УДК 624.139.7

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ. ЧАСТЬ 1. ИСПЫТАНИЯ В РЕЗОНАНСНОЙ КОЛОНКЕ.

МИРНЫЙ А.Ю.

доцент Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, генеральный директор ООО «Независимая геотехника», к.т.н., info@indep-geo.ru

ИДРИСОВ И.Х.

генеральный директор ООО НПП «Геотек»

МОСИНА А.С.

научный сотрудник Лаборатории Изучения состава и свойств грунтов ИГЭ РАН, заместитель генерального директора ООО «Независимая геотехника», к. г.-м. н., Mosina.A.S@yandex.ru

Оригинальная статья

Аннотация

Результаты испытаний мерзлых грунтов в динамическом режиме тяжело найти в трудах российских ученых. При этом их механическое поведение при динамическом воздействии может оказывать влияние на функционирование зданий и сооружений и имеет свои особенности. Малый опыт испытаний, отсутствие должного оборудования и методик

делает невозможным качественное получение показателей динамических свойств мерзлых грунтов отечественными исследователями. Для развития данной темы выпущен цикл статей, в первой из которых рассмотрены динамические свойства мерзлых грунтов, полученные в резонансной колонке. Так, приведен литературный обзор исследований этого вопроса иностранными учеными начиная с 1960-80 гг. и до нашего времени, сделан их анализ и обобщение. В статье показано влияние на начальный модуль сдвига и коэффициент поглощения: температуры грунта, его влажности, состава, плотности и амплитуды деформаций. Проведено сравнение показателей динамических свойств мерзлых грунтов с немерзлыми, в частности, основной упор дан на влияние температуры мёрзлого грунта на его динамические свойства. Показано, что при низких отрицательных температурах от −10ºС до −3ºС начальный модуль сдвига в среднем находится в диапазоне от 3000 до 900 МПа, при температурах выше −2ºС его значение снижается до 500-90 МПа Коэффициент поглощения мерзлых грунтов в целом варьирует в широком диапазоне: при температуре грунта −5ºС и выше его значение изменяется от 0,08 до 0,12, при температуре −10ºС и ниже – 0,05-0,07.

Ключевые слова:

многолетнемерзлые грунты; динамические свойства грунтов; резонансная колонка; динамические испытания; коэффициент поглощения; лабораторные испытания; криолитозона.

DYNAMIC PROPERTIES OF FROZEN SOILS. PART 1. RESONANT COLUMN TESTS.

MIRNYY A.Y

Associate Professor of the Faculty of Geology of Lomonosov Moscow State University, Head of Independent Geotechnics LLC, Ph.D., info@indep-geo.ru

IDRISOV I.K.

Head of OOO “Geotek”

MOSINA A.S.

Researcher scientist at the Laboratory for Studying the Composition and Properties of Soils of the Sergeev Institute of Environmental Geoscience Russian Academy of Science, Deputy General Director of Independent Geotechnics LLC, PhD, Mosina.A.S@yandex.ru

The original article

Annotation

The results of dynamic frozen soil test are difficult to find in the Russian scientists’ works. However, frozen soils dynamic characteristics can affect the operation of buildings. Russian researchers have little test experience, no equipment and research methods, which does not allow them to obtain accurate dynamic properties of frozen soils. To study this issue, a series of articles has been published, the first of which shows the dynamic properties of frozen soils by resonant column tests. Thus, a literary review of the research of foreign scientists from 1960-80 to the present time is given, their analysis and generalization are made. The article shows the effect on dynamic shear modulus and damping ratio of frozen soils: soil temperature, humidity, composition and density and vibration amplitude. A comparison of the dynamic properties of frozen soils with unfrozen ones is made, the influence of the temperature of frozen soil on its dynamic characteristics is estimated. At low negative temperatures from -10°C to −3°C, dynamic shear modulus is on average in the range from 3000 to 900 MPa, at temperatures above − 2°C its value

decreases to 500-90 MPa. The damping ratio of frozen soils on average at temperature of −5°C and above is from 0.08 to 0.12, at a temperature of −10°C and below is 0.05-0.07.

Keywords:

frozen soil; dynamic properties of frozen soils; resonant column tests; dynamic tests; damping ratio; laboratory testing; permafrost

Строительство зданий и сооружений на мерзлых грунтах неминуемо сопровождается изменением напряженно-деформированного состояния (НДС) всего массива. От степени этого изменения зависит безопасность эксплуатации будущего объекта, срок его службы и т.д. В связи с этим на стадии проектирования выполняются прогнозные расчеты изменения НДС массива, позволяющие рассчитать осадку сооружение, возможность нарушения прочности грунтов основания и др. На основании данного расчета проектируется допустимая нагрузка и режим работы будущего сооружения.

