

연약 지반 주행차량의 동특성(Single-Body, Multi-Body) 비교

김형우* · 홍섭* · 최종수*
*한국해양연구원 해양개발시스템연구본부

Comparative Study of Dynamic Responses (Single-Body, Multi-Body) for Tracked Vehicles on Soft Soil

HYUNG-WOO KIM*, SUP HONG* AND JONG-SU CHOI*

*Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KORDI
Daejeon, Korea

KEY WORDS: cohesive soil, tracked vehicle, shear displacement/stress, Multi-body, Single-body, RecurDyn

ABSTRACT: This paper is handling about comparative study on dynamic responses of tracked vehicle on soft soil. Two models of tracked vehicle are used in this paper: a single-body model and a multi-body model. Two different methods for dynamic analysis of tracked vehicle are compared: single-body dynamic analysis and multi-body dynamic analysis. Traveling performances of two tracked vehicles are compared.

1. 서론

각종 공학적 설계 문제에 있어서 컴퓨터 시뮬레이션의 사용이 점차적으로 늘어나고 있다. 컴퓨터 시뮬레이션의 장점은 제반 설계변수의 변화에 따른 결과를 손쉽게 확인할 수 있고, 문제해결에 필요한 시간과 경비를 획기적으로 절감함과 더불어 설계 조건들을 광범위하게 검토할 수 있다는 점이다. 또한, 시뮬레이션을 통하여 설계 단계에서부터 제작과 운용을 함께 고려할 수 있는 점은 시뮬레이션을 기반으로 하는 설계기법의 확장의 주요 이유가 된다.

연약 지반에 대한 주행차량의 성능해석에도 컴퓨터 시뮬레이션이 많이 사용되고 있다(Hayasi, 1975; Kitano and Tyorzaki, 1976; Kitano and Kuma, 1977; Baladi and Rohani, 1978; Bode, 1991; Murakami et al, 1992; Zhang, 1995; Thai and Muro, 1999; Hong et al, 2002).

연약지반 주행차량의 성능해석에 대한 컴퓨터 시뮬레이션은 보통 2가지로 나눌 수 있다. 실제모델과 아주 유사하게 모델링하는 다물체 차량 모델링과 실제모델을 간단히 하여 하나의 강체로 모델링하는 강체 차량 모델링으로 나눌 수 있다.

다물체 차량 모델 해석의 장점은 차량의 각 요소의 세부적인 모델링을 바탕으로 각 요소에 대한 동적 거동 특성의 예측이 가능하다는 점과, 이러한 동적 거동 특성을 통하여 세부설계 제작에 아주 유용하게 사용될 수 있다는 점이다. 하지만 다물체 차량으로 모델링하기 위해서는 많은 강체와 구속조건등을 사용함으로써, 모델의 자유도가 증가하게 되어서, 풀어야 할 시스템 방정식이 커지게 되고 수치해석에 많은 시간이 소요된다.

이에 비해 강체 차량 모델 해석은 차량의 각 요소의 세부적인 모델링 대신에 1개의 강체로 모델링함으로써, 다물체 차량 해석에서 발생하는 문제점인 수치해석 시간이 아주 짧아지며, 해저 주행차량과 유연관, 양광관 및 해상 채광선으로 구성되는 심해저 채광시스템과 같은 복합 시스템의 통합 거동 시뮬레이션에 적용이 가능하다. 하지만 강체 차량 모델은 실제모델을 1개의 강체로 모델링하였기 때문에, 다물체 차량 모델과의 비교·검증이 필요하다.

지면에 대한 차량 트랙의 미끄럼에 의해 발생하는 접지면에서의 전단변위의 분포는 무한궤도 차량의 주행성능에 절대적인 영향을 미친다. 특히 해저 퇴적지반은 매우 연약하여, 지반의 전단저항력이 전단변위에 따라 민감하게 변하는 비선형 특성을 가지고 있기 때문에, 올바른 지반 추진력을 산정하기 위해서는 트랙의 접지면에서 발생하는 전단변위의 분포가 정확하게 계산되어야 한다. 연약지반에 대한 지반주행역학 모델은 Hong et al.(2002)에 의해 개발된 TRACSIM에 포함되어 있다.

