

MODELE NUMERYCZNE W PROJEKTOWANIU STRUKTUR NOŚNYCH BUDYNKÓW WYSOKICH

JANUSZ RĘBIELAK

STRESZCZENIE

Artykuł przedstawia możliwości zastosowania modeli numerycznych i korzyści z tego płynących w projektowaniu systemów konstrukcyjnych budynków wysokich. Zostało to pokazane na przykładach autorskich propozycji kształtowania unikalnych form architektonicznych takich budynków przez zastosowanie nowatorskich układów struktur nośnych opracowanych również przez autora, których postacią są rezultatem odpowiedniego zastosowania formuły konstrukcyjnej struktur przestrzennych. Dla złożonych form systemów konstrukcyjnych zdefiniowano w języku programowania For-

mian stosowne modele numeryczne, których użycie znacząco usprawnia i przyspiesza proces projektowania oraz wznoszenia obiektów budowlanych. Przedstawiono także nowatorskie propozycje projektowania systemów fundamentowania, które umożliwiają bezpieczne posadowienie obiektów silnie obciążonych na gruntach o niewielkiej nośności oraz na terenach aktywnych sejsmicznie.

Słowa kluczowe: model numeryczny, Formian, architektura, budynek wysoki, system konstrukcyjny, fundament

NUMERICAL MODELS IN DESIGNING OF SUPPORTING STRUCTURES OF TALL BUILDINGS

ABSTRACT

The paper presents possibilities of applications of numerical models and advantages following from their applying in designing of bearing structures of tall buildings. There were presented on examples of the author's proposals of shaping of unique architectonic forms of such buildings possible to obtain by usage of innovative structural systems invented also by the author. Shapes of these bearing support systems are defined by suitable application of structural formula of the space structures. For complex forms of structural systems there were defined in programming language Formian their numerical models, appli-

cations of which make considerably streamlined and faster processes of their design and construction. There are also presented the innovative proposals of design of the foundation systems, which enables safe locations of heavily loaded objects on subsoils of very small load carrying ability as well as in the earthquake areas.

Key words: numerical model, Formian, architecture, tall building, structural system, foundation

Wstęp

Zastosowanie modeli numerycznych złożonych systemów konstrukcyjnych ułatwia proces projektowy obiektu budowlanego, który podlega częstym modyfikacjom podczas całego procesu inwestycyjnego. Współcześnie do najsprawniejszych należy

technologia komputerowa określana skrótem BIM pochodzącym z języka angielskiego i w oryginale określana mianem Building Information Modeling. W jej procedurach wewnętrznych stosuje się wiele metod budowania modeli numerycznych definiowanych za pomocą różnych języków programowania. Formian jest specjalnym rodzajem języka progra-

owania opracowanym na podstawie tzw. formex algebry¹, której pomysłodawcą jest prof. Hoshyar Nooshin ze Space Structures Research Centre na University of Surrey w Wielkiej Brytanii². Formian został pomyślany jako narzędzie dla sprawnego budowania modeli numerycznych prętowych struktur przestrzennych składających się z niekiedy bardzo dużej liczby komponentów. Modele numeryczne mogą być definiowane w Formianie za pomocą niemal dowolnej liczby parametrów, co pozwala na płynne dostosowanie kształtu projektowanej konstrukcji do aktualnych wymogów procesu projektowego. Struktury przestrzenne były od połowy XX wieku i są nadal stosowane głównie w konstrukcjach przekryć dachowych³, szczególnie o dużych rozpiętościach⁴. Istnieje wiele definicji struktury przestrzennej. Najprostsza i chyba najbardziej ogólna z nich, za taką określa konstrukcję zbudowaną z elementów rozmieszczonych w sposób równomierny w przestrzeni, gdzie sposób przekazywania sił między jej elementami składowymi odbywa się również w sposób przestrzenny⁵. Korzystne cechy struktur przestrzennych sprawiły, że ich formułę zaczęto stosować w konstrukcjach nośnych budynków wysokich. Przydatność języka programowania Formian, sprawdzona w przypadku projektowania przekryć dachowych, potwierdza się również w definiowaniu modeli numerycznych prostych oraz złożonych postaci proponowanych systemów konstrukcyjnych budynków wysokich⁶.

Elementy podstawowe języka programowania Formian

Matematyczną podstawą tego języka programowania jest wspomniana już *formex algebra* służąca do precyzyjnego określania położenia węzłów konstrukcji w przestrzeni trójwymiarowej i definiowania prostoliniowych połączeń między nimi, przez co jednocześnie określa się lokalizacje poszczegól-

nych prętów. Na przykład dla lokalizacji elementów na płaszczyźnie służą linie tzw. *normatowe*, których wzajemne konfiguracje i odległości między nimi określa projektant-programista. W pracy przyjęto stosować oryginalne terminy tego języka używane w języku angielskim, ponieważ jest to język, w którym opublikowane są podręczniki i artykuły dotyczące zastosowań Formianu⁷. Zwykle stosowana jest ortogonalna konfiguracja osi *normatowych*, które w typowym kartezjańskim układzie odniesienia mogą być identyfikowane z osiami x, y oraz z (il. 1). Numer osi *normatowej* nosi miano *uniple* (il. 2). Stosuje się typowe znaki klawiaturowe, którym przypisano określone operacje numeryczne. Pozycję każdego węzła określa sekwencja liczb rozdzielona przecinkami podawana w odpowiedniej kolejności i nosi ona nazwę *signet*. Jako pierwszy podaje się numer linii *normatowej* prostopadły do kierunku pierwszego. Na przykład położenie węzła A na płaszczyźnie określa *signet*: 1,2. Jeśli przykładowa płaszczyzna położona jest w przestrzeni trójwymiarowej na poziomie „0” to *signet* ten przypiera następującą postać: 1,2,0. Połączenie dwóch węzłów np. A oraz B za pomocą pręta definiuje się za pomocą tzw. *cantle* i w tym przypadku ma to następującą formę: [1,2;0,1]. Konfiguracja dwóch połączonych ze sobą prętów usytuowanych między węzłami A, B i C definiowana jest za pomocą formacji numerycznej określanej mianem *formex* (il. 2). Możliwe jest także matematyczne definiowanie modeli numerycznych dla elementów powierzchniowych. Dla różnych celów projektowych stosuje się odmienne funkcje począwszy od bardzo prostych należących do grupy tzw. *cardinal functions*, aż do bardzo złożonych takich, jak np. *polymation function* oraz *tractation function* umożliwiających parametryczne budowanie modeli numerycznych np. jedno- i wielowarstwowych kopuł geodezyjnych⁸. Matematyczna prostota języka programowania

¹ H. Nooshin, P. Disney, C. Yamamoto, *Formian*, Multi-Science Publishing Co. Ltd., Brentwood 1993.

² Warto nadmienić, że to znaczące w skali światowej centrum badawcze zostało założone w połowie lat 60. ubiegłego wieku przez prof. Zygmunta Stanisława Makowskiego.

³ M. Mengerlinghausen, *Raumfachwerke aus Stäben und Knoten*, Bauverlag, Wiesbaden, Berlin 1975.

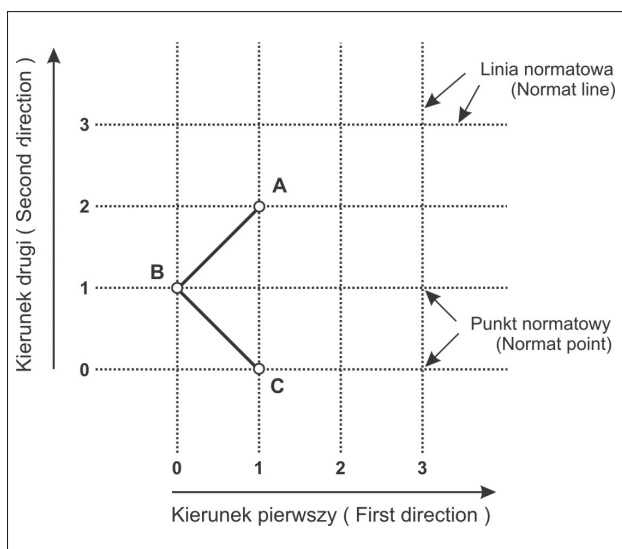
⁴ Pojęcie struktury przestrzennej było początkowo utożsamiane niemal wyłącznie z przestrzennymi konstrukcjami kratownicowymi. Stopniowo rozszerzono zakres jego stosowania na inne formy systemów konstrukcyjnych spełniających stosowną definicję.

⁵ Z. S. Makowski, *Analysis, design and construction of double-layer grids*, Applied Science Publishers, London 1981.

⁶ Modele numeryczne prezentowanych systemów konstrukcyjnych zostały przez autora zdefiniowane w Formianie i były podstawą do przygotowania wszystkich rysunków, ilustracji oraz wizualizacji prezentowanych w tej pracy, wykonanych także w zespołach projektowych kierowanych przez autora.

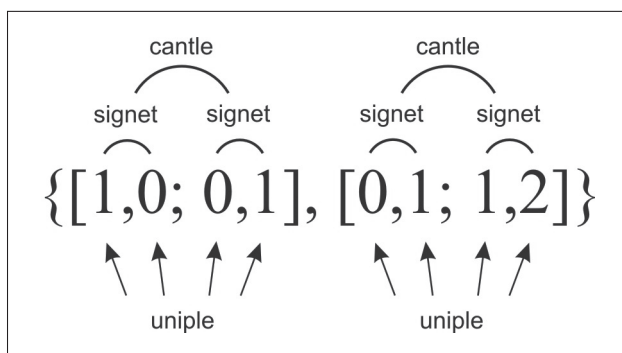
⁷ H. Nooshin, P. Disney, *Formex configuration processing III*, „International Journal of Space Structures”, t. 17, nr 1, 2002.

⁸ J. Rębielak, *Shaping of space structures. Examples of applications of Formian in design of tension-strut systems*, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.



1. Podstawowy układ odniesienia stosowany w *formex algebra*

1. Basic frame of reference applied in *formex algebra*



2. Przykładowa postać *formexu*

2. Example shape of a *formex*

Formian przyczyniła się do jego zastosowania jako specjalistycznego narzędzia numerycznego w procesach projektowania innych rodzajów skomplikowanych struktur nośnych, w tym także budynków wysokich⁹.

Wymagania ogólne dotyczące konstrukcji nośnej budynku wysokiego

Budynki wielopiętrowe są wznoszone od bardzo dawna i pełną różną funkcje użytkowe¹⁰. Istnieje

wiele równoprawnych definicji budynku wysokiego. Najogólniej takim mianem można określić obiekt wielopiętrowy, którego wysokość jest kilkukrotnie większa od wymiaru krótszego boku jego podstawy. Niekiedy za umowną przyjmuje się przyjętą na przykład wysokość 75 lub 100 metrów, powyżej której obiekt uważa się za wysoki lub wysokościowy. Dynamiczny rozwój współczesnych budynków wysokich datuje się od około połowy XIX wieku, kiedy to Elisha Otis opracował bezpieczny system transportu pionowego za pomocą wind i jednocześnie, niemal w tym samym czasie zaczęto stosować stal jako podstawowy materiał konstrukcyjny takich budynków. Nowe gatunki betonu wprowadzone szerzej do przemysłu budowlanego w ostatniej dekadzie XX wieku także wpłynęły na ewolucję form systemów konstrukcyjnych tego typu obiektów¹¹.

Konstrukcja nośna budynku wysokiego powinna jednocześnie odznaczać się dwiema przeciwstawnymi cechami. Z jednej strony taka konstrukcja musi charakteryzować się dużą sztywnością i umożliwiać bezpieczne przejmowanie obciążeń o bardzo dużych wartościach oraz przekazywać je na podłoże za pomocą stosownego systemu fundamentowego¹². W przypadku budynku wysokiego decydującą rolę odgrywają obciążenia poziome spowodowane parciem i ssaniem wiatru. Z drugiej strony ta sama konstrukcja powinna odznaczać się pewną elastycznością i odpowiednią podatnością na odkształcenia, co jest korzystną cechą w przypadku wystąpienia obciążeń wyjątkowych takich, jak np. trzęsienia ziemi. Podatność ta jest jednak ograniczana dopuszczalnymi odchyleniami szczytów obiektów, dawniej określanymi najczęściej na wartość równą 1/500 ich wysokości, a ostatnio rygorystycznie ograniczoną do 1/1000 wysokości budynku ponad otaczający go teren. Zagadnienia odporności ogniowej konstrukcji oraz zapewnienie alternatywnych dróg ewakuacji podczas pożaru należą do zestawu wielu trudnych problemów projektowych, które muszą być rozwiązane tak, aby spełnić wszystkie stosowne wymagania.

⁹ W skład osobowych dużych firm projektowych zajmujących się przygotowaniem dokumentacji dla dużych i złożonych inwestycji, gdzie istnieje konieczność stosowania struktur przestrzennych, wchodzi specjalistów posługujących się Formianem, co ułatwia współpracę przede wszystkim między architektami i konstruktorami.

¹⁰ A. Z. Pawłowski, I. Całka, *Budynki wysokie*, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.

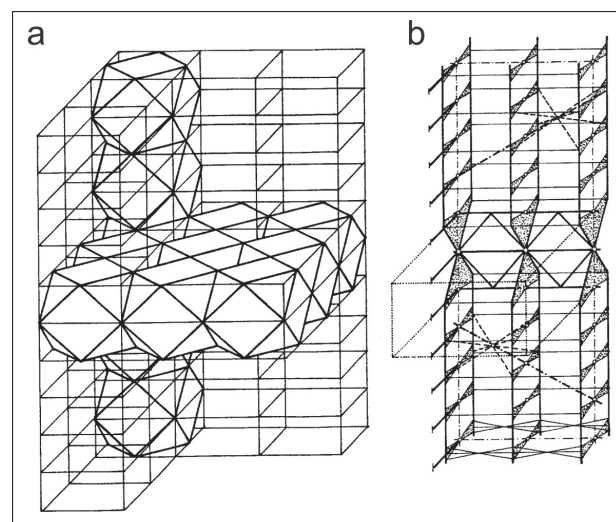
¹¹ R. Robinson, *Malaysia's Twins. High-rise. High Strength*, „Civil Engineering”, nr 7, 1994.

¹² M. Y. L. Chew, *Construction Technology for Tall Buildings*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore 2012.

System obwodowej struktury nośnej

Płaskie układy ramowe, układy pojedynczych powłok ramowych (*framed tube*) i podwójnych powłok ramowych¹³ (*tube in tube*) należą do grupy systemów konstrukcyjnych, uważanych obecnie już za tradycyjne¹⁴. Do ich rozwoju przyczyniły się znacząco prace takich projektantów konstrukcji, jak Fazlur R. Khan¹⁵ czy Leslie E. Robertson. W pewnym okresie drugiej połowy XX wieku wpływy termiczne były rozpatrywane jako mogące mieć istotne znaczenie w ograniczeniu wysokości możliwych do osiągnięcia przez budynki mające typowe rodzaje systemów konstrukcyjnych¹⁶. Problem ten mógł być spowodowany odmiennymi długościami słupów usytuowanych w wewnętrznej przestrzeni budynku i słupami rozmieszczonymi wzdłuż jego obwodu. Różne długości tych słupów są wynikiem głównie zmieniających się temperatur słupów usytuowanych na obwodzie.

