

© В.И. Шевцов, И.А. Атманский, С.Г. Тютрин, 1997.

Биомеханическое моделирование реконструкции бедренной кости у больных с анкилозом тазобедренного сустава в порочном положении

В.И. Шевцов, И.А. Атманский, С.Г. Тютрин

Российский научный центр "Восстановительная травматология и ортопедия" им. академика Г. А. Илизарова, г. Курган (Генеральный директор — академик РАМТН, д.м.н., профессор, заслуженный деятель науки РФ В.И. Шевцов)

В статье приведен способ коррекции осанки и биомеханической оси конечности у больных с анкилозом тазобедренного сустава в порочном положении путем реконструкции бедренной кости. Дан алгоритм, позволяющий смоделировать естественную биомеханику дистальных отделов конечности и позвоночника с учетом индивидуальных особенностей больного.

Ключевые слова: бедренная кость, тазобедренный сустав, анкилоз в порочном положении, биомеханическое моделирование, реконструкция кости, аппарат Илизарова

В РНЦ ВТО им. академика Г.А. Илизарова разработаны методики лечения больных с анкилозом тазобедренного сустава в порочном положении. Эти методики позволяют, в отличие от традиционных способов коррекции анкилоза тазобедренного сустава, учесть и скорректировать смещение общего центра масс тела (ОЦМ), тем самым оптимизировать механизмы компенсации двигательного дефекта позвоночником, устранить гиперлордоз поясничного отдела позвоночника с учетом компенсаторных изменений в нём независимо от угла функционально-выгодного сгибания бедра в сагиттальной плоскости, восстановить конвертирующий тип строения нижних конечностей, без сужения межбедренного пространства, реализовать естественную биомеханическую ось конечности.

Данная методика предусматривает выполнение проксимальной межвертельной или подвертельной остеотомии с образованием угла открытого кнаружи и кпереди. Дистальная остеотомия производится на протяжении диафиза для противоразворота, коррекции биомеханической оси в функционально-выгодном положении и удлинения до равной длины ног (рис. 1). Степень отведения во фронтальной плоскости промежуточного фрагмента, образованного двумя остеотомиями, определяется достижением симметрии контуров мягких тканей, восстановлением межбедренного пространства, возможностью реализации кондилodiaфизарного угла противоразворотом дистального фрагмента. Создаваемая при этом варусная трансформация бедра приводит к латерализации центра тяжести конечности относительно биомеханической оси конечности, что в свою очередь даёт возможность достигнуть равновесного одноопорного стояния меньшим боковым наклоном туловища [3]. В сагитталь-

ной плоскости промежуточному фрагменту придаётся сгибательная установка. Степень его сгибания определяется величиной выноса биомеханической оси конечности кпереди для восстановления в сагиттальной плоскости единой анатомической проекции общего центра тяжести в одноопорный период здоровой и анкилозированной конечностей. Тем самым устраняется гиперлордоз, независимо от угла сгибания бедра в сагиттальной плоскости. Поскольку величина смещения ОЦМ определяется углом сгибания бедра в сагиттальной плоскости, то гиперлордоз можно моделировать, изменяя величину выноса оси конечности. Математическая зависимость пространственной ориентации

$$\ell = \sqrt{\left[\frac{\sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \cdot d \right]^2 + [|\text{OE}| \cdot \sin \varphi + |\text{BE}| \cdot \cos \varphi]^2}$$

$$\mu = \arctg \left[\frac{[|\text{OE}| \cdot \sin \varphi + |\text{BE}| \cdot \cos \varphi] \cdot \sin(\alpha + \beta)}{d \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta} \right]$$

и длины промежуточного фрагмента описывается совокупностью выражений:

Учет данной зависимости позволяет при выполнении двойной реконструктивной остеотомии у больных с анкилозом тазобедренного сустава в порочном положении смоделировать естественную биомеханику не только дистальных отделов, но и позвоночника.

Таким образом, задачей биомеханического моделирования является расчёт оптимальных величин l , α и μ с учётом имеющихся входящих данных. Использование полученной зависимости в таком виде затруднено из-за сложности математических вычислений и сравнительного анализа возможных вариантов соотношений l , α и μ между собой. С этой целью нами разработан

алгоритм, позволяющий произвести расчёт оптимальных их величин с учётом совокупности всех данных, в том числе клинорентгенологических, социальных, возрастных, биомеханических и т.д.

