

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт прикладной математики и механики
Кафедра Механики и процессов управления

Оценка степени локальных повреждений бетонных и железобетонных конструкций с использованием конечно-элементного моделирования

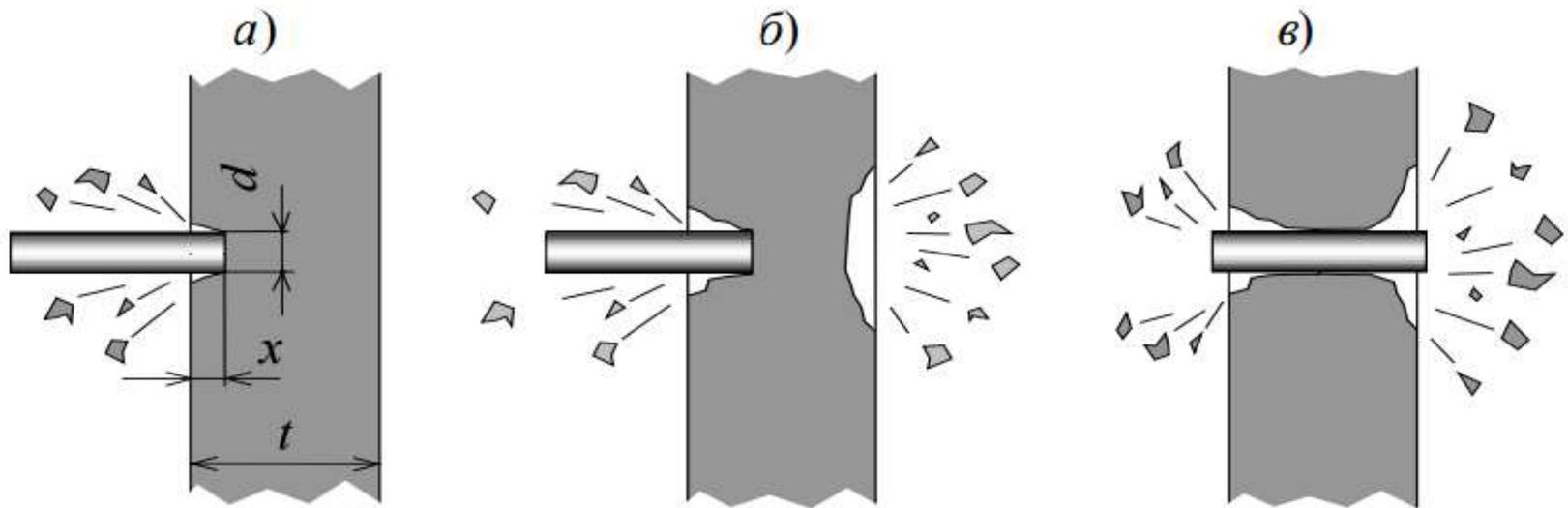
Выполнила студентка гр. 43602/2
Короткова Д. Д.
Руководитель Модестов В. С.

Санкт-Петербург
2015 г

Цели работы:

- Моделирование натурального эксперимента в конечно-элементном комплексе Abaqus.
- Исследование некоторых видов ударных повреждений бетонной преграды.

Виды ударных повреждений бетона



Виды повреждений бетонной преграды
при ударе твердого тела :

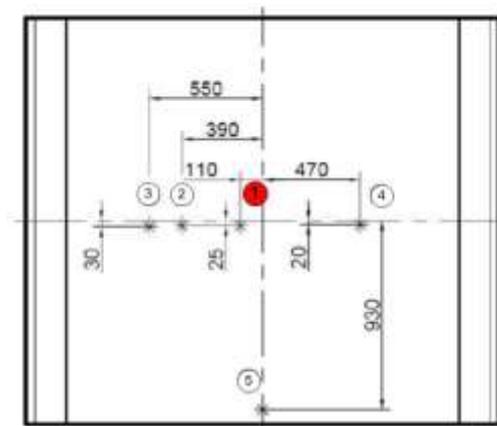
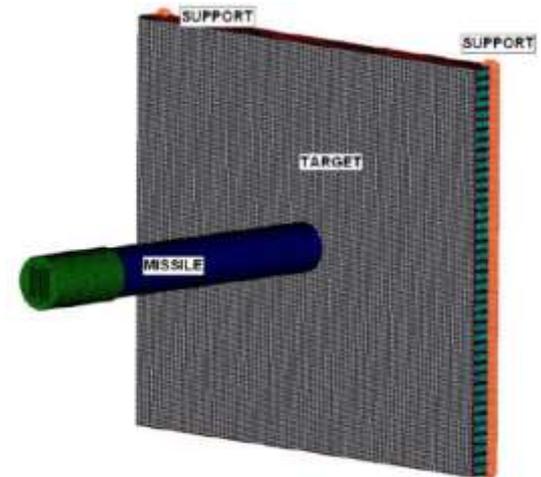
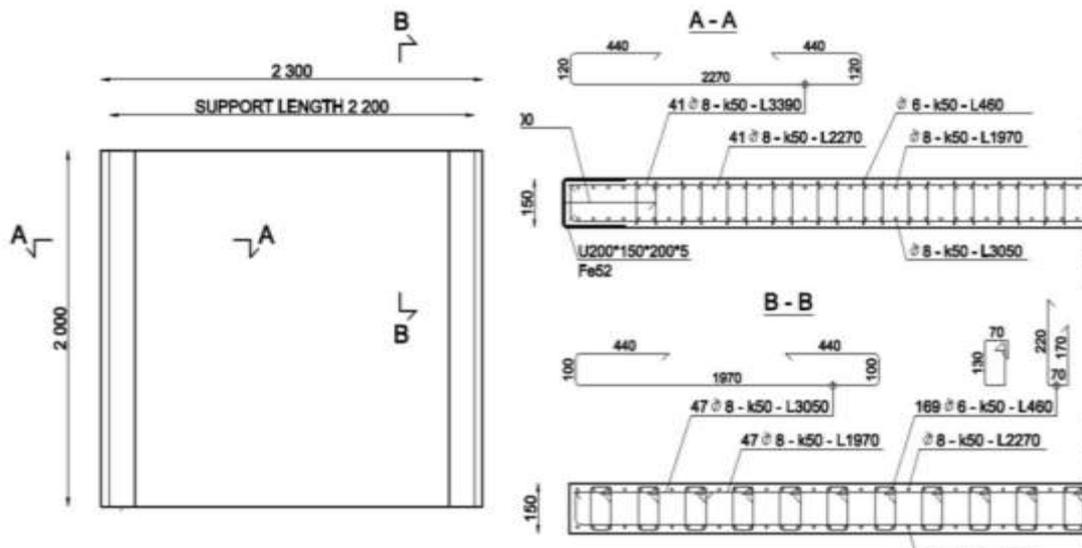
a – выкрашивание с лицевой поверхности;
б – растрескивание изнутри; *в* – пробивание

