porównanie sił wypadkowych F_x i F_y działających na konstrukcję budynku; autor: dr inż. Grzegorz Kimbar na podstawie wyników badań doświadczalnych oraz obliczeń obciążeń normowych wykonanych przez Pro-Invest Sp. z o.o. [4]

3. Obciążenie wiatrem

Najważniejszym obciążeniem wymiarującym trzon, tj. główny ustrój nośny i sztywnościowy jest obciążenie od wiatru. Na potrzeby projektu wykonawczego w Instytucie Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej Politechniki Warszawskiej zrealizowano badania w tunelu aerodynamicznym, na podstawie których opracowano m.in. szczegółowe wytyczne obciążeniowe dla projektanta. Podczas badań uwzględniono wpływ istniejącego otoczenia w promieniu 500 m, a także

wpływ obiektów wysokościowych, które aktualnie są realizowane w bliskim otoczeniu Spinnakera. Badania zostały przeprowadzone dla 36 kierunków wiatru.

Punkty o współrzędnych równych składowym siły wypadkowej F_x oraz F_y , prostopadłym do fasad budynku przedstawia rysunek 9. Kierunki wiatru zaznaczono strzałkami. Z powyższego porównania widać wyraźnie duży wpływ otaczających budynków na uzyskane wyniki doświadczalne. Wpływ ten nie jest uwzględniany w warunkach normowych. Największe różnice występują przy analizie oddziaływania wiatru z kierunku północnego przy kątach: 300° , 340° , 0° , w przypadku przestaniania budynku Spinnakera przez wysokościowiec Warsaw Spire. Natomiast od strony, gdzie nie ma wysokich budynków, które mogłyby przestaniać budynek Spinnakera, różnice w wartościach siły F_y , równoległej do kierunku wiatru z kierunku południowo-wschodniego przy kątach: 90° , 120° , 160° są znacznie mniejsze i bardziej zbliżone do wyników uzyskanych z badań w tunelu aerodynamicznym. Duży wpływ otaczającej zabudowy ujawnia się natomiast przy analizie obciążeń budynku przy kątach wiatru 210° , 240° , 270° , a występujące różnice w wielkościach sił są już znaczne. Omawiane różnice pomiędzy analizowanymi obciążeniami od wiatru wynikają z faktu, że badania modelowe obciążenia wiatrem konstrukcji Spinnakera prowadzone były w tunelu aerodynamicznym w obecności sąsiadującej zabudowy w promieniu 500 m. W obciążeniach normowych natomiast sąsiadująca zabudowa nie jest w ogóle uwzględniana i dlatego obciążenia te nie są miarodajne [4]. Innymi przyjętymi obciążeniami poza stałymi i eksploatacyjnymi są:

- obciążenia od temperatury dla otwartych garaży pomiędzy kondygnacją L00 a L09,
- uderzenie pojazdu poruszającego się w ruchu miejskim w słupy zewnętrzne w poziomie L00,
- uderzenie pojazdu poruszającego się w garażu w każdy słup,
- obciążenia wynikające z imperfekcji geometrycznych,
- uwzględnienie globalnych efektów II rzędu,
- obciążenia technologiczne podczas wznoszenia obiektu,
- konsekwencje lokalnego zniszczenia np. słupa, ściany, stropu (wg przyjętej strategii dla zabezpieczenia przeciwko katastrofie postępującej).

4. Sposób zabezpieczenia konstrukcji budynku przed katastrofą postępującą

Przyjęto następującą strategię dla zabezpieczenia przeciwko katastrofie postępującej. Jako elementy kluczowe przyjęto ściany trzonu na całej wysokości obiektu, ściany tarcz w osiach D/3 i D/4m oraz słupy w osiach B, C, D, E na całej wysokości obiektu. Zakłada się, że w przypadku katastrofy elementy kluczowe nie mogą być naruszone. Na etapie projektu wykonawczego te elementy zwymiarowano zgodnie z normą PN-EN 1991-1-7:2008 *Oddziaływania na konstrukcje. Oddziaływanie ogólne. Oddziaływanie wyjątkowe*, punkt A.8 na oddziaływanie wyjątkowe równe $A_d = 34 \text{ kN/m}^2$. Obciążenie to potraktowano jako przykładowe niezależnie na każdej kondygnacji oddzielnie. Zalecono, by na etapie

wykonawstwa szczególnie zadbano o jakość wykonania elementów kluczowych.

Założono, że każdy pozostały element nie kluczowy może być utracony, ale jednorazowo tylko jeden z nich. Obciążenia z utraconego elementu (słup w osi A lub F, przeszło płyty) przenieść ma układ cięgnowy (metoda więzi łączących). W projektowanym budynku nie stosuje się układów ścianowych zdolnych przenieść obciążenia z kondygnacji powyżej utraconego słupa, dlatego stosuje się zasadę, że odkształcenia po utracie słupa mogą propagować się na całą wysokość powyżej awaryjnego miejsca. W takiej sytuacji każda z kondygnacji musi przenieść obciążenie na nią przypadające [13].