Одним из важнейших этапов прогноза является выбор оцениваемых факторов влияния на мерзлое основание. Традиционно в качестве внешних факторов специалистами в расчет принимается статическая нагрузка от сооружения и динамическое (изменяющееся во времени) температурное воздействие. Динамикой же передаваемых на мерзлый грунт нагрузок чаще всего пренебрегают. Однако поведение мерзлых грунтов под динамической нагрузкой имеет свои особенности, которые необходимо учитывать. Так, например, важным с точки зрения несущей способности грунтов, является сезонное изменение их динамических свойств в регионах с суровыми климатическими условиями. При промерзании грунта изменятся его жесткость, что сказывается на характере распространения волн в грунтах и деформациях сооружений, и наоборот. Зафиксировано, что при сейсмических событиях в Китае [8] наблюдался разный тип разрушения зданий в зависимости от времени года – землетрясения в зимний период времени приводили к большим повреждениям зданий с жесткой конструкцией, а в летний период – с гибкой конструкцией. Некоторые из исследователей наблюдали деформации мерзлого грунта под вибрационным воздействием проходящего железнодорожного и автомобильного транспорта [4, 7, 10]. В связи с этим, недоучет особенностей динамического поведения мерзлых грунтов может привести к снижению надежности зданий и сооружений в холодных регионах.

На территории нашей страны игнорирование динамического поведения мерзлых грунтов во многом обусловлено недостаточным опытом исследований, отсюда отсутствием необходимого оборудования и методик для выполнения экспериментов. Так, несмотря на то, что в холодных регионах фиксируются все те же источники динамического воздействия (землетрясения, транспортная инфраструктура и т.д.), для мерзлых грунтов неприменимо обычное оборудование. Из-за большей жесткости мерзлых грунтов и иных показателей динамических свойств использование в экспериментах приборов для немерзлых грунтов приведет к высокой погрешности результатов, а в некоторых случаях в целом не позволит провести испытание. Отсюда вытекает необходимость разработки специализированного лабораторного оборудования, а также создания методов и методик таких испытаний. Для полного рассмотрения данного вопроса мы решили выпустить серию статей, в которых будет поэтапно представлен опыт исследований динамических свойств мерзлых грунтов и дальнейшие их перспективы.

В первую очередь необходимо изучить особенности динамических свойств объекта нашего внимания. Для этого приведем результаты имеющихся в литературе испытаний, проанализируем их и дадим обобщённую характеристику.

В целом, исходя из практики иностранных исследователей, количественная характеристика динамических свойств мерзлых грунтов преимущественно производится лабораторными методами. Одним из них является испытание мерзлых грунтов в резонансной колонке. Оно позволяет моделировать упруго-вязкое поведение мерзлых

грунтов при высокочастотных, низкоамплитудных воздействиях (диапазон деформаций 10^{-8} – 10^{-3}), воспроизводящих в первую очередь воздействие от транспортной инфраструктуры. По мнению некоторых авторов [3, 8], такой метод хорошо подходит для исследования динамического поведения мерзлых грунтов. Это обосновывается значительной жесткостью мерзлых грунтов, из-за которой в них по большей части фиксируется низкий уровень деформаций и наблюдается упруго-вязкое поведение.

Суть испытания мерзлых грунтов в резонансной колонке заключается в нагружении цилиндрического образца мерзлого грунта торсионным колебательным движением с изменяемой частотой колебаний вплоть до резонансной частоты. По результатам определяются динамический модуль сдвига и коэффициент поглощения как функция амплитуды деформации сдвига, резонансная частота (рис. 1) [10].

Рис. 1. Испытания мерзлого грунта в резонансной колонке
а − схема испытания б − колонка резонансная ГТ 1.3.3 ООО НПП «Геотек»
Fig. 1. Resonant column testing of frozen soils
a − test circuit b − resonant column GT 1.3.3 NPP Geotech LLC

