

Janusz Rębielak

Przykłady kształtowania i zastosowań struktur przestrzennych

1. Wstęp

Konstrukcje złożone z prętów prostych, które są rozmieszczone w sposób równomierny w przestrzeni i połączone ze sobą współśrodkowo w węzłach teoretycznie przegubowych są określane mianem struktur przestrzennych. Należą one do nowoczesnych rodzajów systemów konstrukcyjnych i ich pierwsze zastosowania praktyczne w architekturze i budownictwie nastąpiły w latach 40. naszego stulecia. Cechy struktur przestrzennych, takie jak niewielki ciężar własny, duża sztywność, łatwość montażu czy duża swoboda w kształtowaniu formy architektonicznej, sprawiają że zakres ich praktycznych zastosowań jest coraz to szerszy. Początkowo były one używane jako przenośne konstrukcje przekryć dachowych. Później stanowią także konstrukcje, np. kopuł geodezyjnych o dużych rozpiętościach, a ostatnio stanowią one czasami główny składnik systemów konstrukcyjnych obiektów o złożo-

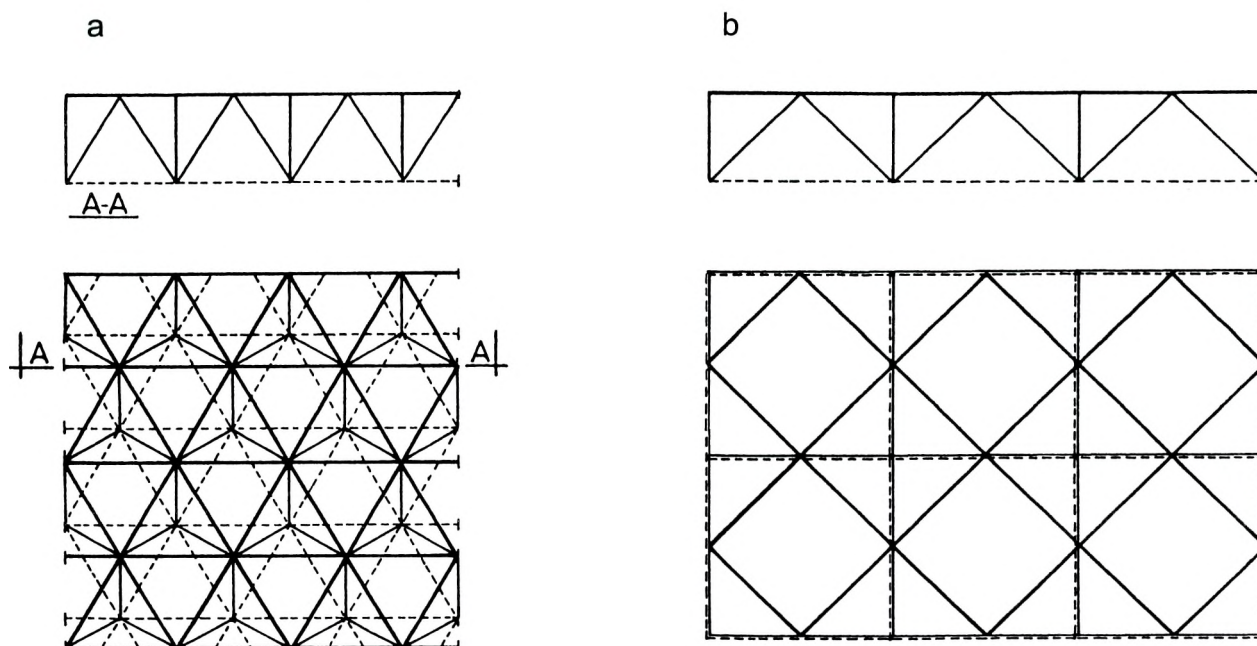
nych funkcjach użytkowych. Proponuje się także stosować struktury przestrzenne w projektowaniu budynków wielokondygnacyjnych. Duża sztywność, w połączeniu z niewielką wrażliwością na nierównomierne osiadanie podpór, umożliwiają zastosowanie pewnych rodzajów takich struktur w kształtowaniu konstrukcji obiektów lokalizowanych bądź na terenach aktywnych sejsmicznie, bądź na terenach szkód górniczych [1]–[3], [6], [9]–[11].

Dalej przedstawiono przykłady kształtowania struktur przestrzennych na potrzeby projektowania przekryć dachowych o dużych rozpiętościach oraz systemów konstrukcyjnych budynków wysokich. Przedstawione przykłady stanowią reprezentatywną grupę układów konstrukcyjnych opracowanych wcześniej przez autora i prezentowanych bardziej szczegółowo w pracach [14]–[21].

2. Struktury przekryć dachowych

Klasyczne i najczęściej stosowane formy struktur przestrzennych składają się z dwóch równoległych do siebie warstw prętów, połączonych ze sobą za pomocą systemu prętów ukośnych czy pionowych. Pręty warstw górnej i dolnej tworzą ciągłe formy siatek, a odległość między nimi, oznaczana zwykle jako h , jest wysokością konstrukcyjną struktury przestrzennej. Rozmieszczenie prętów w przestrzeni danej struktury może być opisane za pomocą wielu metod. W pracach autora przyjęto stosowanie metody opisu geometrycznego, w której używa się odpowiednio przyjętych symboli siatek prętów w warstwach zewnętrznych struktur. Podstawowe typy siatek prętów

oznaczono następującymi symbolami: siatkę trójkątną oznaczono jako T, siatkę trójkątno-sześciokątną jako TH, siatkę ortogonalną jako O, a siatkę diagonalną symbolem D [2], [15], [16]. Siatki o bardziej złożonych kształtach są oznaczone stosownie dobranymi postaciami symboli literowych lub literowo-cyfrowych. Symbole te są umieszczone wewnątrz nawiasu klamrowego i oddzielone myślnikiem. Jako pierwszy jest umieszczany symbol siatki górnej. Przed, za i wewnątrz nawiasu klamrowego mogą być usytuowane dodatkowe oznaczenia literowe i cyfrowe, które służą do precyzyjnego opisu sposobu rozmieszczenia prętów w przestrzeni danego rodzaju struktury.



Rys. 1. Schematy rozmieszczenia prętów w przestrzeniach struktur dwuwarstwowych: a) {T-T}, b) {D-O}

Na rysunku 1 przedstawiono schematy przykładowych form dwuwarstwowych struktur przestrzennych. Schematy struktury oznaczonej jako {T-T} przedstawiono na rys. 1a, schematy budowy struktury {D-O} natomiast na rys. 1b.

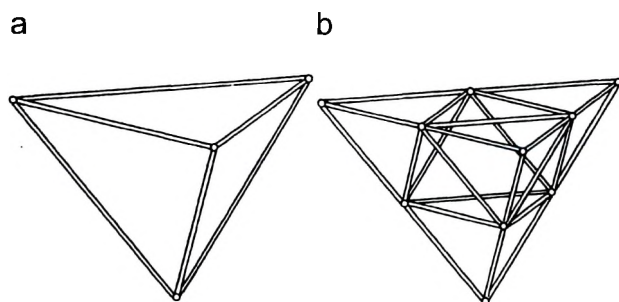
Ekonomiczną rozpiętość płaskiej postaci struktury przestrzennej szacuje się na około 20 h. Ta zależność oznacza, że struktura projektowana jako konstrukcja o dużej rozpiętości musi być wykonywana z prętów o długościach znacznie większych niż długości uznane za optymalne i mieszczące się w zakresie 1,5–2,5 m. Ponieważ nośność struktury prętowej jest w najistotniejszej mierze uwarunkowana nośnością prętów ściskanych, należy więc dążyć do takiego jej uformowania, aby w strefach działania największych sił ściskających mogły być umieszczane pręty najkrótsze danej struktury. Montaż struktury o dużych rozmiarach jest procesem złożonym i często jest dokonywany za pomocą modułów w postaci odpowiednich zestawów prętów.