Описание натурального эксперимента. (*)

Размеры плиты: 2м × 2.3м × 0.15м

Арматура: стальные прутья $d=0.008\text{м}$,
расстояние между прутьями 0.050м и
поперечные хомуты

Плита жестко заделана с двух вертикальных сторон



Расположение датчиков
фиксирующих отклонение плиты

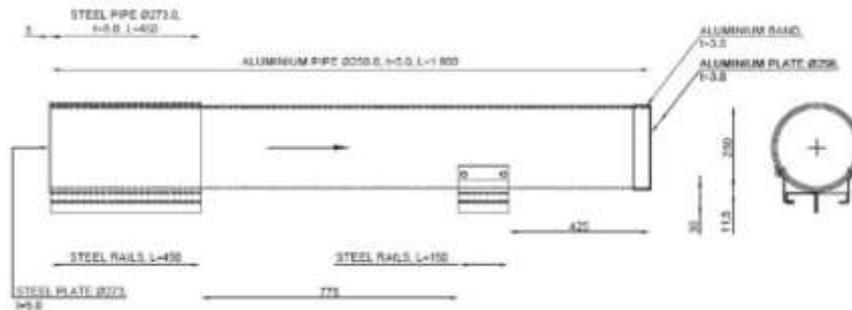
(*) **Bending failure of a shear reinforced concrete slab due to deformable missile impact.** K. Calonius *et al.* SMiRT 21, New Delhi, India, 2011

Описание натурального эксперимента. (*)

Размеры снаряда: $L=1.8\text{м}$, $d=0.25\text{м}$

Вес снаряда: 50.3кг

Скорость снаряда: 127м/с

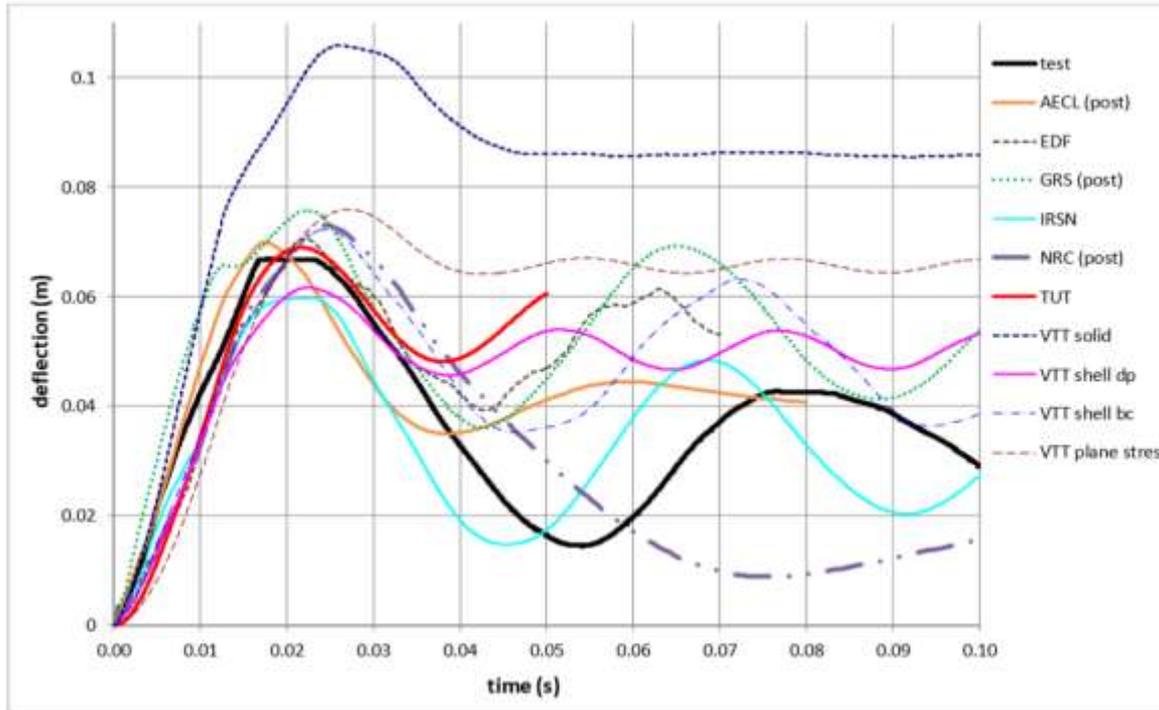


Материалы ударника:

	Е, МПа	Плотность	ν	Предел прочности, МПа
Алюминий	70	2700	0.34	217
Сталь	210	7800	0.3	500

(*)Bending failure of a shear reinforced concrete slab due to deformable missile impact. K. Calonius *et al.* SMiRT 21, New Delhi, India, 2011