Из полученной математической совокупности видно, что имеется три группы данных: клинорентгенологические ($d, \beta, |OE|$), исходно задаваемые данные ($\varphi, |BE|$) и искомые элементы (α, l, μ), позволяющие оптимально реализовать условие двойной реконструктивной остеотомии при перечисленных выше входящих данных. Мы считаем, что величину отведения угол α наиболее целесообразно так же исходно задавать с учётом поставленных задач, индивидуальных особенностей и ортопедического статуса больного.

С целью облегчения математических расчётов мы вводим два коэффициента:

$$K_1 = \frac{\sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \text{ и}$$

$$K_2 = \frac{|OE| \cdot \sin \varphi + |BE| \cdot \cos \varphi}{d},$$

которые позволяют представить ряд математических операций над клинорентгенологическими данными в виде таблицы, упростить общую зависимость и облегчить выбор величин исходно задаваемых данных. Общий вид математической зависимости при этом примет следующий вид:

$$\begin{cases} \ell = \sqrt{(d \cdot K_1)^2 + (d \cdot K_2)^2} \\ \mu = \arctg \frac{K_2}{K_1 \cdot \cos \alpha} \end{cases} \text{ или}$$

$$\begin{cases} \frac{\ell}{d} = \sqrt{K_1^2 + K_2^2} \\ \mu = \arctg \frac{K_2}{K_1 \cdot \cos \alpha} \end{cases}$$

В этом случае зависимость коэффициента K_1 от кондиллодиафизарного угла β и отведения промежуточного фрагмента угла α можно представить в виде таблицы (табл. 1). В данную таблицу, с целью облегчения выбора величины угла α , введена величина получаемого угла противоразворота во фронтальной плоскости (γ). В зависимости от степени атрофии мягких тканей и их объёма, величина угла γ должна быть не менее $150-160^\circ$, в силу клинического проявления варусной трансформации бедренной кости и возникающих усилий на излом в области угловой трансформации. Для удобства дальнейших расчётов присваиваем значение выражения $K_1 \cos \alpha$ коэффициенту C . В этом случае значение μ будет определяться следующим выраже-

нием:

$$\mu = \arctg \frac{K_2}{C}.$$

Зависимость l/d от K_1 и K_2 и μ от K_2 и $C = K_1 \cos \alpha$ также можно представить в виде таблицы. Так как K_1 и C ($K_1 \cos \alpha$) по своим значениям составляют один числовой ряд, это позволяет их структурно объединить в одной строке, а нахождение μ и l/d представить в одной таблице (табл.2).

При моделировании реконструкции бедренной кости необходимо помнить, что клинический промежуточный фрагмент не однороден и сформирован частично проксимальным фрагментом бедренной кости, собственно промежуточным фрагментом и, частично, регенератом в области угловых трансформаций. Наличие регенерата дает возможность произвести угловую трансформацию во фронтальной и сагиттальной плоскостях на разных уровнях. Это позволяет иметь независимую величину l в разных плоскостях в пределах прогнозируемого удлинения бедра. Величины углов α и μ , в силу возникающих усилий на излом в области противоразворота, должны приближаться к максимальному значению. С другой стороны, при выборе величины угла α , по таблице 1 имеющуюся величину β , при его больших значениях, можно уменьшить, так как коррекция вальгусной деформации возможна дополнительным смещением проксимального конца дистального фрагмента к наружи на регенерате до $5-7^\circ$ (рац. предложение № 35/87 "Способ дополнительной коррекции вальгусной деформации коленного сустава при реконструктивно-восстановительных операциях по Илизарову" Куртов В.М.). $|BE|$ - расстояние между отвесной линией центра тяжести и поперечной осью тазобедренных суставов по данным разных авторов составляет от 2 до 5 см [1, 2]. Учитывая, что у больных данной категории, как правило, имеются дефекты головки, шейки, то наиболее правильно будет выбирать минимальные значения $|BE|$. Величина угла φ подбирается индивидуально в зависимости от возраста, профессии, пожеланий пациента. С учётом особенностей предлагаемой реконструкции бедренной кости, функционально-выгодное сгибание в тазобедренном суставе может иметь большие величины, чем это общепринято. В случаях, когда полная коррекция гиперлордоза не возможна из-за наступивших необратимых изменений, величина угла φ определяется исходя из того положения конечности в сагиттальной плоскости, в котором позвоночник находится в функционально выгодном, для этого состояния, положении. Это позволяет произвести коррекцию порочного положения конечности с учётом наступивших анатомических изменений.

