

G. Iliev, A. Andonov. ANALYSIS OF STRUCTURES ON ELASTIC FOUNDATION THE CASE OF TALL BUILDINGS, Anuaire Ins.Superior Arh.Genie Civ., Sofia Vol.IV, 2004.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА КОНСТРУКЦИИ ВЪРХУ ЕЛАСТИЧНА ОСНОВА. СЛУЧАЙ НА ВИСОКА СГРАДА

Г.Илов¹, А.Андонов²

Key Words: Soil – structure, pile frame, displacements, soil reaction, FEM.

Резюме

Статията представя резултати от едно изследване на влиянието на взаимодействието между връхна конструкция и земна основа върху усилията в конструкцията. Разглеждат се и се съпоставят резултати от две популярни изчислителни схеми – традиционна и разглеждаща “съвместно решение между двете конструкции” (връхна и фундаментна). Получени са резултати за различна височина на сградата 40 m, 56 m и 72 m и при различни коравини на земната основа (4000, 8000 и 12000 kPa/m²), представяна чрез коефициента на пропорционалност.

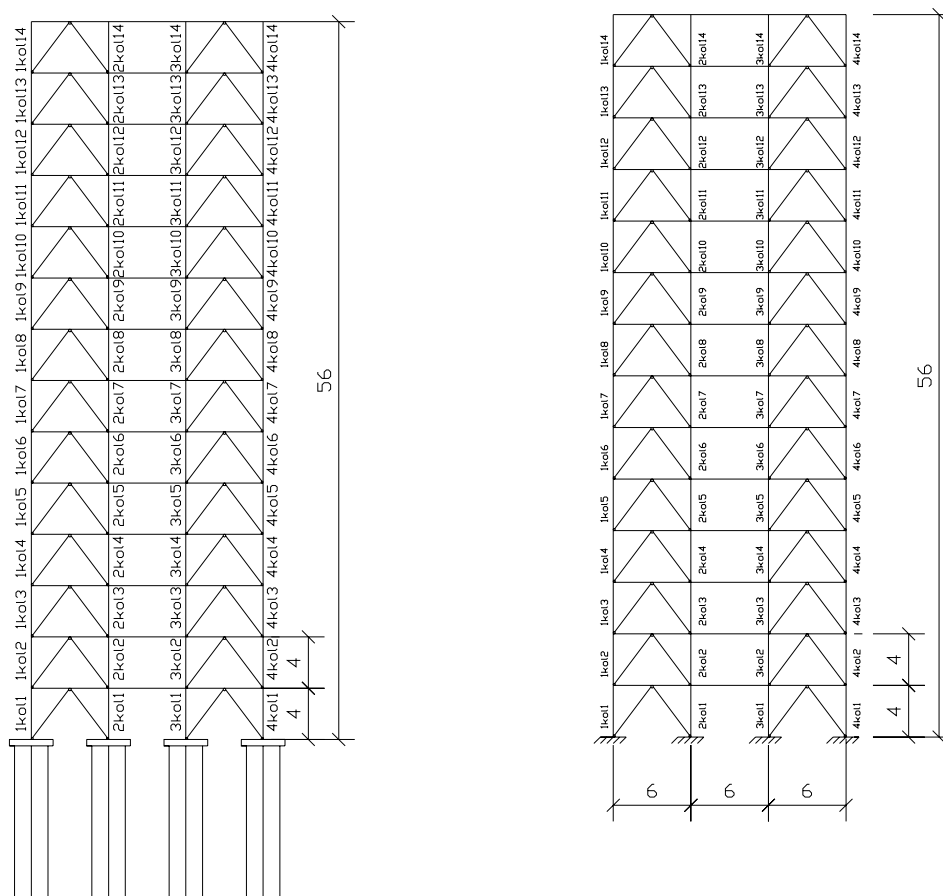
Получените разлики в сравнение с традиционното решение (отделно решаване на връхна и фундаментна конструкция) са значителни, което от своя страна предполага задължителност в съвместното изследване на конструкциите със земната основа.

¹ Доц. д-р инж. Георги Костадинов Илов, катедра “Геотехника”, УАСГ, бул. Хр. Смирненски 1, София

² Антон Георгиев Андонов – студент 4 курс, специалност ССС на УАСГ, бул.Хр. Смирненски 1, София.