Некоторые результаты натурального эксперимента



Отклонение плиты в точке №1

	method	code	model type	approx. el. size (mm)	shear reinf.	load	D1 (mm)
test	-	-	-	-	yes	missile	67*
AECL (post)	FEM	LS-DYNA	solid, full	20	yes	missile simpl.	70
EDF	FEM	Europlexus	4-node shell, full	31	yes	Riera	75
Fortum (post 1)	FEM	Abaqus / Explicit	solid, mp, quarter	25	yes	Riera	62
Fortum (post 1)	FEM	Abaqus / Explicit	solid, dp, quarter	25	yes	Riera	61
Fortum (post 2)	FEM	Abaqus / Explicit	solid, dp, quarter	25	yes	IRSN	75
GRS (post)	FEM	AUTODYN	solid, full	17	yes	missile	77
IRSN	FEM	LS-DYNA	solid, full	10	yes	missile	60
IRSN	various simplified	-	-	-	no	Riera	62...68
NRC (post)	FEM	LS-DYNA	solid, quarter	9	yes	missile	75
TUT	semi-analytic	-	1D, 2DOF	-	yes	Riera	69...72
VTT	FEM	Abaqus / Explicit	shell, quarter	50	no	Riera	61
VTT	FEM	Abaqus / Explicit	solid, half	15	yes	Riera	106
VTT	FEM	Abaqus / Explicit	plane stress, half	8	yes	Riera	75

Эмпирические формулы для вычисления глубины проникания

Модифицированная формула NDRC(*)

Формула получена для случая удара снаряда цилиндрической формы по нормали к недеформируемой (т.е. массивной и достаточно жесткой) железобетонной преграде с армированием 0.3 ÷ 1.5%.

Глубина проникания в преграду составляет:

$$x_n = \begin{cases} KNQ\left(\frac{V_0}{1000d}\right)^{1.8} + d & \text{при } \frac{x_n}{d} > 2 \\ \sqrt{4KNQd\left(\frac{V_0}{1000d}\right)^{1.8}} & \text{при } \frac{x_n}{d} \leq 2 \end{cases}$$

Параметры заданы в международной системе мер:

x_n -глубина проникания, м ;

d - диаметр снаряда, м;

Q - его вес, Н;

V_0 -скорость удара, м/с;

N -коэффициент, зависящий от формы снаряда;

$$N = \begin{cases} 0.72 & \text{— плоский конец} \\ 0.84 & \text{— тупо заостренный конец} \\ 1 & \text{— среднеострый конец} \\ 1.144 & \text{— очень острый конец} \end{cases}$$

K - коэффициент характеризующий прочность бетона.

$K = 180(17.85 * f)^{-1/2}$, f -цилиндрическая прочность бетона при сжатию, кг/м.

	Натурный эксперимент	NDRC
Глубина проникания x_n , м	0.067	0.016

	Глубина проникания x_n , м
30 м/с	0.0044
80 м/с	0.0107
127 м/с	0.0162

(*) National Defence Research Committee (USA)

Эмпирические формулы для вычисления глубины проникания

Методика UK AEA (*). Данная методика учитывает армирование в явном виде.

Если снаряд цилиндрический, то параметры снаряда и преграды связаны соотношением:

$$V_c = 1.3 \rho^{1/6} f^{1/2} \left(\frac{t_p^2 d}{m} \right)^{2/3} (r + 0.3)^{1/2}$$

Где r -количество арматуры у лицевой и тыльной поверхностей мишени в каждом направлении в процентах. $r = \left(\frac{a}{ct} \right) 100$, a -площадь арматурного стержня, s -шаг между стержнями.

t_p -толщина пробивания, м

f -цилиндрическая прочность бетона, Па.

ρ - плотность бетона, кг/м³.

Глубина проникания снаряда в мишень вычисляется по формуле:

$$G = 3.8 * 10^{-5} * \frac{NmV_c^{1.8}}{f_{cy}^{0.5} d^{2.8}}$$

$$\text{Где } G = \begin{cases} 0.55\varepsilon - \varepsilon^2, & \text{при } \varepsilon < 0.22 \\ 0.25\varepsilon^2 + 0.0605, & \text{при } 0.22 < \varepsilon < 2 \\ \varepsilon - 0.9395, & \text{при } \varepsilon > 2 \end{cases}$$

Здесь $\varepsilon = \frac{x_n}{d}$ – отношение глубины проникания к диаметру снаряда.

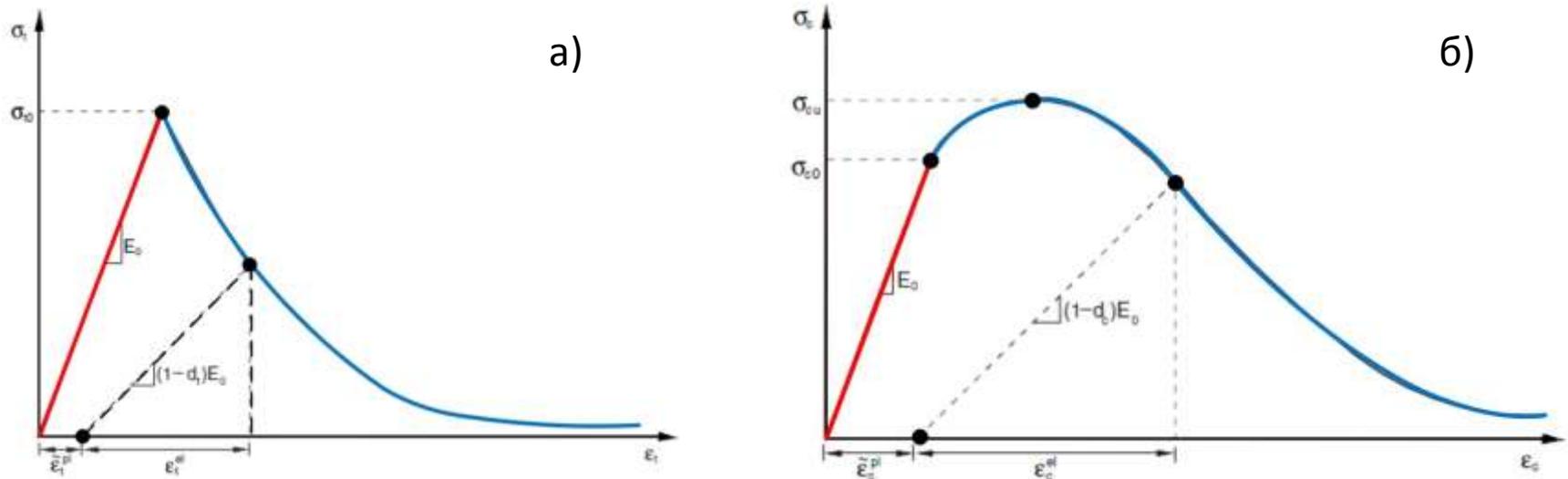
	Глубина проникания x_n , м
30 м/с	0.006
80 м/с	0.0351
127 м/с	0.074