Pierwszą z autorskich propozycji ograniczenia wpływów termicznych była koncepcja obwodowego systemu konstrukcyjnego ukształtowana w wyniku odpowiednich przekształceń wielowarstwowych struktur przestrzennych. Czternastościan półforemny był modulem wybranej postaci trójwarstwowej struktury przestrzennej (il. 3a), będącej podwojoną postacią struktury SDC opracowanej przez Stefana Du Chateau, która po serii przekształceń została ograniczona do kilku oddzielnych warstw stanowiących poziome przepony kształtowanego systemu konstrukcyjnego. Wzdłuż obwodu usytuowano duże słupy dwugałęziowe (il. 3b), gdzie rozstaw gałęzi pionowych wynikał pośrednio z przyjętego wymiaru modułu poziomej struktury przestrzennej. W przestrzeni ograniczonej ramionami słupów dwugałęziowych zaprojektowano podstawowy i drugorzędny układ stężeń. Układ podstawowy jest zbudowany z odcinków tworzących potężne stężenia kratowe typu „X”. Poszczególne węzły tego stężenia są węzłami centralnymi dla grupy prętów drugorzędowego układu stężeń. Taki układ stężeń umożliwia stosunkowo równomierną dystrybucję sił w elementach struk-



3a. Wyjściowa konfiguracja struktury przestrzennej;
b. przekształcona postać struktury tworząca obwodowy system nośny

3a. Initial configuration of a spatial structure; b. transformed shape of structure created the perimeter bearing system

tury obwodowej spowodowanych działaniem obciążeń poziomych.

Obwodowa struktura nośna budowana w proponowany sposób jest podzielona na kilka segmentów, z których każdy ma wysokość kilkunastu lub kilkadziesiątu kondygnacji typowych (il. 4). Poszczególne segmenty są pionowo usytuowane na sobie i łączą się za pomocą głównych węzłów typu N, które są teoretycznie węzłami przegubowymi i usytuowanymi w połowie wysokości poszczególnych przepon poziomych. Dzięki temu wpływ odkształceń pojedynczego segmentu pionowego, spowodowanych również wpływami termicznymi, na stan odkształceń segmentów z nim sąsiadujących jest znacząco ograniczony. Przestrzeń przepon poziomych jest przeznaczona na kondygnacje techniczne.

Dla budowy obwodowej struktury nośnej można użyć typowych form dwuwarstwowych struktur przestrzennych usytuowanych pionowo wzdłuż obwodu i tworzących odpowiednie segmenty (il. 5). Wymiar powtarzalnego modułu M takiej struktury może być także modulem głównym całego systemu konstrukcyjnego projektowanego budynku wysokiego. Tak jak uprzednio segmenty będą usytuowane pionowo

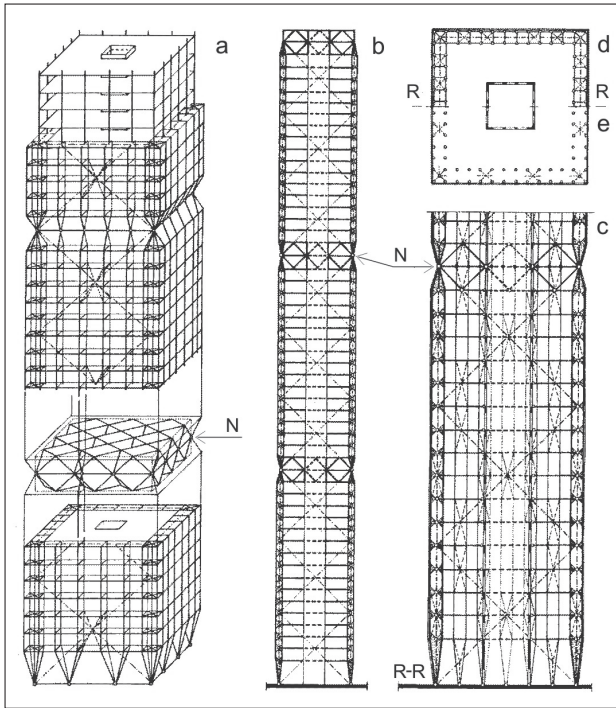
¹³ F. R. Khan, *The John Hancock Center*, „Civil Engineering”, nr 10, 1967.

¹⁴ M. M. Ali, K. S. Moon, *Structural developments in tall buildings. Current trends and future prospects*, „Architectural Science Review”, nr 3, 2007.

¹⁵ Prace teoretyczne oraz aplikacje praktyczne autorstwa amerykańskiego inżyniera Fazlura R. Khana, wzorowane na kon-

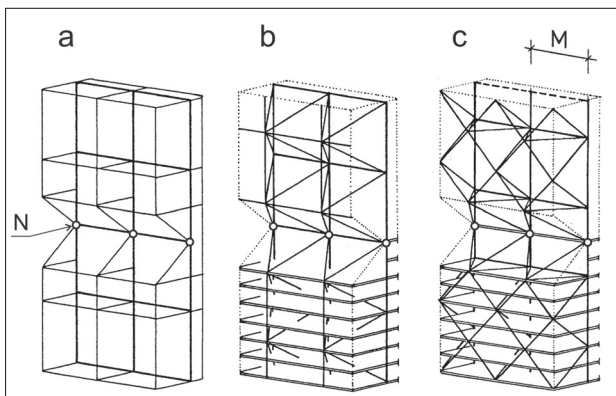
strukcjach lotniczych, radykalnie zmieniły sposoby projektowania budynków wysokich zwiększając w podobny sposób efektywność ekonomiczną konstrukcji takich obiektów, które mogły uzyskiwać coraz większe wysokości.

¹⁶ R. M. Kowalczyk, R. Sim, M. B. Kilmister (red.), *Structural Systems for Tall Buildings*, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, McGraw-Hill, New York 1993.



4a. Ogólna postać koncepcji konstrukcyjnej obwodowej struktury nośnej budynku wysokiego; b. schemat głównego przekroju pionowego budynku; c. przekrój pionowy dolnego segmentu konstrukcji budynku; d, e. przekroje poziome kondygnacji typowych

4a. General scheme of structural concept of the perimeter structural system of a tall building; b. scheme of the main vertical section of building; c. vertical section of lower segment of the building structure; d, e. forms of top views of typical floors



5. Schematy budowy stref połączeń segmentów obwodowej struktury nośnej

5. Schemes of inner build of zones of connections of segments of perimeter bearing structure

nad sobą i będą łączyć się za pomocą odpowiednio ukształtowanych stref wspólnych, w których znajdować się będą węzły główne typu N, mające cechy połączeń przegubowych (il. 5). Tak zaprojektowane strefy wspólne umożliwiają kompensację odkształceń i naprężeń wywołanych wpływami termicznymi.

Ponadto wewnętrzne przestrzenie prętów obwodowej struktury nośnej mogą stanowić zamknięty obwód dla znajdującej się tam odpowiedniej substancji cieplej, co dodatkowo ograniczy wielkości odkształceń spowodowanych takimi wpływami.

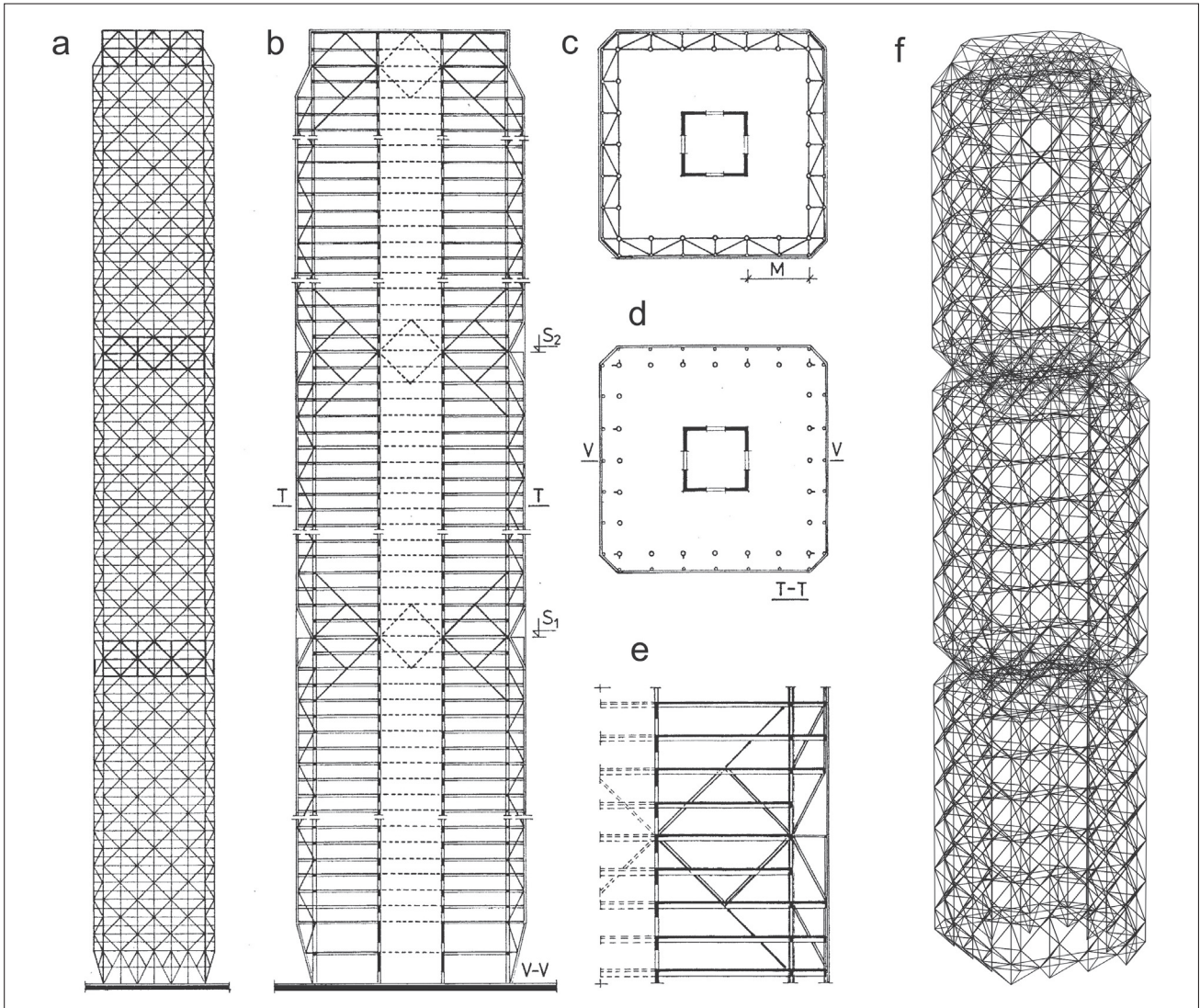
Strefy połączeń segmentów mogą być uwidocznione w formie architektonicznej całego budynku, jednak ze względów praktycznych najbardziej uzasadnione jest umieszczanie ścian osłonowych na ciągłej powierzchni pionowej każdej elewacji (il. 6a-e). Jest to łatwe do osiągnięcia na przykład przez odpowiednie rozmieszczenie drugorzędnych prętów stanowiących stabilne zamocowanie dla paneli ścian osłonowych usytuowanych w bezpośrednim sąsiedztwie węzłów głównych typu N obwodowej struktury nośnej (il. 6e). Ta przykładowa postać systemu konstrukcyjnego składa się z trzech segmentów pionowo usytuowanych na sobie. Każdy z segmentów ma wysokość kilkudziesięciu kondygnacji typowych.

Model numeryczny tego rodzaju konfiguracji konstrukcyjnej przedstawiony na wizualizacji (il. 6f), zdefiniowano w języku programowania Formian za pomocą programu Budynek1. W tym przypadku dla czytelności podstawowej postaci systemu konstrukcyjnego nie zastosowano dodatkowych prętów rozmieszczonych wokół węzłów głównych typu N w strefach połączeń poszczególnych segmentów pionowych. Ponieważ całość programu jest dość obszerna poniżej podano jedynie jego fragment i krótko omówiono działanie jego wybranych funkcji. W tym przypadku zastosowano numerację wierszy, która nie była stosowana w pierwszych wersjach tego języka programowania, natomiast została ona obligatoryjnie wprowadzona w najnowszej wersji noszącej oznaczenie Formian-K. Numeracja wierszy znacznie usprawnia współpracę i wymianę informacji między różnymi osobami pracującymi nad tym samym modelem numerycznym projektowanego systemu konstrukcyjnego.

Program Budynek1

◇

```
01. clear;
02. m=3; n=6; k=3;
03. K1={ [0,0,0;0,-1,1], [0,0,0;1,-1,0], [0,-1,1;1,-1,0] };
04. KM=lamis(1,1)|lamis(1,1)|K1;
05. SD={ [0,0,0;2,0,0], [0,0,2;2,0,2], [0,0,0;0,0,2],
        [2,0,0;2,0,2] };
06. mod1=KM#SD;
07. scian1=rinis(m,n,2,2)|mod1;
08. P1={ [0,-1,1;0,-1,3] };
```



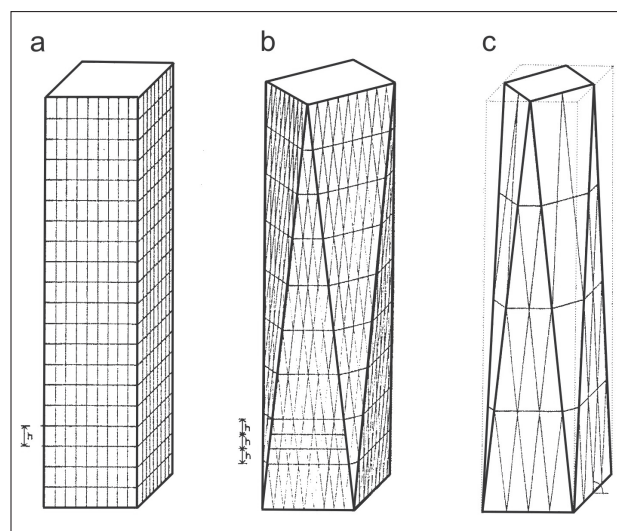
6. Schematy przykładowej postaci obwodowej struktury nośnej budynku wysokiego
6. Schemes of an example shape of the perimeter bearing structure of tall building