Известно, е че строителните конструкции и земната основа работят съвместно. Статическото взаимодействие зависи от статическата схема и коравината на конструкцията, вида и коравината на преходната или фундаментната конструкция и деформационните свойства на земната основа.

От друга страна много често при статическия и динамичен анализ на конструкциите се възприема схема, която води до разчленяване на конструкцията на върхна и фундаментна и анализът се провежда върху върхната, като в мястото на преход се приема “запъване”. Порочността на подобен подход е тема на числено изследване, резултатите от което се посочват и анализират по-долу.



Фиг. 1. Две изчислителни схеми: а/ Съвместно решение, б/ Традиционно решение.

Изследванията са направени върху четиринадесет-етажна рамкова конструкция от стомана (фиг.1). Конструктивната схема предвижда корави връзки между греди и колони и развити вертикални прътови връзки по двете крайни полета на рамката. Разглеждат са два варианта за статическо изследване: първият - разчленява

конструкцията на връхна и фундаментна, като фундаментната е представена от фундаментни пилотни рамки. Решава се връхната конструкция и усилията в местата на запъване (обикновено на нивото на терена) се приемат за натоварване върху фундаментната (нататък тази схема на решение ще се нарича **традиционна**); **вторият** - разглежда конструкцията съвместно със земната основа, така както тя действително работи.

Пилотните фундаменти са съставени от 9 бр. пилоти, 12 метрова със сечение 40/40 cm и с ростверк с височина 120 cm. Пилотната група е симетрична с разстояние между пилотите от 130 cm.

За пълната предвид са взети следните товарни състояния:

SW – собствено тегло на сградата;

S – натоварване от сняг;

G – полезен товар;

WR – вятър;

GL – несиметрично натоварване в лявата половина на сградата.

и са използвани стандартни товарни комбинации.

Всички изчисления (оразмеряване и статически) са направени върху една рамка (равнинно решение) чрез програмата SAP 2000.

Получените резултати и коментар са следните:

А. Комбинация на натоварване SW+G+S

Таблица 1. N-усилия в kN от товарна комбинация SW+G+S

Традиционно решение						
ЕЛЕМЕНТ	ТОВАР	LOC	P, kN	ЕЛЕМЕНТ	LOC	P, kN
1KOL1	SWGS	4	-1437.19	2KOL1	4	-1912.7
1KOL8	SWGS	4	-715.729	2KOL8	4	-949.46
1KOL14	SWGS	4	-57.9128	2KOL14	4	-162.18
				2KOL1	%	8.06
				2KOL8	%	3.06
				2KOL14	%	0.38
Съвместно решение						
ЕЛЕМЕНТ	ТОВАР	LOC	P, kN	ЕЛЕМЕНТ	LOC	P, kN
1KOL1	SWGS	4	-1583.27	KOL1	4	-1769.99
1KOL8	SWGS	4	-743.82	KOL8	4	-921.237
1KOL14	SWGS	4	-58.34	2KOL14	4	-161.569
1KOL1		%	10.16			
1KOL8		%	3.92			
1KOL14		%	0.75			

При сравняване на резултатите от вертикално натоварване се забелязва, че при съвместното решение усилията в конструкцията се разпределят по-плавно, като външните колони се натоварват допълнително, изтегляйки усилия от вътрешните. В следствие на това по-плавно разпределение на усилията в рамката разликата между максимално и минимално натоварената колона пада от 33,1 % на 11,8 %.

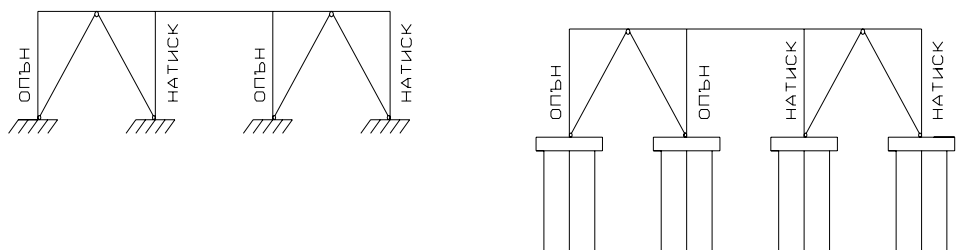
Б. Натоварване само от вятър

Любопитни са резултатите (Таблица 2), получени от хоризонтален товар (вятър) без да се отчитат други товари.