	Натурный эксперимент	UK AEA
x_n , м	0.067	0.074

(*) Методика UK AEA (United Kingdom Atomic Energy Authority

Модель «Concrete Damaged Plasticity»

- Моделирует прочностные свойства бетона на растяжение и сжатие
- Учитывает частичное восстановления жесткости при снятии нагрузки
- Допускает наличие арматуры. Учитывает совместную работу арматуры и бетона
- Не удаляет поврежденные элементы в течение анализа



Диаграммы деформирования бетона при одноосном растяжении(а) и сжатии (б)

$$E = (1 - d_0)E_0$$

E_0 – начальный модуль упругости материала

Модель материала CDP для бетона C60(*)

Dilation Angle	Eccentricity	fb0/fc0	Viscosity Parameter	K
38	0.1	1,16	0	0

	E, ГПа	$\rho, \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$	ν
Бетон с60	41	2400	0.2

диаграмма пластического деформирования бетона при сжатии

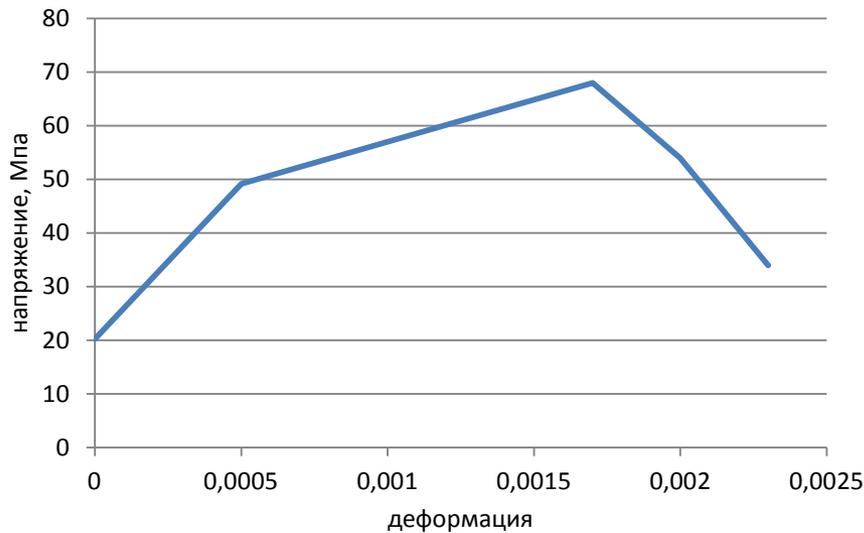
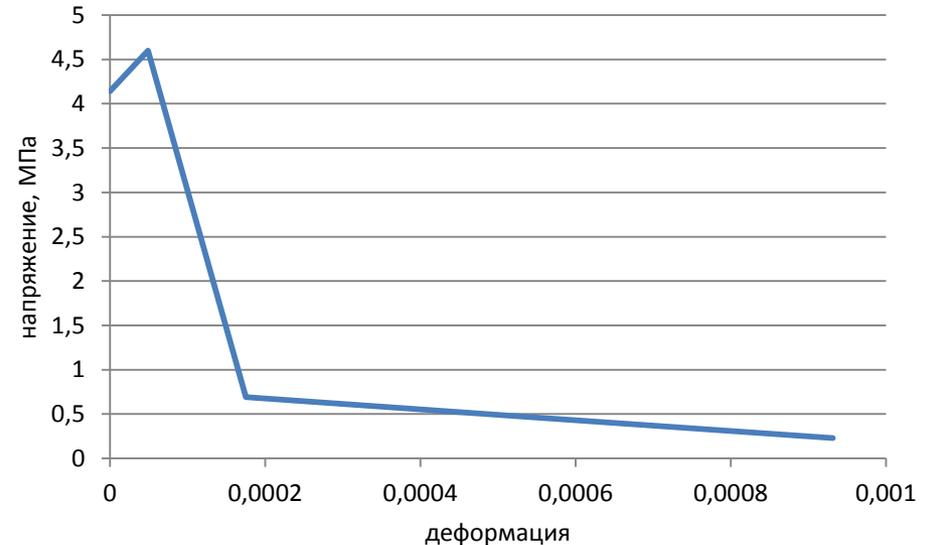
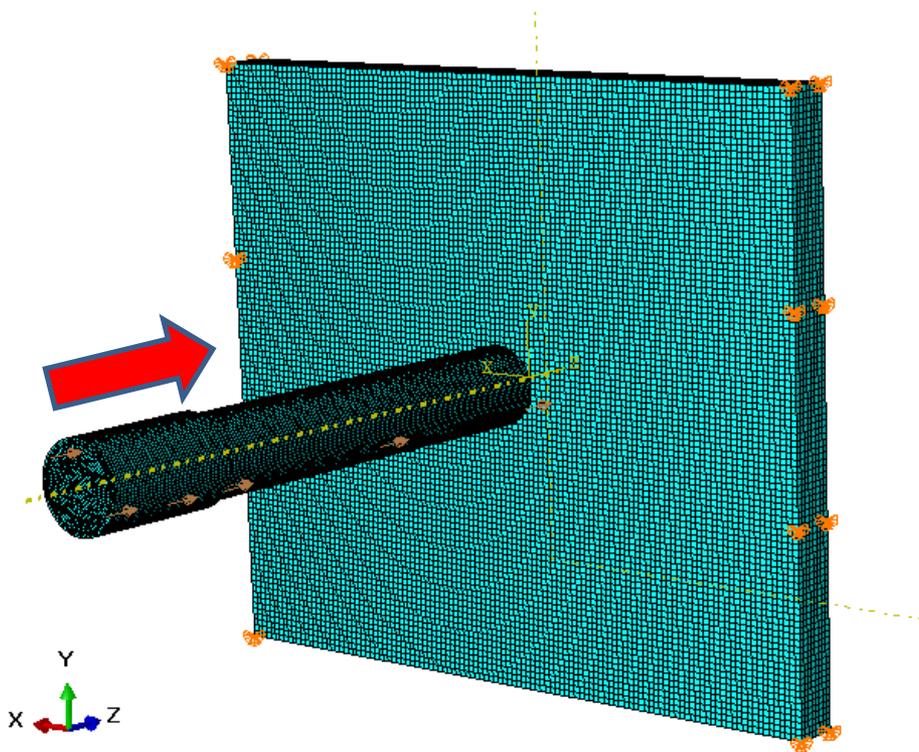