09. $PP = \text{rin}(3, n-1, 2) | P1;$
 10. $P2 = \text{lam}(1, m) | PP;$
 11. $PH = \text{lam}(3, n) | \text{rin}(1, m-1, 2) | [1, -1, 0; 3, -1, 0];$
 12. $TST = \{ [0, -1, 0; 1, -1, 0], [0, -1, 0; 0, -1, 1], [0, -1, 0; 0, 0, 0] \};$
 13. $\text{naroza} = \text{lam}(3, n) | \text{lam}(1, m) | TST;$
 14. $\text{prukosn1} = \text{lam}(1, m) | \text{rin}(3, 2, 2*n) | [-1, 0, 0; 0, -1, 0];$
 15. $\text{prukosp2} = \text{lam}(1, m) | \text{rin}(3, n, 2) | [-1, 0, 1; 0, -1, 1];$
 16. $\text{scian2} = P2 \# \text{scian1} \# PH \# \text{naroza} \# \text{prukosn1} \# \text{prukosp2};$
 17. $PD1 = \{ [0, 0, 0; 0, 0, -1], [0, 0, -1; 0, -1, 0], [0, -1, 1; 0, -1, 0] \};$
 18. $DDpr = \text{lam}(3, n) | \text{rin}(1, m+1, 2) | PD1;$
 19. $\text{ddkrz} = \text{lam}(3, n) | \text{rin}(1, m, 2) | \{ [1, -1, 0; 0, 0, -1], [1, -1, 0; 2, 0, -1] \};$
 20. $\text{goscian} = \text{rin}(3, 1, 1) | \text{scian2} \# DDpr \# \text{ddkrz};$
 21. $\text{segm1} = \text{rosad}(m, m) | \text{goscian};$
 22. $\text{stnosn1} = \text{rin}(3, k, 2*n+2) | \text{segm1};$ (*)Przepony(*)
 23. $P = \{ [0, 0, 0; 2, 0, 0], [0, 0, 0; 0, 1, 1], [0, 0, 0; 1, 0, 1], [0, 1, 1; 1, 0, 1] \};$
 24. $PM = \text{rosad}(1, 1, 4, -90) | P;$
 25. $SDO = \text{rinid}(m, m, 2, 2) | PM;$
 26. $\text{StrDO} = \text{pex} | SDO;$
 27. $\text{pradd1} = [1, 0, 1; 3, 0, 1];$
 28. $p1 = \text{rinid}(m-1, 2, 2, m*2) | \text{pradd1};$
 29. $p2 = \text{rinid}(2, m-1, m*2, 2) | [0, 3, 1; 0, 1, 1];$
 30. $s1 = \text{StrDO} \# P1 \# p2;$
 31. $\text{str2} = \text{lam}(3, 0) | s1;$
 32. $\text{str2obn} = \text{tran}(3, -1) | \text{str2};$
 33. $\text{use } \& \text{vm}(2), \text{vt}(2), \text{vh}(-125, -250, 100, 0, 0, 0, 0, 1);$
 34. $\text{przepon1} = \text{tran}(3, 2*n+2) | \text{str2obn};$
 35. $\text{przepwsz} = \text{rin}(3, k, 2*n+2) | \text{przepon1};$
 36. $\text{Budynek1} = \text{przepwsz} \# \text{stnosn1};$
 37. $\text{draw Budynek1};$
 <

Spośród wielu operatorów i funkcji tego języka programowania skrótowo omówiono niżej tylko kilka wybranych pozycji. Znaki operacyjne „◇” są w Formianie tzw. twardymi znakami stop zatrzymującymi proces wykonywania programu. Użyteczna komenda „clear” kasuje na ekranie komputera poprzedni obraz i umożliwia wyświetlanie rezultatów aktualnie wykonywanych operacji numerycznych. Znak tzw. podwójnego krzyżyka czyli „#” stosuje się do łączenia ze sobą uprzednio zdefiniowanych *formexów*. Zestaw odpowiednio przyjętych parametrów sprawia, że projektant-programista może odpowiednio płynnie zmieniać wielkość modułu M struktury obwodowej, gęstość jej wewnętrznego podziału w kierunkach poziomym i pionowym oraz liczbę segmentów głównych całego systemu konstrukcyjnego budynku wysokiego kształtowanego w proponowany sposób. W tym przypadku w wierszu nr 3 tego programu użyto trzech parametrów, z których „m” określa liczbę modułów struktury rozmieszczonych w kierunku poziomym każdego z głównych segmentów, parametr „n” definiuje liczbę tych modułów w kierunku pionowym pojedynczego segmentu, natomiast parametr „k” oznacza liczbę segmentów ustawionych pionowo na sobie. Komendy zawarte między średnikami są instrukcjami wykonywania programu Formian. Wszystko co jest zapisane między dwoma sąsiednimi znakami typu „(*)” nie ma charakteru komend operacyjnych i jest pomijane w procedurze wykonywania, a pełni rolę informacyjną dla projektanta-programisty. Program Budynek1 ma bardzo prostą postać, jednak może posłużyć dla szybkiego i łatwego definiowania modeli numerycznych nieraz bardzo złożonych form proponowanych systemów konstrukcyjnych. Jest to bardzo istotna cecha w przypadku konieczności rozważenia w krótkim czasie wielu wariantów układów funkcjonalno-przestrzennych budynków wysokich, szczególnie w początkowym etapie ich projektowania.

System wielościanu ramowego

Sztywność systemu nośnego należy do najbardziej pożądanых cech konstrukcji nośnej budynku wysokiego. Konstrukcje ramowe są ze względów funkcjonalnych projektowane najczęściej w układach ortogonalnych (il. 7a), co wymaga stosowania sztywnych połączeń słupów i rygli. Dystans między dwoma sąsiednimi ryglami (h) jest najczęściej wysokością kondygnacji typowej budynku. Sztywne węzły muszą być odpowiednio zaprojektowane i precyzyjnie wykonane, przez co są dość ciężkie i dość drogie. Sztywność typowego systemu ramowego jest w dużej mierze sumą sztywności wszystkich jego węzłów. Płaskie układy ramowe zaprojektowane na siatce trójkątnej są z założenia bardzo stabilne, nie wymagają stosowania sztywnych węzłów, dzięki czemu są dużo lżejsze i tańsze niż rami o układach ortogonalnych. Jeśli rami o układach trójkątnych zostaną umieszczone na trójkątnych ścianach bocznych stosownej bryły budynku (il. 7b), to jego system konstrukcyjny osiągnie dużą stabilność przestrzenną przy użyciu stosunkowo niewielkiej ilości materiału konstrukcyjnego. Ponadto koszt jego wykonania może być również stosunkowo niski. Ilustracja 7b przedstawia wydłużoną postać 10-ścianu, nazywanego także antypryzmą o podstawie kwadratowej. Wszystkie trójkątne ściany boczne posiadają stosowne podziały trójkątne i są pochyłe, ponieważ dwie jego kwadratowe podstawy mają te same wymiary. Jeśli jego górna kwadratowa ściana będzie mieć stosowną wielkość, to połowa ścian bocznych tego wielościanu będzie prostopadła do podstawy (il. 7c). Jest to ze względów funkcjonalnych i użytkowych cecha korzystna, jeśli taka postać wielościanu zostanie przyjęta jako bryła podstawowa projektowanego budynku wysokiego.



7. Prostopadłościenne i wielościenne formy budynków wysokich

7. Rectangular prism and polyhedron forms of tall buildings

System konstrukcyjny kształtowany w ten sposób autor określił mianem wielościanu ramowego i od połowy lat 90. ubiegłego stulecia w swoich pracach i publikacjach proponował stosować jako główną strukturę nośną budynków wysokich. Kon-

cepcja tego systemu konstrukcyjnego została zaprezentowana w 1997 roku podczas obrad Sympozjum IASS¹⁷. Później został on przedstawiony w innym artykule autora¹⁸. W pierwszych latach XXI wieku wzniesiono kilka spektakularnych obiektów o proponowanych formach strukturalnych, jak na przykład One World Trade Center w Nowym Jorku, ukończony w 2013 roku oraz także Hearst Tower oddany do użytku w 2006 roku¹⁹. System konstrukcyjny Hearst Tower jest określany angielskim terminem jako „diagrid”.

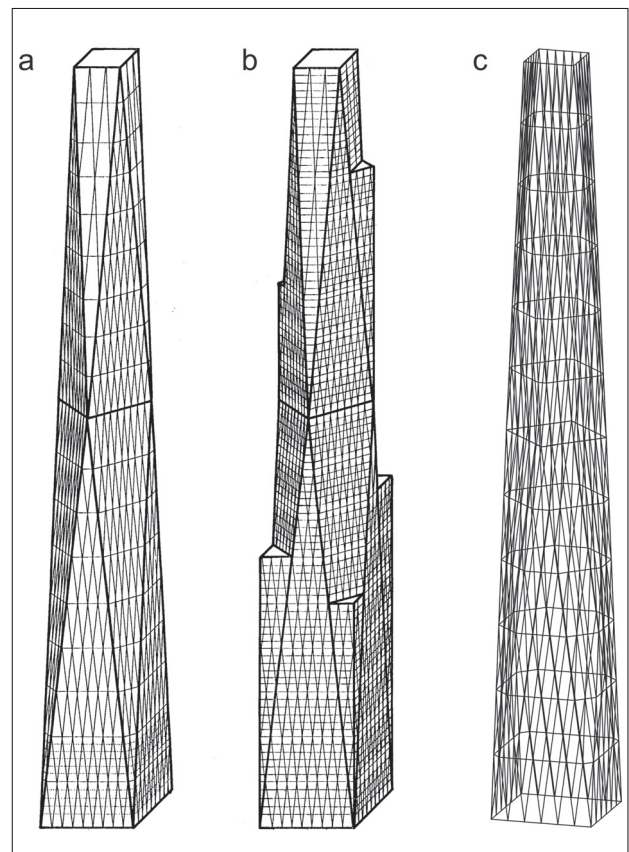
Wyróżniona postać bryły podstawowej (il. 7c), może być dalej modyfikowana i przekształcana, a jej odpowiednie formy mogą być pionowo sytuowane na sobie (il. 8a). Ta stosunkowo prosta forma może być uzupełniona o odpowiednie fragmenty zaprojektowane zgodnie z przedstawioną koncepcją konstrukcyjną wielościanu ramowego i rozmieszczone w wybranych strefach podstawowej bryły budynku. Dzięki temu projektowany budynek może uzyskać interesującą i unikatową formę architektoniczną (il. 8b). Budynek wysoki o takiej formie był głównym obiektem zespołu wielofunkcyjnego zaprojektowanego przez autora dla południowej części Wrocławia – stolicy Dolnego Śląska. Istotną rolę w opracowaniu projektu koncepcyjnego tego budynku odegrał model numeryczny zdefiniowany w języku programowania Formian o nazwie roboczej Budynek2 (il. 8c). Wybrany fragment programu podano niżej.

Program **Budynek2**

```

◇
1. clear;
2. m=6;
3. EM13={ [0,0,0;2,0,0],[0,0,0;1,0,1],[1,0,1;2,0,0] };
4. SPP1=genis(m,m,2,1,1,-1)|EM13;
5. EM12={ [0,0,0;0,1,0],[0,0,0;1,0,0],[0,1,0;1,0,0] };
6. SP=genid(m,m,1,1,0,-1)|EM12;
7. SW1=pos(3,[0,0,0;m,0,m;0,m,m],
  [0,0,0;m,0,0;0,m,0])|SP;
8. XMP=SW1#SPP1;
9. ModPod=rosad(0,0)|tranad(0,0,-m,-m)|XMP;
10. s3=7.48;
11. Modul1=bt(1,1,s3)|ModPod;

```



8. Propozycje bardziej złożonych postaci systemu wielościanu ramowego

8. Proposals of more complex shapes of system of framed polyhedron

```

12. s2=0.5*sqrt|2;
13. s1=0.5*sqrt|2;
14. ModGor1=tranix(0,0,0)|verax
  (0,0,0,0,0,1,45)|bt(s1,s2,s3)|ModPod;
15. Gora1=tranix(0,0,m*s3)|ModGor1;
16. Budynek2=Modul1#Gora1;
17. use &,vm(2), vt(1), c(1,1),
  vh(94,-288,82,5,5,0,5,5,5);
18. draw Budynek2;

```

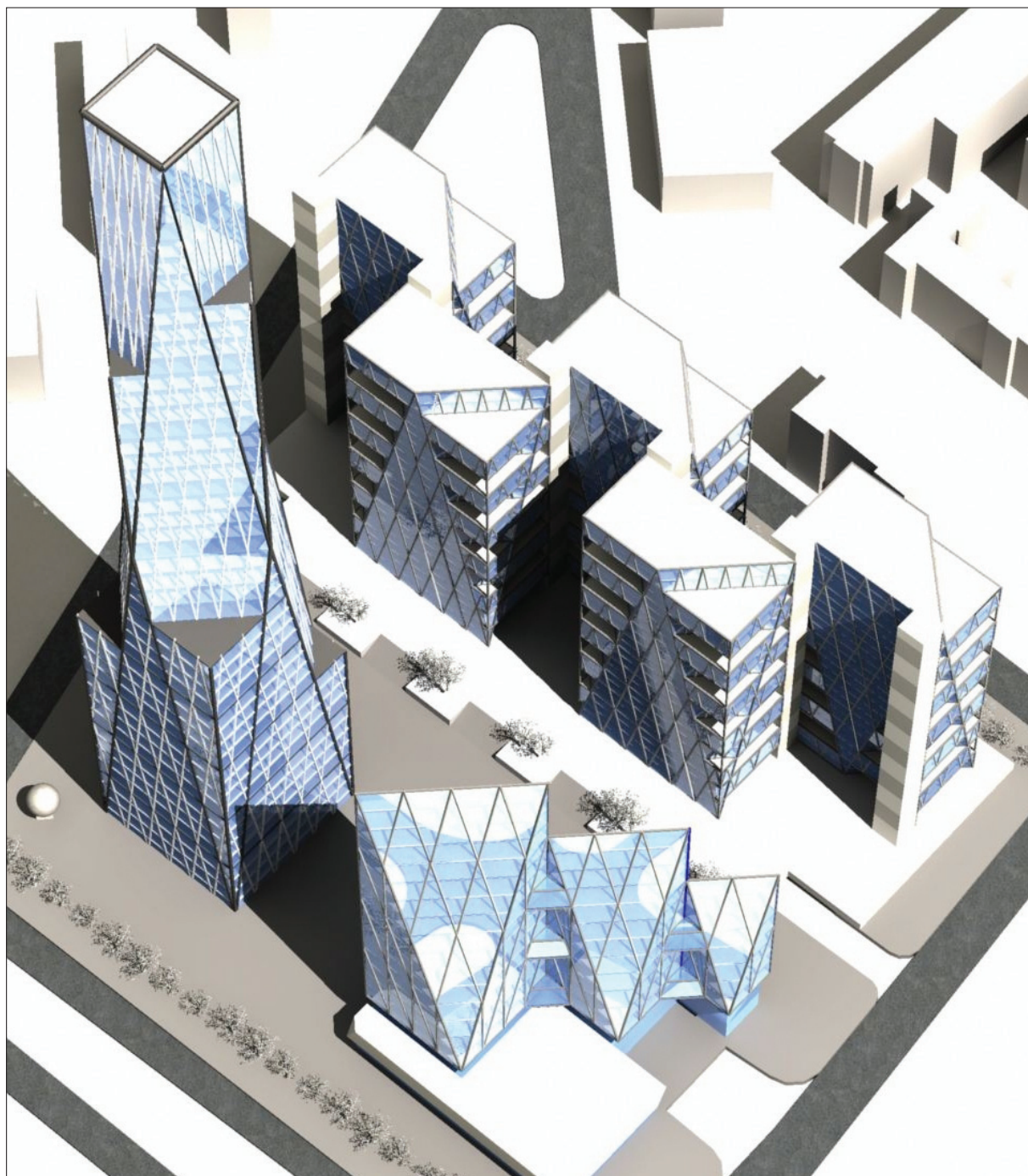
◇

Powyżej podano jedynie początkową część programu definiującą stosunkową prostą postać struktury zaprezentowanej na ilustracji 8a. W wierszu numer 2 określono gęstość projektowanej siatki trójkątnej na każdej z bocznych ścian wielościanu podstawowego.