Pręty w przestrzeni każdej struktury tworzą układy bryłowe, charakterystyczne dla danej jej formy. W skład tych układów dość często wchodzi czworościan (rys. 2a) i jest to forma o największej sztywności utworzona

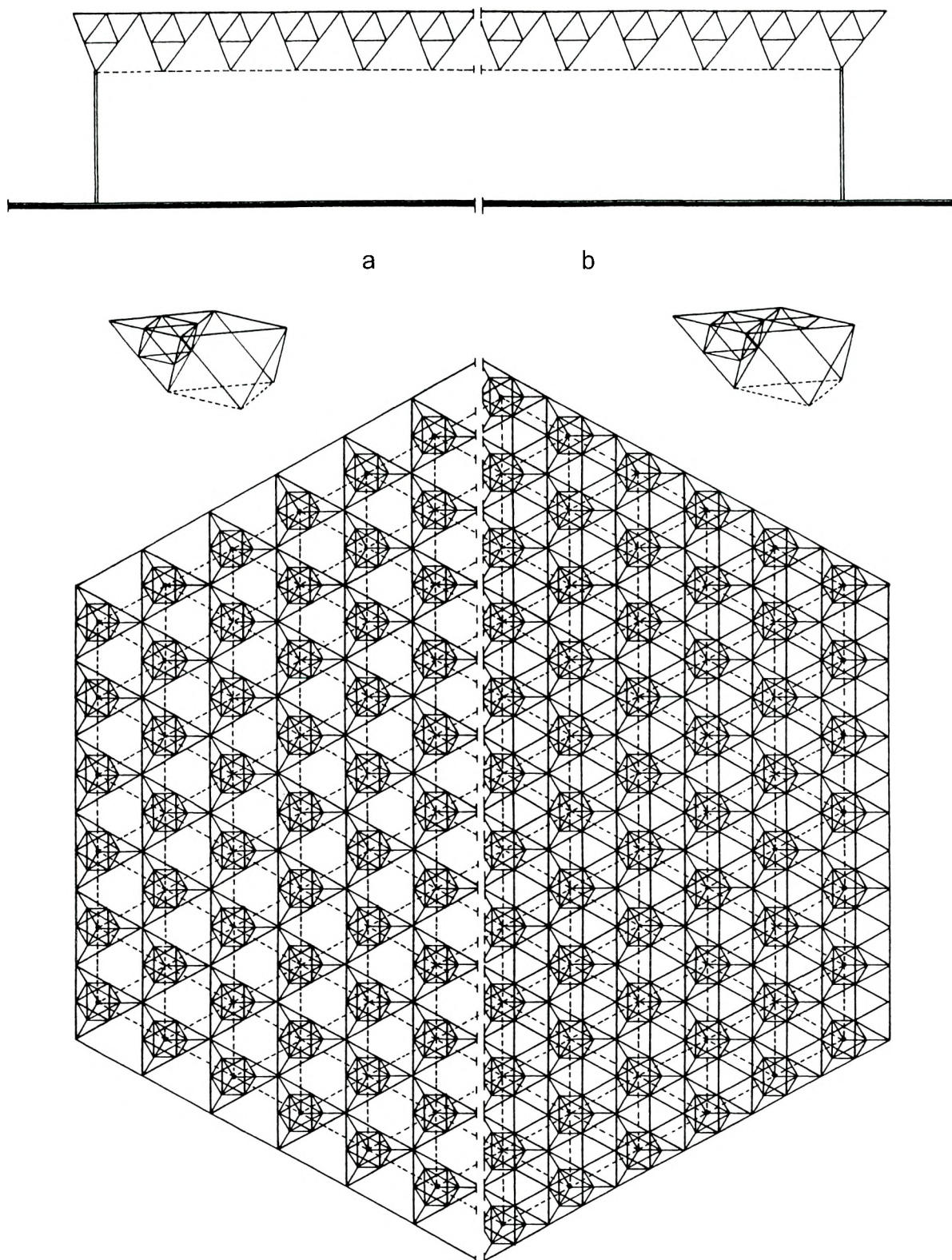
z prętów o jednakowych długościach, połączonych ze sobą w sposób przegubowy. Jeśli krawędzie czworościanu foremego zostaną podzielone na dwie równe części, a każda z trójkątnych ścian zostanie uzupełniona dodatkowymi trzema prętami w sposób pokazany na rys. 2b, to tak ukształtowany moduł może być zastosowany w projektowaniu konstrukcji przekrycia dachowego o dużej rozpiętości. W tym przypadku pręty tworzące ten moduł są dwukrotnie krótsze od prętów budujących moduł klasycznej struktury dwuwarstwowej (rys. 2a) o takiej samej wysokości konstrukcyjnej. Dzięki temu można oczekiwać, że rozpiętość struktury złożonej z modułów o formie proponowanej na rys. 2b może być znacznie większa niż rozpiętość klasycznej postaci struktury złożonej z modułów typowych (rys. 2a) o takich samych długościach prętów.

Stosowanie tego proponowanego rodzaju modułu będzie korzystne jeśli obciążenia będą przyłożone tylko do węzłów usytuowanych w wierzchołkach czworościanu [26].

Na rysunku 3 przedstawiono schematy płaskiej formy przekrycia zbudowanego za pomocą dwóch odmian struktury przestrzennej uformowanej na podstawie struktury {T-T} za pomocą proponowanej postaci czworościennego modułu konstrukcyjnego. Warstwa górna struktury przestrzennej oznaczonej jako B {T-T} A (rys. 3a) składa się z prętów o takich samych długościach jak wszystkie jej krzyżulce, ale siatka górna jest złożona z trójkątnych pól o różnych wielkościach. Warstwa dolna jest zbudowana z prętów dwukrotnie dłuższych niż pręty warstw pozostałych. Struktura oznaczona jako B {T-T} B (rys. 3b) ma budowę wewnętrzną taką samą jak struktura poprzednia, ale jej warstwa górna składa się z jednakowych trójkątnych pól. Prezentowane dwie formy struktur są podparte w każdym z krawędziowych węzłów ich siatek dolnych.



Rys. 2. Typowa postać czworościennego zestawu prętów a), proponowana forma modułu prętowego dla przekryć strukturalnych o dużych rozpiętościach b)