Таблица 2. Резултати от натоварване от вятър (WR), без да се отчитат други товари. Резултатите са за колони 1,2,3 и 4 за 1,8 и 14 етажи.

Традиционно решение								
ЕЛЕМ.	P,kN	M,kNm	ЕЛЕМ.	P,kN	M,kNm	ЕЛЕМ.	P,kN	M,kNm
1KOL1	700.88	-48.40	2KOL1	-292.42	-50.74	3KOL1	292.47	-50.74
1KOL8	156.62	-20.63	2KOL8	-14.94	-35.05	3KOL8	15.07	-35.05
1KOL14	-2.47	-6.94	2KOL14	22.46	-12.95	3KOL14	-22.39	-12.97
Съвместно решение								
ЕЛЕМ.	P,kN	M,kNm	ЕЛЕМ.	P,kN	M,kNm	ЕЛЕМ.	P,kN	M,kNm
1KOL1	579.69	-52.26	2KOL1	82.21	-56.59	3KOL1	-82.24	-56.58
1KOL8	139.33	-19.71	2KOL8	43.00	-39.89	3KOL8	-42.92	-39.89
1KOL14	-2.85	-6.14	2KOL14	30.01	-16.85	3KOL14	-29.95	-16.86

При хоризонтално - ветрово въздействие върху рамката (без други товари), се променя цялостно картината на напрегнатото и деформирано състояние (дори се сменят знаците на усилията). Това личи от двете схеми на фиг. 2 – **нещо изключително показателно.**



а. Традиционно

б. Съвместно

Фиг.2. Усилия в колоните при ветрови товар за двете изчислителни схеми.

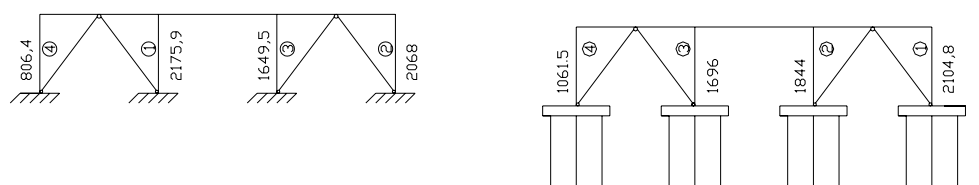
Освен това като цяло N-усиленията при съвместното решение са по-малки, като това се променя само за най-горните етажи. Огъващите моменти в опорните възли в колоните нарастват между 8 и 11,5 % при съвместното решение.

В. При комбинацията SW+G+WR+S.

Частични резултати са показани в Таблица 3.

Таблица 3. Резултати от товарна комбинация SW+G+WR+S.

Традиционно решение								
ЕЛЕМ.	P,kN	M,kNm	ЕЛЕМ.	P,kN	M,kNm	ЕЛЕМ.	P,kN	M,kNm
1KOL1	-806.3	-40.67	2KOL1	-2175.8	-41.6	3KOL1	-1649.	-49.73
1KOL8	-583.0	-2.372	2KOL8	-962.9	-18.8	3KOL8	-935.8	-44.27
1KOL14	-68.4	18.34	2KOL14	-141.9	1.616	3KOL14	-182.3	-24.95
Съвместно решение								
ЕЛЕМ.	P,kN	M,kNm	ЕЛЕМ.	P,kN	M,kNm	ЕЛЕМ.	P,kN	M,kNm
1KOL1	-1061.	-50.81	2KOL1	-1696.0	-44.1	3KOL1	-1844.	-57.69
1KOL8	-626.7	0.042	2KOL8	-882.5	-21.9	3KOL8	-959.8	-49.85
1KOL14	-69.21	20.218	2KOL14	-134.5	-0.97	3KOL14	-188.5	-29.37



Фиг.3. Усилия в колоните при двете изчислителни схеми.

При традиционната схема на решение най-натоварени са втора и четвърта колона, които поемат натисковите усилия от ветровото въздействие, като разликата между най-голямото и най-малкото усилие е 170 %. При съвместното решение усилията намаляват постепенно от далечната към близката колона, като разликата между най-голямото и най-малкото усилие е 98 %. Сумата от реакциите, които се явяват вътрешни усилия в опорните точки на рамката е практически една и съща (разлика 0,098 %). Различна е големината на реакциите в различните точки, което се дължи на това, че връхната конструкция преразпределя товарите върху фундаментите и регулира техните премествания.