¹⁷ J. Rębielak, *Some proposals of space structures shaping*, [w:] J. C. Chilton, B. S. Choo, W. J. Lewis & O. Popovic (red.), *Proceedings of the International Colloquium: Structural Morphology – Towards the New Millennium*, University of Nottingham, 1997.

¹⁸ J. Rębielak, *Some proposals of structural systems for long span roofs and high-rise buildings*, „Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures”, t. 40, nr 1, 1999.

¹⁹ M. Sarkisian, *Designing Tall Buildings. Structure as Architecture*, Routledge, Taylor and Francis Group, New York 2011.



9. Widok z lotu ptaka zespołu budynków zaprojektowanych za pomocą systemu wielościanu ramowego
 9. Bird view of complex of buildings designed by application of the framed polyhedron system

Ta postać budynku wysokiego była dominantą w projekcie koncepcyjnym zespołu obiektów wielofunkcyjnych zlokalizowanych we Wrocławiu w obrębie ul. Powstańców Śląskich, Wielkiej, Gwiaździstej i Szczęśliwej²⁰ (il. 9–11). Kompleks ten składał się z centrum kongresowego, pasażu handlowo-usługowego, obiektów zawierających aparta-

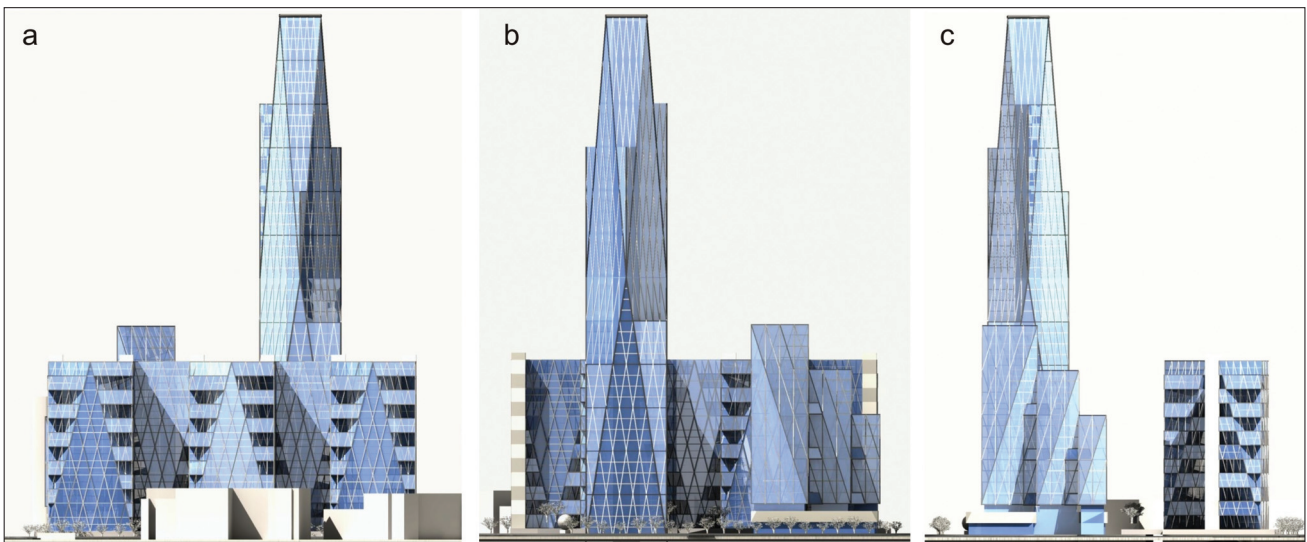
menty mieszkalne, a przestrzeń budynku wysokiego przeznaczona była głównie na cele biurowe i hotelowe. Miał on podstawę kwadratu o boku równym 48 metrom, zawierał 47 kondygnacji nadziemnych oraz 3 kondygnacje podziemne. Całkowita jego wysokość, łącznie z kondygnacją techniczną wyniosła ok. 203 metrów.

²⁰ Projekt koncepcyjny tego zespołu został wykonany w celu przedstawienia praktycznych możliwości zastosowania systemu

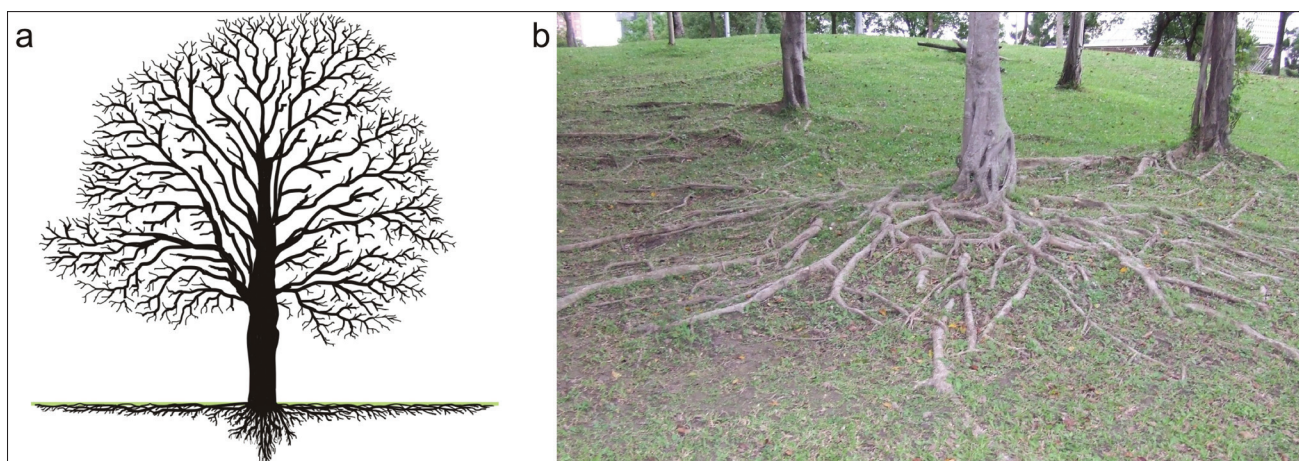
wielościanu ramowego. Projektant: Janusz Rębielak, współpraca techniczna: Maciej Smoliński, Maciej Rębielak.



10. Widok perspektywiczny od strony centrum miasta
 10. Perspective view from the town centre



11. Elewacja: a. zachodnia; b. wschodnia; c. północna wielofunkcyjnego zespołu budynków
 11. Elevations: a. west; b. east; c. north of the multifunctional complex of buildings



12a. Uproszczony schemat przekroju pionowego struktury drzewa; b. widok systemu korzeniowego drzewa liściastego gatunku

ficus microcarpa

12a. Simplified scheme of vertical section of a tree structure; b. view of root system of a deciduous kind of tree called

ficus microcarpa

Koncepcja systemu fundamentu zespolonego

Posadowienie obiektu silnie obciążonego, jakim jest budynek wysoki, na gruncie o niewielkiej nośności lub na terenie aktywnym sejsmicznie jest trudnym i złożonym zadaniem technicznym^{21, 22, 23, 24}. Jeśli grunt nośny znajduje się głęboko poniżej terenu, to głębokie fundamenty zwykle stosowane w takich przypadkach są dość złożonymi i drogimi rozwiązaniami konstrukcyjnymi. Wnioski z analizy struktur biologicznych istniejących w naturze mogą być bardzo przydatne w procesach projektowania konstrukcji inżynierskich. Budowa pni oraz systemów korzeniowych pewnych gatunków drzew sprawiają, że ich całościowa struktura posiada zdolność bezpiecznego przejmowania względnie dużych wartości obciążeń, w tym także poziomych, odznaczając się jednocześnie odpowiednią elastycznością.

Pewne gatunki drzew rosnących zwłaszcza na gruntach podmokłych posiadają rozłożyste systemy korzeniowe rozmieszczone szeroko i płytko wokół pnia (il. 12). Taka postać systemu korzeniowego łącznie z obrazami trajektorii naprężeń głównych w belce wolno podpartej były dla autora

inspiracjami w procesie opracowania systemu fundamentu zespolonego²⁵. Schematy jego koncepcji konstrukcyjnej pokazuje ilustracja 13. Węzły główne tego proponowanego systemu konstrukcyjnego są usytuowane równomiernie wzdłuż osi obojętnej np. belek (1) stanowiących jego poziome elementy (il. 13a). Siły skupione o dużych wartościach są przekazywane do tych węzłów za pomocą dwóch podsystemów umieszczonych np. w wąskiej przestrzeni pomiędzy dwiema ustawionymi równoległe do siebie belkami. Jeden z tych podsystemów nazwano funikularnym (il. 13b), zaś drugi łukowym (il. 13c). Jeśli ich formy są symetryczne względem wspomnianych osi obojętnej, to po ich połączeniu w węzłach głównych wystąpią jednie składowe pionowe reakcji (il. 13d). Wyróżniona soczewkowa postać elementów pośrednich stanowi ich moduł konstrukcyjny i może być wielokrotnie powielana w kierunku poziomym, (il. 13d). Węzły A, B i C nie są połączone z materią belek głównych (1), natomiast węzły główne (Nc) są z nimi trwale połączone. Oznacza to, że fundament budowany w ten sposób może mieć teoretycznie nieograniczoną powierzchnię podstawy. Zatem taki fundament może być zastosowany dla posadowienia obiektu bardzo silnie

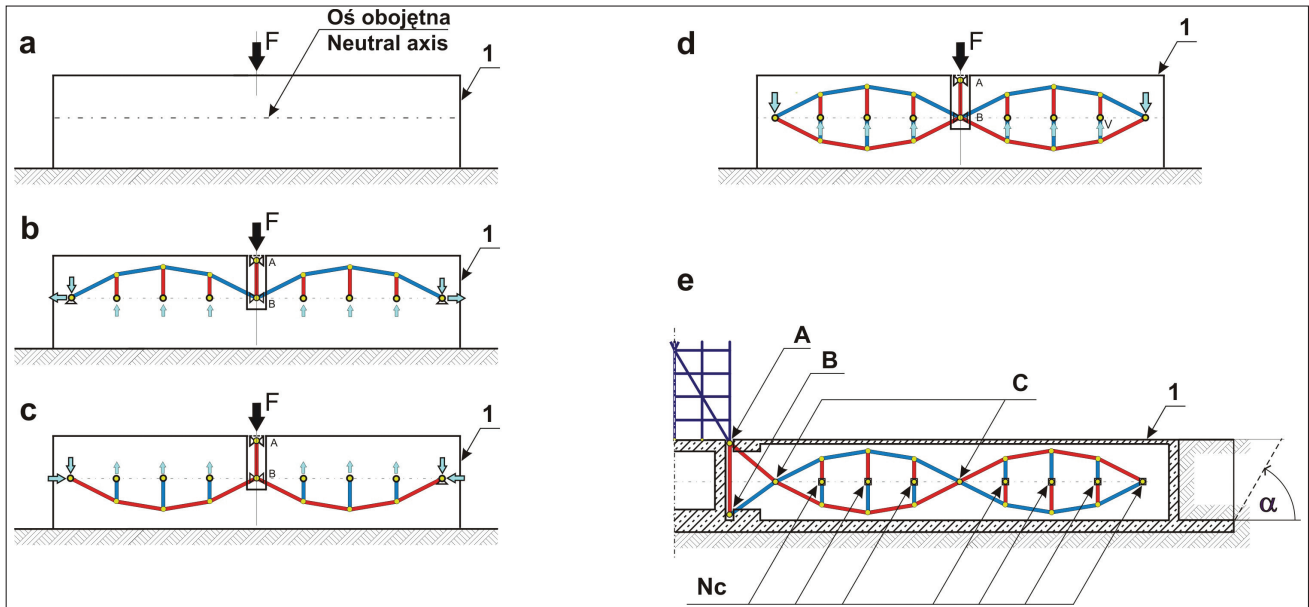
²¹ D. P. Coduto, *Foundation Design. Principles and Practices*, Prentice Hall, NJ 2001.

²² E. Allen, J. Iano, *Fundamentals of Building Construction. Materials and Methods*, John Wiley & Sons, Hoboken 2014.

²³ S. J. Greenfield, *Foundation in Problem Soil. A Guide to Lightly Loaded Foundation Construction for Challenging Soil and Site Conditions*, Prentice Hall, NJ 1992.

²⁴ K. Matso, *Lessons from Kobe*, „Civil Engineering”, nr 4, 1995.

²⁵ J. Rębielak, *System of combined foundation for tall buildings*, „Journal of Civil Engineering and Architecture”, nr 6(12), 2012.

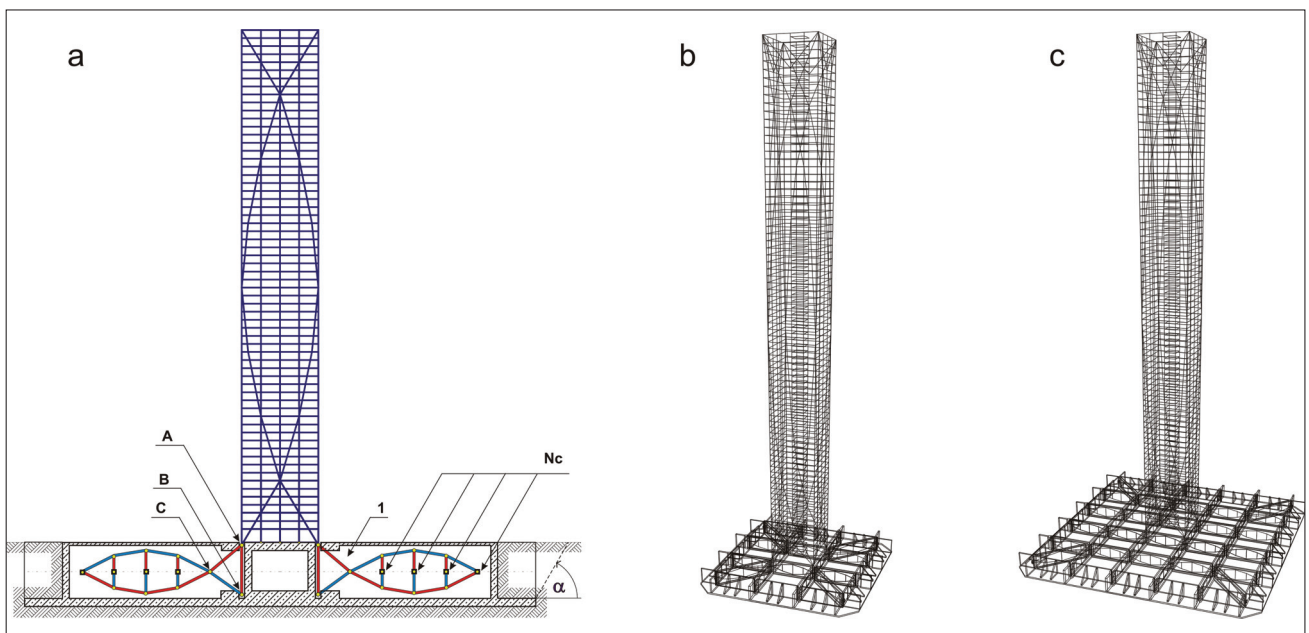


13. Schematy ogólne koncepcji konstrukcyjnej systemu fundamentu zespolonego
 13. General schemes of structural concept of system of combined foundation

obciążonego na gruncie o bardzo małej nośności. Budynek na nim oparty powinien zachować stabilność nawet po zaistnieniu znacznych przemieszczeń gruntu spowodowanych np. trzęsieniem ziemi. W przypadku nieparzystej liczby modłów soczewkowych stabilność stref brzegowych można zwiększyć poprzez ich odpowiednie ukształtowanie dzięki włączeniu do współpracy ciężaru gruntu znajdującego się w obwodowych klinach odłamu ograniczonych odpowiednią wielkością kąta α .