무한궤도 차량에 대한 동특성 해석 프로그램인 상용소프트웨어(RecurDyn-LM)가 국내의 FunctionBay에서 개발되었다. 하지만 RecurDyn-LM에 포함되어 있는 지반주행역학 모델로는 비선형성이 강한 연약지반에 동특성 해석에는 어려움이 많다.

본 논문에서는 RecurDyn-LM에서 제공하는 사용자 제작 서브루틴을 이용하여, TRACSIM에서 사용되고 있는 연약지반에 대한 주행역학 모델을 추가하였으며, Hong et al.(2002)에 의해 개발된 강체 차량 모델인 TRACSIM과

RecurDyn-LM을 이용한 다물체 차량 해석 모델을 비교·검증하는 내용을 다루고 있다.

2. 해석기법 비교

2.1 강체 차량

강체 주행차량 해석프로그램인 TRACSIM은 1개의 강체를 이용하여 연약지반에 대한 동적거동이 가능한 프로그램이다. TRACSIM에서는 수치적분은 수치점 댐핑의 추가가 가능한 Newmark 적분기를 사용하였다. 강체의 밀면을 여러개의 메쉬로 나누어서 궤도링크를 움직임을 모사하였다. TRACSIM에서는 차량의 비선형 운동방정식을 차량고정 좌표계에 대하여 도출되어 있으며, 직교좌표계를 사용하고 있다. TRACSIM은 실시간 해석이 가능하며, 연약지반에 대해 직진 및 선회 성능 시뮬레이션이 가능하다.

2.2 다물체 차량

다물체 두행차량 해석프로그램은 RecurDyn-LM을 사용하였다. RecurDyn-LM은 국내에 있는 FunctionBay에서 개발한 프로그램으로 다양한 모델에 대한 동적 거동 해석이 가능한 프로그램이다. RecurDyn-LM에서는 Track G-alpha 적분기를 사용하고 있다. Track G-alpha는 Newmark 적분기를 변형한 것이다. RecurDyn-LM에는 사용자 정의 서브루틴을 제공하여 사용자가 만든 서브루틴을 RecurDyn-LM에 붙여서 실행할 수 있다. 일반적인 상용소프트웨어는 직교좌표계를 사용하여 운동방정식을 형성하는데 반하여, RecurDyn-LM은 상대좌표계를 사용한다.

3. 예제해석 비교

3.1 지반모델

강체 주행 차량과 다물체 주행 차량의 동적거동 해석을 하기위하여 연약 지반에 대한 지반 특성을 알아야 한다. 지반반력으로는 토양의 수직응력과 전단응력으로 나눌수 있다. 토양의 수직응력은 차량의 지면 압력으로 표시되고, 압력-침하간의 관계식에 의해 얻어진다. 이에 반해 전단변위에 의해 발생하는 토양의 전단응력은 전단력과 모멘트를 발생시킨다. 연약한 점착성 토양은 심한 비선형을 보여준다(예, Hong and Choi, 2001).

지면의 압력은 아래와 같이 정적침하의 함수로 나타낸다.

$$p = p^*(1 - K_1 \cdot i_s)(1 - e^{K_2 \cdot i_s}) \quad (1)$$

Fig. 1은 압력-침하 특성곡선을 보여준다.

Wong (1993)은 점착성 토양의 전단 응력을 다음의 함수로 제안하였다.

$$\tau = \frac{\tau_m}{E} \left[1 + \left(\frac{E}{1 - e^{-1}} - 1 \right) e^{\frac{1-s}{k_v}} \right] \left(1 - e^{-\frac{s}{k_v}} \right) \quad (2)$$

여기서, τ_m 은 최대 전단응력이고, E 는 잔류응력에 대한 최대 전단응력의 비이다. k_v 는 최대 전단응력이 발생하는 전단변위이고, s 는 전단변위이다. 함수특성 곡선은 Fig. 2와 같다.

점착성 토양의 최대 전단응력은 아래와 같이 표현된다 (Baladi and Rohani, 1978).

$$\tau_m = C + C_d(1 - e^{-\mu s}) + p \tan \phi \quad (3)$$

여기서, C 는 점착력(cohesion)이고, C_d 와 μ 는 물질상수이며, ϕ 는 내부 마찰각이고, s 는 전단속도이다. 본 논문에서 사용된 점착성 토양 모델의 상수는 Table 1에 나타내었다.