Г. При комбинацията SW+G+S

Таблица 4. Резултати от решението за комбинация SW+G+S.

Традиционно решение								
ЕЛЕМ.	ТОВАР	N, kN	ЕЛЕМ.	N, kN	ЕЛЕМ.	N, kN	ЕЛЕМ.	N, kN
1KOL1	SWGS	-2036.9	2KOL1	-2587.269	3KOL1	-2093.63	4KOL1	-1465.14
1KOL8	SWGS	-1008.0	2KOL8	-1289.525	3KOL8	-1028.65	4KOL8	-745.40
1KOL14	SWGS	-82.17	2KOL14	-207.6803	3KOL14	-180.76	4KOL14	-66.44
Съвместно решение								
ЕЛЕМ.	ТОВАР	N, kN	ЕЛЕМ.	N, kN	ЕЛЕМ.	N, kN	ЕЛЕМ.	N, kN
1KOL1	SWGS	-2248.4	2KOL1	-2320.051	3KOL1	-2007.06	4KOL1	-1615.83
1KOL8	SWGS	-1047.0	2KOL8	-1240.424	3KOL8	-1007.79	4KOL8	-776.01
1KOL14	SWGS	-82.81	2KOL14	-205.079	3KOL14	-181.84	4KOL14	-66.88

При натоварване с несиметричен товар също се забелязват съществени разлики в поведението на конструкцията. Вътрешните колони се разтоварват за сметка на външните. Разликата между максималното и минималното усилие пада от 77 на 48 %.

Какви най-общи изводи могат да бъдат направени до тук:

1. От разгледаните по-горе примери става ясно, че изчисляването на конструкцията, съвместно с фундаментите и земната основа, дава някои съществени разлики в напрегнатото и деформирано състояние, както в конструкцията така и във фундаментите. В общият случай пренебрегването на действителните опорни условия и заместването им с идеализирани схеми на подпиране дава разлики в усилията, които в много случаи не са в полза на сигурността.

2. Като цяло при съвместното решение се забелязва едно по-плавно разпределение на усилията в цялата конструкция, като едни елементи се разтоварват за сметка на други, които поемат допълнителни усилия. Не еднакво натоварените пилоти слягат различно, с което натоварват допълнително горната конструкция, тя от своя страна преразпределя усилията, като разтоварва едни, а натоварва други.

За да се изясни по-добре характерът на взаимодействие между конструкцията, фундаментите и земната основа, са разгледани няколко примера, в които чрез промяна на натоварването, на геометрията (коравината) на рамката и на коравината на земната основа (чрез коефициента на пропорционалност) е направен опит да се покажат някои основни зависимости между горе-изброените характеристики и поведението на конструкцията при двете схеми на решение – Съвместно (със земната основа) решение и Традиционно решение.

1 .ВЛИЯНИЕ НА НАТОВАРВАНЕТО ВЪРХУ РАЗЛИКАТА В ДВЕТЕ РЕШЕНИЯ

Докато системата работи в еластичен стадий, промяната в натоварването естествено не оказва влияние на разликата между двете решения т.е. 10%, 25%, 50% по-голям или по-малък товар дава съответно 10%, 25%, 50% по големи или по-малки усилия в конструкцията, а процентната разлика от двете решения, разглеждани самостоятелно, остава непроменена.