Исследования динамического поведения мерзлых грунтов в резонансной колонке начались еще в 1960-80-ых годах, когда были предприняты первые попытки модификации существующего на тот момент оборудования. В 1980 г. в Канаде Turcott-Rios E.E. [6] провел динамические испытания мерзлых грунтов на обычной и модифицированной резонансных колонках типа Hardina в диапазоне деформаций от 10^{-7} до 10^{-4} и температуре −10 и −15°С. Образцы представляли собой мерзлые пески, мерзлые глины и льды. По результатам испытаний были получены следующие значения динамического модуля сдвига: у мерзлого песка он оказался равен 7000-9000 МПа, мерзлой глины – 1000-2750 МПа, льда – 2000-2100 МПа. По Turcott-Rios E.E. резонансная частота мерзлого песка варьирует от 800 до 1000 Гц, глины – 500-800 Гц, льда – 450-800 Гц. Turcott-Rios E.E. также выяснил, что при увеличении степени влажности до оптимального значения (от 18% до 30%) наблюдается приближение модуля сдвига мёрзлой глины к модулю сдвига льда (в среднем от 1600 МПа до 2200 МПа). По мере дальнейшего увеличения влажности мёрзлой глины, выше ее оптимального значения, жесткость продолжает расти и модуль сдвига достигает около 2750 МПа (рис. 2).

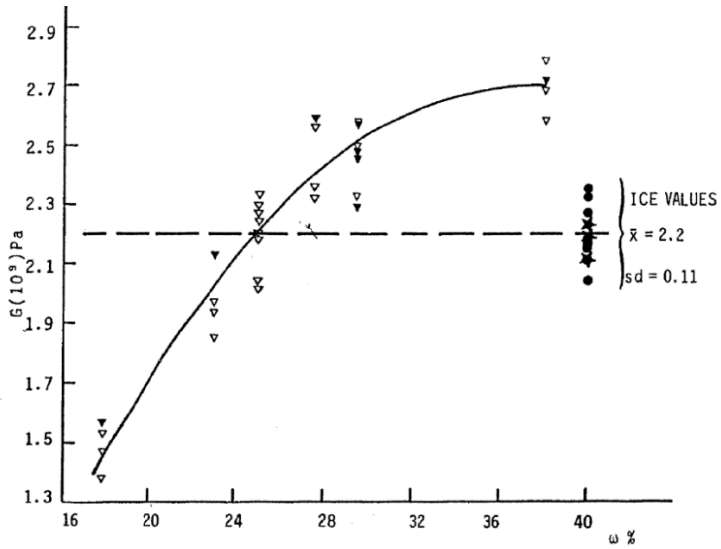


Рис. 2. Динамический модуль сдвига мерзлой каолиновой глины при разной степени влажности по результатам испытаний в резонансной колонке [6]

Fig. 2. Resonant Column Test Results. Dynamic shear modulus of frozen kaolin clay at different water content

В 1982 Ted S. Vinson изучил влияние всестороннего давления, температуры, влажности и плотности грунта, амплитуды деформации и частоты на показатели динамических свойств мерзлых пылеватых грунтов [5]. Так, по результатам было получено, что модуль сдвига значительно уменьшается с повышением температуры, причем интенсивность снижения увеличивается по мере повышения температуры от −10 до −1°C (рис. 3). При температуре −10°C модуль сдвига мерзлого пылеватого грунта составляет 3900-4900 МПа, а при −1°C его значение опускается до 1000-1900 МПа. Модуль сдвига мерзлого грунта увеличивается с увеличением частоты и увеличением степени влажности.

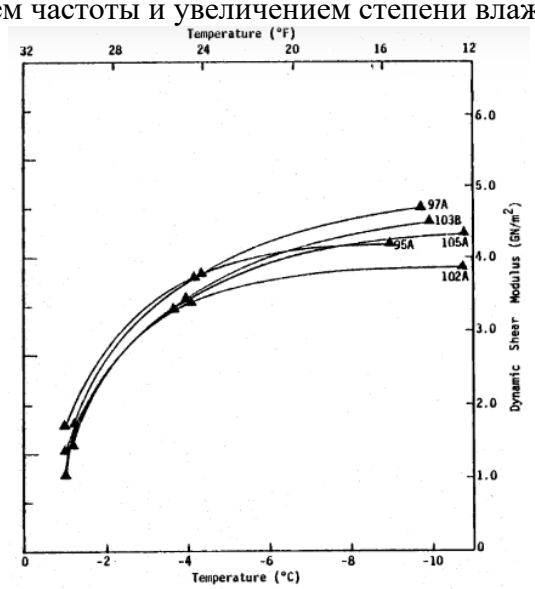


Рис. 3. Зависимость модуля сдвига мерзлого пылеватого грунта от температуры по результатам испытаний в резонансной колонке [5]

Fig. 3. Resonant Column Test Results. Dependence of the shear modulus of frozen soil on temperature.