Тем самым, последовательность выбора параметров может быть представлена следующим образом. По таблице 1, исходя из величины кондиллодиафизарного угла β , измеряемого по рентгенограмме,

и допустимого угла противоразворота, производят выбор угла отведения промежуточного фрагмента α . По α и β определяют соответствующие им коэффициенты K_1 и C . В зависимости от локализации илю-феморального синастоа и сохранности элементов проксимального фрагмента бедренной кости производят выбор значения $|BE|$. По рентгенограмме таза с компенсацией лордоза определяют по известным ориентирам радиус вращения ОЦМ - $|OE|$. С учётом планируемой установки конечности в сагиттальной плоскости (угла φ), рассчитывают величину коэффициента K_2 по формуле

$$K_2 = \frac{|OE| \cdot \sin \varphi + |BE| \cdot \cos \varphi}{d}.$$

Затем в таблице 2, по коэффициентам K_2 и K_1 определяют соответствующую им величину l/d и l , а по коэффициентам K_2 и C - соответствующую им величину угла μ . Так как клинически имеет значение не сама величина угла μ , задаваемая относительно биомеханической оси конечности в сагиттальной плоскости, а угол сгибания промежуточного фрагмента относительно положения таза в сагиттальной плоскости (радиус вращения ОЦМ), то положение фрагмента в сагиттальной плоскости будет определяться разностью углов φ и μ .

Таким образом, созданный алгоритм позволяет учесть не только математическую зависимость, обусловленную восстановлением нормальной биомеханики статики и кинематики двигательного акта, в условиях неподвижности в тазобедренном суставе, но и учесть анатомо-функциональные особенности пациента. По данной методике пролечено 28 больных анкилозом тазобедренного сустава в порочном положении. Во всех случаях достигнут хороший косметический и функциональный результат.

В качестве иллюстрации приводим клинический пример. Больная Г. 37 лет (архивный № истории болезни 27152) поступила с диагнозом анкилоз левого тазобедренного сустава в порочном положении. Укорочение левой нижней конечности 3 см. При поступлении предъявляла жалобы на периодические боли ноющего характера в области тазобедренного сустава, поясничного отдела позвоночника, хромоту, укорочение, порочное положение бедра (рис. 5). В 1,5-летнем возрасте перенесла травматический вывих левого бедра. Производилось закрытое вправление. С 1992 года, после родов, наступило резкое ухудшение: увеличилась хромота, укорочение, ограничение движений вплоть до полного их исчезновения.

St. localis: Ортопедическое укорочение 18 см. Установка в левом тазобедренном суставе сгибание 110° , приведение 60° , ротация 0° , анатомическая длина бедра 43 см, g. valg. 8° . Ходит в обычной обуви резко хромота на левую ногу.

Во время предоперационного обследования

по рентгенограмме коленного сустава определена величина кондиллодиафизарного угла $\beta = 8^\circ$. С целью максимального расширения межбедренного пространства по таблице 1 найден максимально возможный угол отведения α с учётом рекомендуемого угла противоразворота. Углу $\beta = 8^\circ$ при максимально допустимом угле $\gamma = 147^\circ$ соответствуют $\alpha = 25^\circ$ (от вертикали), $K_1 = 0,256$, $C = 0,232$. По скиаграмме с рентгенограммы таза (рис. 2) в положении компенсации гиперлордоза определена величина радиуса вращения ОЦМ: $|OE| = 10,5$ см. По приведённому выше математическому выражению, принимая $|BE| = 2$ см и с учётом планируемой установки конечности в сагиттальной плоскости $\varphi = 150^\circ$, рассчитана величина коэффициента $K_2 = 0,082$. По таблице 2, коэффициентам $K_2 = 0,082$ и $K_1 = 0,256$ соответствует $l/d = 0,271$ (при анатомической длине бедренной кости, равной 43 см, $l = 11,65$ см), а коэффициентам $K_2 = 0,082$ и $C = 0,232$ соответствует $\mu = 21,2^\circ$.