диаграмма пластического деформирования бетона при растяжении



(*) CEB-FIP Model Code 90

Конечно-элементная постановка задачи



Граничные условия:

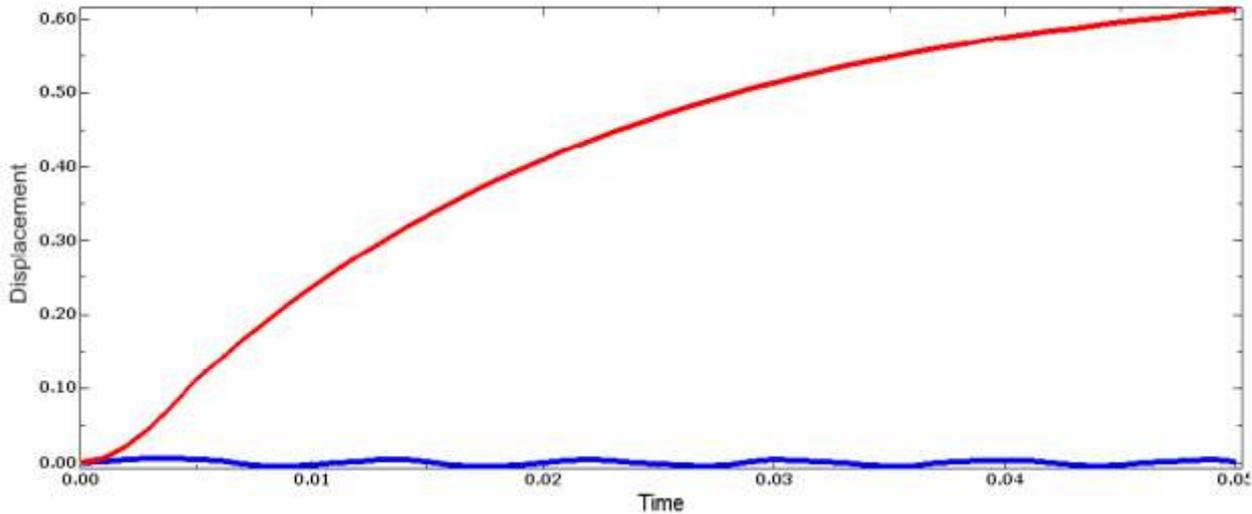
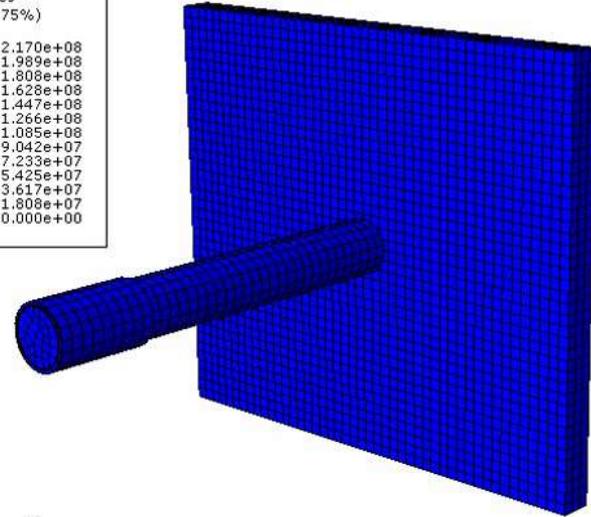
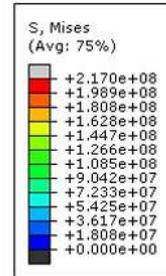
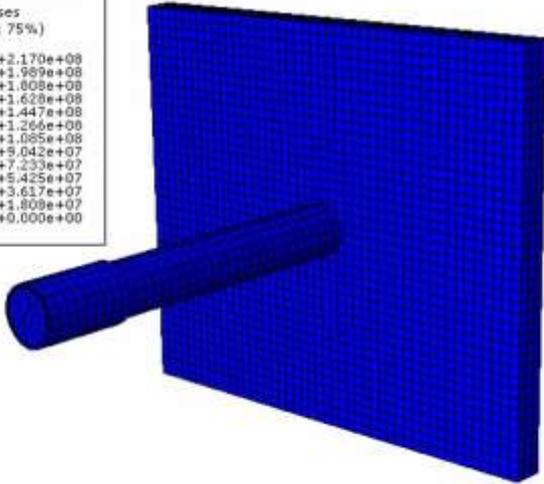
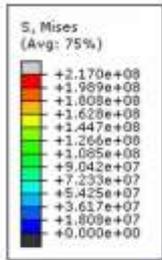
$$u_x = 0; u_y = 0; u_z = 0$$

Время расчета: 0, 1с

Количество элементов: 122662

Количество узлов: 152122

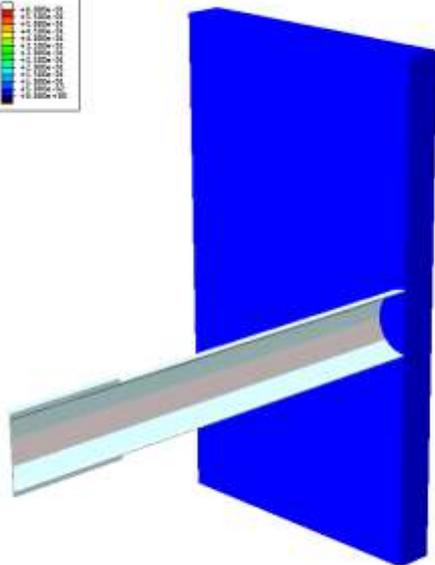
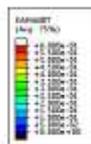
Упругий и неупругий удары