2. ВЛИЯНИЕ НА ВИСОЧИНАТА НА СГРАДАТА

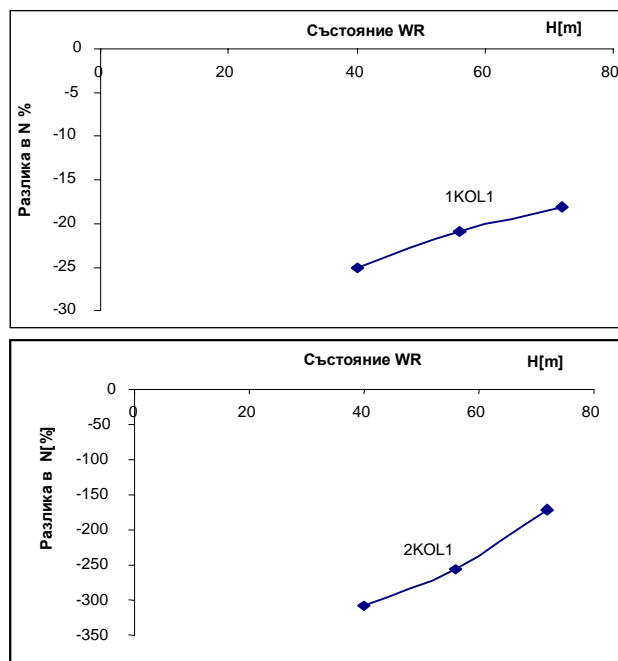
За да се проследи влиянието на височината на сградата върху резултатите, получени от двете решения, са разгледани още два варианта – с четири етажа по-малко или обща височина 40 m (10 етажа) и с четири етажа повече, т.е. 72 m (18 етажа).

А. Товарно състояние WR (вятър).

Таблица 5. Разлика в N-усиления от двете решения в %.

H[m]	1KOL1	2KOL1	3KOL1	4KOL1
40	-25.1	-308.7	-308.8	-25.2
56	-20.9	-255.6	-255.6	-20.9
72	-18.0	-170.4	-170.3	-18.0

В таблицата са дадени разликите в N-усиления в колоните на първият етаж. Знакът минус означава че разликата е в полза на сигурността, т.е. усиления при съвместното решение са по-малки.



Фиг. 5. Изменение на усиления в колони 1 и 2 от първо етажно ниво в зависимост от височината на сградата

Основният извод от показаното на двете графики е, че колкото по висока е сградата толкова по-малка е разликата в резултатите между двете решения. Причина за това, е че с нарастването на височината на сградата **нараства и способността и да се съпротивлява на относителните слягания на фундаментите.**

Таблица 6. Разлика в M усиления от двете решения в %.

H[m]	1KOL1	2KOL1	3KOL1	4KOL1
40	-1.73	3.128377	3.098708	0.118694
56	7.976214	11.53609	11.51698	9.462377
72	16.28517	18.86937	18.85514	17.55694

При огъващите моменти тенденцията е обратна. С нарастване на височината нараства и разликата в моментите. Отново са сравнявани усиления в колоните на първият етаж. По-големите моменти се получават при съвместното решение (срещу сигурността).

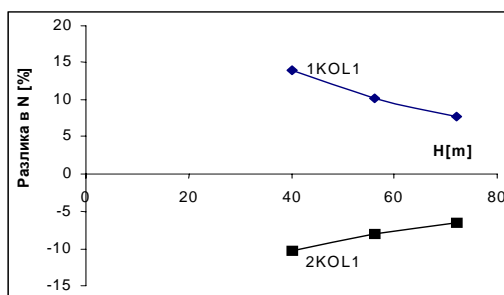
Б. Товарна комбинация SW+G+S (вертикални товари).

В таблицата са дадени процентните разлики в N – усиления в колони по оси 1 и 2 за първи етаж.(Знакът минус означава, че разликата е в полза на сигурността).

Таблица 7. Разлика в N усилията от двете решения в %.

H[m]	ЕЛЕМЕНТ	%	ЕЛЕМЕНТ	%
40	1KOL1	13.86	2KOL1	-10.22
56	1KOL1	10.16	2KOL1	-8.06
72	1KOL1	7.78	2KOL1	-6.45

Регистрират се грешки в границите 8-14% в посока на несигурността и 6-8% по-ниски резултати в “Съвместното решение” за втора колона. Тенденцията е показана на графиката.



Фиг.6. Изменение на N-усиленията в двете колони в зависимост от височината на сградата.

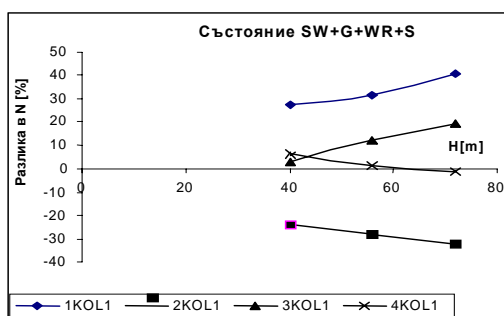
При вертикален товар връзката между височината и разликата в решенията е обратно “пропорционална”. Причина за това отново е по-голямото съпротивление на сградата спрямо нееднаквото слягане на фундаментите под различните колони.