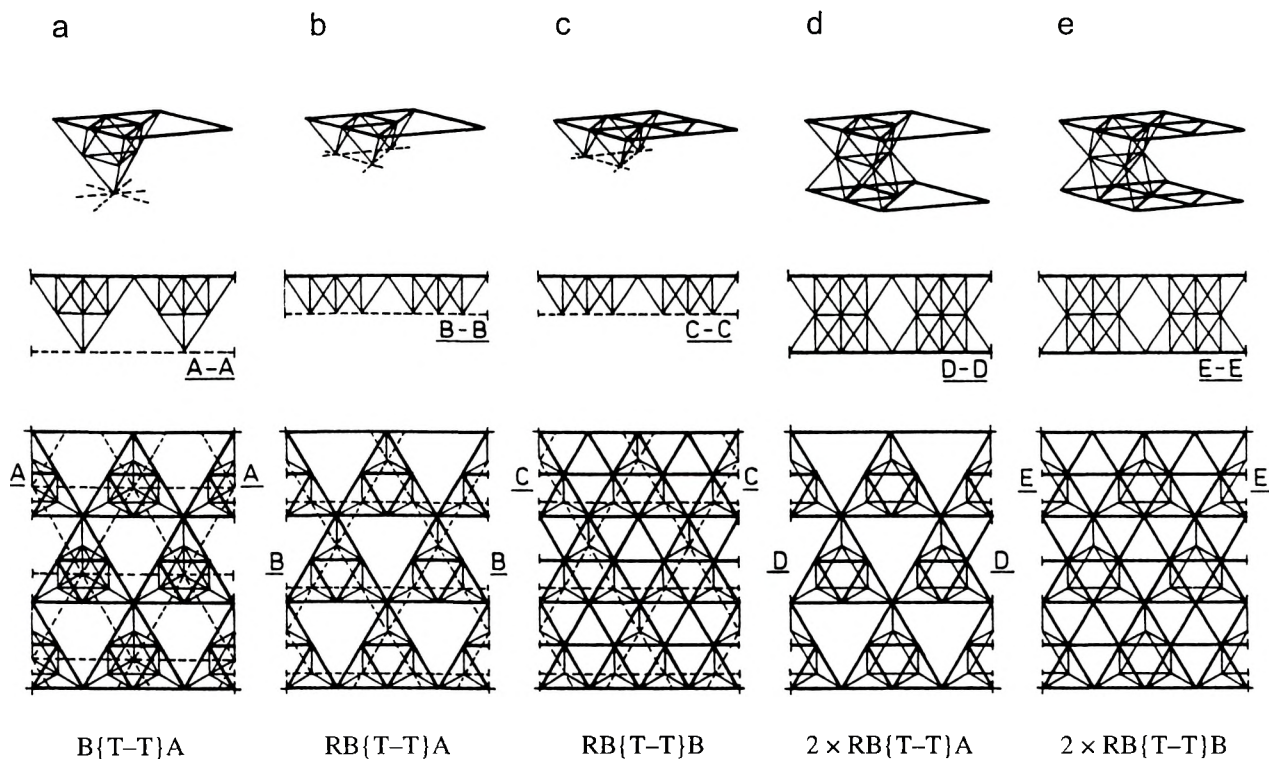


Rys. 3. Schematy konstrukcji płaskiego przekrycia dachowego budowanego za pomocą: a) struktury $B\{T-T\}A$, b) $B\{T-T\}B$

W przypadku działania sił ściskających o dużych wartościach w prętach warstwy dolnej, proponowana postać modułu prętów może być lokowana w pozycji odwrotnej, tak aby najdłuższe pręty były poddane działaniu sił rozciągających [18]–[21]. Struktury budowane w ten sposób składają się wprawdzie z trzech warstw prętów poziomych, jednak tylko pręty warstw zewnętrznych tworzą ciągłe formy siatek, dlatego struktury

przedstawione na rys. 3 można uważać za złożone odmiany struktur dwuwarstwowych. Struktury o podobnych formach można otrzymać w wyniku odpowiednich przekształceń wybranej struktury dwuwarstwowej [8].

Proponowana forma modułu prętowego może być przedmiotem wielu przekształceń prowadzonych w celu uzyskania innych postaci takich modułów oraz innych



Rys. 4. Przykłady różnych form struktur przestrzennych uzyskanych za pomocą formy podstawowej i przekształconych postaci *dużego* modułu czworosiennego

form struktur budowanych za ich pomocą. Przykłady rezultatów takich przekształceń pokazano na rys. 4. Jeśli dolna część *dużego* modułu czworosiennego (rys. 4a) ulegnie redukcji w sposób pokazany na rys. 4b, to tak uzyskany moduł będzie podstawowym zestawem prętów struktury $RB\{T-T\}A$. Jeśli się uzupełni liczbę prętów jej warstwy górnej, w sposób podobny jak w strukturze $B\{T-T\}B$, to uzyska się strukturę $RB\{T-T\}B$ (rys. 4c).

Pręty warstw dolnych struktur o dużych rozpiętościach mogą być poddane działaniu sił ściskających o znacznych wartościach, np. w razie obciążenia konstrukcji wiatrem (hangarów lotniczych). W tym przypadku możliwość zmiany konfiguracji proponowanych form modułów prętowych nie może być brana pod uwagę. Dla tego rodzaju przekryć strukturalnych zaproponowano więc np. strukturę $2 \times RB\{T-T\}A$, (rys. 4d) lub strukturę $2 \times RB\{T-T\}B$ (rys. 4e), [22].

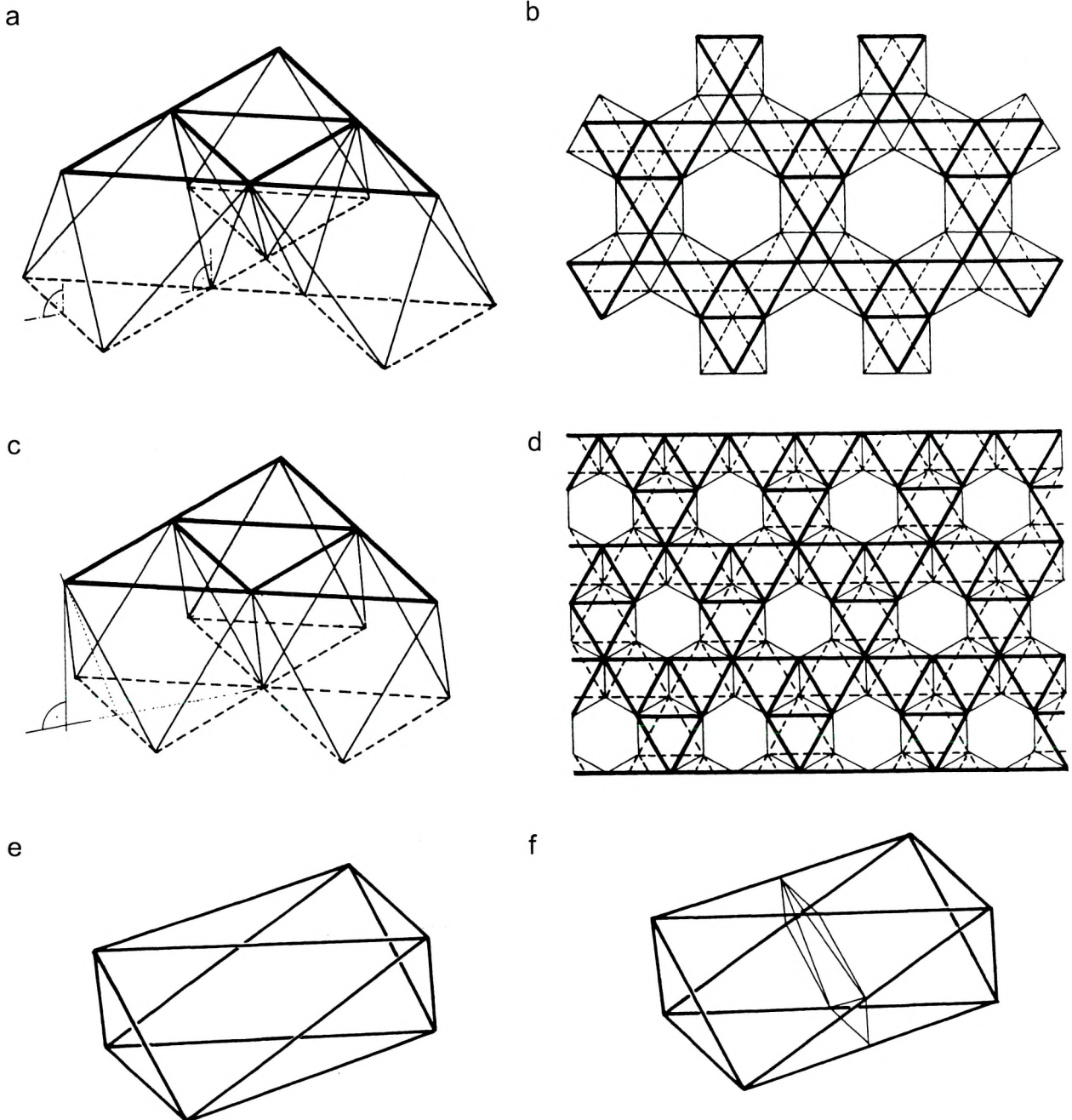
Formą podstawową dla wszystkich proponowanych dotychczas struktur była klasyczna postać struktury dwuwarstwowej $\{T-T\}$. Układ bryłowy tej struktury składa się z czworosiennu i ośmiościanu. Ten ostatni może być także podstawą procesu kształtowania modułów prętowych przekryć strukturalnych o dużych rozpiętościach.