В 1996 исследователи из Канады M.O. Al-Hunaidi и др. [2] выпустили статью с результатами динамических испытаний мерзлой глины при температуре −9°C и

всестороннем давлении 0,01 МПа. С этой целью в резонансной колонке Stokoe были созданы крутильные колебания с амплитудой деформации сдвига 10^{-5} - 10^{-3} %. Дополнительно для сравнения были проведены испытания немерзлой глины при температуре +22°С в диапазоне деформаций от 10^{-3} до 10^{-2} %. По результатам было получено, что в зависимости от уровня деформации динамический модуль сдвига мерзлой глины варьирует от 944 МПа до 1298 МПа, коэффициент поглощения от 4,01% до 5,60%, резонансная частота от 283,5 до 323,7 Гц (табл. 1).

Табл. 1. Результаты испытания мерзлой и немерзлой глины в резонансной колонке [2]

Table 1. Resonant column test results of frozen and unfrozen clay [2]

Specimen No.	Resonant frequency (Hz)	Peak shear strain (%)	Shear modulus (MPa)	Damping ratio (%)
BH21-F (frozen)	323.7	0.00015	1298	4.87
	320.6	0.00026	1273	5.60
	297.5	0.00057	1096	5.59
BH21-U (unfrozen)	42.9	0.00113	22.8	4.17
	43.1	0.00306	23.0	5.35
	41.3	0.00320	21.1	4.90
	42.0	0.00614	21.9	5.65
	39.7	0.01197	19.5	6.57
BH31-F (frozen)	285.4	0.00002	956	4.01
	284.2	0.00002	949	5.32
	283.5	0.00028	944	5.02
	283.5	0.00030	944	5.14
BH31-U (unfrozen)	53.6	0.00081	33.7	3.39
	52.1	0.00409	31.9	3.69
	48.3	0.01166	27.4	5.06

Xiaobo Yu и др. [8] в 2017 г. изучили влияние температуры пылеватого грунта (от −15°С до +25°С) на его динамический модуль сдвига и коэффициент поглощения. Отдельно проведены исследования динамического поведения мерзлого грунта при высокой отрицательной температуре, близкой к температуре фазового перехода: −1,4°С; −2,2; −3°С. Эксперименты выполнялись в модифицированной резонансной колонке компании GDS с всесторонним давлением 0,1 МПа в диапазоне амплитуды деформаций 10^{-7}–10^{-4}. По результатам установлено, что динамический модуль сдвига и коэффициент поглощения пылеватого грунта (а также их изменения при увеличении уровня деформации) при температурах -1,4°С и +20°С оказались практически одинаковыми – менее 100 МПа (рис. 4). При понижении температуры мерзлого грунта до −2,2 и −3°С наблюдался резкий скачок всех показателей динамических свойств - динамический модуль сдвига увеличился практически в 10 раз и составил при −3°С более 1200 МПа. При дальнейшем снижении температуры (от −3 до −15°С) показатели динамических свойств изменялись, но со значительно меньшей интенсивностью (табл. 2).

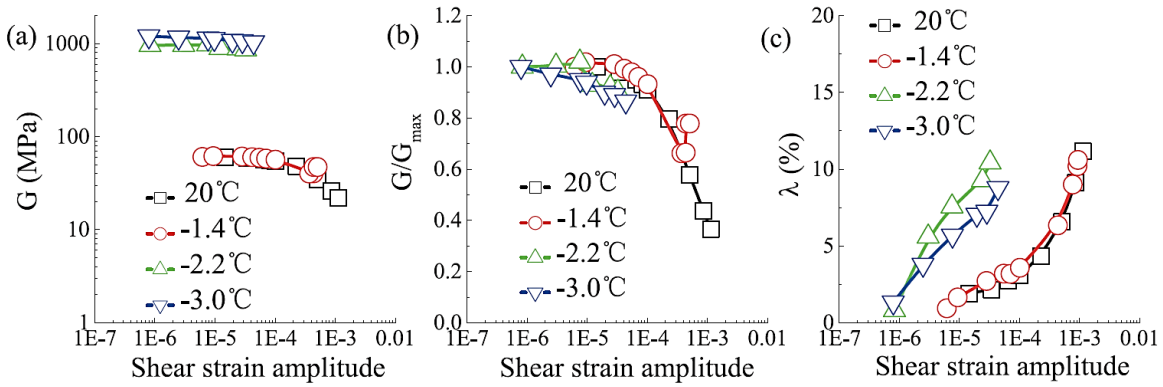


Рис. 4. Зависимость показателей динамических свойств мерзлого пылеватого грунта от температуры по результатам испытаний в резонансной колонке: а) динамический модуль сдвига G; б) отношение текущего модуля сдвига к его максимальному значению G/G_{max}; в) коэффициент поглощения λ [8]