В. Товарна комбинация SW+G+S+WR

Дадени са процентните разлики в N – усилията в колоните на първия етаж. (Знакът минус означава, че разликата е в полза на сигурността).

Таблица 8. Разлика в N-усиленията от двете решения в %.

H[m]	1KOL1	2KOL1	3KOL1	4KOL1
40	27.20	-24.09	3.02	6.37
56	31.64	-28.29	11.79	1.77
72	40.67	-32.10	19.21	-0.76

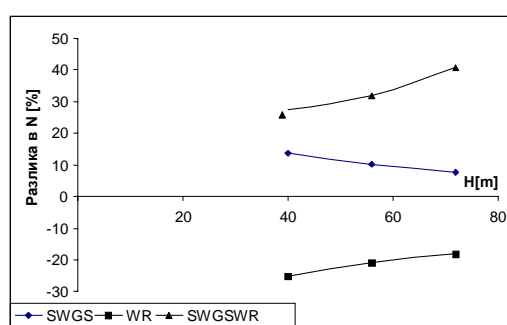


Фиг.7. Разлики в N-усиленията за 4-те колони.

При товарна комбинация от вертикални и хоризонтални товари процентната разлика нараства с нарастване на височината. И това се дължи на силното влияние на вятъра, което довежда разликите до 41% във вреда на сигурността. В Таблица 9, където е показано изменението на N-усиления за първата колона на първия етаж при различни височини и товари, това проличава ясно.

Таблица 9. Изменение в N-усиления за различни височини на сградата.

H[m]	ЕЛЕМ.	ТОВАР	%	ТОВАР	%	ТОВАР	%
40	1KOL1	SWGS	13.86	WR	-25.12	SWGSR	27.20
56	1KOL1	SWGS	10.16	WR	-20.90	SWGSR	31.64
72	1KOL1	SWGS	7.78	WR	-18.01	SWGSR	40.67



Фиг.8. Изменение на N-усиления в зависимост от височината на сградата за различни натоварвания

Графиката от фиг.8. е обобщение на описаните по-горе резултати. При самостоятелно действащи хоризонтални или вертикални товари разликите намаляват с нарастване на височината, а при комбинацията от вертикални и хоризонтални товари е точно обратно.

3. ВЛИЯНИЕ НА “КОРАВИНАТА” НА ЗЕМНАТА ОСНОВА ВЪРХУ УСИЛИЯТА В РАМКТА

Показаните в Таблица 10 резултати са от пълна товарна комбинация SW+G+S+WR (хоризонтални и вертикални товари).

Отбелязани са изменението на усиления в четерите колони на първия етаж. От резултатите ясно се вижда, че с нарастване на коефициента на леглото резултатите от “Съвместното решение” се доближават все повече до “Традиционното решение”.

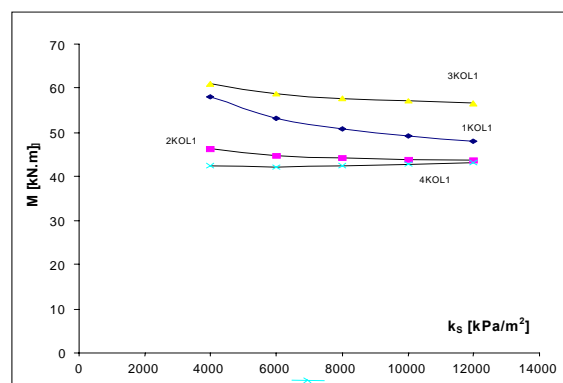
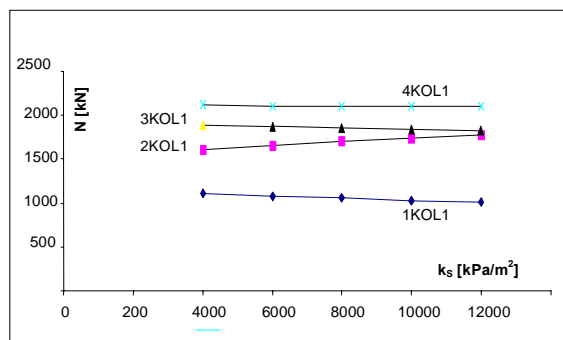
Таблица 10. Резултати за N и M в зависимост от коравината на основата.