Na rysunku 5 przedstawiono schematy struktur przestrzennych kształtowanych za pomocą wyróżnionych postaci modułów prętowych, mających formę ośmiościennego zestawu prętów. W jednym punkcie może się zwykle łączyć trzy, cztery lub sześć takich modułów. W proponowanym systemie opisu struktur przyjęto oznaczać moduł

ośmiościenny symbolem OM. Grupa struktur zbudowana za pomocą trzech modułów zestawionych w jednym punkcie będzie miała oznaczenie OM3. Jeśli moduł prętowy ma formę ośmiościanu foremego, to litera R będzie sytuowana po wcześniejszych symbolach; jeśli moduł będzie miał formę przekształconego ośmiościanu, to będzie to oznaczone symbolem T.

Zewnętrzne warstwy prętów dwuwarstwowych struktur przestrzennych pokazanych na rys. 5a i 5c mają formy nieregularnych siatek trójkątno-sześciokątnych, co przyjęto oznaczać symbolem UTH. Strukturę o schematach pokazanych na rys. 5a i 5b oznaczono symbolem $OM3T\{ITH-ITH\}$. Na rysunku 5c i 5d przedstawiono schematy budowy struktury przestrzennej, której siatki prętów warstw zewnętrznych mają taką samą postać jak siatka prętów warstwy górnej struktury $B\{T-T\}A$, por. rys. 3a. Ta forma siatki składa się z trójkątnych pól o różnych wielkościach. Krawędzie trójkątów mniejszych są dwukrotnie krótsze od boków większych trójkątnych pól. Tę formę siatki prętów przyjęto oznaczać symbolem 2T. Strukturę przestrzenną zatem, o schematach pokazanych na rys. 5c i 5d, proponuje się oznaczać symbolem $OM3R\{2T-2T\}$.

Ośmiościenny zestaw prętów może mieć także formę odpowiednio wydłużoną (rys. 5e), zbudowaną np. z prętów usytuowanych na krawędziach bocznych, mających długości dwukrotnie większe niż długości prętów usytuowanych na krawędziach trójkątnych podstaw tego modułu. Wszystkie pręty umieszczone na krawędziach takiego modułu mogą mieć takie same długości w przypadku usytuowania, w centralnej jego części,



Rys. 5. Schematy budowy grupy struktur kształtowanych za pomocą modułu w postaci ośmiościennego zestawu prętów

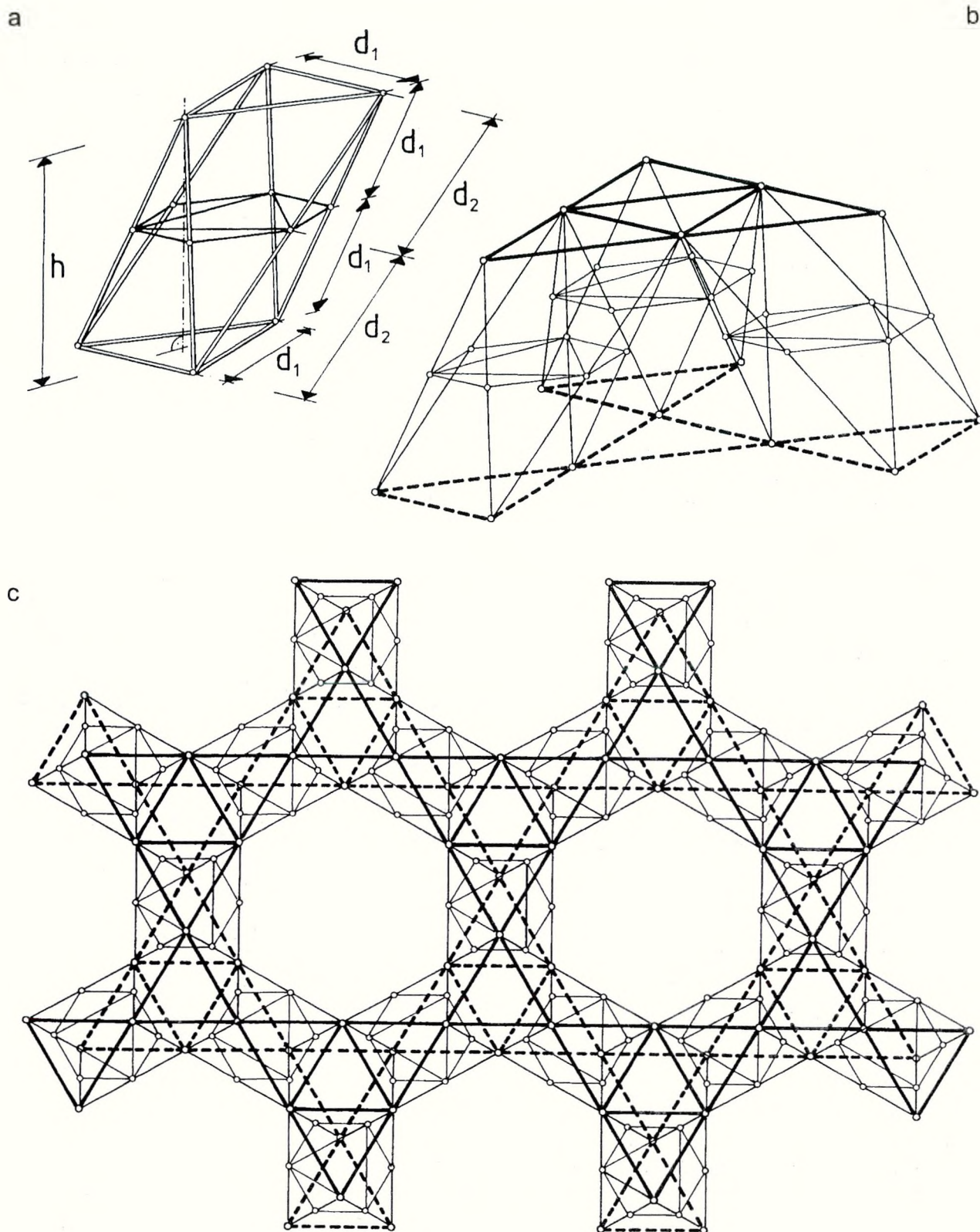
dotychczasowych prętów w sposób pokazany na rys. 5f. Ten zestaw prętów stężących ma formę sześciokąta, z wpisanym w jego wnętrzu dodatkowym, trójkątnym zestawem prętów.

Wszystkie formy modułów prętowych pokazanych na rys. 5 mogą znaleźć zastosowanie w projektowaniu struktur przestrzennych o dużych rozpiętościach, jako konstrukcji przekryć o złożonych formach architektonicznych.