6.12.95 выполнена операция. Произведена подвертельная поперечная остеотомия левого бедра. Дистальному фрагменту, с учётом выше приведённых расчетов и последующей коррекцией биомеханической оси конечности придано положение во фронтальной плоскости под углом 25° кнаружи относительно вертикальной линии (или 115° относительно биспинальной линии) и в сагиттальной плоскости под углом 130° открытым кпереди (исходя из того, что μ - по условию угол, задаваемый относительно биомеханической оси конечности в сагиттальной плоскости $\varphi = 150^\circ$). С учётом рассчитанной длины промежуточного фрагмента, на расстоянии 11 см от проксимальной остеотомии, произведена кортикотомия диафиза бедра. Остеосинтез произведен аппаратом Илизарова. С седьмых суток после операции начата дистракция на уровне кортикотомии. В процессе удлинения на дистракционном регенерате осуществлён коррекционный разворот до нормализации биомеханической оси конечности. Общий срок дистракции и коррекции составил 59 дней, фиксации 69 дней. Общий срок лечения аппаратом 135 дней. Результат лечения через год: жалоб не предъявляет, ходит без дополнительных средств опоры, не хромота, относительная длина ног одинаковая, функция коленного сустава сохранена в полном объеме, установка в тазобедренном суставе: сгибание 150° , приведение 90° , ротация 0° . Рентгенологически определяется сращение на уровне подвертельной остеотомии, промежуточный фрагмент, длиной 11,5 см, отведён под углом 25° к вертикали и сгибания 130° , на границе верхней и средней третьей диафиза имеется дистракционный регенерат, трансформированный с целью коррекционного противоразворота дистального фрагмента во фронтальной плоскости для нормализации биомеханической оси (рис.3) на 147° ,

в сагитальной на 160° . Устранён гиперлордоз позвоночника, восстановлена биомеханическая ось конечности в функционально выгодном положении (рис. 4). Результатом лечения довольна (рис. 6).

Таким образом, предлагаемый способ позволяет, используя геометрическую интерпретацию опорно-двигательного аппарата и математические расчеты, при выполнении реконструкции бедренной кости у данной категории больных не только устранить порочное положение бедра, восстановить равную длину ног, восстановить межбедренное пространство, но и устранить компенсаторный гиперлордоз позвоночника.

Кроме того, данный способ позволяет оптимизировать механизмы компенсации позвоночником двигательного дефекта в сагитальной плоскости во время ходьбы, производить учёт степени обратимости компенсаторных изменений в позвоночнике независимо от угла функционально-выгодного сгибания бедра в сагитальной плоскости, создать в комплексе с реабилитационными мероприятиями действенную систему профилактики дегенеративно-дистрофических изменений в позвоночнике, дистальных и контралатеральных суставах нижних конечностей.

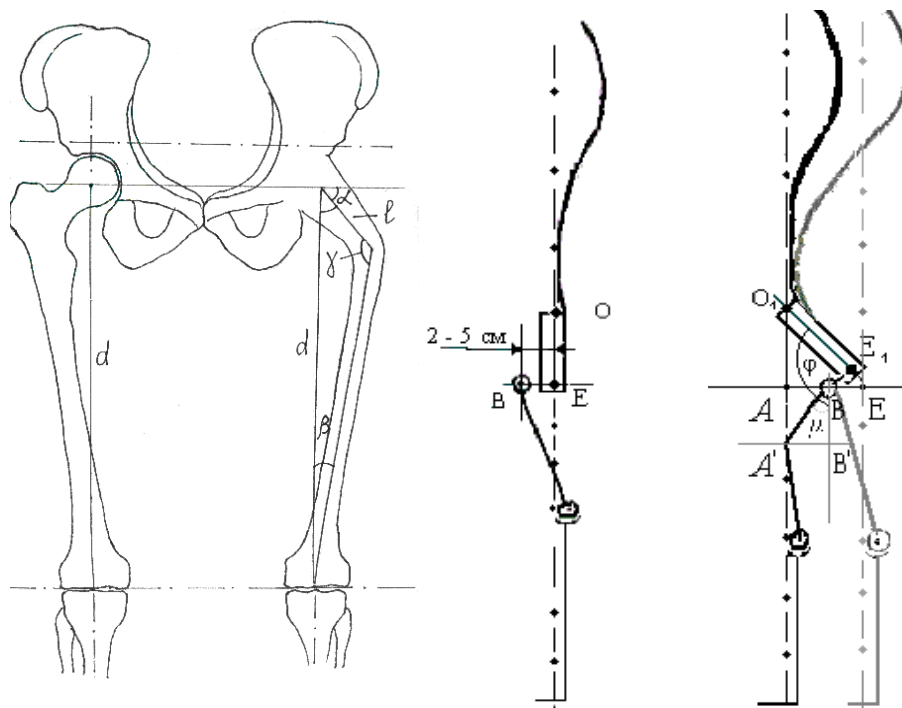


Рис. 1. Схема расположения бедренной кости и позвоночника относительно вертикальной составляющей ОЦМ тела в норме и после выполнения двойной реконструктивной остеотомии во фронтальной и сагитальной плоскостях. Серым контуром в сагитальной плоскости показано их расположение после коррекции анкилоза в порочном положении традиционным способом.