Fig. 4. Resonant Column Test Results. The dependence of the dynamic properties of the frozen soil on the temperature: a) the dynamic shear modulus G; b) G/G_{max}; c) damping ratio λ [47]

Табл. 2. Результаты испытаний мерзлых пылеватых грунтов методом резонансной колонки при разных температурах [8]

Table 2. Resonant Column Test Results of frozen soils at different temperatures [8]

Temperature °C	G_{max} MPa	γ_r	λ_{max}
−15	1539.2	6.312×10^{-5}	0.073
−10	1467.4	6.670×10^{-5}	0.078
−5	1341.8	7.520×10^{-5}	0.106
−3	1238.4	9.354×10^{-5}	0.116
Room temperature (15°C to 25°C)	64.2	6.602×10^{-4}	0.183

В 2018 г. Xiaobo Yu и др. [9] дополнили свои исследования (по той же схеме испытаний) серией испытаний мерзлых грунтов разного состава (мерзлые глины, мерзлые пылеватые грунты и мерзлые пески) с разной степенью водонасыщения – от 0,3 до 1 при температуре от −5ºС до −18ºС. По результатам было получено, что показатели динамических свойств мерзлых глинистых и пылеватых грунтов не зависят от степени водонасыщения. Ее некоторое влияние было отмечено только на модуль сдвига и коэффициент поглощения мерзлого песчаного грунта (рис. 5). Резонансная частота определена для мерзлой глины при температуре −18ºС и составила 310 Гц.

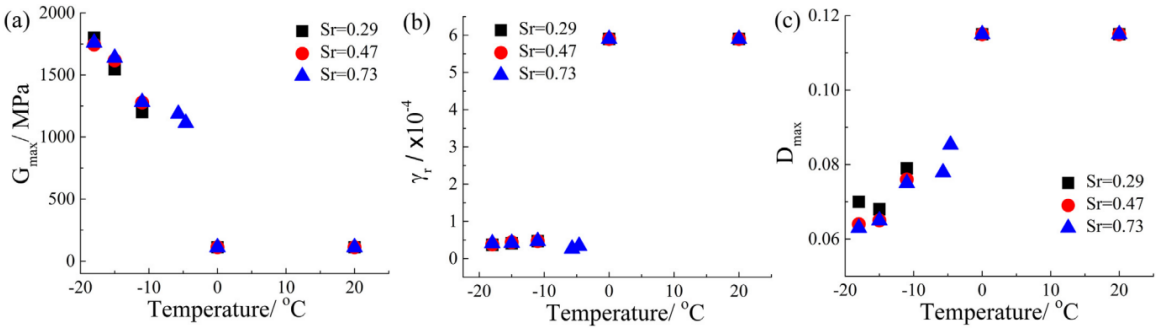


Рис. 5. Зависимость показателей динамических свойств мерзлого песка от степени водонасыщения и температуры по результатам испытаний в резонансной колонке [9]

Fig. 5. Resonant Column Test Results. The dependence of the dynamic properties of frozen sand on the f water saturation and temperature [9]

При снижении температуры мерзлого грунта от 0 °С до −18°С начальный модуль сдвига значительно увеличивается в среднем от 20-60 МПа до 1600-2750 МПа, а коэффициент поглощения уменьшается – от 0,05-0,07 до 0,11-0,22 (рис. 6) [9].