Ta postać modułu ośmiościennego może mieć wiele odmian i moduł ten może być umieszczany na wiele różnych sposobów w przestrzeniach nowo tworzonych struktur. Przykład jednej z nich pokazano na rys. 6. Układ prętów budujących tę odmianę modułu ośmio-

ściennego pokazano na rys. 6a. Jeden wierzchołek ściany górnej jest umieszczony pionowo nad środkiem ciężkości dolnej podstawy tego modułu prętowego. W tej konfiguracji moduł jest utworzony z dwóch rodzajów prętów zlokalizowanych na jego krawędziach bocznych. Pręty o długościach d_2 są nieco dłuższe i ich długość jest równa około $1,05 d_1$. Wysokość konstrukcyjna (h) tego modułu i struktury budowanej za jego pomocą jest równa ok. 1,91 i jest ona nieco większa niż wysokość konstrukcyjna czworosściennego modułu (por. rys. 2b), złożonego z prętów o takich samych długościach, np. d_1 .

Przekształcone i ukośnie usytuowane formy modułów ośmiościennych mogą być łączone ze sobą w sposób po-

Rys. 6. Sposób rozmieszczenia prętów w przestrzeni struktury $OM3TS\{2TH-2TH\}$

kazany na rys. 6b. Schemat widoku z góry części struktury przestrzennej utworzonej w ten sposób pokazano na rys. 6c. Dolna i górna warstwa struktury jest zbudowana z prętów o takich samych długościach; pręty te tworzą tam

siatki trójkątno-sześciokątne. Pola trójkątne mają dwie różne gęstości podziału. Tę formę struktury przestrzennej zaproponowano oznaczać skrótem $OM3TS\{2TH-2TH\}$ [27].

3. Struktury dla budynków wysokich

Budynki wysokie, w zależności od liczby kondygnacji oraz wysokości ponad poziom terenu, dzieli się na kilka kategorii [12]. System konstrukcyjny budynku wysokiego powinien zapewnić dużą sztywność całemu układowi pod działaniem sił spowodowanych obciążeniami pionowymi i poziomymi. Istotną rolę w konstrukcjach budynków bardzo wysokich mogą odgrywać siły spowodowane wpływami termicznymi. Różnice między temperaturą słupów wewnętrznych i słupów usytuowanych na krawędziach rzutu poziomego powodują różne odkształcenia tych słupów oraz elementów z nimi połączonych. Ogólnie można stwierdzić, że dla tej grupy budynków należy dobierać takie rodzaje systemów konstrukcyjnych, które nie wymagają stosowania większych wymiarów elementów składowych ponad te, które są konieczne do przeniesienia sił spowodowanych działaniem obciążeń pionowych. Budynki najwyższe mają zwykle stalowe konstrukcje nośne, zaprojektowane w formie tzw. powłok ramowych, bez lub ze skratowaniem oraz w formie wiązki powłok ramowych [12], [13], [30]. Obecnie betony o bardzo dużych wytrzymałościach umożliwiają projektowanie i wznoszenie budynków o wysokościach rzędu 450 i więcej metrów [7], [29]. Ostatnio można zaobserwować tendencję do stosowania zasad budowy struktur przestrzennych w kształtowaniu systemów konstrukcyjnych budynków wysokich [4], [5], [31].

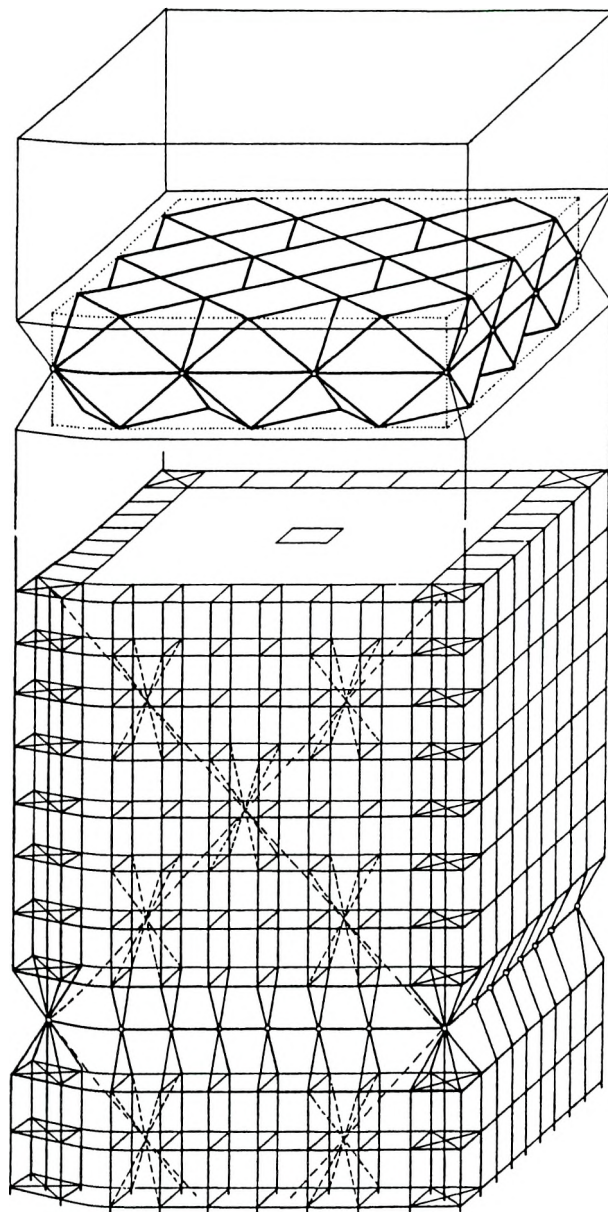
Autor przedstawił kilka postaci systemów proponowanych do projektowania układów nośnych budynków bardzo wysokich, zawierających więcej niż sto kondygnacji. Zostały one opracowane na podstawie przekształceń odpowiednio wybranych form struktur przestrzennych.

Na rysunku 7 przedstawiono schemat pierwszej z proponowanych postaci tego rodzaju systemów. Został on uformowany w wyniku przekształceń struktury $2 \times \{D-O\}A$, której układ przestrzenny przedstawiono w górnej części tego rysunku. Podstawową część składową tego systemu stanowi struktura złożona ze słupów dwugałęziowych, rozmieszczonych wzdłuż obwodu budynku. Poszczególne gałęzie tych słupów są połączone ze sobą poziomymi przewiązkami oraz systemami krótkich krzyżulców. Węzły ogniskujące kierunki kilku takich krzyżulców są zamontowane do materii głównej kratownicy stężającej, umiejscowionej w płaszczyźnie między gałęziami słupów obwodowych. Stropy poszczególnych kondygnacji są oparte w węzłach trzonu wewnętrznego oraz w węzłach teoretycznie zlokalizowanych w centralnej części przewiązek prostopadłych do obwodu budynku.