l - длина промежуточного фрагмента от центра тазобедренного сустава до уровня коррекционного разворота;

d - длина бедренной кости от центра тазобедренного сустава до щели разогнутого коленного сустава с учетом удлинения бедра и нормализации биомеханической оси конечности;

α - угол, образованный продольной осью промежуточного фрагмента и биомеханической осью конечности во фронтальной плоскости;

β - (кондилodiaфизарный) угол, образованный продольной осью диафиза бедренной кости и биомеханической осью бедра;

$|OE|$ - длина радиуса вращения ОЦМ (определяется по рентгенограмме от передненижнего края I крестцового позвонка до его центра вращения);

$|BE|$ - расстояние между отвесной линией центра тяжести и поперечной осью тазобедренных суставов;

φ - угол, образованный радиусом вращения ОЦМ тела и биомеханической осью конечности в сагитальной плоскости;

μ - угол, образованный продольной осью промежуточного фрагмента и биомеханической осью конечности в сагитальной плоскости.



Рис. 2. Фото с рентгенограммы таза больной до лечения.



Рис. 3. Фото с рентгенограмм левого тазобедренного сустава с бедром в двух проекциях через 10 дней после снятия аппарата.



Рис. 4а. Фото с рентгенограммы левой нижней конечности больной через 8 месяцев после операции.



Рис. 4б. Фото с рентгенограммы позвоночника больной в сагитальной плоскости стоя на прооперированной конечности через 8 месяцев после операции.

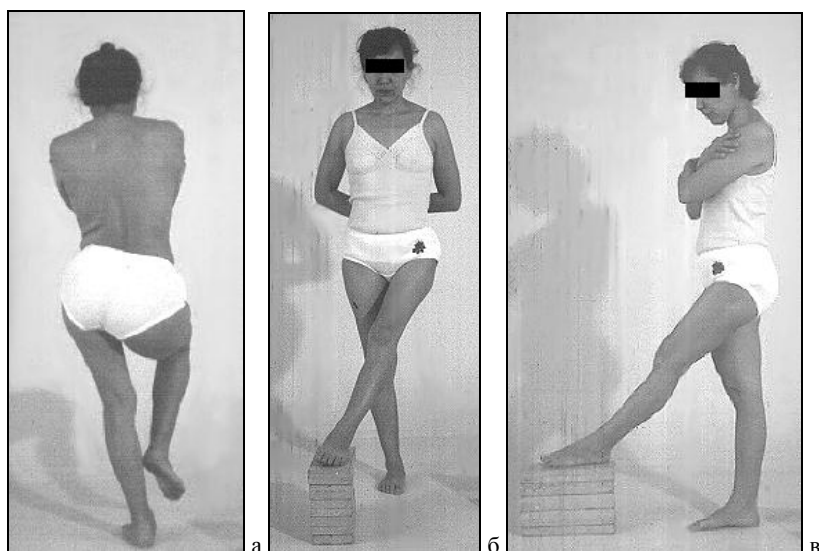


Рис. 5 Фото больной до лечения. Вид а - сзади стоя на больной ноге, б, в - фас и профиль с компенсацией ортопедического укорочения.



Рис. 6 Фото больной после лечения. Вид а - сзади стоя на прооперированной ноге, б - фас, в - профиль.

Таблица 1

Зависимость коэффициентов K_1 , C и угла γ от кондильофизарного угла β и отведения промежуточного фрагмента угла α .