k_s [kPa/m ²]	N, kN			
	1KOL1	2KOL1	3KOL1	4KOL1
4000	-1116.37	-1594.61	-1885.95	-2112.89
6000	-1085.97	-1650.53	-1862.95	-2108.21
8000	-1061.55	-1696.00	-1844.01	-2104.79
10000	-1041.48	-1733.59	-1828.33	-2102.07

Таблица 10. Продължение

k_s [kPa/m ²]	N, kN			
	1KOL1	2KOL1	3KOL1	4KOL1
12000	-1024.68	-1765.14	-1815.18	-2099.82
Запъване	-806.39	-2175.88	-1649.47	-2068.04
k_s [kPa/m ²]	M, kNm			
	1KOL1	2KOL1	3KOL1	4KOL1
4000	-57.9473	-46.3998	-61.0299	-42.4423
6000	-53.3059	-44.7876	-58.7602	-42.1664
8000	-50.8139	-44.1687	-57.6984	-42.4884
10000	-49.2258	-43.8546	-57.0396	-42.8714
12000	-48.1129	-43.6623	-56.5613	-43.2151
Запъване	-40.6721	-41.6035	-49.7351	-45.1561

От показаните графики (фиг.9) се вижда, че с увеличаване на коефициента на леглото усилията, които при съвместното решение са по-големи, намаляват и обратното по-малките усилия нарастват, т.е. поведението на конструкцията се доближава до това на рамка с идеално запъване.

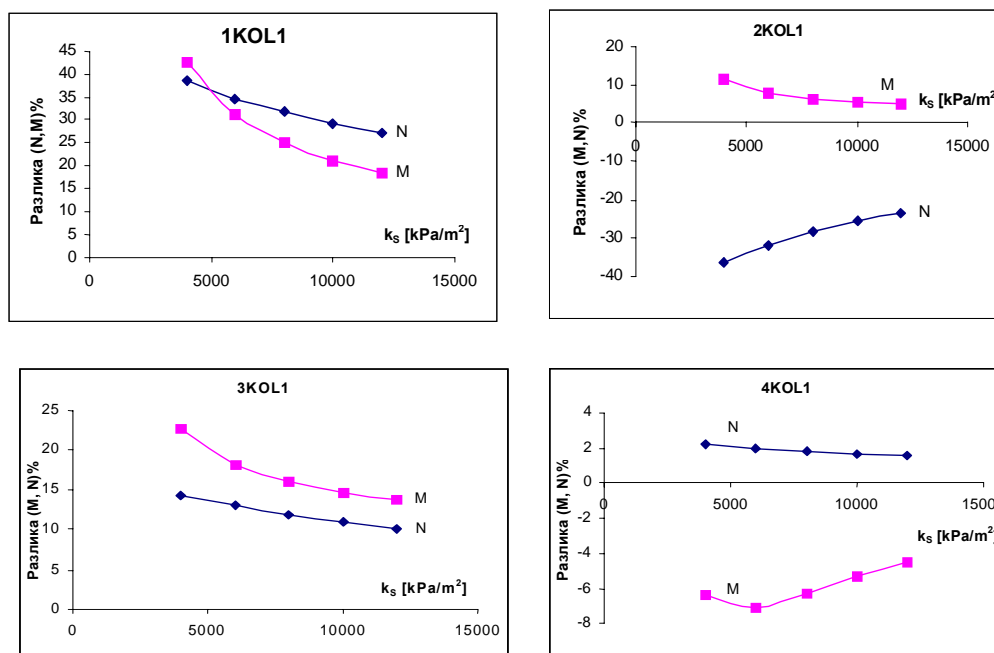


Фиг.9. Изменение на N и M в зависимост от коравината на основата, изразена чрез k_s

В Таблица 11 са показани разликите в резултатите за N и M между двете решения и отразяване влиянието на коравината на основата k_s . Същите резултати са показани и графично на фиг.10. Основният извод е, че процентната грешка намалява със закоравяване на земната основа и, че грешките могат да достигнат до 30% и повече, както по отношение на N, така и по отношение на огъващи моменти.

Таблица 11. Влияние на коравината на основата върху разликата между двете решения в усилията (колони първо ниво) .