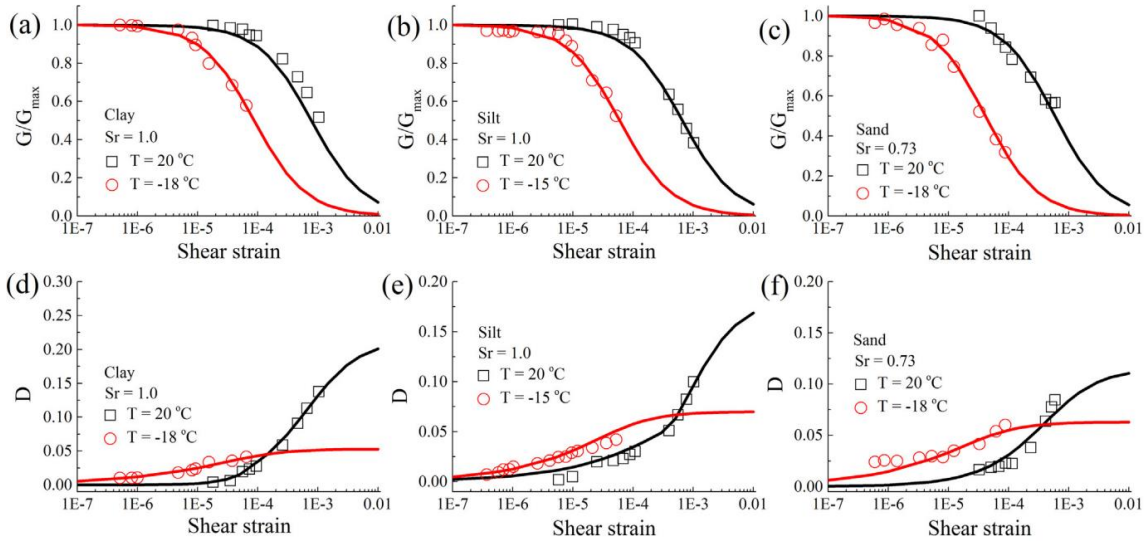
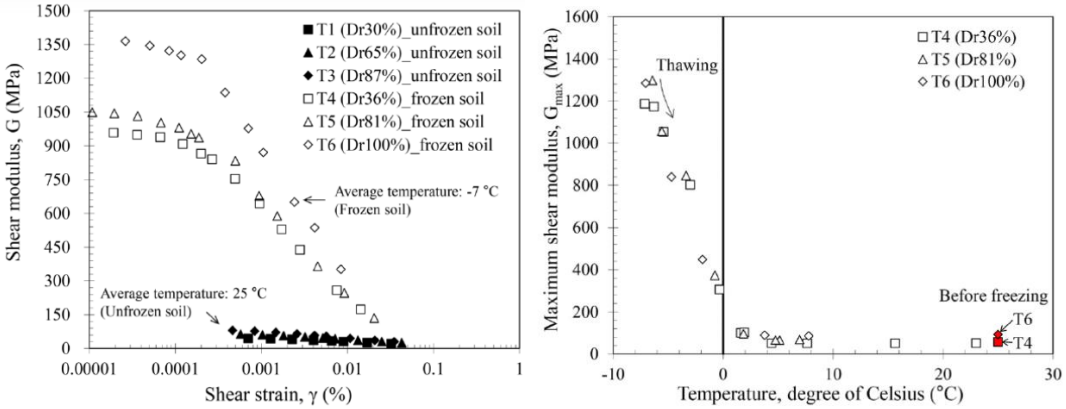


Рис. 6. Результаты испытаний грунтов разного состава методом резонансной колонки: a, b, c – отношение G/G_{max} мерзлой глины, мерзлого пылеватого грунта, мерзлого песка; d, e, f – коэффициент поглощения D мерзлой глины, мерзлого пылеватого грунта, мерзлого песка [9]

Fig. 6. Resonant Column Test Results: a, b, c – G/Gmax of frozen clay, frozen silty, frozen sand; d, e, f – damping ratio D of frozen clay, frozen silty, frozen sand [9]

Ученые из Южной Кореи Jae-Hyun Kim и др. [2] провели исследование динамического поведения мерзлого песка. С помощью модифицированной резонансной колонки Stokoe проведены испытания в диапазоне деформаций от 10^{-7} до $2*10^{-4}$ с всесторонним давлением 0,03 МПа. По результатам было получено, что при увеличении удельной плотности увлажненного грунта от 1910 кг/м^3 до 2200 кг/м^3 начальный модуль сдвига мерзлого грунта увеличивается с 960 МПа до 1375 МПа при температуре −7ºС. С увеличением температуры мерзлого грунта модуль сдвига значительно снижается. Так, при температуре −2ºС модуль сдвига составляет 300-440 МПа (в зависимости от плотности). При температуре выше 0ºС модуль сдвига имеет значение ниже 100 МПа (рис. 7). Кроме этого, деградация модуля сдвига при увеличении уровня деформации у мерзлых грунтов идет интенсивнее, чем у немерзлых.

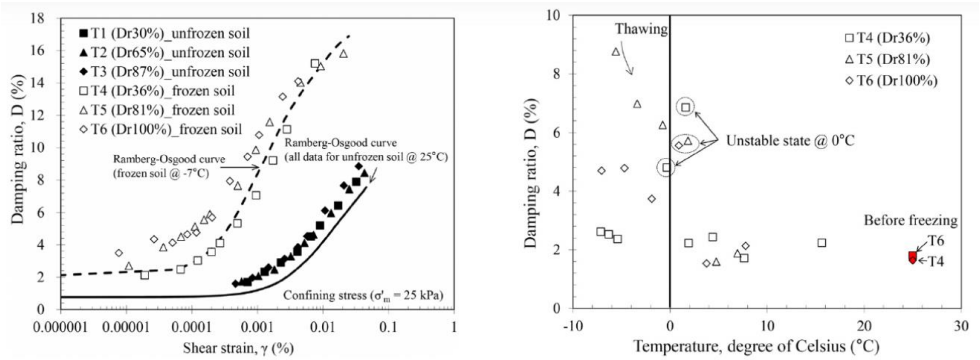
Коэффициент поглощения мерзлых грунтов в среднем в 2-4 раза больше, чем у немерзлых грунтов. При увеличении температуры мерзлого грунта наблюдается тенденция к снижению коэффициента поглощения, однако это не так явно просматривается, как в случае модуля сдвига. При приближении температуры грунта к 0°С зафиксировано некоторое увеличение коэффициента поглощения (рис. 8) [2].