Zespolony system konstrukcyjny budynku wysokiego

Jeśli budynek oparty jest na proponowanym fundamencie zespolonym, a w konstrukcji jego kondygnacji nadziemnych zastosowane są stężenia o formie soczewkowej pokazanej na ilustracji 14a to taki układ nazwano zespolonym systemem konstrukcyjnym budynku wysokiego. Dla bardzo podobnej postaci konstrukcji opracowano model numeryczny definiowany za pomocą programu o nazwie Budy-



14. Schematy przykładowych postaci zespolonego systemu konstrukcyjnego budynku wysokiego
 14. Schemes of examples shapes of the combined structural system of a tall building

nek3 umożliwiające kształtowanie takich modeli dla różnej liczby kondygnacji nadziemnych oraz dla różnej wielkości fundamentu zespolonego. Część tego programu dotycząca definicji modelu konstrukcji tego fundamentu jest dość złożona i długa dlatego poniżej podano jedynie jego początkowy fragment definiujący model numeryczny konstrukcji nadziemnej budynku.

Fragment programu **Budynek3**

```

◇
1. clear;
2. wk=4.5;(*)Wysokosc kondygnacji(*)
3. FasadaK1=pex|lam(1,0)|{[18,0,0;0,0,8*wk],
  [0,0,8*wk;9,0,16*wk],[9,0,16*wk;13.5,0,24*wk],
  [13.5,0,24*wk;18,0,40*wk],[18,0,40*wk;0,0,4
  0*wk],[18,0,40*wk;18,0,0],[0,0,2*wk;0,0,40*wk],
  [0,0,4*wk;18,0,0],[9,0,2*wk;9,0,40*wk]};
4. Strop1=lam(1,0)|tran(3,2*wk)|[0,0,0;18,0,0];
5. Strop2=lam(1,0)|tran(3,3*wk)|[0,0,0;18,0,0];
6. StropS= lam(1,0)|rin(3,36,4.5)|tran(3,4*wk)|
  [0,0,0;18,0,0];
7. FasadaKB=FasadaK1#Strop1#Strop2#StropS;
8. FasadaA=tran(2,-18)|FasadaKB;
9. StrObwod=ros(1,2,0,0)|FasadaA;
10. TrzWind=rin(3,41,4.5)|ros(1,2,0,0)|
  {[4.5,0,0;4.5,-4.5,0],[4.5,-4.5,0;0,-4.5,0]};
11. TrzonP=StrObwod#TrzWind;
12. Uzupeł=ros(1,2,0,0)|tran(2,-18)|
  {[ -18,0,0;18,0,0],[ -18,0,wk;18,0,wk],
  [0,0,0;0,0,2*wk],[9,0,0;9,0,2*wk],
  [-9,0,0;-9,0,2*wk]};
13. TrzonCX=Uzupeł#TrzonP;
14. TrzonG=ref(3,40*wk)|TrzonCX;
15. CalyTrz=TrzonP#TrzonG;
16. Budynek3=Podstaw3#CalyTrz;
17. use &,vt(2),c(1,1),vm(2),
  vh(200,-740,426,0,0,0,0,1);
18. draw Budynek3;
◇

```

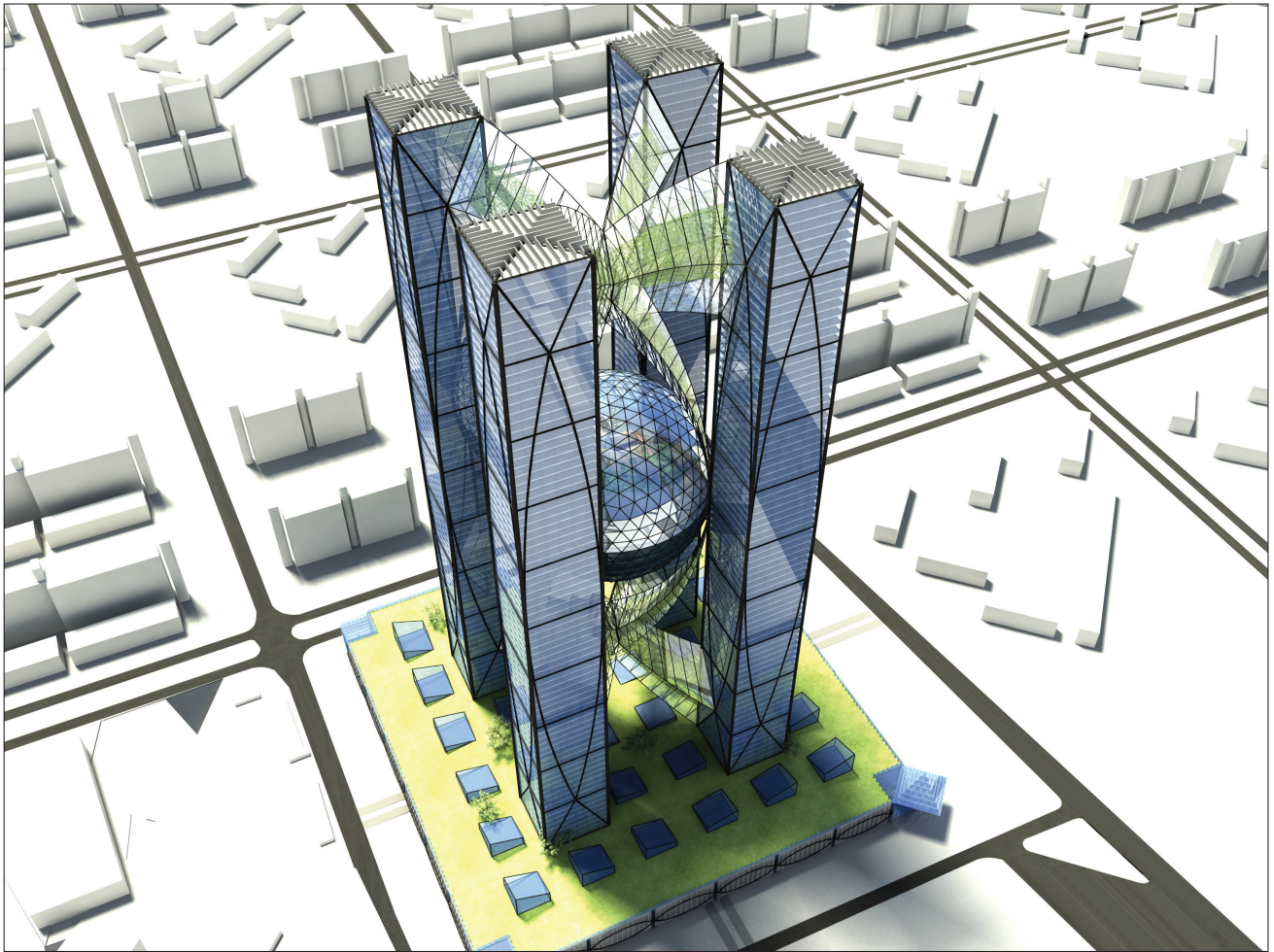
Graficzne reprezentacje rezultatów wykonania tego programu dla różnej wielkości fundamentu zespolonego pokazano na ilustracji 14b oraz ilustracji 14c. Program ten stosuje najprostsze funkcje Formianu należące do grupy *cardinal functions*, dzięki czemu zawiera więcej wierszy i jest przez to nieco dłuższy, jednak łatwiejszy do wprowadzania liczy-

nych i poważnych jego modyfikacji. W wierszu numer 3 użyto funkcji „pex”, która po wielokrotnym powieleniu wybranego modułu przypisuje mu pojedynczą lokalizację w przestrzeni konstrukcji. Model numeryczny zdefiniowany w Formianie może być łatwo transportowany i stosowany w innych specjalistycznych programach komputerowych służących np. do analiz inżynierskich. Dlatego funkcja określana nazwą „pex” jest bardzo ważna dla poprawności np. obliczeń statycznych prowadzonych na podstawie tak zdefiniowanego modelu numerycznego konstrukcji.

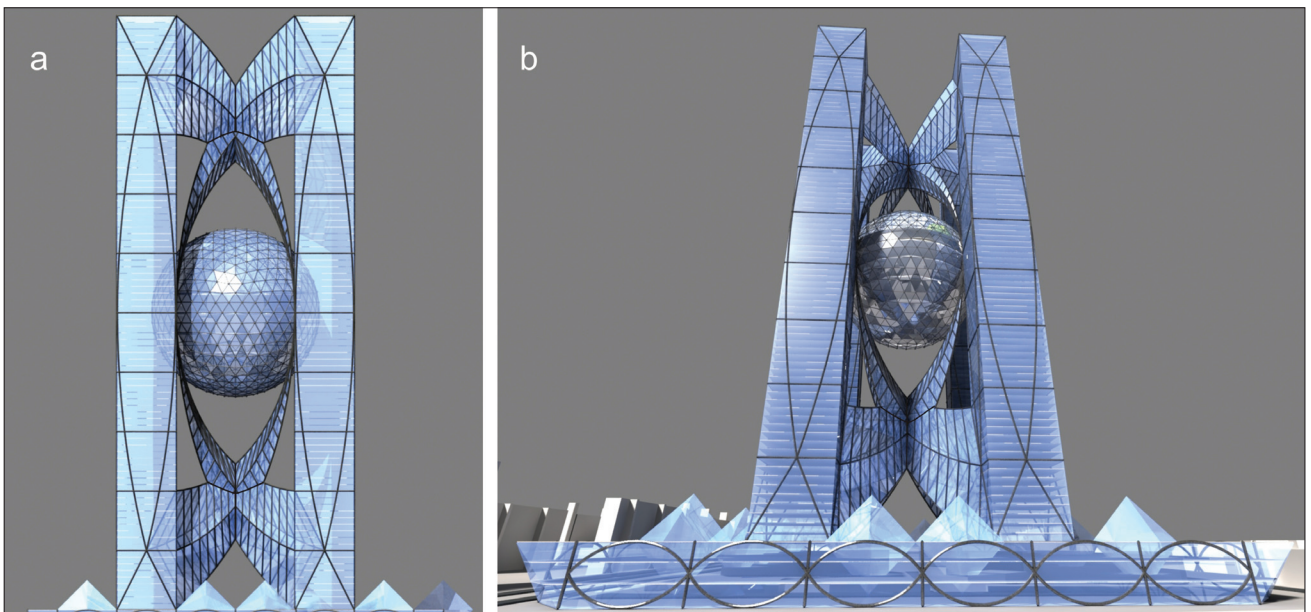
Przykłady zastosowania modeli numerycznych w opracowaniach projektowych

Praktyczna przydatność modeli numerycznych budowanych w Formianie sprawdziła się między innymi w toku przygotowania prac na potrzeby dwóch międzynarodowych konkursów architektonicznych z serii eVolo. Opisana wyżej postać systemu konstrukcyjnego była podstawą kształtowania struktury nośnej i formy architektonicznej kompleksu o nazwie GeoDome Sky Tower (il. 15–18), będącej przedmiotem projektu konkursowego dotyczącego obiektów wysokich i przygotowanego na konkurs eVolo2012.²⁶ Zespół wielofunkcyjny o tej nazwie został zlokalizowany w tym samym obszarze Wrocławia, co podobny kompleks pokazany na ilustracjach 9, 10 i 11. Projektowane założenie urbanistyczne GeoDome Sky Tower jest utworzone głównie przez zespół czterech prostopadłościennych budynków wysokich, z których każdy ma kwadratową formę podstawy o długości boku równej 36 metrom i wysokość nieco większą niż 380 metrów. Wysokość kondygnacji typowych jest równa 4,50 m. Cztery budynki główne są posadowione na wspólnej, poziomej podstawie ukształtowanej jako odpowiednia postać systemu fundamentu zespolonego. Zawiera on trzy kondygnacje, każda o wysokości 6 m, których przestrzeń przeznaczono na funkcje uzupełniające i towarzyszące głównym funkcjom użytkowym kompleksu, którymi są funkcje biurowe, hotelowe, kongresowe i wypoczynkowo-rekreacyjne. Aby podkreślić główną zaletę systemu fundamentu zespolonego celowo posadowiono go niemal na

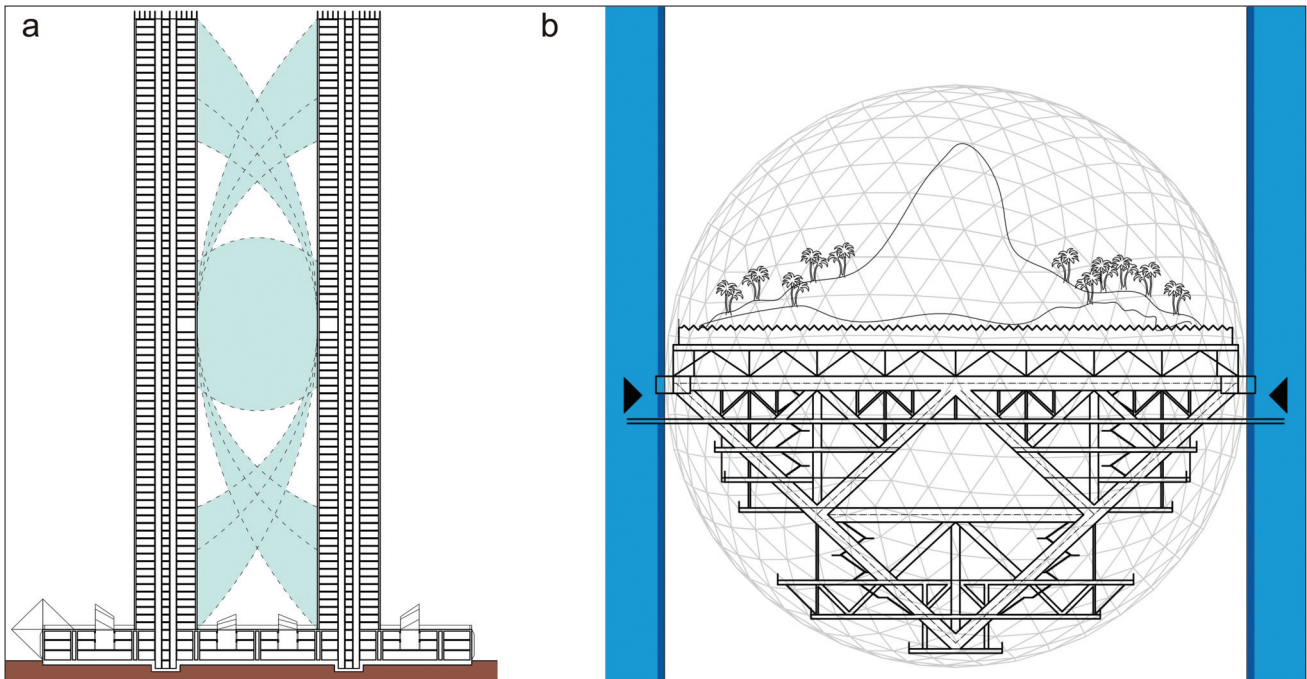
²⁶ Projektant: Janusz Rębielak, współpraca techniczna: Maciej Smoliński.