3.2 다물체 차량 모델링

Fig. 3은 RecurDyn-LM을 이용하여 모델링 한 다물체 주행 차량을 나타내고 있다. 다물체 차량 모델은 차체와 2개의 스프라켓, 2개의 로드휠, 20개의 아이들러로 구성되며, 24개의 회전 조인트를 가지고 있다. 주행차량을 구동시키기 위해서 2개의 드라이버를 스프라켓의 회전조인트에 장착하였다. 궤도링크는 총 96개이며, 인접한 궤도링크들은 부성으로 연결되어 있다. 다물체 주행차량은 604자유도를 가지고 있다. 각 강체 및 궤도링크의 물성치는 Table 2에 나타나 있다.

직진주행을 하기위해서 2개의 드라이버에 Fig. 4와 같은 불연속성 없는 스텝함수에 어떤 속도 (V^k)를 곱한 값을 입력으로 주었다. 이런 함수를 사용한 이유는 드라이버의 입력값의 불연속성을 없애기 위해서다.

3.3 강체 차량 모델링

Fig. 5은 강체 주행차량을 나타내고 있다. 강체 주행차량은 한 개의 강체로 구성되어 있다. 차량의 무게중심의 높이는 지면에서 1.5m지점에 위치하고 있다. 차량의 총 길이는 3m이다. 각 차량의 물성치는 Table 3에 나타나 있다.

다물체 주행차량에서는 차량의 구동속도에 의해 궤도링크가 움직이면서 접지면에서 전단변위 분포를 형성한다. 그러나 강체 주행차량은 한 개의 강체로 구성되어 있기 때문에, 전단변위 분포곡선을 형성하지 못한다. 트랙 접지면에서의 전단변위 분포 및 그에 따른 지반의 전단저항 반력 및 모멘트를 산출하기 위하여 각 트랙의 초기 접지면을 Fig. 6과 같이 길이방향 (n), 폭방향(m)으로 등분하였다. 이러한 메쉬를 트랙의 구동속도에 대한 전단변위 분포곡선을 형성하였다. 그리고 각 요소의 중심점에서의 전단변위를 해당요소의 전면적에 적용하였다. 본 논문에서는 n 을 96으로, m 을 1로 주었다.

3.4 수치해석

다물체 주행차량과 강체 주행차량에 대해 각각 수치해석을 행하였다. 다물체 주행차량의 적분기는 RecurDyn-LM에 있는 Track G-alpha를 사용하였다. Track G-alpha는 Newmark 적분기를 변형한 것이다. 강체 주행차량의 적분기는 Newmark 적분기를 사용하였다.

다물체 주행차량과 강체 주행차량의 동특성을 비교하기 위하여 같은 조건에서 비교하여야 한다. 그러나 두 모델은 아래와 같이 다른 조건을 가지고 있다.

첫째, 지면에 접촉하는 부분이 강체 차량은 항상 직선을 이루고 있으나, 다물체 차량은 궤도링크가 부성으로 연결되었기

때문에 각각의 케도링크가 6자유도 운동을 하여 지면에 접촉하는 케도링크들이 직선을 유지하지 못한다. 이 문제를 해결하기 위해서 다물체 주행차량의 케도링크에 보다 많은 아이들러를 장착하고, 케도링크에 작용하는 인장력을 보다 크게 주어써 케도링크의 직선을 유지시켰다.

둘째, 강제차량에는 케도링크가 없기 때문에 질량과 관성모멘트가 차체에만 집중되어 있지만, 다물체 차량에서는 차체, 스프라켓, 로드휠, 아이들러, 케도링크에 질량과 관성모멘트가 분포되어 있다. 케도링크와 똑같은 조건의 모델이 되기 위해서는 차체를 제외한 모든 요소의 질량을 0에 가깝게 주어야 한다. 그러나 케도링크의 질량은 수치적분 시간간격에 직접적인 영향을 미치므로 케도링크의 무한히 작게만 줄 수는 없다. 본 논문에서는 케도링크 전체의 질량을 총 질량의 20%로 하였다. 그리고 스프라켓, 아이들러, 로드휠의 질량은 1로 주었다.