β	α	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°
6°	K_1	0.548	0.379	0.292	0.238	0.203	0.178	0.159
	g	169°	164°	159°	154°	149°	144°	139°
	C	0.546	0.373	0.282	0.224	0.184	0.154	0.131
7°	K_1	0.586	0.417	0.325	0.268	0.230	0.203	0.182
	g	168°	163°	158°	153°	148°	143°	138°
	C	0.584	0.410	0.314	0.252	0.208	0.175	0.149
8°	K_1	0.619	0.450	0.356	0.296	0.256	0.226	0.204
	g	167°	162°	157°	152°	147°	142°	138°
	C	0.616	0.444	0.344	0.279	0.232	0.196	0.167
9°	K_1	0.647	0.480	0.385	0.323	0.280	0.249	0.225
	g	166°	161°	156°	151°	146°	141°	137°
	C	0.644	0.473	0.372	0.303	0.254	0.215	0.184
10°	K_1	0.671	0.508	0.411	0.347	0.303	0.270	0.246
	g	165°	161°	155°	150°	145°	140°	136°
	C	0.668	0.500	0.397	0.326	0.274	0.234	0.201

Таблица 2

Зависимость l/d от коэффициентов K_1 , K_2 и μ от коэффициентов K_2 и C .

K ₂		Коэффициенты K ₁ и C = K ₁ ·cos α																											
		0.15 4	0.17 5	0.17 8	0.18 4	0.20 3	0.20 8	0.22 4	0.23 0	0.23 2	0.23 8	0.25 2	0.25 4	0.25 6	0.26 8	0.27 4	0.27 1	0.27 9	0.28 0	0.28 2	0.29 2	0.29 6	0.30 3	0.31 4	0.32 3	0.32 5	0.32 9	0.32 9	
0.03	l/d	0.15 9	0.18 0	0.18 2	0.18 8	0.20 7	0.21 2	0.22 8	0.23 3	0.23 5	0.24 1	0.25 5	0.25 7	0.25 9	0.27 7	0.27 4	0.27 9	0.28 3	0.28 5	0.28 5	0.29 9	0.29 6	0.30 7	0.31 5	0.32 7	0.32 1	0.32 7	0.33 1	
	μ	14.6	12.9	12.7	12.3	11.1	10.9	10.1	9.9	9.8	9.5	9.0	8.9	8.9	8.5	8.3	8.4	8.2	8.1	8.1	7.8	7.7	7.5	7.3	7.1	7.0	6.9	6.9	
0.04	l/d	0.16 2	0.18 2	0.18 5	0.19 1	0.20 9	0.21 4	0.23 0	0.23 5	0.23 7	0.24 3	0.25 1	0.25 3	0.26 1	0.27 9	0.27 6	0.27 3	0.28 3	0.28 4	0.28 6	0.29 6	0.30 0	0.30 7	0.31 8	0.32 7	0.32 9	0.33 3	0.33 3	
	μ	18.0	15.9	15.7	15.2	13.8	13.5	12.6	12.3	12.2	11.9	11.2	11.1	11.1	10.6	10.3	10.5	10.2	10.1	10.1	9.7	9.6	9.4	9.0	8.8	8.7	8.6	8.6	
0.05	l/d	0.16 5	0.18 5	0.18 8	0.19 4	0.21 2	0.21 6	0.23 2	0.23 8	0.24 0	0.25 5	0.25 9	0.26 1	0.26 3	0.27 5	0.28 0	0.27 8	0.28 5	0.28 6	0.28 8	0.29 8	0.30 2	0.30 9	0.32 0	0.32 3	0.33 4	0.33 4	0.33 3	
	μ	21.3	18.9	18.6	18.4	16.5	16.1	15.0	14.6	14.5	14.1	13.4	13.3	13.2	12.6	12.4	12.5	12.1	12.1	12.0	11.6	11.5	11.2	10.8	10.5	10.5	10.3	10.3	
0.06	l/d	0.16 9	0.18 8	0.19 1	0.19 7	0.21 5	0.21 9	0.23 0	0.24 4	0.24 2	0.24 8	0.26 3	0.26 5	0.27 7	0.28 0	0.28 3	0.28 8	0.28 9	0.28 9	0.29 1	0.30 4	0.30 7	0.31 1	0.32 0	0.33 3	0.33 3	0.33 6	0.33 6	