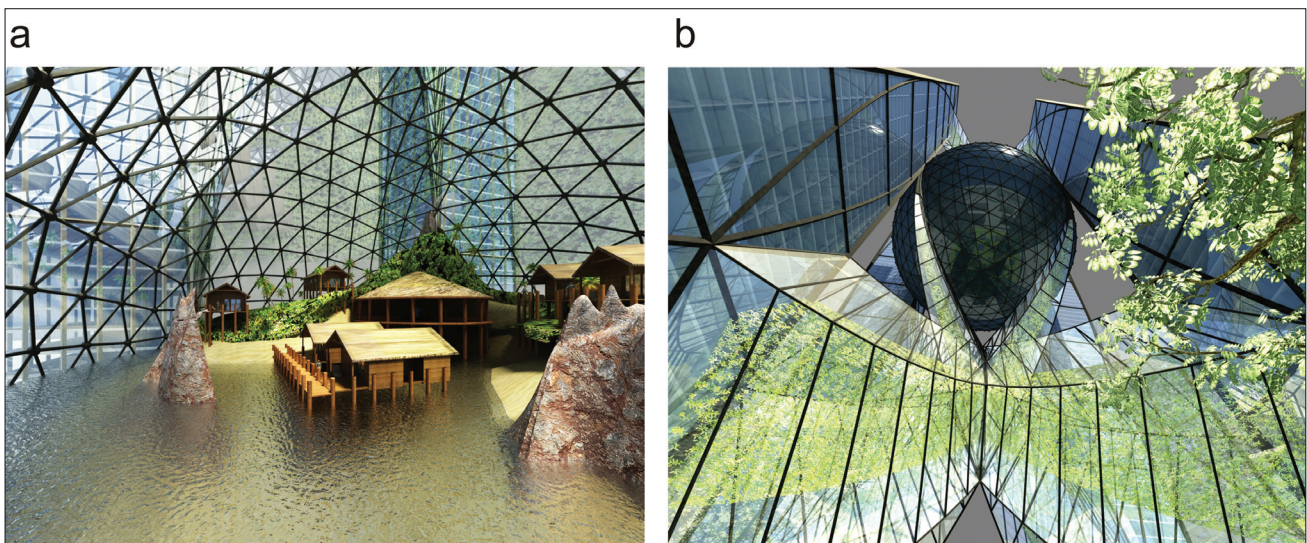
15. Widok z góry na projektowany zespół GeoDome Sky Tower
 15. Bird view on designed complex of the GeoDome Sky Tower



16. Widoki GeoDome Sky Tower: a. elewacja typowa; b. widok perspektywiczny
 16. Visualizations of GeoDome Sky Tower: a. typical elevation; b. perspective view



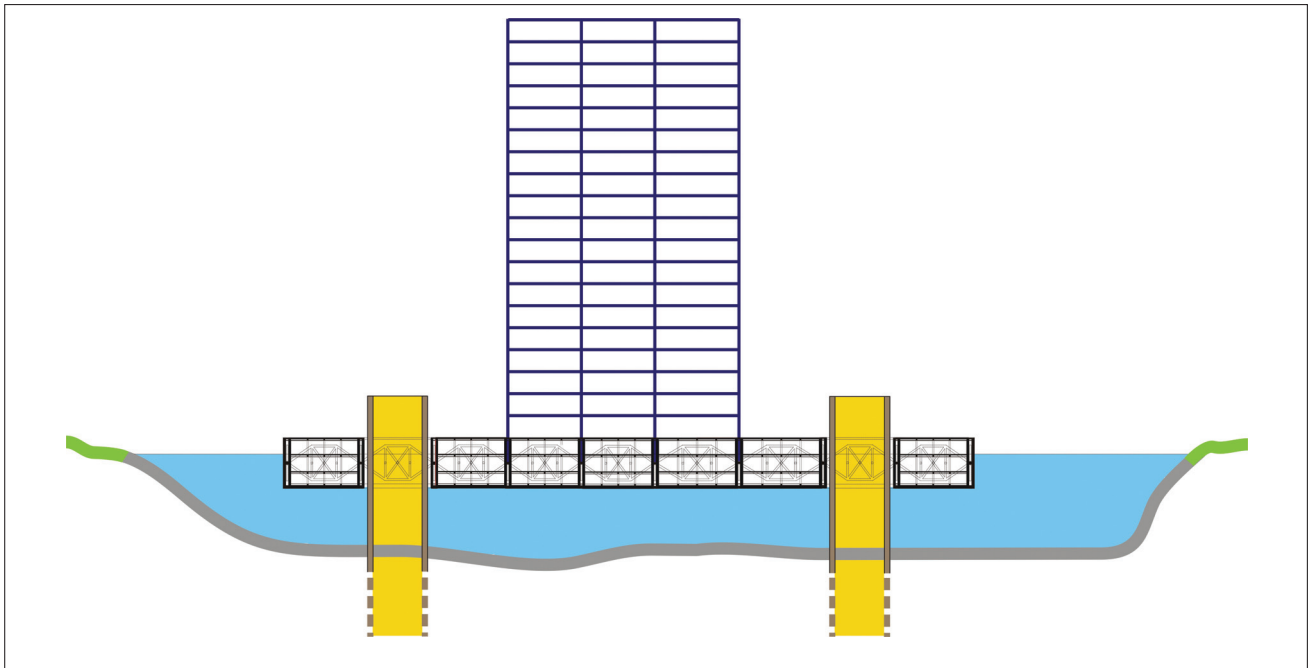
17a. Schemat głównego przekroju pionowego zespołu GeoDome Sky Tower; b. przekrój pionowy centralnej części geodezyjnej
 17a. Scheme of general vertical cross-section of the GeoDome Sky Tower complex; b. vertical cross-section of the central geodesic part



18a. Widok wnętrza centrum wypoczynkowego usytuowanego w górnej strefie struktury geodezyjnej;
 b. widok od dołu na centralną część GeoDome Sky Tower
 18a. View of interior of leisure centre situated in upper part of geodesic structure;
 b. view on the central part of the GeoDome Sky Tower

powierzchni terenu, zagłębiając jego strukturę jedynie na około 0,50 m w gruncie. Moduł siatki projektowej takiego fundamentu ma także postać kwadratu o wymiarach 36 m x 36 m, a całość tak budowanej struktury ma na poziomie podstawy wymiary 252 m x 252 m. Dzięki temu naprężenia w gruncie są bardzo niewielkie, a przypadkowe przemieszczenia gruntu mogące pojawić się nawet

pod znaczną powierzchnią fundamentu nie będą mieć praktyczne znaczącego wpływu na stabilność budynków wysokich. Poszczególne obiekty wysokie są połączone ze sobą za pomocą przestrzennych konstrukcji łukowych oraz za pomocą geodezyjnej struktury sferycznej. W górnej części jej przestrzeni wewnętrznej przewidziano centrum rekreacyjne o nazwie Tropical Island (il. 18a),



19. Schemat głównego przekroju pionowego Floating Bay Tower
19. Scheme of general vertical cross-section of the Floating Bay Tower

a w dolnej zaplanowano pomieszczenia spełniające podobne funkcje, w tym sale sportowe, wystawienne, konferencyjne. Przestrzeń wewnętrzną przeszklonych struktur łukowych przeznaczono także na funkcje rekreacyjne i zaplanowano tam stosowne ogrody z roślinnością pochodzącą głównie ze stref okołozwrotnikowych.

Ten sam rodzaj systemu fundamentu zespolonego został zastosowany jako podstawa złożonej formy budynku wielofunkcyjnego w projekcie Floating Bay Tower²⁷ (il. 19–21), opracowanym na potrzeby międzynarodowego konkursu architektonicznego eVolo215. Taki rodzaj obiektów jest proponowany dla obszarów silnie zurbanizowanych nie mających możliwości ekspansji na terenach lądowych, które znajdują się nad spokojnymi zbiornikami wodnymi, będącymi na przykład zatokami morskimi lub jeziorami. Całość założenia zaprojektowana jest na siatce złożonej z trójkątów równobocznych o modularnej długości boku równej 30 m. Pozioma materia podstawy ma formę zbliżoną do sześciokąta prawidłowego o długości boku równej 150 m, zatem długość przekątnej tej podstawy jest równa 300 m. Platforma podstawy jest utworzona ze stalowo-żelbetowych

segmentów wykonanych jako wodoszczelne skrzynie trwale połączone ze sobą. Mając dużą wyporność hydrostatyczną fundament ukształtowany w ten sposób stanowi unoszącą się na wodzie platformę posiadającą możliwość dostosowywania się jedynie w kierunku pionowym do aktualnego poziomu wody w danym zbiorniku. Przemieszczenia w kierunku poziomym są blokowane za pomocą 12 masywnych filarów żelbetowo-ziemnych (il. 19), mających formy potężnych prostopadłościaków, których trójkątne boki podstaw mają długość równą 30 m. Filary te są trwale osadzone w głęboko położonych warstwach nośnych podłoża. Budynek główny jest umieszczony centralnie na pływającej platformie podstawy, ma wysokość około 158 metrów i jest utworzony za pomocą trzech modułów zaprojektowanych za pomocą systemu wielościanu ramowego. Każdy moduł ma postać wydłużonego ośmiościanu mającego podstawę w formie trójkąta równobocznego o długości boku równej 30 metrów. Sposób definiowania modeli numerycznych siatek prętów na bocznych ścianach tej formy modułu bryłowego jest bardzo podobny do tego zastosowanego w programie Budynek2.

²⁷ Projektant: Janusz Rębielak, współpraca techniczna: Wojciech Cieplucha, Maciej Rębielak.



20. Widok z góry na zaprojektowany kompleks Floating Bay Tower
20. Bird view on designed complex of the Floating Bay Tower



21. Widok perspektywiczny kompleksu Floating Bay Tower
21. Perspective view of the Floating Bay Tower complex

Wnioski

Formuła konstrukcyjna prętowych struktur przestrzennych odznacza się dużym potencjałem rozwojowym i może być w sposób twórczy zastosowana w projektowaniu nowych rodzajów konstrukcji nośnych budynków wysokich. Modele numeryczne takich systemów konstrukcyjnych zdefiniowane np. w języku programowania Formian znacząco usprawniają i przyspieszają proces projektowania obiektów budowlanych umożliwiając szybką analizę różnych wariantów i wybór rozwiązania optymalnego dla zadanych warunków. Zastosowanie takich narzędzi projektowych ułatwia współpracę między wszystkimi uczestnikami procesu inwestycyjnego, w tym głównie między architektami i konstruktorami. Współczesne technologie numeryczne są istotną pomocą w pracy architektów i swoimi coraz większymi możliwościami zachęcają twórców do podejmowania coraz to nowych i śmielszych wyzwań projektowych.

Bibliografia

M. M. Ali, K. S. Moon, *Structural developments in tall buildings. Current trends and future prospects*, „Architectural Science Review”, nr 3, 2007.

E. Allen, J. Iano, *Fundamentals of Building Construction. Materials and Methods*, John Wiley & Sons, Hoboken 2014.

M. Y. L. Chew, *Construction Technology for Tall Buildings*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore 2012.

D. P. Coduto, *Foundation Design. Principles and Practices*, Prentice Hall, New Jersey 2001.

S. J. Greenfield, *Foundation in Problem Soil. A Guide to Lightly Loaded Foundation Construction for Challenging Soil and Site Conditions*, Prentice Hall, New Jersey 1992.

F. R. Khan, *The John Hancock Center*, „Civil Engineering”, nr 10, 1967.

R. M. Kowalczyk, R. Sim, M. B. Kilmister, (red.), *Structural Systems for Tall Buildings*, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, McGraw-Hill, New York 1993.

Z. S. Makowski, *Analysis, design and construction of double-layer grids*, Applied Science Publishers, London 1981.

K. Matso, *Lessons from Kobe*, „Civil Engineering”, nr 4, 1995.

M. Mengerhausen, *Raumfachwerke aus Stäben und Knoten*, Bauverlag, Wiesbaden, Berlin 1975.

H. Nooshin, P. Disney, C. Yamamoto, *Formian*, Multi-Science Publishing Co. Ltd., Brentwood 1993.

H. Nooshin, P. Disney, *Formex configuration processing III*, „International Journal of Space Structures”, t. 17, nr 1, 2002.

A. Z. Pawłowski, I. Całka, *Budynki wysokie*, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.

J. Rębielak, *Shaping of space structures. Examples of applications of Formian in design of tension-strut systems*, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.

J. Rębielak, *Some proposals of structural systems for long span roofs and high-rise buildings*, „Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures”, t. 40, nr 1, 1999.

J. Rębielak, *Some proposals of space structures shaping*, [w:] J. C. Chilton, B. S. Choo, W. J. Lewis & O. Popovic (red.), *Proceedings of the International Colloquium: Structural Morphology – Towards the New Millennium*, University of Nottingham, 1997.

J. Rębielak, *System of combined foundation for tall buildings*, „Journal of Civil Engineering and Architecture”, nr 6(12), 2012.

R. Robinson, *Malaysia's Twins. High-rise. High Strength*, „Civil Engineering”, nr 7, 1994.

M. Sarkisian, *Designing Tall Buildings. Structure as Architecture*, Routledge, Taylor and Francis Group, New York 2011.

Janusz Rębielak, prof. dr hab. inż. arch.
Instytut Projektowania Budowlanego
Katedra Konstrukcji i Technik Budowlanych
Wydział Architektury Politechniki Krakowskiej

NUMERICAL MODELS IN DESIGNING OF SUPPORTING STRUCTURES OF TALL BUILDINGS

JANUSZ REBIELAK

Introduction

Application of numerical models of the complex structural systems makes easier the design process of a building object, form of which is subjected to frequent modifications during the entire investment process. At present the computer technology called by abbreviation BIM (Building Information Modeling) belongs to the most efficient design tools. In its integral procedures are applied numerous methods in creating of numerical models defined by means of various programming languages. Formian is a specific type of the programming language, which is based on so called formex algebra¹, invented by Prof. Hoshyar Nooshin from Space Structures Research Centre at University of Surrey in Great Britain². Formian is intended as a tool for efficient creating of numerical models of the spatial frames often composed of huge number of component parts. Numerical models can be defined in Formian by means of almost optional number of parameters, what makes possible steady adjust of shape of the designed structure to the actual requirements of the design process. Space frames have been since the middle of XX century and they are currently applied mainly in the roof cover structures³, particularly of big clear spans⁴. There are several definitions of space structures. The most simple and probably the most general one determines as spatial structure that one, which consists of members uniformly arranged in space, while the force transmission is done also in spatial way⁵. Advantageous features of space structures have inclined to adopt them in the bearing structures of tall buildings. Feasibility of pro-

gramming language Formian, proved in design of roof covers, has been confirmed in defining of numerical models of simple and of more complex shapes of the proposed structural systems of tall buildings⁶.