3.5 결과비교

케도링크의 속도가 0.5m/s와 1.0m/s 인 두 가지의 경우에 대해서 해석을 행하였다. 강제 차량의 경우에는 적분시간간격을 $h=0.01$ 초로 고정하였으며, 다물체 차량은 다중 적분시간간격을 사용하고 있다. 2가지 조건에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 7 - 13에 나타나 있다.

Fig. 7과 8은 속도에 대한 주행차량의 직진운동을 나타낸다. 그림에서 보논봐와 같이 강제 차량과 다물체 차량의 결과가 일치함을 알 수 있다.

Fig. 9는 속도에 대한 주행차량의 수직운동을 나타낸다. 다물체의 경우에 수직방향의 침하가 조금 더 발생하고 있다. 다물체 차량에는 지면에 접촉하는 케도링크위에는 7개의 아이들러가 있다. 아이들러부분에서 더 많은 수직압력이 발생하여 수직침하가 강제 차량보다 더 발생한다.

Fig. 10과 11은 차량의 직진방향에 대한 속도를 나타낸다. 그림에서 보논봐와 같이 두 모델의 속도가 유사한 것을 알 수 있다. 다물체 차량이 경우 속도가 진동을 하고 있는데, 그 이유는 RecurDyn-LM에서 지면에 대한 전단변위분포를 제대로 계산하지 못해서 발생하는 것 같다.

Fig. 12와 Fig. 13은 트랙의 슬립(slip)을 보여준다. 슬립의 정의는 다음과 같다.

$$\lambda^{(j)} = 1 - V_{C_i} / V_K^{(j)} \quad (4)$$

그림에서 보논봐와 같이 두 모델의 슬립이 유사한 것을 알 수 있다. 다물체 차량의 경우에 슬립이 진동하고 있는데, 이것은 지면에 대한 전단변위 분포가 제대로 계산되지 않은 것 같다. 현재 RecurDyn-LM은 군수용차량 해석프로그램인 RecurDyn-HM을 바탕으로 개발되었다. 일반적으로 군수용차량의 지면은 아주 딱딱한 지면을 사용하고 있다. 이런 이유로 RecurDyn-LM에서 연약지반에 대한 전단변위 분포에 대한 계산이 미흡한 것 같다.

4. 결론

RecurDyn-LM에서 제공하는 유저 서브루틴을 이용하여 연약 지반 주행역학모델이 추가되었으며, 연약지반에 대한 주행

차량의 동적거동 해석이 가능하게 되었다. 강제 차량모델과 다물체 차량모델의 동적거동해석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

다물체 차량에 연약지반 직진주행모델을 첨가하였다.

연약지반에 대한 다물체 차량의 동적거동 해석이 가능하게 되었다.

강제차량과 다물체 차량의 동적거동이 유사 동일한 결과를 보였다.

향후, 다물체 주행 차량에 연약지반 선회주행모델이 첨가되어야 하며, 케도링크의 그라우저 효과에 관한 실험적 연구가 보완되어야 하며, 차량의 실제 실험을 통하여 두 모델을 비교하여야 한다.

후기

본 논문은 해양수산특정 연구과제인 "심해저 집광시스템 및 채광운용기술 개발" 과제의 일부분으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Baladi, GY and Rohani, B (1978): A mathematical model of terrain vehicle interaction for predicting the steering performance of track-laying vehicles, presented at the 6th ISTVS-conference, pp. 285-332.
- I. Hayasi (1975): Practical Analysis of Tracked Vehicle Steering Depending on Longitudinal Track Slippage, Proc. ISTVS Conf., Vol. 2
- M. Kitano and H. Tyorzaki (1976): A Theoretical Analysis of Steerability of Tracked Vehicle, Journal of Terramechanics, Vol. 13, No. 4, pp. 241-258
- Kitano, M and Kuma, M (1977): An analysis of horizontal plane motion of tracked vehicles, Journal of Terramechanics, Vol. 14, pp. 211-225.
- O. Bode (1991): Simulation der Fahrt von Raupenfahrwerken auf Tiefseeböden, doctoral dissertation (in German), Univ. of Hanover
- Murakami, H, Watanabe, K and Kitano, M (1992): A mathematical model for spatial motion of tracked vehicles on soft ground, Journal of Terramechanics, Vol. 29, pp. 71-81.
- Yilin Zhang (1995): Prüfstands und Rechnersimulation der Kurvenfahrt von Raupenfahrwerken auf extrem weichen Böden, doctoral dissertation (in German), Univ. of Hanover
- D. T. Tran, J. O'Brien and T. Muro (2002): An Optimal method for the design of a robotic tracked vehicle to operate over fresh concrete under steering motion, Journal of Terramechanics, Vol. 39, No. 1, pp.1-22