K_s [kPa/m ²]	К	1KOL1		2KOL1		3KOL1		4KOL1	
		N	M	N	M	N	M	N	M
4	-50%	38.44	42.47	36.45	11.52	14.33	22.70	2.16	6.39
6	-25%	34.67	31.06	31.82	7.65	12.94	18.14	1.94	7.09
8	0%	31.64	24.93	28.29	6.16	11.79	16.01	1.77	6.27
10	25%	29.15	21.03	25.51	5.41	10.84	14.68	1.64	5.32
12	50%	27.06	18.29	23.26	4.94	10.04	13.72	1.53	4.49



Фиг. 10. Графики за онагледяване на разликите в двете решения по отношение на усилията в колони 1 до 4, първо ниво

Заклучение

Първо. Като анализ на получените резултати могат да се направят много изводи: започвайки от това, че има немалки (бихме казали смущаващи) разлики в

усилията и то **не в полза на сигурността**; затова, че тези резултати зависят както от височината на сградата – така и от коравината на земната основа; и че тези разлики намаляват (размиват се в резултатите за т.нар. “горни етажи”; което не означава нищо друго, освен че влиянието на запъването се отразява преди всичко в долните нива на конструкцията); затова, че конструкцията проявява стремеж да **преразпредели** неравномерните слягания на фундаментите; затова, че “дори се сменя качествено поведението на конструкцията” и т.н. Всичко това води до грешки, в определени случаи по-големи от 30%. А това вече граничи с резервите на една строителна конструкция.

Второ и още веднъж: Пренебрегването на реалните опорни условия на връхната конструкция от една страна и на влиянието ѝ върху регулирането на преместванията на фундаментите от друга води до неточна картина на напрегнатото и деформирано състояние на системата “конструкция – фундаменти – земна основа”. Като правило грешката, която се получава, не е в полза на сигурността. От значение за големината на разликата от двете решения са коравините на сградата и на земната основа и по-точно отношението помежду им

Трето: Известно е, че коефициентите в “Метода на граничните състояния” имат за цел да представят поотделно и вероятно допускани грешки в проектирането. Едните свързани с неточности в определяне на натоварването (коефициенти на натоварване) и тяхното възможно изменение, вторите с отклоненията от якостите на материалите - свързани основно със временни якости и възможни претоварвания на конструкциите и третите с изчислителния метод, който се използва за изследване на конструкцията. Тук естествено не е направен пълен анализ какви грешки се допускат при “Метода на разчленяване на конструкцията” - едва ли това е необходимо, но нищо (вече) не пречи коефициентът на условие на работа да “отиде към 1”, ако се приеме, че едно съвместно решение на конструкцията със земната основа е най-доброто и най-истинно решение.

Според нас няма никакъв проблем конструкциите да се решават вече задължително съвместно със земната основа (а не като връхна конструкция – запъната в почвата). Има всичко - от техника до програми за изследвания. И още нещо - тези програми позволяват и далеч по-точни и пространни изследвания, отколкото това което регламентира правилникът като съчетания на натоварванията. Няма пречка това да стане задължително. Нека традицията да остане само една възможност за контрол на “машинните” резултати.

Литература:

- [1]. *Г. Стефанов и др.* Фундиране. Техника, 1978 г.
- [2]. *Б. Божинев, Т. Етимов и Д. Райкова.* Изчисляване на конструкции върху еластична основа. Техника 1987 год.
- [3]. *Г. Илов.* Определяне натоварването в пилотите в пилотните фундаменти. Строителство, 1991 год.
- [4]. *Г. Илов, А. Андонов.* За съвместното решение “конструкция-земна основа”. Изводи за фундаментната конструкция, Годишник УАСГ, т. XLI, Св. 4, 2004.

Постъпила Декември 2002 г.

ANALYSIS OF STRUCTURES ON ELASTIC FOUNDATION THE CASE OF TALL BUILDINGS

G. Ilov, A. Andonov

Summary

Soil-structure interaction analysis is presented in order to estimate its influence to the structural stresses. The results from the two well-known models are considered and compared – the traditional one and the other, which takes into account the soil base – superstructure interaction. Solutions are obtained for different height of the building – 40 m, 56 m, and 72 m, and for various stiffness of the soil base (4000, 8000 and 12000 kPa/m²), presented through proportional ratio.

The presented results, when compared with the traditional model (the structure and soil base are considered with no interaction), suggest considerable deviations, which leads to the conclusion