Basic components of programming language Formian

The *formex algebra*, as it was previously mentioned, is the mathematic background of this programming language, which is used for precise definition of location nodes in three dimensional space of a structure as well as to determine connections between them, what simultaneously defines arrangements of particular members. For instance localization of component parts arranged on the plane surface is determined by means of so called *normat lines*, which mutual positions and distances are assigned by the programmer. In the paper has been assumed to apply original terms of this programming language used in English because in this language are published manuals and papers about applications of Formian⁷. Orthogonal configuration of *normat lines* is commonly used, which in typical Cartesian system can be identified with axes x, y and z (Fig. 1). Number of *normat line* is called *unipole* (Fig. 2). There are used typical keyboard signs, which are connected to the appropriate numerical operations. Position of each node defines set of figures given in suitable sequence, which figures are separated by comas what is named *signet*. As the first is given a number of *normat line* perpendicular to the first direction. For instance localization of node A on the plane surface defines *signet* 1,2.

¹ H. Nooshin, P. Disney, C. Yamamoto, *Formian*, Multi-Science Publishing Co. Ltd., Brentwood 1993.

² It is worthy to mention, that the research centre is of global scientific importance and it was established in middle of 60s of the past century by Prof. Zygmunt Stanisław Makowski.

³ M. Mengerhausen, *Raumfachwerke aus Stäben und Knoten*, Bauverlag, Wiesbaden, Berlin 1975.

⁴ The notion of space structure was initially identified almost exclusively to the space frames. Gradually it was extended to other forms of structural systems, which fulfil an appropriate definition.

⁵ Z. S. Makowski, *Analysis, design and construction of double-layer grids*, Applied Science Publishers, London 1981.

⁶ Numerical models of the proposed structural systems are defined by the author in Formian and they have been the bases for preparing all the figures, drawings and visualizations shown in the paper and made also by the designed teams led by the author.

⁷ H. Nooshin, P. Disney, *Formex configuration processing III*, "International Journal of Space Structures", Vol. 17, No 1, 2002.

If an example surface is in the three dimensional space located on "0" level then the signet takes following form: 1,2,0. Connections of two nodes, e.g. A and B, by means of a member is declared by a *cantile*, what in this particular case takes a following form: [1,2;0,1]. Configuration of two connected together members placed between nodes, A, B and C is defined by means of numerical formation called *formex* (Fig. 2). Defining numerical models for the surface elements is also possible.

For various design purposes there are applied disparate functions starting from very simple, belonging to group of so called *cardinal functions*, till to very complex like e.g. *polymation function* or *trac-tation function* that make possible the parametric way of defining of numerical models for single- and multilayer geodesic domes⁸. Mathematic simplicity of programming language Formian caused its applications as the special numerical tool in processes of design of other types of very complex bearing structures, including systems of tall buildings⁹.

General requirements regarding support structure of a tall building

Multi-story buildings are constructed for a very long time and they are of various useful purposes¹⁰. There are exist numerous equivalent definitions of tall building. In general one can call in this way a multi-story buildings, which height is several times bigger than size of shortest edge of its base plan. Sometimes one can assume a conventional height of 75 m or 100 m, above which building is considered as the tall or high-rise. Dynamic develop of contemporary tall buildings have been initiated in the middle of XIX century when Elisha Otis invented safe system of the vertical transportation by help of lifts and when almost simultaneously steel was broadly introduced as structural material of such build-

ings. Nowadays types of the high-strength concrete implemented in the building industry in last decade of XX century have impact on evolution of forms of structural systems of such objects¹¹.

Structural system of tall building should be characterized at the same time by two contradictory features. On the one hand it should be very stiff and be able to transmit safely the load forces to subsoil by means of appropriate foundation system¹². In case of the tall building the horizontal load forces evoked by wind suction or wind pressure are crucial. On the other hand the same tall building structure should be to some degree flexible and by characterized by susceptibility to strains, what is considered as a favorable feature in case of unusual loads like e.g. the earthquakes. The susceptibility is however strictly restricted by the allowed sizes of the top building's deflections, before mostly estimated as size equal to 1/500 of its height but nowadays more rigorously limited only to 1/1000 of the height measured above the close adjacent terrain. Problems of the fire resistance of the structure and aspects of provided various ways of evacuation during the fire belong to sets of very difficult design tasks, which have to be correctly solved in order to fulfill all the suitable requirements.

System of circumferential support structure

Systems of frame structures, system of single framed tube or system double framed tube (*tube in tube*)¹³ belong to currently considered as typical structural systems of tall buildings¹⁴. Works of such outstanding engineers like Fazlur R. Khan¹⁵ or Leslie E. Robertson have been of significant impact to the develop of tall buildings structures. Thermal influences, in certain period of XX century, have been considered as significant impact in restriction of height possible to obtain by the

⁸ J. Rębielak, *Shaping of space structures. Examples of applications of Formian in design of tension-strut systems*, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.

⁹ In personal compositions of big design offices involved in preparation of technical documentations for very big and complex investments, exist necessity of applications of the space structures, are always presents specialists skilled in Formian, what makes easier the cooperation mostly between architects and engineers.

¹⁰ A. Z. Pawłowski, I. Całka, *Budynki wysokie*, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.

¹¹ R. Robinson, *Malaysia's Twins. High-rise. High Strength*, "Civil Engineering", 7, 1994.

¹² M. Y. L. Chew, *Construction Technology for Tall Buildings*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore 2012.

¹³ F. R. Khan, *The John Hancock Center*, "Civil Engineering", No 10, 1967.

¹⁴ M. M. Ali, K. S. Moon, *Structural developments in tall buildings. Current trends and future prospects*, "Architectural Science Review", No 3, 2007.

¹⁵ Theoretical works and practical applications worked out by an American engineer Fazlur R. Khana, based on samples of aircraft structures, changed completely the ways of design of tall buildings and in similar way they have increased economic efficiency of such objects, which can reach biggest heights.

tall buildings having typical structural systems¹⁶. The problem can be caused by differences between lengths of the columns located in the inner space of the building and lengths of columns arranged along its perimeter.

The first author's proposal to decrease the thermal influences was the concept of circumferential structural system being result of suitable transformations of multi-layer space frames. The cuboctahedron was a module of selected shape of the triple-layer space structure (Fig. 3a), which is the double form of structure called SDC invented by Stefan Du Chateau, which structure after some transformations has been restricted to some separated layers being horizontal disks of the just shaped structural system. Along perimeter are arranged the twin poles (Fig. 3b), while the spacing of their single branches results indirectly from the module size of the assumed horizontal space frame. In space bordered by branches of the twin poles are designed the basic and secondary bracing systems. The basic system is built by members creating huge bracings of the type "X". Particular nodes of this system are the central nodes for group of members creating the secondary bracing system. This complex system of bracing makes possible a quite uniform distribution of forces, evoked by horizontal load, among all component parts of the circumferential structure.

The circumferential support structure built in the proposed way is divided into some segments, while each of it is of the height equal to height of set of between ten and twenty or of several dozen of typical stories (Fig. 4). Particular segments are vertically positioned each on other and they are connected together by means of the main nodes of type N, which are theoretically the articulated connections and they are situated in the middle layer of horizontal disks. Due to this shape strains of single segment, caused by thermal influences, have significantly reduced impact on strains of the adjacent segments. Space of horizontal disks is devoted for technical stories.

The circumferential structure can be built by application of one of the typical double-layer space frames located vertically along the perimeter and

creating suitable segments (Fig. 5). Size of the modular unit M of such structure can be the main unit of the whole structural system of the designed tall building. The segments, like previously, will be located vertically each on other and they will be connected together by means of the suitably shaped common areas, in which will be located the main nodes of type N, being considered as the articulated nodes (Fig. 5). The joint areas designed in this way make possible to compensate of the strains and deformations caused by the thermal load. Moreover the inner spaces of members of the circumferential structure one can be fulfilled by liquid coolant being in induced circulation, what additionally will reduce thermal impact. Areas of connections of particular segments can be visible in architectonic form of the whole building, however practical reasons justify location of curtain walls onto continuous vertical surface of each façade (Figs. 6a-e). This goal is easy to achieve by appropriate arrangement of the secondary members, which constitute the stable attachment of the curtain walls situated in close vicinity of the main nodes of type N of the circumferential structure (Fig. 6e). The example form of structural system consists of three segments vertically positioned each on other. Every segment contains several dozen of typical stories.

Numerical model of this type of structural configuration has been defined in programming language Formian by means of program Budynek1. Graphic representation of execution of this program is shown in Fig. 6f. In this particular case, for clarity of the basic shape of the structural system, there were not applied additional members around the main nodes of type N in zones of connections of the vertical segments. Because the entire program is quite extensive only a part of it is presented below together with brief discuss of selected functions. In this case it was applied a numbering of rows, which has been not used in earlier versions of the programming language, while numbering of rows is obligatory introduced in the newest version called Formian-K. Numbering of rows significantly enhances cooperation and exchanging information between various persons working out the same numerical model of the designed structural system.

¹⁶ R. M. Kowalczyk, R. Sim, M. B. Kilmister (eds.), *Structural Systems for Tall Buildings*, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, McGraw-Hill, New York 1993.

Program **Budynek1**

```
<>
01. clear;
02. m=3; n=6; k=3;
03. K1={ [0,0,0;0,-1,1], [0,0,0;1,-1,0], [0,-1,1;1,-1,0] };
04. KM=lamis(1,1)|lamis(1,1)|K1;
05. SD={ [0,0,0;2,0,0], [0,0,2;2,0,2], [0,0,0;0,0,2], [
    2,0,0;2,0,2] };
06. mod1=KM#SD;
07. scian1=rinis(m,n,2,2)|mod1;
08. P1={ [0,-1,1;0,-1,3] };
09. PP=rin(3,n-1,2)|P1;
10. P2=lam(1,m)|PP;
11. PH=lam(3,n)|rin(1,m-1,2)| [1,-1,0;3,-1,0];
12. TST={ [0,-1,0;1,-1,0], [0,-1,0;0,-1,1],
    [0,-1,0;0,0,0] };
13. narozal=lam(3,n)|lam(1,m)|TST;
14. prukosn1=lam(1,m)|rin(3,2,2*n)| [-1,0,0;0,-1,0];
15. prukosp2=lam(1,m)|rin(3,n,2)| [-1,0,1;0,-1,1];
16. scian2= P2#scian1#PH#naroza#prukosn1#
    prukosp2;
17. PD1={ [0,0,0;0,0,-1], [0,0,-1;0,-1,0],
    [0,-1,1;0,-1,0] };
18. DDpr=lam(3,n)|rin(1,m+1,2)|PD1;
19. ddkrz=lam(3,n)|rin(1,m,2)| [1,-1,0;0,0,-1],
    [1,-1,0;2,0,-1] };
20. goscian=rin(3,1,1)|scian2#DDpr#ddkrz;
21. segm1=rosad(m,m)|goscian;
22. strnosn1=rin(3,k,2*n+2)|segm1; (*)Przepony(*)
23. P={ [0,0,0;2,0,0], [0,0,0;0,1,1], [0,0,0;1,0,1],
    [0,1,1;1,0,1] };
24. PM=rosad(1,1,4,-90)|P;
25. SDO=rinid(m,m,2,2)|PM;
26. StrDO=pex|SDO;
27. pradd1=[1,0,1;3,0,1];
28. p1=rinid(m-1,2,2,m*2)|pradd1;
29. p2=rinid(2,m-1,m*2,2)| [0,3,1;0,1,1];
30. s1=StrDO#P1#p2;
31. str2=lam(3,0)|s1;
32. str2obn=tran(3,-1)|str2;
33. use &,vm(2),vt(2),
    vh(-125,-250,100,0,0,0,0,1);
34. przepon1=tran(3,2*n+2)|str2obn;
35. przepwsz=rin(3,k,2*n+2)|przepon1;
36. Budynek1=przepwsz# strnosn1;
37. draw Budynek1;
<>
```

Among numerous operators and functions of this programming language below are discussed only a few selected items. Operator signs “<>” are in

Formian so called the hard signs of stop, which are stopping further execution of the program. Very useful command “clear” wipes screen of computer and makes possible to display on it a graphic representations of current numerical operations. Sign of so called double-cross “#” is used for connection together of the previously defined *formexes*. Set of appropriately assumed parameters makes possible to the programmer a fluent changing of size of module M of the circumferential structure, its density of the inner subdivisions in horizontal and vertical directions together with number of the main segments of the whole structural system of the tall building shaped in this way. In row number 3 of this program there are applied three parameters, one of them is “m” which defines number of structure’s modules displayed along horizontal direction of each of its main segments, while parameter “n” determines number of these modules arranged along vertical direction of each single segment where parameter “k” declares number of segments vertically positioned each on other. Commands situated between semicolons are instructions of executing of Formian. Everything what is put between signs of type “(*)” is not an operation command and it is omitted during procedure of execution, but for the programmer it fulfils the information role. Program Budynek1 is of very simple shape however it can be applied for very fast of easy defining procedure of defining of numerical models for sometimes very complex forms of the proposed structural systems. It is a significant feature in case of necessity to consider in a short time of a lot of variants of spatial-functional systems of tall buildings, especially at initial stages of their design.

System of framed polyhedron

Stiffness belongs to the most desirable features of the tall building support structure. Framed structures, because of functional reasons, are mostly designed as orthogonal systems (Fig. 7a), what demands usage of rigid connections of columns and transoms. Distance between two adjacent transoms (h) equals mostly the height of a single typical story of the building. Rigid nodes have to be appropriately designed and precisely produced that is why they are heavy and quite expensive. Stiffness of typical frame system is in a great part the summary of stiffness of all its nodes. Coplanar frame systems arranged as triangular grids are originally

are very stable, they do not need application of rigid nodes, due to which they can be much lightweight and cheaper than orthogonal frame systems. When triangular frames will be put onto triangular side facades of the appropriate building's form, then its structural system will get a very big stability by relatively small consumption of the construction material. Moreover costs or its erection can be also quite small. Figure 7b shows elongated shape of square antiprism. All its triangular side faces are suitably in the triangular way subdivided and they are oblique because two its square bases are of the same size. If its upper face will be of appropriate size then half number of its side faces will be perpendicular to the base (Fig. 7c). It is an advantageous feature because of the functional reasons therefore it was assumed as the basic form of the designed tall building

Structural system shaped in this way the author called a framed polyhedron and in the middle of 90s of the last century he proposed in projects and papers its applications as the main structural system for the tall buildings. Concept of this structural system has been presented in 1997 during proceedings of the IASS Symposium¹⁷. Later it was presented in another author's paper¹⁸. At the beginning of XXI century there were constructed some spectacular buildings like the One World Trade Center, erected in 2013 in New York, and also there the Hearst Tower built in 2006¹⁹. Structure of the Hearst Tower is called the "diagrid" system.

The selected basic shape (Fig. 7c), can be further modified and transformed, while its suitable forms can be vertically located each on other (Fig. 8a). The relatively simple form can be supplemented by appropriate parts designed according to rules of presented structural concept of the framed polyhedron and these parts can be arranged in selected parts of the basic shape. Due to this concept the designed building can obtain an interesting and unique architectonic form (Fig. 8b). Tall building of such form was the main object of the multi-purpose complex designed by the author in the southern part of Wrocław, the capital city of province Lower Silesia, in

Poland. Significant role in process of working out of this conceptual design has played the numerical model determined in programming language Formian having a working name Budynek2 (Fig. 8c). Selected part of this program is presented below.