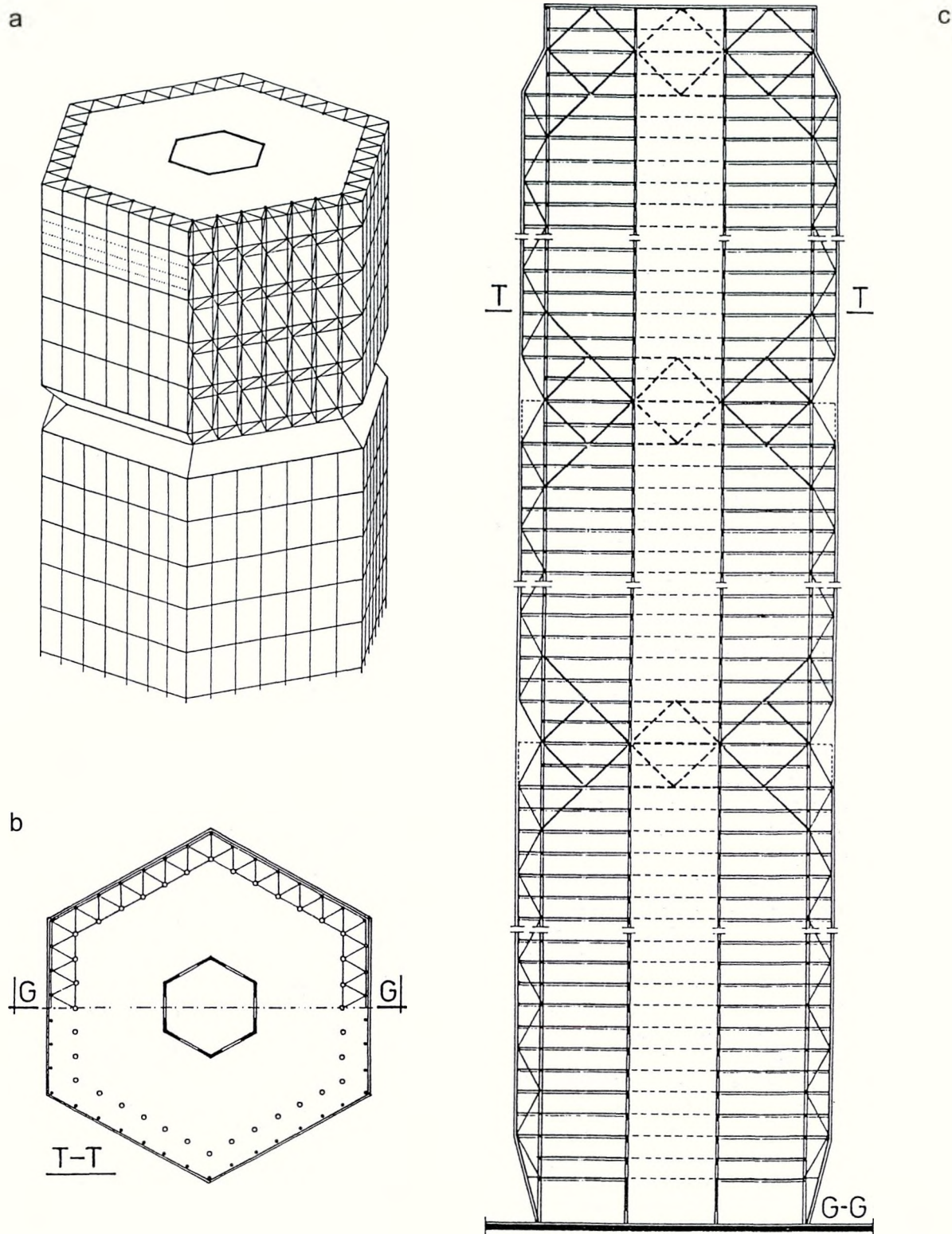
Obwodowa struktura nośna budynku składa się z kilku segmentów ustawionych pionowo na sobie i połączonych ze sobą za pomocą przepon poziomych zaprojektowanych w formie kratownic przestrzennych, np. w formie struktury $2 \times \{D-O\}A$. Wysokość pojedynczego segmentu struktury obwodowej będzie równa wysokości kilkunastu lub kilkudziesięciu kondygnacji typowych. Przestrzeń przepon poziomych będzie przeznaczona na potrzeby kondygnacji technicznych budynku. Ściany osłonowe muszą być zamontowane do węzłów umiejscowionych na zewnętrznych gałęziach słupów. Podział struktury obwodowej

na odcinki jest podyktowany dążeniem do ograniczenia wpływu odkształceń pojedynczego segmentu na wielkości odkształceń segmentów z nim połączonych [18], [21], [23].

Opisany system konstrukcyjny składa się z dużej liczby elementów umieszczonych w przestrzeni wewnętrznej budynku wysokiego, co może niekiedy znacznie ograniczać powierzchnię użytkową poszczególnych kondygnacji. Dlatego system ten przekształcono w sposób pokazany poglądowo na rys. 8a, w celu uzyskania prostszej formy obwodowej struktury nośnej. W tym przypadku gałęzie wewnętrzne poprzedniej formy słupów biegną w liniach prostych, od fundamentu aż po szczyt budynku. Są to jego słupy główne. Gałęzie zewnętrzne wraz z pozosta-



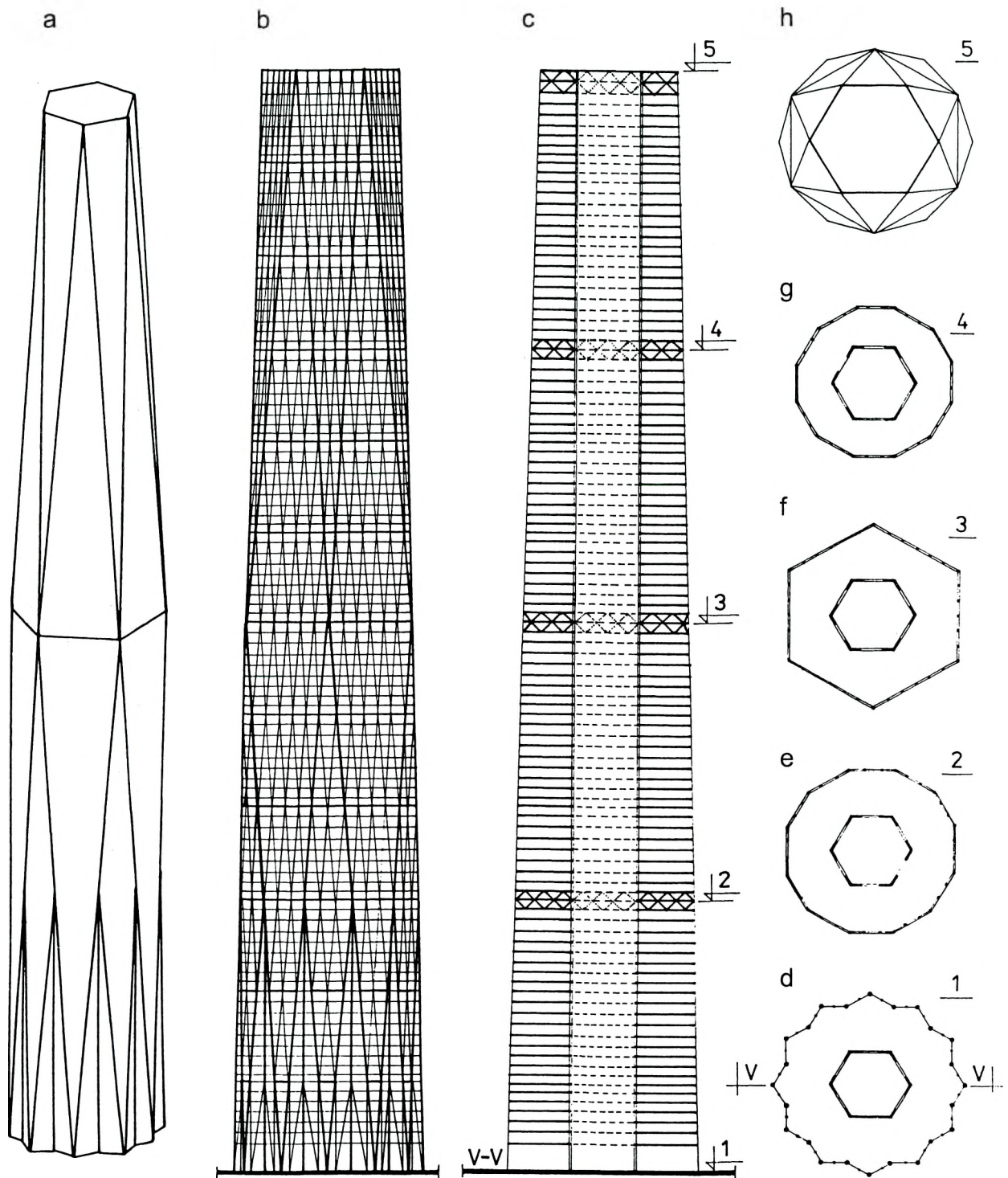
Rys. 7. Schemat budowy pierwszej z proponowanych form obwodowej struktury nośnej budynku wysokiego