Sup Hong, Hyung-woo Kim, and Jong-su Choi (2002) : A Method for 3-D Dynamic Analysis of Tracked Vehicles on Soft Terrain of Seafloor, Fall KCORE Conference, pp. 149-154

Wong, JY (1993): Theory of Ground Vehicles, John Wiley & Sons, New York.

Hong, S and Choi, JS (2001): Experimental Study on Grouser Shape Effects on Trafficability of Extremely Soft Seabed, Proceedings of the 4th Ocean Mining Symposium, Szczecin, Poland, pp. 115-121.

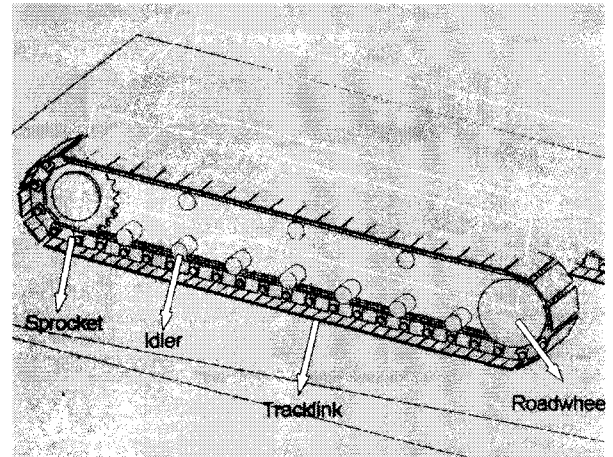


Fig. 3 Multi-body vehicle model by using RecurDyn-LM

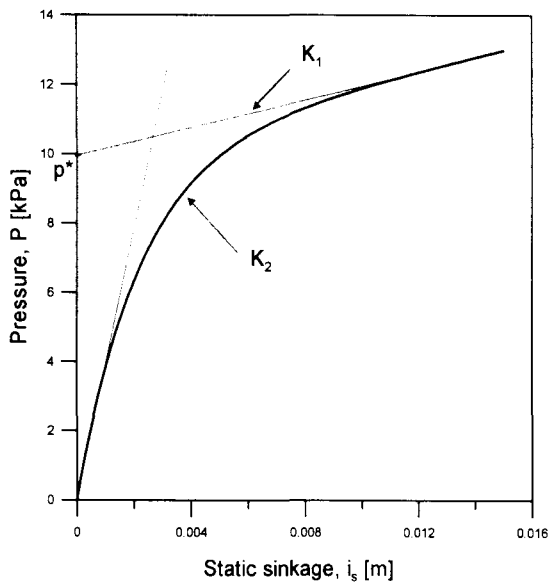