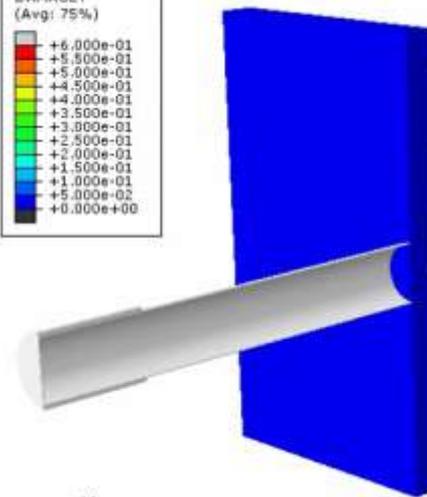
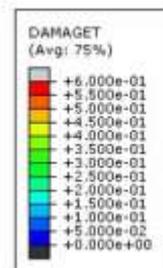
- Модель бетона CDP
- Модель упругого бетона

Упрощенная модель

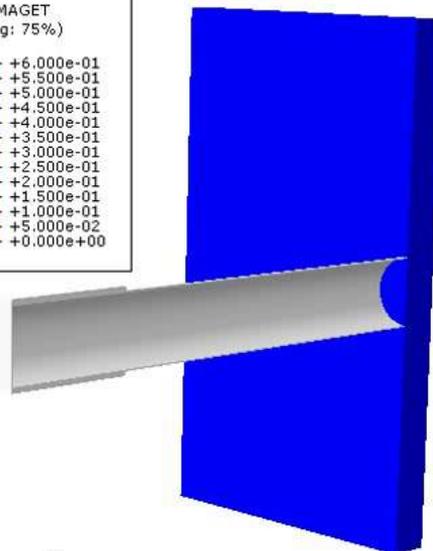
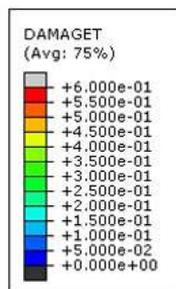
Результаты показаны за время расчета 0.002 с