Rys. 8. Schematy: a) ogólny jednej z przykładowych form drugiego z proponowanych rodzajów obwodowej struktury nośnej jako układu konstrukcyjnego budynku, b) przekroju konstrukcji budynku oraz rzutu poziomego kondygnacji typowej, c) główny przekrój pionowy tej formy budynku wysokiego

łymi elementami tworzą przestrzenną formę obwodowej struktury nośnej usytuowanej pionowo po zewnętrznej stronie słupów głównych. Całość tej struktury jest podzielona na pewną liczbę segmentów połączonych ze sobą za pomocą kratownicowych przepon poziomych. Ściany osłó-

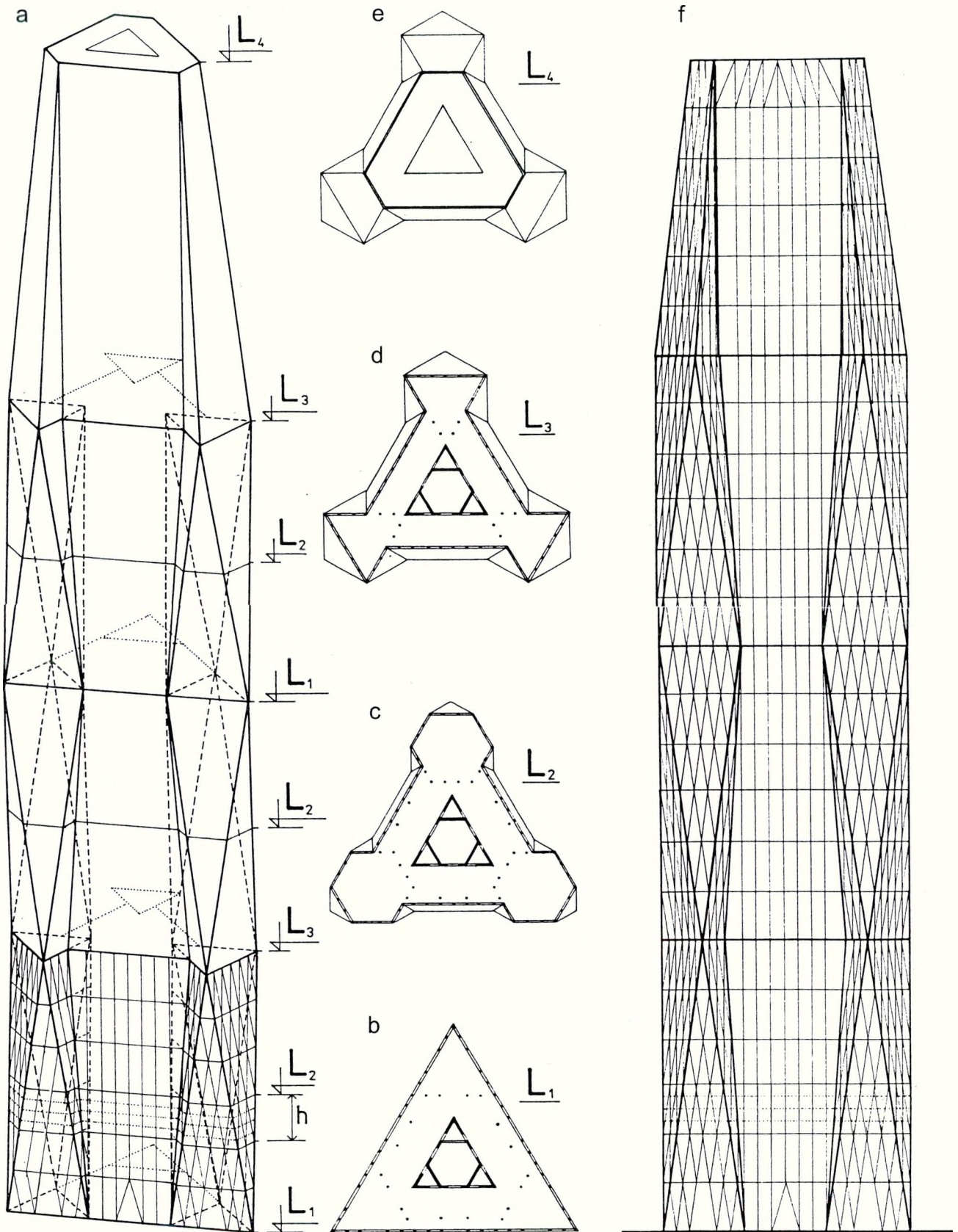
nowe mogą także biec w liniach pionowych na niemal całej wysokości budynku, dzięki umieszczeniu dodatkowych elementów zlokalizowanych wzdłuż obwodu budynku, tuż poniżej warstwy środkowej przepon poziomych, rys. 8c.



Rys. 9. Schematy budynku wysokiego zaprojektowanego przy użyciu systemu konstrukcyjnego określonego mianem przekształconej formy *wielościanu ramowego*

Ten rodzaj systemu konstrukcyjnego odznacza się znaczną sztywnością i nie zawiera dużej liczby elementów w przestrzeni użytkowej projektowanego budynku. Może on być zastosowany w formie tzw. wiązki struktur obwodowych, którą można wykorzystać do projektowania budynku wysokiego, o liczbie kondygnacji typowych znacznie większej niż sto [23]–[26].

Inne z proponowanych systemów konstrukcyjnych mają formy tzw. wielościągów ramowych. W tym przypadku obwodowa struktura nośna ma postać ramy zaprojektowanej jako siatka trójkątna, składająca się z nośnych słupów i poziomych rygli. Ta rama kratowa jest umieszczana na trójkątnych ścianach zewnętrznych budynku, będących ścianami odpowiednio przyjętej postaci wielościągu. Dzięki zastoso-



Rys. 10. Schematy przykładowej formy budynku wysokiego o układzie konstrukcyjnym zaprojektowanym w formie tzw. wiązki wielościanów ramowych

waniu trójkątnej siatki prętów, te ostatnie mogą być ze sobą łączone w węzłach teoretycznie przegubowych [25].

Jedną z przykładowych form takiego układu konstrukcyjnego pokazano na rys. 9 [28].

Dolna część tego budynku ma formę wielościanu, o skomplikowanej 12-kątnej podstawie, centralna – złożoną postać wielościanu o sześciokątnych i dwunastokątnych podstawach. Górna część ma sześciokątne podstawy o różnych wielkościach i obrócone pod pewnym kątem w stosunku do siebie (rys. 9a). Całość budynku jest podzielona na cztery części składowe, których granicami są poziomy fundament, szczytu budynku oraz poziomy warstw środkowych przepon kratownicowych. Na rysunkach od 9a do 9h przedstawiono schematy ideowe kształtów odpowiednich przekrojów poziomych takiego budynku.

Drugą z proponowanych form systemu konstrukcyjnego, uformowanego w postaci tzw. *wiązki wielościanów*

ramowych, pokazano na rys. 10. Składa się on z wielu osmiościennych wielościanów ramowych, umieszczonych pionowo na sobie w każdym narożu trójkątnej formy podstawy. Górna część przykładowej formy budynku jest ukształtowana odpowiednio do formy podstaw dolnej i górnej. W centralnej części budynku jest zlokalizowany pionowy trzon wewnętrzny, zawierający głównie środki transportu pionowego oraz inne potrzebne urządzenia i instalacje. Wysokość całego budynku będzie zależęć od liczby pojedynczych osmiościanów ramowych ustawionych na sobie. Szywność tego systemu może być bardzo duża, dzięki czemu może on być użytecznym w projektowaniu budynków wysokich, zawierających również znacznie więcej niż sto kondygnacji typowych [28].