	μ	24.4	21.8	21.5	20.8	19.0	18.6	17.4	16.9	16.8	16.4	15.5	15.4	15.3	14.6	14.3	14.5	14.1	14.0	13.9	13.5	13.3	13.0	12.6	12.2	12.2	12.0	12.0	
0.07	l/d	0.17 4	0.19 2	0.19 5	0.20 1	0.21 3	0.22 3	0.23 4	0.24 5	0.24 1	0.25 4	0.26 6	0.26 8	0.27 0	0.28 0	0.28 5	0.28 8	0.29 0	0.29 3	0.30 7	0.30 3	0.31 4	0.32 3	0.33 3	0.33 5	0.33 9	0.33 9	0.33 9	
	μ	27.5	24.6	24.2	23.5	21.5	21.0	19.7	19.2	19.0	18.6	17.6	17.5	17.4	16.6	16.3	16.4	16.0	15.9	15.8	15.3	15.1	14.8	14.3	13.9	13.8	13.7	13.7	
0.08	l/d	0.17 8	0.19 7	0.19 9	0.20 5	0.22 2	0.22 7	0.24 1	0.24 7	0.24 9	0.25 4	0.26 8	0.26 9	0.27 8	0.28 1	0.28 3	0.28 6	0.28 9	0.29 4	0.29 6	0.30 6	0.30 9	0.31 6	0.32 7	0.33 7	0.33 7	0.34 1	0.34 1	
	μ	30.3	27.2	26.8	26.1	23.9	23.4	21.9	21.4	21.2	20.7	19.7	19.5	19.4	18.6	18.2	18.4	17.9	17.8	17.7	17.1	16.9	16.5	16.0	15.6	15.5	15.3	15.3	
0.09	l/d	0.18 4	0.20 2	0.20 9	0.20 4	0.22 6	0.23 1	0.24 5	0.24 1	0.25 3	0.25 8	0.27 1	0.27 3	0.27 5	0.28 6	0.29 2	0.28 9	0.29 6	0.29 7	0.29 9	0.30 3	0.31 9	0.31 3	0.32 3	0.33 4	0.34 3	0.34 3	0.34 3	
	μ	33.0	29.7	29.3	28.5	26.2	25.7	24.1	23.5	23.3	22.8	21.6	21.5	21.3	20.5	20.1	20.3	19.7	19.7	19.5	18.9	18.7	18.3	17.7	17.2	17.1	16.9	16.9	
0.10	l/d	0.18 9	0.20 7	0.20 9	0.21 4	0.23 1	0.23 5	0.25 0	0.25 5	0.25 7	0.27 2	0.27 5	0.27 7	0.27 9	0.29 0	0.29 5	0.29 2	0.30 1	0.30 3	0.31 6	0.31 2	0.32 3	0.33 3	0.34 3	0.34 3	0.34 7	0.34 7	0.34 7	
	μ	35.5	32.2	31.7	30.9	28.5	27.9	26.2	25.6	25.4	24.8	23.6	23.4	23.3	22.3	21.9	22.1	21.5	21.4	21.3	20.6	20.4	20.0	19.3	18.8	18.7	18.5	18.5	
0.11	l/d	0.19 5	0.21 2	0.21 5	0.22 0	0.23 6	0.24 0	0.25 4	0.25 9	0.26 1	0.26 7	0.27 9	0.28 1	0.28 3	0.29 4	0.29 6	0.29 9	0.30 4	0.30 5	0.31 6	0.31 9	0.32 6	0.33 6	0.34 3	0.35 6	0.36 0	0.36 0	0.36 0	
	μ	37.9	34.4	34.0	33.1	30.6	30.0	28.2	27.6	27.3	26.8	25.5	25.3	25.1	24.1	23.7	23.9	23.3	23.2	23.1	22.3	22.6	21.6	20.9	20.4	20.3	20.0	20.0	
0.12	l/d	0.20 2	0.21 8	0.22 0	0.22 5	0.24 1	0.24 5	0.25 9	0.26 4	0.26 6	0.27 1	0.28 4	0.28 5	0.28 7	0.29 0	0.30 3	0.30 1	0.30 8	0.30 9	0.31 1	0.32 4	0.32 0	0.33 3	0.34 0	0.34 8	0.35 0	0.35 4	0.35 4	
	μ	40.2	36.6	36.1	35.2	32.6	32.0	30.1	29.5	29.3	28.6	27.3	27.1	26.9	25.9	25.4	25.6	25.0	24.9	24.7	24.0	23.7	23.2	22.5	21.9	21.8	21.6	21.6	
0.13	l/d	0.20 8	0.22 4	0.22 6	0.23 1	0.24 7	0.25 1	0.26 4	0.26 9	0.27 1	0.27 6	0.28 8	0.29 0	0.29 2	0.30 5	0.30 8	0.31 2	0.31 5	0.31 8	0.31 9	0.32 4	0.32 7	0.33 4	0.34 4	0.35 3	0.35 4	0.35 8	0.35 8	