$V=30\text{m/c}$

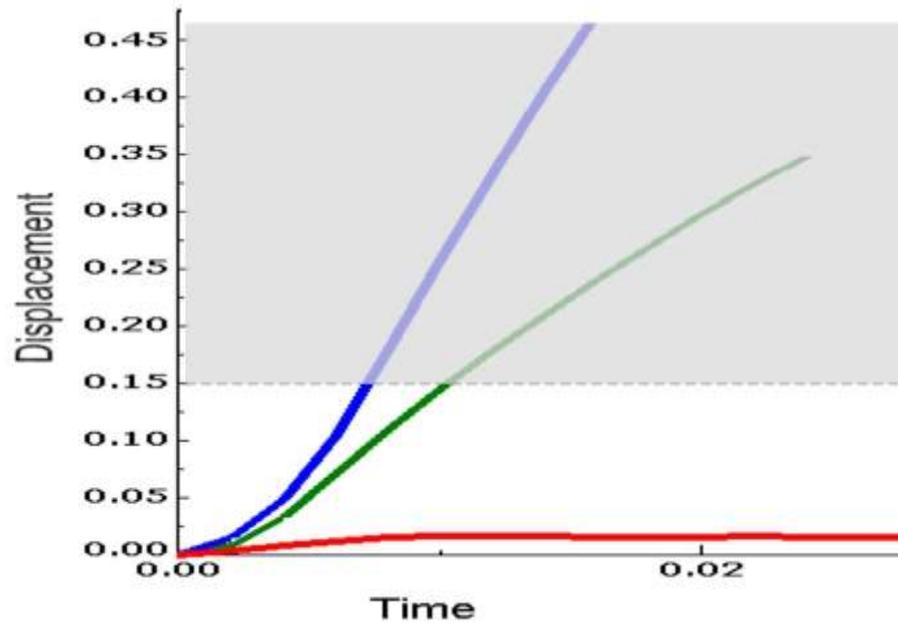


$V=80\text{m/c}$

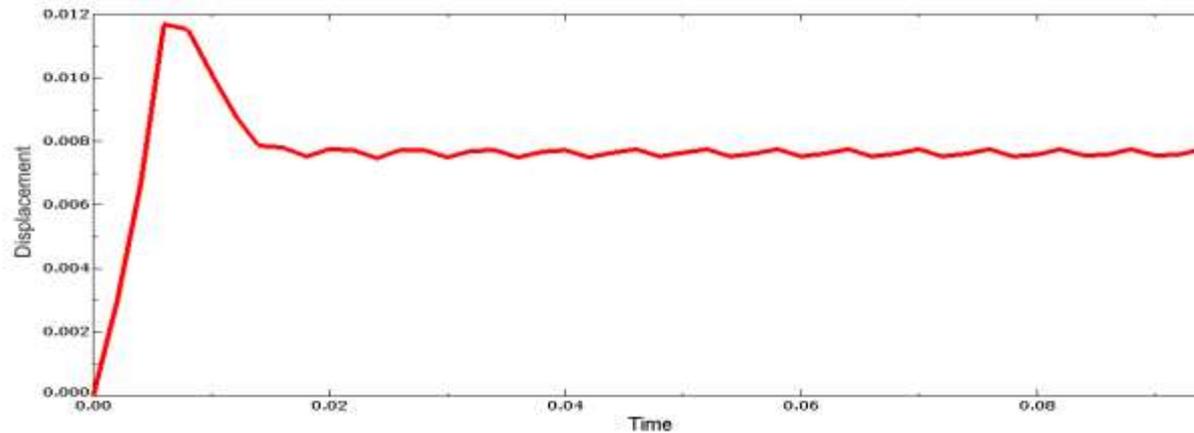


$V=127\text{m/c}$

Отклонение плиты в исследуемой точке

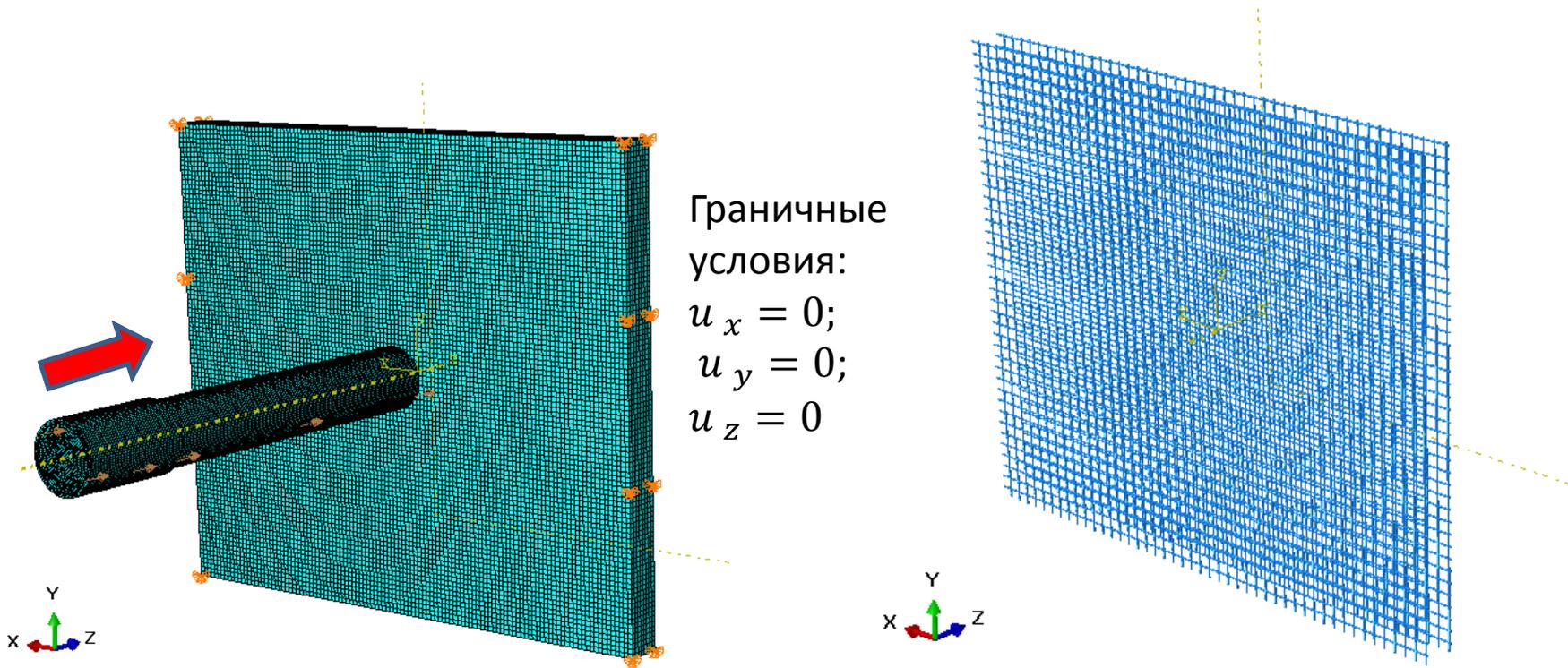


- Скорость 30 м/с
- Скорость 127 м/с
- Скорость 80 м/с



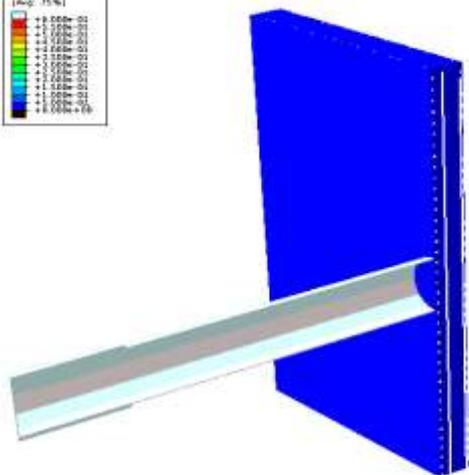
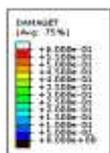
- Скорость 30 м/с

Конечно-элементная постановка задачи

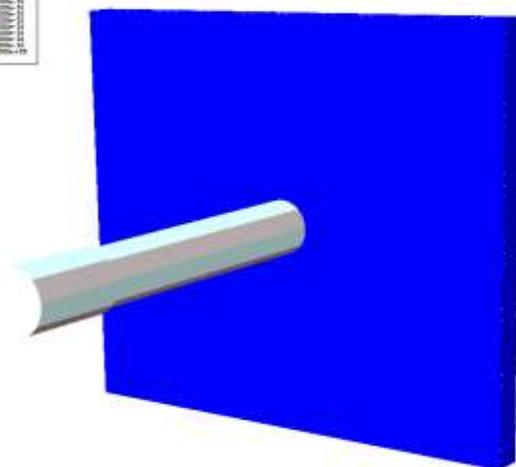
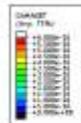


Модель с армированием

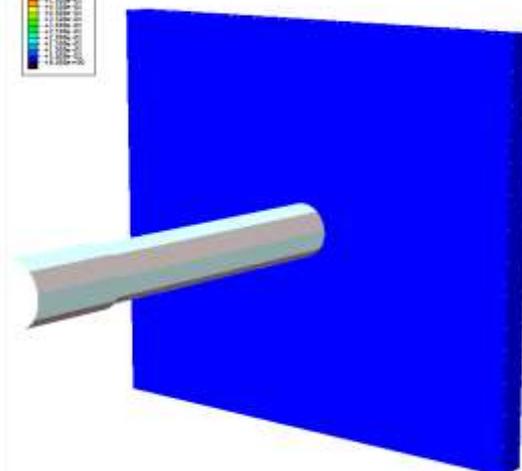
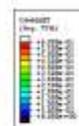
30м/с