Fig. 1 Pressure-sinkage model

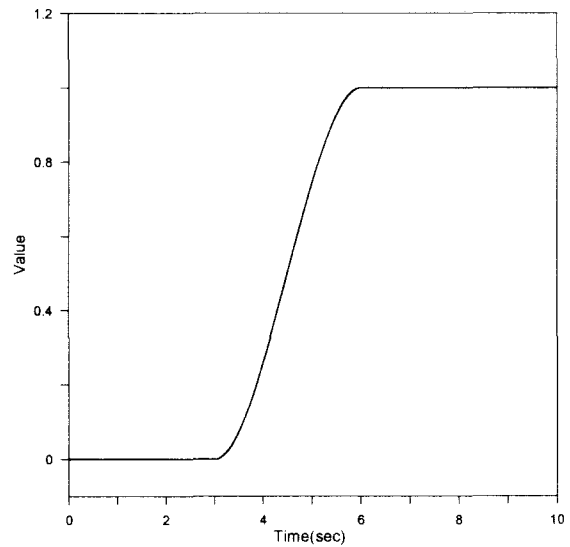


Fig. 4 Step input function

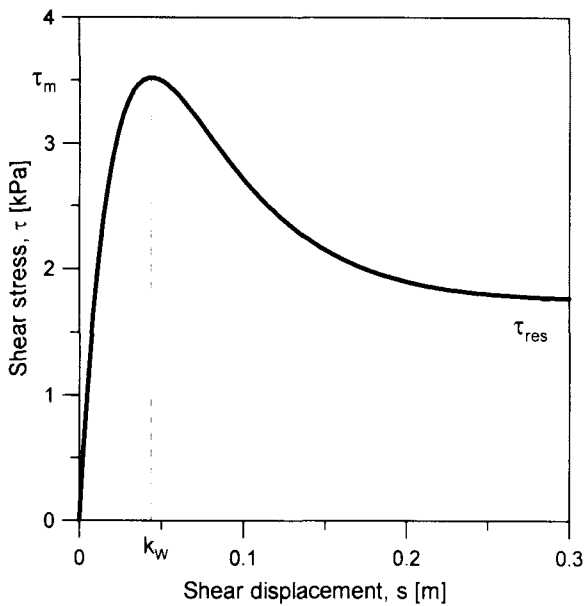


Fig. 2 Shear stress vs. displacement

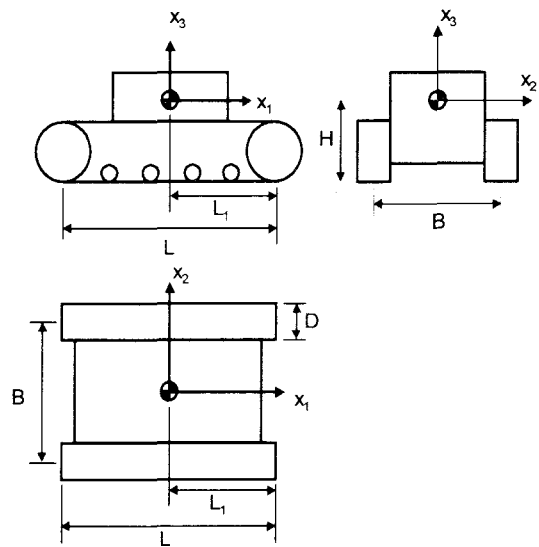


Fig. 5 Vehicle model and body-fixed coordinates

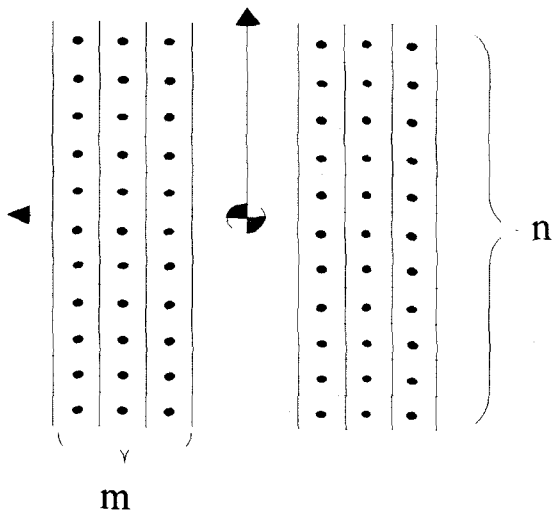


Fig. 6 Track mesh for estimation of shear displacements and soil reactions

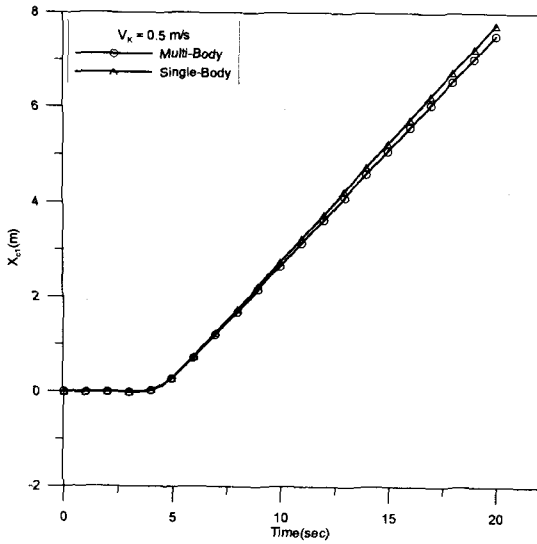


Fig. 7 Surge responses of vehicles at $V_k = 1.0$ m/s

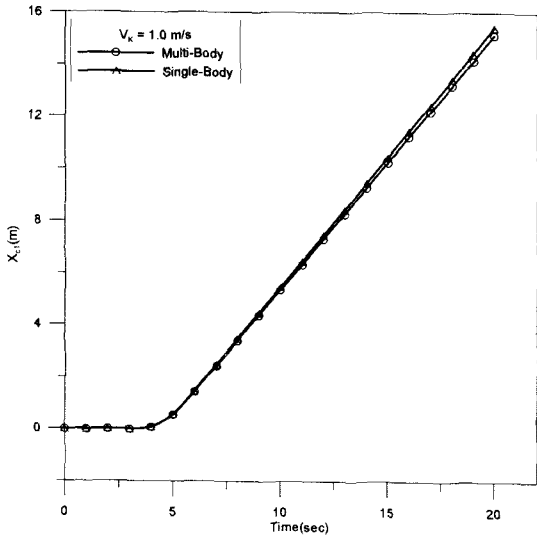


Fig. 8 Surge responses of vehicles at $V_k = 1.0$ m/s