а) б)

Рис. 7. Динамический модуль сдвига песчаных грунтов по результатам испытаний в резонансной колонке в зависимости от (а) уровня деформации сдвига и (б) температуры (на схемах указана относительная плотность мерзлого грунта D_r, %) [2]

Fig. 7. Resonant Column Test Results. Dynamic shear modulus of frozen sand [2]



а) б)

Рис. 8. Коэффициент поглощения песчаных грунтов по результатам испытаний в резонансной колонке в зависимости от (а) уровня деформации сдвига и (б) температуры (на схемах указана относительная плотность мерзлого грунта D_r, %) [2]

Fig. 8. Resonant Column Test Results. Damping ratio of frozen sand soils

Выводы

Приведем некоторое количественное обобщение показателей динамических свойств мёрзлых грунтов, полученных методом резонансной колонки. При низких отрицательных температурах менее −10ºС начальный модуль сдвига мерзлого грунта имеет значение в среднем более 2000-3000 МПа. Увеличение температуры грунта до −4 - −7ºС способствует снижению начального модуля сдвига до 900-1500 МПа, мерзлые грунты с температурой −3ºС и выше характеризуются в среднем начальным модулем сдвига от 1200 МПа (−3ºС) до 90 МПа (−1,4ºС). Хотя в отдельных работах, преимущественно 1980-ых годов и ранее, приводятся иные результаты. Результаты исследования показывают более высокие значения как модуля сдвига, так и резонансной частоты для мерзлых грунтов и мало соотносятся с данными, полученными современными учеными, что может быть связано с особенностями применяемого оборудования. Так, по некоторым исследованиям того времени модуль сдвига мерзлых грунтов доходит до 8000 МПа и выше.

Обобщенные графики температурной зависимости начального модуля сдвига мерзлых грунтов разного состава приведены на рис. 9.