4. Uwagi końcowe

Prezentowane przykłady kształtowania struktur przestrzennych umożliwiają zastosowanie stosunkowo krótkich prętów w konstrukcjach przekryć o dużych rozpiętościach. Te krótkie, należące do standardowego zakresu długości, pręty mogą być umieszczone w strefach działania największych sił ściskających, a konstrukcja przekrycia o dużej rozpiętości może być zmontowana także przy użyciu węzłów typowych.

Zastosowanie struktur przestrzennych w konstrukcjach budynków wysokich umożliwia projektowanie takich obiektów o bardzo dużych wysokościach bez-

względnych i znacznych smukłościach, charakteryzujących się jednocześnie bardzo dużą szywnością. Proponowane układy konstrukcyjne muszą być przedmiotem wielu kompleksowych analiz, w celu określenia ich ekonomicznej przydatności do proponowanych celów praktycznych.

Każda z prezentowanych postaci struktur umożliwia nadanie interesującej i indywidualnej formy architektonicznej projektowanym obiektom. Przedstawione sposoby kształtowania mogą świadczyć o dużym potencjale rozwojowym przestrzennych struktur prętowych.

Bibliografia

- [1] Borrego J., *Space grids structures. Skeletal frameworks and stressed-skin systems*, Cambridge 1968.
- [2] Bródka J. i inni, *Przekrycia strukturalne*, Warszawa 1985.
- [3] Chateau Du S., *Structures spatiales. Phenomene d'ideation an architecture*, [in:] Proceedings of the Third International Conference on Space Structures, London 1984.
- [4] Gabriel J.F., *Multi-layer space frames and architecture*, [in:] Proceedings of the First International Conference on Lightweight Structures in Architecture, Sydney 1986.
- [5] Janis K.V., *Superskyscraper*, [in:] Civil Engineering, March 1989.
- [6] Kolondowicz T., *Architektoniczne konstrukcje przestrzenne*, Wrocław 1976.
- [7] Kowalczyk R., *Zastosowanie betonów wysokiej wytrzymałości w budynkach wysokich*, Inżynieria i Budownictwo 9/1993.
- [8] Lalvani H., Collins T.J., *Comparative morphology of configurations with reduced part count derived from the octahedral-tetrahedral truss*, NASA Technical Memorandum, No. 102768, 1991.
- [9] Makowski Z.S., *Space structures – A review of the development within the last decade*, [in:] Proceedings of the Fourth International Conference on Space Structures, London 1993.
- [10] Makowski Z.S., *Space frames and trusses. Constructional steel design. An international guide*, London 1992.
- [11] Mengerlinghauscn M., *Raumfachwerke als Mittel der individuellen Baugestaltung*, Proceedings of the Third International Conference on Space Structures, London 1984.
- [12] Nejman T.J., Siczekowski J., *Zagadnienia konstrukcyjno-statyczne budynków wysokich*, Inżynieria i Budownictwo 12/1974.
- [13] Panczewicz Z., Arciszewski T., Boni B., *Nowe koncepcje konstrukcyjne budynków wysokich*, Inżynieria i Budownictwo 3/1973.
- [14] Rębielak J., *Struktury wysokie – propozycja kształtowania*, Raport Instytutu Architektury i Urbanistyki Politechniki Wrocławskiej, Nr I-1/P-639/91, Wrocław 1991.
- [15] Rębielak J., *Struktury przestrzenne o dużych rozpiętościach*, Prace Naukowe Instytutu Architektury i Urbanistyki Politechniki Wrocławskiej Nr 27, Seria: Monografie Nr 15, Wrocław 1992.
- [16] Rębielak J., *Space structures – proposals for shaping*, International Journal of Space Structures 3/1992.
- [17] Rębielak J., *Budynek bardzo wysoki o konstrukcji stalowej*, Patent UP RP, Nr 159465 z 31 XII 1992 r., Politechnika Wroclawska.
- [18] Rębielak J., *Space structures used in the construction of large span roofs and tall buildings*, [in:] Proceedings of the Fourth International Conference on Space Structures, Thomas Telford, London 1993.
- [19] Rębielak J., *Elementy symetrii w kształtowaniu struktur przestrzennych*, Studium Generale Universitatis Wratislaviensis, Vol. IV, Leopoldinum, Wrocław 1994.
- [20] Rębielak J., *Bar space structures – Rules of shaping. Symmetry: culture and science*, The Quarterly of the International Society for the Interdisciplinary Study of Symmetry 3/1995.
- [21] Rębielak J., *Proposals of shaping multi-layer and vertical space structures*, [in:] Proceedings of the International Conference on Lightweight Structures in Civil Engineering, Warsaw 1995.
- [22] Rębielak J., *Construction systems of high-rise buildings designed by means of space structures*, Raport Wydziału Architektury Politechniki Wrocławskiej, PRE Nr I-1/P-784/97, przygotowany na International Symposium IASS 1997 w Singapurze.
- [23] Rębielak J., *Construction systems for tall buildings shaped by means of space structures*, Proceedings of the International Conference: Challenges to Civil and Mechanical Engineering in 2000 and Beyond, Vol. III, June 2–5, 1997, Wrocław, pp. 389–395.
- [24] Rębielak J., *Examples of shaping for large span roofs and for high-rise buildings*, International Journal of Space Structures, special issue on Morphology and Architecture, Volume 11, Nos 1&2/96, pp. 241–250.
- [25] Rębielak J., *Kształtowanie różnorodnych rodzajów przestrzennych struktur prętowych*, Raport Wydziału Architektury Politechniki Wrocławskiej, PRE Nr I-1/P-785, Wrocław 1997.

- [26] Rębielak J., *Propozycje układów konstrukcyjnych przykryć strukturalnych o dużych rozpiętościach oraz budynków wysokich*, Inżynieria i Budownictwo, Nr 6/96, s. 340–345.
- [27] Rębielak J., *Some proposals of space structures shaping*, Proceedings of the International Colloquium: Structural Morphology – Towards the New Millennium, Eds: J.C. Chilton, B.S. Choo, W.J. Lewis & O. Popovic, University of Nottingham, 15–17 August 1997, Nottingham, United Kingdom, pp. 144–151.
- [28] Rębielak J., *Space structures proposed for dome covers*, [in:] Proceedings of the Asia–Pacific Conference on Shell and Spatial Structures, ed. Tien T. Lan, May 21–25, 1996, Beijing, China Civil Engineering Society, pp. 352–357.
- [29] Robinson R., *Malaysia twins: high-rise, high strength*, Civil Engineering, 7/1994.
- [30] *Structural Design of Tall Steel Buildings*, Monograph on Planning and Design of Tall Buildings, Volume SB, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 1979.
- [31] Sunner F., *Une mega-structure. Symbole du defi chinois.*, Techniques et Architecture No 372, 1987.

Examples of modelling and application of spatial structures

In the paper, a proposal is put forward for the modelling of spatial structures, which has been worked out by the author with the aim of applying them as large-span structural covers and implementing them in high building constructions. The load capacity of the rod structure is to a large degree determined by the load capacity of struts, and the latter, in turn, is inversely proportional to a square reduced buckling length of such rods. That is why the main idea underlying the construction of the proposed forms of bar modules was a desire to apply short rods, which can be placed in areas where the greatest compressive forces act.

The construction of high buildings should be characterized by great rigidity. This requirement can be fulfilled by proper arrangement of the elements that form constructional system of the building. A spatial structure being appropriately formed can be a very effective form of constructional system for a high building.

The proposed forms of constructional systems will be subject to further, thorough analysis, which should enable evaluation of their usability for particular purposes.