Wymiarowanie elementów konstrukcji uwzględnia następujące przypadki wyjątkowe:

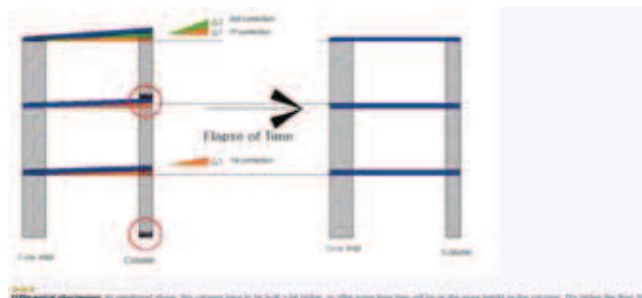
- zniszczenie płyty stropowej w przęśle (pole wewnętrzne, pole skrajne),
- zniszczenie jednego dowolnego słupa podpierającego w osi A i F.

5. Uwzględnienie skrócenia słupów

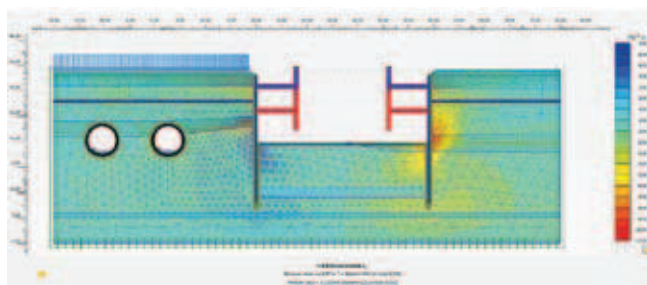
Podczas projektowania i wznoszenia budynków wysokich należy wziąć pod uwagę efekt skrótu konstrukcji. W nomenklaturze budynków wysokich skrót nazywamy odkształcenia w kierunku pionowym obliczane głównie dla słupów i ścian. Rozróżnia się skrót sprężysty – odkształcenia sprężyste: P/EA – które zależą wprost od obciążenia, wymiarów konstrukcji i cech materiałowych oraz skrót od skurczu i pęcznienia. Te ostatnie w konstrukcjach żelbetonowych są zależne od kilkunastu zmiennych, m.in. wilgotności i temperatury powietrza podczas wysychania betonu, rodzaju cementu, czasu przyłożenia obciążenia, poziomu obciążenia, wymiarów elementu. Cała analiza skrótów musi uwzględniać funkcję czasu, począwszy od wznoszenia obiektu oraz jego powolnego obciążania. Jako że efekt ten zależy m.in. od wartości występujących naprężeń oraz geometrii elementów, w budynkach wysokich obserwuje się duże różnice skrótów pomiędzy trzonem a słupami wewnętrznymi bądź skrajnymi. Z tego powodu wynikiem analiz są zazwyczaj wartości kompensacji skrótów zadanych w celu ich eliminacji po upływie czasu.

Istotą zagadnienia obrazują przedstawione schematy zaczerpnięte z literatury (rys. 10).

W praktyce oznacza to, że płytę stropową wylewa się na budowie z zadaniem spadkiem najczęściej w stronę trzonu (słupy zewnętrzne wykonuje się wyższe o około 2–3 cm, wartości



Rys. 10. Schemat obrazujący zagadnienie skrócenia wysokich konstrukcji [14]



Rys. 11. Mapy przemieszczeń poziomych terenu po wykonaniu wykopu [1]

wynikają ze szczegółowych obliczeń i są różne na słupach i na kondygnacjach). Podczas kolejnego obciążania niższych słupów przez budowanie wyższych pięter, a także zachodzących zjawisk reologicznych (skurcz i pełzanie) dany słup skraca się, a strop dąży do niwelowania zadanego wstępnie spadku [6, 7, 11]. W projekcie Spinnakera przeprowadzono analizę uwzględniając:

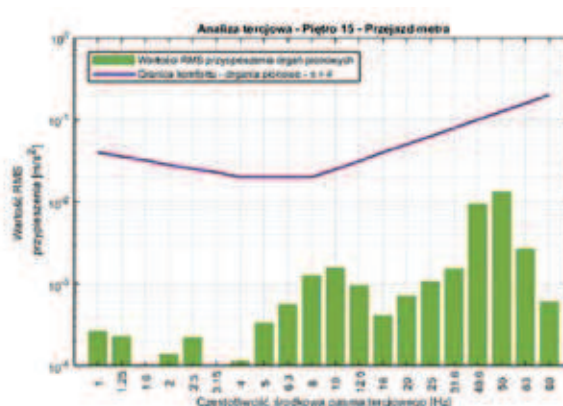
- skrót sprężysty wszystkich słupów oraz dziesięciu punktów trzonu, w tym jego narożniki,
- skrót reologiczny w tym od skurczu i pełzania w funkcji czasu,
- osiadanie budynku w funkcji czasu,
- naddatki realizacyjne na każdej kondygnacji uwzględniające trwające etapowo: skurcz, pełzanie, osiadanie oraz skrót sprężysty w miarę narastania obciążeń,
- wieloetapowość obciążenia wg wstępnego harmonogramu budowy.