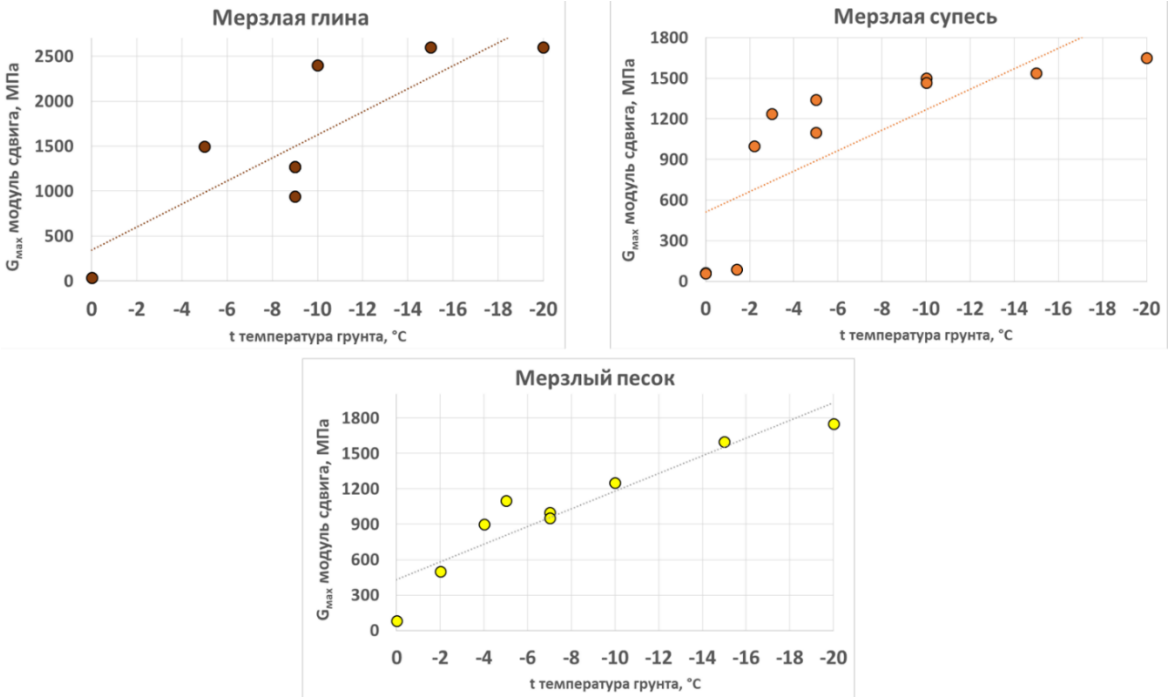


Рис. 9. Обобщенные графики зависимости начального модуля сдвига мерзлого грунта от температуры по результатам испытаний в резонансной колонке

Fig. 9. Generalized Resonant Column Test Results. Dynamic shear modulus of frozen soil on temperature

Коэффициент поглощения мерзлых грунтов в целом варьирует в широком диапазоне. Так, при температуре грунта −5°C и выше его значение изменяется от 0,08 до 0,12, при температуре −10°C и ниже – 0,05-0,07.

Информация о резонансной частоте в проанализированной литературе, к сожалению, приводится только при низкой отрицательной температуре. Так, ее значение при температуре мерзлого грунта −10°C и ниже колеблется от 300 Гц до 1000 Гц.

При сравнении результатов испытаний мерзлого и немерзлого грунтов при одинаковой амплитуде деформаций в среднем получается, что динамический модуль сдвига первого из них выше примерно в 50 раз, иногда более. Коэффициент поглощения мерзлого грунта выше, чем у немерзлого в несколько раз.

Список литературы

1. Al-Hunaidi M., P.A. Chen, J.H. Rainer, M. Tremblay. Shear moduli and damping in frozen and unfrozen clay by resonant column tests // Canadian Geotechnical Journal, №33(3), 1996, CC.510-514 1996. DOI:10.1139/T96-073.

1. Kim Jae-Hyun, Kwon Yeong-Man, Park Keunbo, Kim YoungSeok, Kim Dong-Soo. Dynamic Soil Properties of Frozen and Unfrozen Soils from Terra Nova Bay in Eastern Antarctica // Journal of the Korean geotechnical society, №.33(3), 2017, CC. 37-47. https://doi.org/10.7843/kgs.2017.33.3.37.

2. Ling, X., Li, Q., Wang, L., Zhang, F., An, L., Xu, P. Stiffness and damping radio evolution of frozen clays under long-term low-level repeated cyclic loading: experimental evidence and evolution model. Cold Regions Science and Technology, №86, 2013, CC. 45-54.

3. Shaoling Wang, Fujun Niu, Lin Zhao, Shuxun Li. The thermal stability of roadbed in permafrost regions along Qinghai–Tibet Highway // Cold Regions Science and Technology, № 37(1), 2003, CC. 25-34. DOI:10.1016/S0165-232X(03)00011-9.

4. Ted S. Vinson. Dynamic properties of naturally frozen Farbanks silt. 1982. с. 317. [54]
5. Turcott-Rios E. E. Resonant column-testing of frozen soils, с. 135, 1980.
6. Wenbing Yu, Yuanming Lai, Xuefu Zhang, Shujuan Zhang. Laboratory investigation on cooling effect of coarse rock layer and fine rock layer in permafrost regions // Cold Regions Science and Technology, № 38(1), 2004, СС. 31-42. DOI:10.1016/S0165-232X(03)00061-2.
7. Xiaobo Yu, Rui Sun, Xiaoming Yuan, Zhuoshi Chen, Jiuqi Zhang. Resonant Column Test on the Frozen Silt Soil Modulus and Damping at Different Temperatures // Periodica Polytechnica Civil Engineering, №61(4), 2017, СС. 762-769. DOI:10.3311/PPci.10349.
8. Xiaobo Yu, Huabei Liu, Rui Sun, Xiaoming Yuan. Improved Hardin-Drnevich model for the dynamic modulus and damping ratio of frozen soil // Cold Regions Science and Technology, № 153(1), 2018. DOI:10.1016/J.COLDREGIONS.2018.05.004.
9. Zhao S. P., Zhu Y. L., P. He, and D. Y. Wang. Testing study on dynamic mechanics parameters of frozen soil // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, №22, (2), 2003, СС. 2677-2681.
10. Болдырев Г. Г., Идрисов И. Х. Методы определения динамических свойств грунтов. ООО «НПП «Геотек», М.: ООО «Прондо», 2018, 488 с.