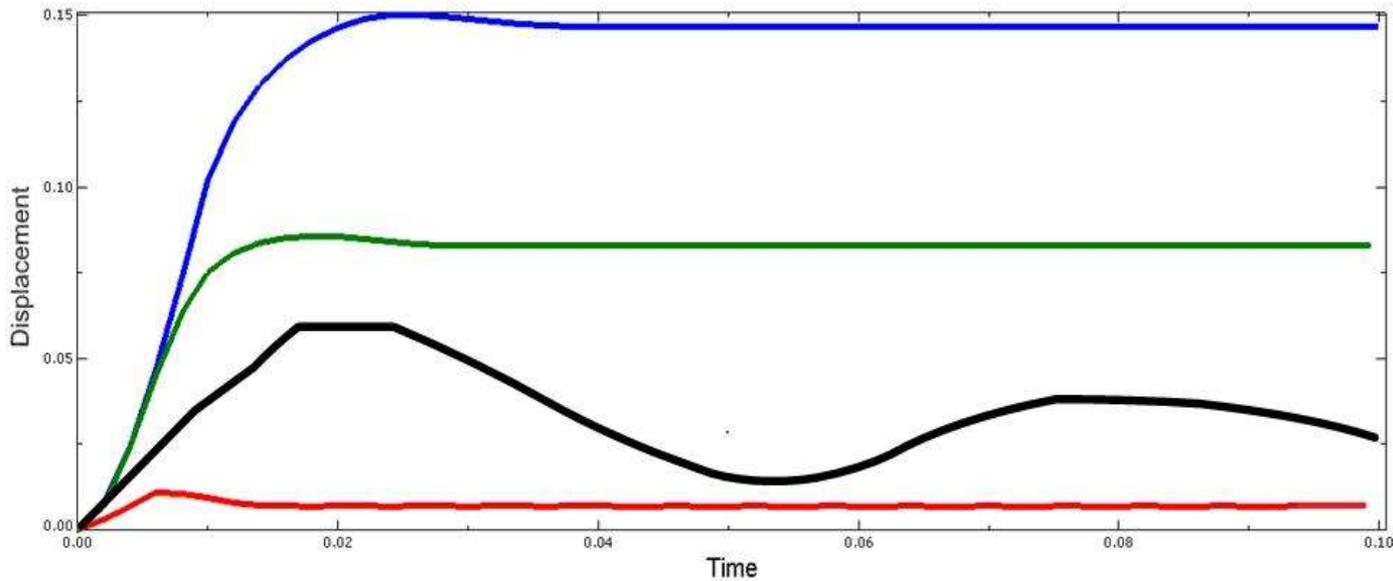
80м/с



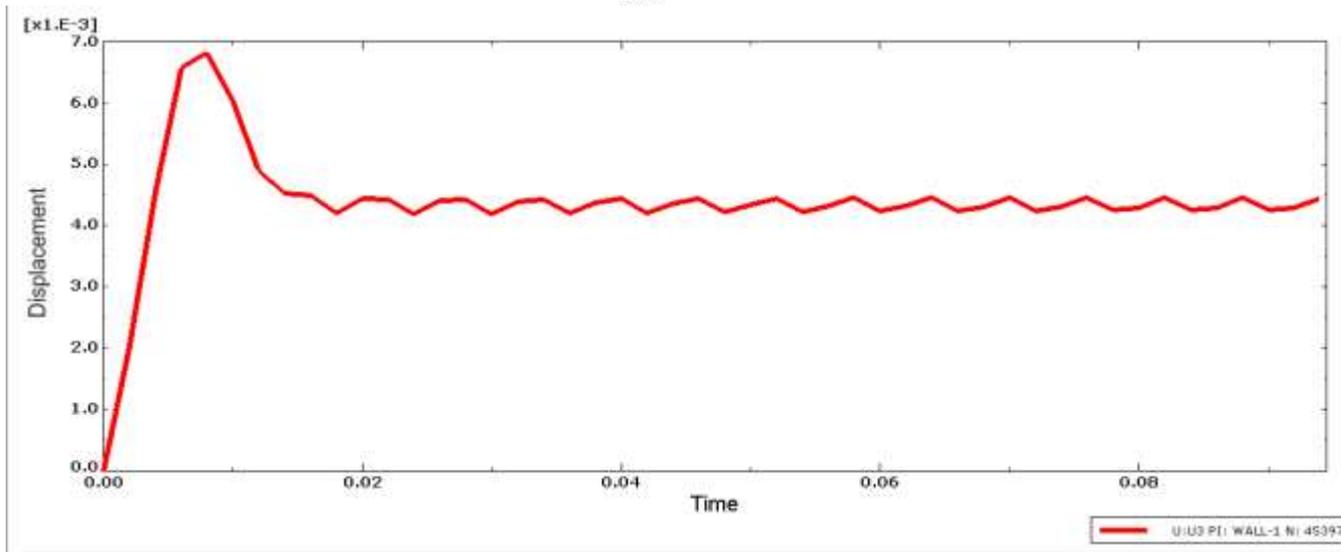
127м/с



Отклонение плиты в исследуемой точке



- Скорость 127 м/с
- Скорость 80 м/с
- Скорость 30 м/с
- Результаты натурного эксперимента (скорость 127 м/с)



Выводы

Различие в результатах расчета с помощью модели материала Concrete Damaged Plasticity и натурального эксперимента могут быть объяснены следующими факторами:

- 1) Не было учтено упрочнение бетона при высокоскоростных нагрузках.
- 2) Теоретическая марка бетона не соответствовала используемой в опыте.
- 3) Армирование было учтено лишь частично.

Модель материала Concrete Damaged Plasticity имеет следующие достоинства:

- 1) Возможность моделирования упруго-пластичных свойств бетона.
- 2) Учет совместной работы армирования и бетона.
- 3) Возможность отражения процесса трещинообразования.
- 4) Дает адекватную картину при небольших скоростях удара, при отсутствии сквозного пробивания.

Спасибо за внимание!