Program **Budynek2**

```

<>
1. clear;
2. m=6;
3. EM13={ [0,0,0;2,0,0],[0,0,0;1,0,1],[1,0,1;2,0,0] };
4. SPP1=genis(m,m,2,1,1,-1)|EM13;
5. EM12={ [0,0,0;0,1,0],[0,0,0;1,0,0],[0,1,0;1,0,0] };
6. SP=genid(m,m,1,1,0,-1)|EM12;
7. SW1=pos(3,[0,0,0;m,0,m;0,m,m],
  [0,0,0;m,0,0;0,m,0])|SP;
8. XMP=SW1#SPP1;
9. ModPod=rosad(0,0)|tranad(0,0,-m,-m)|XMP;
10. s3=7.48;
11. Modul1=bt(1,1,s3)|ModPod;
12. s2=0.5*sqrt(2);
13. s1=0.5*sqrt(2);
14. ModGor1=tranix(0,0,0)|verax(0,0,0,0,0,1,45)|
  bt(s1,s2,s3)|ModPod;
15. Gora1=tranix(0,0,m*s3)|ModGor1;
16. Budynek2=Modul1#Gora1;
17. use &,vm(2), vt(1), c(1,1),
  vh(94,-288,82,5,5,0,5,5,5);
18. draw Budynek2;
<>

```

Above there is presented only the initial part of the program which defines relatively simple shape of structure shown in Fig. 8a. In row number 2 it is determined density of the triangular grid designed onto each of the side faces of the basic polyhedron.

The shape of tall building is a dominant in the conceptual design of multipurpose complex placed in Wrocław within district limited by streets Powstańców Śląskich, Wielka, Gwiaździsta and Szczęśliwa²⁰ (Figs. 9–11). This complex is composed of a congress center, shopping arcade, apartment buildings, while interior space of the tall building is aimed

¹⁷ J. Rębielak, *Some proposals of space structures shaping*, [in:] J. C. Chilton, B. S. Choo, W. J. Lewis & O. Popovic (eds.), *Proceedings of the International Colloquium: Structural Morphology – Towards the New Millennium*, University of Nottingham, 1997.

¹⁸ J. Rębielak, *Some proposals of structural systems for long span roofs and high-rise buildings*, "Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures", Vol. 40, No 1, 1999.

¹⁹ M. Sarkisian, *Designing Tall Buildings. Structure as Architecture*, Routledge, Taylor and Francis Group, New York 2011.

²⁰ Conceptual design of this complex was worked out in order to present practical possibilities of system of framed polyhedron. Author of the design: Janusz Rębielak, technical cooperation by: Maciej Smoliński, Maciej Rębielak.

for the office and hotel functions. The tall building has a square base form of the edge length equal to 48.00 meter, it contains 47 aboveground stories and 3 underground stories. Its total height, including the service story, equals about 203.00 meters.

Concept of system of combined foundation

Foundation of a heavily loaded object, like the tall building really is, on subsoil of small load carrying ability or in an earthquake area, is a very complex and difficult technical task^{21, 22, 23, 24}. If the carrying ground is located very far beneath terrain then the deep foundation structures are complex and expansive structural solutions. Conclusions following from analyses of biologic structures existing in nature can be very helpful in processes of the engineering construction designs. Structures of the trunk and root systems of certain species of trees cause that their whole construction is able to take relatively huge values of load forces, including their horizontal components, at the same time be characterized by suitable flexibility. Certain types of trees, particularly growing in marshy areas, have root systems spreading wide and shallowly around the trunk (Fig. 12). The form of root system together with patterns of stress trajectories in a free-ends beam were inspirations to the author in process of invention of the system of combined foundation²⁵. Schemes of its structural concept are shown in Fig. 13. The main nodes of the proposed structural system are uniformly distributed along the neutral axis of e.g. beams (1) being its horizontal components (Fig. 13a). Concentrated forces of big values are transmitted to these nodes by means of two subsystems located e.g. in the narrow space between two parallel positioned beams. One of the subsystems is called funicular system (Fig. 13b), while the second one is called arch system (Fig. 13c). If their patterns are symmetric towards the neutral axis then after their connection in the main nodes will act only vertical components of reactions (Fig. 13d). Selected lenticular shape of the intermediate components create their structural module and it

can be multiply repeated along horizontal direction (Fig. 13d). Nodes A, B and C are not connected to matter of the main beams (1) but the main nodes (Nc) are connected to them. It implies that foundation constructed in this way can be of theoretical unlimited base surface. Then such foundation can be applied for location of very heavily loaded object on subsoil of very small load carrying ability. Building supported on it should be of great stability even after considerable translocations of ground caused for instance by the earthquake. When number of the lenticular modules is odd then stability of the boundary zones can be improved by their appropriate shaping and including weight of ground situated in the soil wedges determined by suitable value of an angle α .

Combined structural system of tall building

When a building is supported on the proposed combined foundation and when in its aboveground structure are applied bracings having lenticular forms shown in Fig. 14a then this configuration is called the combined structural system of the tall building. For the very similar structural form it was worked out the numerical model defined by means of program called *Budynek3*, which makes possible to determine such models for various numbers of the aboveground stories and for different sizes of the combined foundation. Part of this program, concerning definition of numerical model of the foundation is very complex and long, that is why below is presented only its fragment, which defines numerical model of the building's aboveground structure.

Part of program *Budynek3*

◇

1. clear;
2. wk=4.5;(*)Wysokosc kondygnacji(*)
3. FasadaK1=pex|lam(1,0)|{[18,0,0;0,0,8*wk], [0,0,8*wk;9,0,16*wk],[9,0,16*wk;13.5,0,24*wk],[13.5,0,24*wk;18,0,40*wk],[18,0,40*wk;0,0,40*wk],[18,0,40*wk;18,0,0],[0,0,2*wk;0,0,40*wk],[0,0,4*wk;18,0,0],[9,0,2*wk;9,0,40*wk]};
4. Strop1=lam(1,0)|tran(3,2*wk)|[0,0,0;18,0,0];

²¹ D. P. Coduto, *Foundation Design. Principles and Practices*, Prentice Hall, NJ 2001.

²² E. Allen, J. Iano, *Fundamentals of Building Construction. Materials and Methods*, John Wiley & Sons, Hoboken 2014.

²³ S. J. Greenfield, *Foundation in Problem Soil. A Guide to Lightly Loaded Foundation Construction for Challenging Soil and Site Conditions*, Prentice Hall, NJ 1992.

²⁴ K. Matso, *Lessons from Kobe*, "Civil Engineering", No 4, 1995.

²⁵ J. Rebielak, *System of combined foundation for tall buildings*, "Journal of Civil Engineering and Architecture", No 6(12), 2012.

5. Strop2=lam(1,0)|tran(3,3*wk)|[0,0,0;18,0,0];
6. StropS= lam(1,0)|rin(3,36,4.5)|tran(3,4*wk)|[0,0,0;18,0,0];
7. FasadaKB=FasadaK1#Strop1#Strop2#StropS;
8. FasadaA=tran(2,-18)|FasadaKB;
9. StrObwod=ros(1,2,0,0)|FasadaA;
10. TrzWind=rin(3,41,4.5)|ros(1,2,0,0)|
{[4.5,0,0;4.5,-4.5,0],[4.5,-4.5,0;0,-4.5,0]};
11. TrzonP=StrObwod#TrzWind;
12. Uzupeł=ros(1,2,0,0)|tran(2,-18)|
{[-18,0,0;18,0,0],[-18,0,wk;18,0,wk],
[0,0,0;0,0,2*wk],[9,0,0;9,0,2*wk],
[-9,0,0;-9,0,2*wk]};
13. TrzonCX=Uzupeł#TrzonP;
14. TrzonG=ref(3,40*wk)|TrzonCX;
15. CalyTrz=TrzonP#TrzonG;
16. Budynek3=Podstaw3#CalyTrz;
17. use &,vt(2),c(1,1),vm(2),
vh(200,-740,426,0,0,0,0,1);
18. draw Budynek3;

◇

Graphical representations of results of this program execution for various sizes of the combined foundation are shown in Figs. 14b and 14c. The program applies the simple Formian's functions belonging to group of the *cardinal functions*, due to which it contains bigger number of rows and it is slightly longer however its shape is easier to introduce numerous and significant modifications. In row number 3 it is applied a function "pex", which after multiple usage of a selected module assigns to it a single localization in space of structure. Numerical model determined in Formian can be easily transmitted to the other computer software and there successfully operated for needs of engineering analyses. That is why function "pex" is very important for correctness of e.g. static calculations carried out on basis of numerical model of the structure defined in this way.

Examples of application of numerical models in design studies

Practical usefulness of numerical models defined in Formian turns out to be good during among others working out projects for needs of international architectonic competitions of the eVolo series. The above described shape of structural system was the basis for

shaping the support structure and architectonic form of the building complex called the GeoDome Sky Tower (Figs. 15–18), being the subject of competition design of tall buildings and worked out for the competition eVolo2012.²⁶ Multifunctional complex of this name is localized in the same quarter of city Wrocław like similar complex shown in Figs. 9, 10 and 11. The designed urbanistic complex GeoDome Sky Tower is composed of four tall buildings having forms of rectangular prisms, while each of the has a square shape of base projection of the side length equal to 36.00 meter and of the height slightly bigger than 380.00 meter. Height of typical story equals 4.50 meter. The main four buildings are supported on the common horizontal base shaped as an appropriate form of system of the combined foundation. This base contains three stories, which inner spaces are devoted for needs supplementary functions accompanied to the main useful functions of this complex, which are the office, hotel, congress and leisure functions. In order to point out advantage feature of the combined foundation it was purposely positioned almost on the ground surface, at the level ca. -0.50 meter. Unit of the planning grid is also of square form having sizes 36.00m x 36.00m, and the entire base structure constructed is of size 252.00m x 252.00m. Due to this configuration stresses in the subsoil are very small and moreover accidental translocations of ground, which could appear even below large surface of the foundation, will have insignificant impact of stability of the tall buildings. Particular tall buildings are connected together by means of spatial arch structures and by help of geodesic spherical structure. In upper part of its interior space it is designed a leisure center called Tropical Island (Fig. 18a), while in the lower part have been foreseen rooms of similar functions including the sport, exhibition and conference halls. Interior space of the glazed arch structures are intended also for leisure purposes and inside them are planned gardens with plants coming mainly from subtropics areas.

The same type of system of combined foundation has been applied as the base of complex form of the multifunctional building in the design entitled Floating Bay Tower²⁷ (Figs. 19–21), which was prepared for the international architectonic competition eVolo215. This type of objects is proposed for areas of very dense urbanization of no possible expansion towards land directions, which are located by quiet

²⁶ Architect: Janusz Rębielak, technical cooperation: Maciej Smoliński.

²⁷ Architect: Janusz Rębielak, technical cooperation: Wojciech Ciepłucha, Maciej Rębielak.

water basins like sea or lake bays. The whole complex is designed on planning grid created of equilateral triangles of modular edge length equals 30.00 meter. Horizontal matter of the base is of form close to regular hexagon of the side length equal to 150.00 meter, then its diagonal is of 300.00m size. The base platform is created by means of steel-reinforced concrete segments made as waterproof boxes, which are fastened together. Foundation structure shaped in this way is of considerably big hydrostatic lift constitutes a floating platform having possibility to adjust its position only along vertical direction according to actual water level. Displacements along horizontal directions are blocked by help of 12 massive ground-reinforced concrete plies (Fig. 19), having shapes of huge rectangular prisms, which sides of triangular bases are of length equal to 30.00 meter. These plies are stably embedded in deep located bed-rock. The main building is centrally located onto the floating platform, its height is equal to ca. 158.00 meter and it is composed by three modules designed by means of system of the framed polyhedron. Each module has form of elongated octahedron having the base in shape of equilateral triangle of the edge length equal to 30.00 meter. The way of defining numerical models of triangular grids located onto side faces of this polyhedron form is very similar to the one applied in program Budynek2.

Conclusions

Construction formula of space frames characterizes by a big develop potential and it can be applied in a creative ways in designing of new types of support structures of the tall buildings. Numerical models of these structural systems defined e.g. in the programming language Formian significantly improve the efficiency of the design process of building objects and make this process faster and by this they enable fast analysis of different variants and choosing the optimum solution for the given conditions. Application of such design tools makes easier the cooperation between all participants of the investment process, especially between architects and civil engineers. Contemporary numerical technologies are significantly helpful in activity of architects and through their constantly growing computing capacities they encourage them to take new and more brave design challenges.

Translated by the Author

Bibliography

- M. M. Ali, K. S. Moon, *Structural developments in tall buildings. Current trends and future prospects*, "Architectural Science Review", No 3, 2007.
- E. Allen, J. Iano, *Fundamentals of Building Construction. Materials and Methods*, John Wiley & Sons, Hoboken 2014.
- M. Y. L. Chew, *Construction Technology for Tall Buildings*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore 2012.
- D. P. Coduto, *Foundation Design. Principles and Practices*, Prentice Hall, New Jersey 2001.
- S. J. Greenfield, *Foundation in Problem Soil. A Guide to Lightly Loaded Foundation Construction for Challenging Soil and Site Conditions*, Prentice Hall, New Jersey 1992.
- F. R. Khan, *The John Hancock Center*, "Civil Engineering", No 10, 1967.
- R. M. Kowalczyk, R. Sim, M. B. Kilmister (eds.), *Structural Systems for Tall Buildings*, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, McGraw-Hill, New York 1993.
- Z. S. Makowski, *Analysis, design and construction of double-layer grids*, Applied Science Publishers, London 1981.
- K. Matso, *Lessons from Kobe*, "Civil Engineering", No 4, 1995.
- M. Mengerhausen, *Raumfachwerke aus Stäben und Knoten*, Bauverlag, Wiesbaden, Berlin 1975.
- H. Nooshin, P. Disney, C. Yamamoto, *Formian*, Multi-Science Publishing Co. Ltd., Brentwood 1993.
- H. Nooshin, P. Disney, *Formex configuration processing III*, "International Journal of Space Structures", Vol. 17, No 1, 2002.
- A. Z. Pawłowski, I. Całka, *Budynki wysokie*, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.
- J. Rębielak, *Shaping of space structures. Examples of applications of Formian in design of tension-strut systems*, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
- J. Rębielak, *Some proposals of structural systems for long span roofs and high-rise buildings*, "Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures", Vol. 40, No 1, 1999.
- J. Rębielak, *Some proposals of space structures shaping*, [in:] J. C. Chilton, B. S. Choo, W. J. Lewis & O. Popovic (eds.), *Proceedings of the International Colloquium: Structural Morphology – Towards the New Millennium*, University of Nottingham, 1997.
- J. Rębielak, *System of combined foundation for tall buildings*, "Journal of Civil Engineering and Architecture", No 6(12), 2012.
- R. Robinson, *Malaysia's Twins. High-rise. High Strength*, "Civil Engineering", No 7, 1994.
- M. Sarkisian, *Designing Tall Buildings. Structure as Architecture*, Routledge, Taylor and Francis Group, New York 2011.

Janusz Rębielak, prof. dr hab. inż. arch.
Chair of Structures and Construction Engineering
Institute of Building Design
Faculty of Architecture, Cracow University of Technology