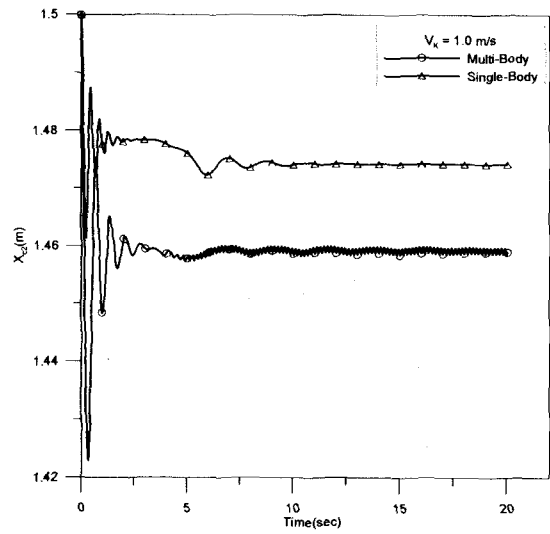


Fig. 9 Heave responses of vehicles at $V_k = 1.0$ m/s

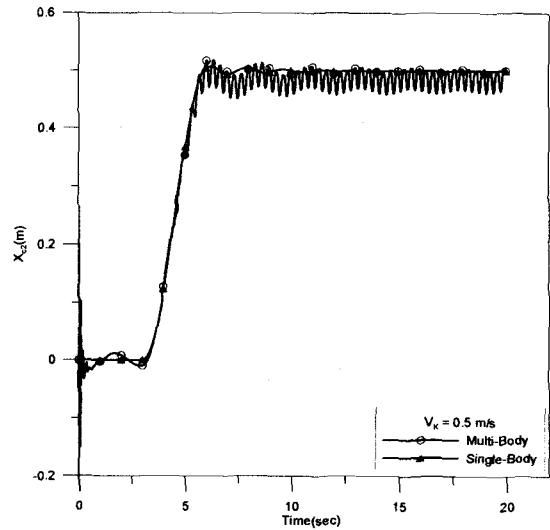


Fig. 10 Longitudinal velocities of vehicles at $V_k = 0.5$ m/s

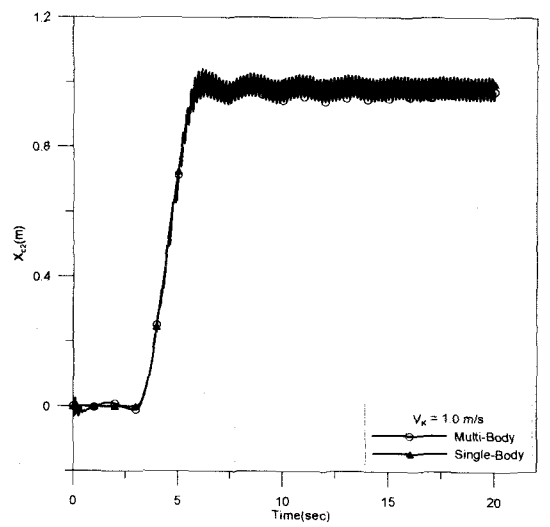


Fig. 11 Longitudinal velocities of vehicles at $V_k = 1.0$ m/s

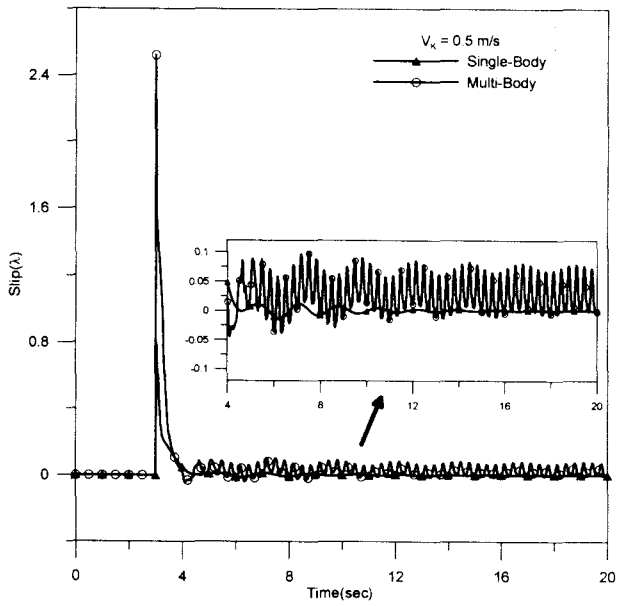


Fig. 12 Slips of track for $V_k = 0.5\text{m/s}$

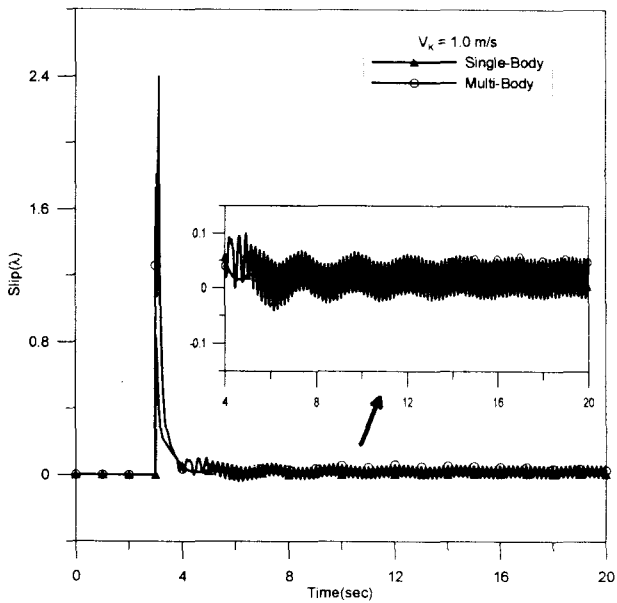


Fig. 13 Slips of track for $V_k = 1.0\text{m/s}$

Table 2. Material properties

Body	Mass	Moment of inertia
Chassis	3044.87	2.0e10 , 4.5e10 , 4.5e10
Sprocket	1	1.0e6 , 1.0e6 , 1.0e6
Roadwheel	1	1.0e6 , 1.0e6 , 1.0e6
Idler	1	1.0e6 , 1.0e6 , 1.0e6
Tracklink	20.11	1.7e5 , 2.3e5 , 9.2e4

Table 3. Data of tracked vehicle model

Weight	W	40 kN
Mass	m	5 Ton
Mass center	L_1	1.5 m(mid-point)
Width of track belt	D	1 m
Contact length of track belt	L	3 m
Centerline distance of tracks	B	2 m
Height of mass center	H	1.5 m

Table 1. Data of soil model

Pressure-sinkage model	K_1, K_2	2.0 [m^{-1}] , 47.0 [m^{-1}]
	p^*	10 kPa
	C	4 kPa
Shear stress model	E	2.7
	k_w	0.04 m
	θ	0 deg
	C_d	0.0
Dynamic sinkage model	p_{cnt}	6.5 kPa
	C_0, C_1, C_2	0.11, 1.0, 1.0