6. Uwzględnienie oddziaływania metra na konstrukcję budynku

Ponieważ lokalizacja obiektu znajduje się w bliskim sąsiedztwie II linii metra (odległość pomiędzy tunelem a ścianą szczelinową wynosi 14,2 m), należało wykonać dwie istotne analizy.

Jedną z nich jest wpływ głębokiego wykopu na stateczność tuneli metra. Za pomocą programu do analiz geotechnicznych Plaxis uzyskaliśmy wyniki potwierdzające, że zarówno podczas głębenia wykopu, jak i w fazie eksploatacji obiektu odkształcenia ściany szczelinowej nie spowodują niedopuszczalnych przemieszczeń tuneli.

Drugą analizą, jaką należało wykonać, był wpływ drgań od metra na budynek oraz ich odczuwalność przez ludzi znajdujących się w budynku. Pomiaru drgań wywołanych zarówno przejazdem metra, jak i ruchem komunikacyjnym dokonał zespół z Politechniki Gdańskiej [5], przekazując projektantowi wymuszenia dynamiczne na każdym z kierunków X, Y, Z. Podczas analizy numerycznej przeprowadzono szereg obliczeń dla różnych przypadków obciążeń dynamicznych. Wpływ drgań na budynek ujęto poprzez uwzględnienie sił z analiz dynamicznych w wymiarowaniu konstrukcji. W przypadku odczuwalności drgań przez ludzi, w wyniku analiz trójwymiarowych sygnałów przyspieszeń uzyskanych z obliczeń udowodniono, że na każdym piętrze mieszczą się one w granicy komfortu wyznaczonym przez normę PN-88/B-02171 *Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach*.



Rys. 12. Przykładowy wykres analizy trójwymiarowej dla piętra 15; przyspieszenia pionowe [1]

7. Podsumowanie

Projektowanie budynków wysokościowych wiąże się z rozwiązaniem wielu dodatkowych, ciekawych, choć złożonych zagadnień w porównaniu do obiektów, jakie najczęściej widzimy za oknem. Jest to też niewątpliwie praca zespołowa, która wymaga dużej determinacji w zdobywaniu najnowszej wiedzy światowej w zakresie inżynierii wysokościowej [10, 12].

OPRACOWANIA PROJEKTOWE

- [1] Projekt Wykonawczy Konstrukcji opracowany przez Fort Polska Sp. z o.o., ul. Nowotoruńska 8, 85-840 Bydgoszcz
- [2] Projekt Wykonawczy ściany szczelinowej na potrzeby budowy budynku biurowo-usługowego Spinnaker przy ul. Prostej/Towarowej w Warszawie. Projekt opracowany przez KELLER POLSKA Sp. z o.o., 05.2017 r.
- [3] Raport – Badania w tunelu aerodynamicznym oddziaływania wiatru na elewację i konstrukcję budynku wieżowego Spinnaker o wysokości 198 m w Warszawie, Politechnika Warszawska, kwiecień 2016 r.
- [4] Raport – Dodatkowe badania w tunelu aerodynamicznym oddziaływania wiatru na konstrukcję budynku wieżowego Spinnaker o wysokości 198 m w Warszawie, Politechnika Warszawska, maj 2017
- [5] Ekspertyza Techniczna – Pomiar drgań wywołane przejazdem metra oraz ruchem komunikacyjnym na ul. Prostej przy projektowanym budynku Spinnaker w Warszawie, Politechnika Gdańska, 2017

BIBLIOGRAFIA

- [6] Bazant Z. P. and Wittmann F. H., Creep and shrinkage in concrete structures, John Wiley & Sons, New York, 1982
- [7] Fintel M., Ghosh S.K., Iyengar H., Column shortening in tall structures, PCA, 1987
- [8] Głębokie posadowienia budynków wysokich, materiały z seminarium, Warszawa, 23 czerwca 2008 r.
- [9] Bajorek G., Pielęgnacja betonu w okresie dojrzewania, SPC, Kraków, 2017
- [10] Pawłowski A. M., Cała I., Budynki wysokie, OWPW, Warszawa, 2006
- [11] Seongdeok K., Jaesung Ch., Hakseong K., Inki K., Prediction and Compensation of Column Shortening for Bitexo Financial Tower, CTBUH 2011 Seoul Conference
- [12] Praca zbiorowa MPA The Concrete Centre and Federation international du beton (fib), Tall buildings, London, 2014
- [13] Starosolski W., Wieczorek B., Wieczorek M., Konstrukcje płytowo-słupowe. Zabezpieczenie przeciwko katastrofie postępującej, Biuletyn Techniczny nr 6, Centrum Promocji Jakości Stali
- [14] www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=474259&page=199, data dostępu 25.02.2018