	μ	42.3	38.7	38.2	37.3	34.6	33.9	32.0	31.3	31.1	30.5	29.1	28.9	28.7	27.6	27.1	27.3	26.6	26.6	26.4	25.6	25.3	24.8	24.0	24.3	23.3	23.1	23.1	
0.14	l/d	0.21 5	0.23 0	0.23 3	0.23 7	0.25 2	0.25 6	0.27 0	0.27 5	0.27 7	0.28 2	0.29 5	0.29 7	0.30 0	0.31 3	0.31 7	0.31 0	0.31 7	0.31 8	0.31 9	0.32 4	0.33 3	0.33 6	0.34 3	0.35 3	0.36 2	0.36 2	0.36 2	
	μ	44.2	40.6	40.1	39.2	36.5	35.8	33.8	33.1	32.9	32.2	30.8	30.6	30.4	29.2	28.7	29.0	28.3	28.2	28.0	27.2	26.9	26.3	25.5	24.9	24.8	24.5	24.5	
0.15	l/d	0.22 2	0.23 7	0.23 9	0.24 4	0.25 8	0.26 2	0.27 5	0.28 0	0.28 2	0.28 7	0.29 0	0.30 3	0.30 6	0.31 0	0.31 2	0.31 7	0.32 2	0.32 7	0.33 4	0.33 6	0.34 3	0.35 3	0.36 0	0.36 2	0.36 6	0.36 6	0.36 6	
	μ	46.1	42.4	42.0	41.0	38.2	37.2	35.5	34.8	34.6	33.9	32.4	32.2	32.0	30.8	30.3	30.6	29.8	29.7	29.6	28.7	28.4	27.8	27.0	26.4	26.2	25.9	25.9	
0.16	l/d	0.22 9	0.24 4	0.24 6	0.25 1	0.26 5	0.26 9	0.28 1	0.28 6	0.28 8	0.29 2	0.30 4	0.30 6	0.30 9	0.31 3	0.32 7	0.32 0	0.32 7	0.32 8	0.32 9	0.33 8	0.34 1	0.34 7	0.35 5	0.36 7	0.36 0	0.37 0	0.37 0	
	μ	47.8	44.2	43.7	42.7	39.9	39.3	37.2	36.5	36.2	35.5	34.0	33.8	33.6	32.4	31.8	32.1	31.4	31.3	31.1	30.2	29.9	29.3	28.4	27.8	27.6	27.3	27.3	
0.17	l/d	0.23 7	0.25 1	0.25 3	0.25 7	0.27 1	0.27 5	0.28 2	0.29 4	0.29 6	0.29 8	0.31 1	0.31 3	0.31 6	0.32 0	0.32 3	0.32 8	0.32 5	0.32 2	0.33 3	0.33 5	0.34 6	0.35 2	0.36 0	0.37 2	0.37 5	0.37 5	0.37 5	
	μ	49.5	45.8	45.3	44.4	41.6	40.9	38.8	38.0	37.8	37.1	35.5	35.3	35.1	33.9	33.3	33.6	32.8	32.7	32.6	31.7	31.3	30.7	29.8	29.1	29.0	28.7	28.7	
0.18	l/d	0.24 5	0.25 8	0.26 0	0.26 7	0.28 2	0.28 4	0.29 8	0.30 0	0.30 5	0.31 1	0.31 3	0.31 6	0.32 0	0.33 3	0.33 7	0.33 1	0.33 8	0.34 0	0.34 8	0.35 2	0.35 5	0.36 7	0.37 5	0.37 6	0.38 0	0.38 0	0.38 0	
	μ	51.0	47.4	46.9	45.9	43.1	42.4	40.3	39.6	39.3	38.6	37.0	36.8	36.6	35.3	34.7	35.0	34.3	34.2	34.0	33.1	32.7	32.1	31.2	30.5	30.3	30.0	30.0	
0.19	l/d	0.25 2	0.26 6	0.26 8	0.27 2	0.28 5	0.28 9	0.30 0	0.30 5	0.30 6	0.31 1	0.32 2	0.32 3	0.32 5	0.33 0	0.33 3	0.33 7	0.34 1	0.34 8	0.34 4	0.35 7	0.35 3	0.36 3	0.37 0	0.38 2	0.38 3	0.38 3	0.38 3	
	μ	52.4	48.8	48.3	47.4	44.6	43.9	41.8	41.0	40.8	40.1	38.4	38.2	38.0	36.7	36.1	36.4	35.6	35.5	35.3	34.4	34.0	33.4	32.5	31.8	31.6	31.3	31.3	